

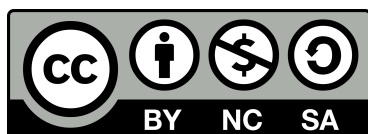
Finance responsable et Web3

De la déclaration d'impact
à sa preuve cryptographique

CAHIER N°2 | 2026



TheBlockchainforGood.org



Les contenus de ce rapport sont mis à disposition selon les termes de la **Licence Creative Commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International**.

Vous êtes autorisés à : Partager – copier, distribuer et communiquer le rapport par tous moyens et sous tous formats. Adapter – remixer, transformer et créer à partir du rapport selon les conditions suivantes : Attribution – Vous devez créditer le rapport, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications au rapport ont été effectuées. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que l'Offrant vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son rapport. Pas d'Utilisation Commerciale – Vous n'êtes pas autorisés à faire un usage commercial de ce rapport, tout ou partie du matériel le composant. Partage dans les Mêmes Conditions – Dans le cas où vous effectuez un remix, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant le rapport original, vous devez diffuser le rapport modifié dans les mêmes conditions, c'est à dire avec la même licence avec laquelle le rapport original a été diffusé. V.2 Images libres de droit. Page 17, <https://www.pexels.com/fr-fr/@zelch/> et page 83, <https://www.pexels.com/fr-fr/@pok-rie-33563/>.

Pour citer ce rapport : « Alexandre, H., Bertucci, L., Blanchard, O., Borreani, L., Boudi, Z., Champsavoir, P., Dubreil, S., Dumeaux, L., El Hadj, S., Fines Schlumberger, J.A., Jeanneaux, C., Jouglen, L., Martin, F., Mayouf, K., Musseau-Milesi, P., Noro, P., Sanchez Pacheco, I., Stephan, M., **Finance responsable et Web 3. De la déclaration d'impact à sa preuve cryptographique**. Association The Blockchain for Good - France, juin 2026 ».

À propos



THE BLOCKCHAIN FOR GOOD est une association de loi 1901 à but non lucratif dont l'objet est de créer des ponts entre l'écosystème des blockchains et des crypto-actifs avec les acteurs d'un développement respectueux des générations futures. Depuis 2018, elle réunit chercheurs et société civile dans une démarche de science ouverte et participative à travers trois moyens d'action. (1) Collecter des données à propos de projets à impact construits sur des blockchains à travers un annuaire mondial, (2) Analyser ces projets par domaine d'activité à travers des rapports de vulgarisation, (3) partager, échanger et débattre à travers des événements originaux.

(1) Annuaire

 A screenshot of a Google Sheets spreadsheet titled "[WORK_DBFG] Impact Blockchain Projects Open Directory". The spreadsheet is a large table with many columns and rows, displaying a comprehensive list of blockchain projects. The columns include project names, descriptions, and various data points. The interface shows standard Google Sheets navigation and editing tools at the top.

(2) Rapports



(3) Événements



Nos Partenaires



Institut
Louis
Bachelier

L'Institut Louis Bachelier (ILB) est une association de loi 1901, créée en 2008, sous l'impulsion de la Direction Générale du Trésor et de la Caisse des Dépôts et Consignations. L'ADN du Groupe Louis Bachelier (ILB, FdR, IEF) est la recherche scientifique, qui favorise le développement durable en économie et finance. Actuellement plus de 60 programmes sont hébergés à l'ILB, avec un focus sur quatre transitions sociétales : environnementale, digitale, démographique et financière. Les activités visent à engager des académiques, des entreprises et des pouvoirs publics dans des programmes de recherche ainsi que dans les manifestations scientifiques et autres forums d'échange.



Bpifrance, la Banque publique d'investissement, est le partenaire de référence des entrepreneurs français. De la création à la cotation en bourse, elle accompagne les entreprises à chaque étape de leur développement grâce à des solutions de financement, de garantie et d'investissement.

Acteur clé de l'innovation, elle soutient également les projets à fort impact technologique et sociétal, notamment dans des domaines émergents comme la blockchain et la transition écologique. À travers ses programmes et partenariats, Bpifrance favorise la croissance durable des entreprises et renforce la compétitivité de l'économie française.



La chaire Fintech de l'Université Paris Dauphine - PSL, et de ses Partenaires Fondateurs FORVIS MAZARS, et Crédit Agricole CIB, soutient la recherche et se focalise sur deux axes prioritaires, la blockchain et la place de l'Intelligence Artificielle dans la finance.

Un vivier de spécialistes de haut niveau (chercheurs, conseillers scientifiques, doctorants, acteurs de l'environnement Tech, ...) sont mis à contribution pour développer ces axes via trois types d'actions : la recherche, l'enseignement et la valorisation.



Ethereum France est une association loi 1901 fondée en 2016, dont l'objet est de promouvoir et développer l'usage de la blockchain Ethereum auprès du grand public francophone.

L'Association Blockchain for Good publie des analyses indépendantes et les opinions exprimées dans ce rapport n'engagent que leurs auteurs et ni les individus ou les organisations consultées, ni nos partenaires.

FINANCE RESPONSABLE & WEB3

DE LA DÉCLARATION D'IMPACT À SA PREUVE CRYPTOGRAPHIQUE

Selon le programme pour l'environnement des Nations Unies, « 7 300 milliards de dollars ont été investis dans des activités nuisibles à la nature, contre seulement 200 milliards pour des solutions basées sur la nature. Le secteur privé est responsable de la majorité des flux financiers négatifs pour la nature, 4 900 milliards de dollars, mais ne contribue qu'à hauteur de 23 milliards aux solutions basées sur la nature »¹. Ce déséquilibre, pourtant, n'est pas nouveau. Pourquoi la finance responsable, après un demi-siècle de réformes, peine-t-elle toujours à s'imposer ?

Au-delà des tendances conjoncturelles et du climat de défiance actuel, s'agit-il d'un problème de risque, que l'on gère par de meilleurs modèles, ou d'un problème de confiance, que l'on restaure par des preuves ? Qu'est-ce qui distingue fondamentalement une *déclaration* d'impact d'une *preuve* d'impact, enregistrée sur une blockchain publique et vérifiable par tout un chacun ? Serait-il possible de substituer à l'audit annuel d'un tiers accrédité, une vérification en temps réel, fondée sur des flux de données hétérogènes, sans que les biais antérieurs ne se reconstituent sous une forme nouvelle ? Ces questions en appellent d'autres, plus politiques. Décentraliser la finance suffit-il à la démocratiser, ou reproduit-on, sous une forme nouvelle, les mêmes asymétries de pouvoir que dans le système traditionnel ? La tokenisation d'un écosystème naturel en fait-elle un bien commun mieux protégé, ou un actif spéculatif d'autant plus exposé ? Et comment un système conçu pour émanciper les populations non bancarisées peut-il, mal architecturé, renforcer leur dépendance plutôt que la réduire ?

La transition vers un modèle financier orienté vers le vivant pourrait, selon certaines estimations², générer jusqu'à 10,1 billions (10 100 milliards) de dollars de valeur commerciale annuelle d'ici 2030. Ce chiffre dit moins ce que le Web3 peut accomplir qu'il ne mesure l'ampleur de ce qui reste à arbitrer, entre la promesse et la preuve, entre l'innovation et l'inclusion, entre la décentralisation et la régulation. Voilà quelques-unes des questions que ce rapport s'attache à poser, et, dans la mesure du possible, à documenter.

¹ König-Sykorova, M., Olsen, N., Grimm, M., Bertello, H., et al. (2026). *State of Finance for Nature 2026 : Nature in the Red – Powering the Trillion Dollar Nature Transition Economy*. United Nations Environment Programme (UNEP). <https://wedocs.unep.org/items/a4a8edaa-3896-4811-b527-1583dfce7201>

² World Economic Forum. (2026). *50 investible opportunities for a new nature economy* [Insight report]. <https://www.weforum.org/publications/50-investible-opportunities-for-a-new-nature-economy-insight-report/>

Auteurs, contributeurs et relecteurs

Dr. Hervé **Alexandre**, Directeur de la Chaire Fintech, Université Paris Dauphine PSL.

[R – P1, 1, 2]

Dr. Louis **Bertucci**, Président, Blockchain for Good. Chercheur à l'Institut Louis Bachelier.

[R – P1, P2, C]

Olivia **Blanchard**, Présidente des Acteurs de la Finance Responsable. Co-fondatrice de la *Climate House*. [R – I, P1, 1]

Louise **Borreani**, Co-director, Ecofrontiers, Autrice de *The Green Crypto Handbook*.

[C – P2, 1, 2, 3]

Zakaryae **Boudi** Co-founder & CEO, Tokenfrastructure GroupFeverTokens, Chair of the Tokenized Economies Institute. [R – P1, 1, 2]

Pierre **Champsavoir**, Head of Strategy & Impacts, Happy Smala. [R – I]

Sarah **Dubreil**, Stratégie & modèles d'affaires pour l'adaptation & régénération Co-autrice de *The Regenerative Shift* avec HEC Paris. [R – P1, 1, 2]

Dr. Louis **Dumeaux**, Docteur en sciences de gestion, Chercheur associé à la Chaire comptabilité écologique. [R – P1, 1, 2]

Sirine **El Hadj**, Doctorante en *business computing* à l'Institut Supérieur de Gestion de Tunis, Tunisie. [R – P1, 1, 2, 3 ; P2, 1, 3]

Dr. Jacques-André **Fines Schlumberger**, Chercheur indépendant et enseignant. Responsable des opérations, Blockchain for Good. [A]

Dr. Christine **Jeanneaux**, *Digital Assets & Blockchain Research*. [C – P1, 1, 2 ; P2, 2]

Luca **Jouglen**, Chargé de mission, Blockchain for Good. [C]

Frédéric **Martin**, CEO, myDid, Cybersecurity expert. [R – P2, 3]

Kheir **Mayouf**, Entrepreneur et indépendant, KMG Conseil & Expertise. [R – P1, 1]

Pierre **Musseau-Milesi**, Doctorant CIFRE en Science Politique à Metapolis, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne/CESSP. [R – P1, 1]

Pierre **Noro**, Advisor, SciencesPo PSIA Tech & Global Affairs Innovation Hub. [R – I, P1, 1]

Ilse **Sanchez Pacheco**, Innovation Ecosystem Manager, Groupe Caisse des Dépôts. [R – P1, 1, 2; P2, 2]

Mario **Stephan**, Directeur de la Philanthropie, Center for Civilians in Conflict (CIVIC). [R – P1, P2, 3]

Légende : A, C ou R pour Auteur, Contributeur et Relecteur suivi de Statut / Partie / Chapitre.

Ex. : [R P1, 2] se lit Relecteur, partie 1, chapitre 2. I et C pour Introduction et Conclusion.

TABLE DES MATIÈRES

Auteurs, contributeurs et relecteurs.....	7
Synthèse en une page.....	12
Introduction.....	14
PARTIE 1. LES LIMITES DE LA FINANCE ESG À L'AUNE D'UNE NOUVELLE	
INFRASTRUCTURE TECHNOLOGIQUE.....	17
1.1 La genèse d'une économie au service du vivant.....	17
1.1.1 Quelle finance au service de qui et de quoi ?.....	18
1.1.1.1 Le continuum du devoir fiduciaire à la régénération du vivant.....	19
1.1.1.2 Le parallèle avec la Finance décentralisée (DeFi) : un continuum biaisé.....	23
1.1.2 L'économie régénérative, un paradigme préexistant au Web3.....	25
1.1.2.1 Du « ne pas nuire » à la triple profitabilité.....	26
1.1.2.2 Les nouvelles grammaires de la valeur écologique.....	28
1.1.3 L'écueil du système centralisé.....	31
1.1.3.1 Auto déclaration et asymétrie d'information.....	31
1.1.3.2 Le greenwashing systémique, crise de confiance et marché de dupes.....	33
1.2 Les nouvelles infrastructures financières du Web3.....	37
1.2.1 L'émergence de la ReFi* au sein de la Finance Décentralisée.....	37
1.2.1.1 Un registre public de confiance.....	38
1.2.1.2 De la Finance décentralisée (DeFi) spéculative à celle régénérative.....	41
1.2.2 La tokenisation des actifs réels (RWA*) et du capital naturel.....	44
1.2.2.1 La tokenisation : fractionnement, liquidité et interopérabilité.....	45
1.2.2.2 Les crédits carbone et la biodiversité on-chain.....	49
1.2.3 L'émergence d'une Micro-finance Décentralisée (Micro-DeFi).....	52
1.2.3.1 La microfinance traditionnelle à l'aune de la désintermédiation.....	53
1.2.3.2 Liquidité mondiale, gestion du risque et historique on-chain.....	57
1.3 La réinvention de la gouvernance et de l'allocation des biens communs.....	60
1.3.1 Les Organisations Autonomes Décentralisées (DAOs*) à impact.....	60
1.3.1.1 Le transfert du pouvoir par les smart contracts*.....	61
1.3.1.2 Autonomiser le terrain : des exemples de DAO*.....	66
1.3.2 L'allocation démocratique.....	69
1.3.2.1 Le financement quadratique* (Quadratic Funding).....	70
1.3.2.2 Les défis du modèle : intégrité et vulnérabilité.....	72
1.3.3 La coordination locale et l'inclusion communautaire.....	75
1.3.3.1 Les monnaies d'inclusion locale (CIC).....	75
1.3.3.2 Les réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePINs).....	79

PARTIE 2. DE LA DÉCLARATION D'IMPACT À SA PREUVE CRYPTOGRAPHIQUE.....	84
2.1 Automatisation, vérification et instruments conditionnels.....	85
2.1.1 Le dMRV : digital Measurement, Reporting and Verification.....	85
2.1.1.1 L'automatisation du suivi écologique.....	85
2.1.1.2 Fiabilité et inaltérabilité des rapports.....	88
2.1.2 Le pont vers le monde physique : Oracle, IoT, IA et humains.....	92
2.1.2.1 Le rôle critique des Oracles et de l'Internet des Objets (IoT).....	93
2.1.2.2 L'Intelligence Artificielle au service de la certification.....	97
2.1.3 Les nouveaux instruments de preuve.....	102
2.1.3.1 Les Impact Tokens* : la tokenisation du résultat.....	102
2.1.3.2 Le financement programmable et rétrospectif (ex-post).....	108
2.2 Les écueils et risques systémiques de la Finance Régénérative du Web3.....	112
2.2.1 La dépendance aux oracles et les distorsions de la mesure tokenisée.....	112
2.2.1.1 La vulnérabilité des Oracles.....	112
2.2.1.2 Le piège de la donnée et la Loi de Goodhart.....	113
2.2.2 L'hyper-financiarisation de la nature.....	115
2.2.2.1 La transformation du vivant en actif spéculatif.....	115
2.2.2.2 Les limites de la quantification écologique.....	117
2.2.3 Les asymétries de pouvoir.....	119
2.2.3.1 L'illusion d'une véritable décentralisation.....	119
2.2.3.2 Le risque de crypto-colonialisme et de green grabbing.....	121
2.3 Les conditions d'un passage à l'échelle : financement, identité et régulation.....	122
2.3.1 Le défi économique : surmonter le trilemme du financement et l'adoption.....	123
2.3.1.1 Surmonter le trilemme du financement par la « preuve économique ».....	123
2.3.1.2 Vers des investissements écosystémiques et des financements mixtes..	125
2.3.2 L'infrastructure de l'identité numérique.....	128
2.3.2.1 Les Identifiants Décentralisés (DID) et le financement à impact.....	129
2.3.2.2 Le défi de la standardisation et de l'interopérabilité mondiale.....	130
2.3.3 L'hybridation et la double contrainte réglementaire.....	132
2.3.3.1 De la CSRD aux normes régénératives (AFNOR, TNFD).....	134
2.3.3.2 La nécessaire convergence de la TradFi et de DeFi.....	135
Conclusion.....	138
IAGraphie.....	140
Bibliographie.....	141

TABLE DES IMAGES [I] ET DES ENCADRÉS [E]

[I] La pièce montée des Objectifs de développement durable.....	16
[I] Le continuum entre les Finances extractives et régénératives.....	18
[E] De la théorie des parties prenantes à la matrice des 3P.....	20
[I] Le continuum entre Finances extractives, régénératives, traditionnelle et décentralisée..	22
[E] Les quatre paradigmes de Carol Sanford et la perspective « Outside-in ».....	27
[E] De la donnée ESG à la donnée d'impact, un saut de complexité.....	33
[E] La dérive des intentions et le défi de l'immunité systémique.....	36
[E] Le paradoxe du concept trustless, la confiance sans intermédiaire.....	40
[I] Une courte histoire de la Finance décentralisée (DeFi).....	41
[E] Le clivage de la ReFi* – Carbon DeFi* contre Bioregional ReFi*.....	44
[E] La tokenisation dans la finance institutionnelle – de l'expérimentation à l'intégration.....	48
[E] Carbone et biodiversité – deux logiques de marché.....	51
[E] La concurrence entre institutions de microfinance sans baisse des taux d'intérêt.....	56
[E] La question du passage à l'échelle – pourquoi les cas d'usage restent locaux.....	59
[E] MakerDAO / Sky - dix ans de gouvernance décentralisée.....	63
[E] La DAO* comme héritière du débat sur la gouvernance des communs.....	65
[E] Gouvernance de terrain ou gouvernance crypto-native ?.....	69
[E] Financement quadratique et théorie des biens publics.....	72
[E] Monnaies d'inclusion communautaire et monnaies complémentaires.....	79
[E] Les réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*).....	82
[E] Quelles données en entrée ? La limite fondamentale du dMRV.....	88
[E] Ce que les blockchains publiques apportent réellement à l'audit environnemental.....	92
[E] L'éco-acoustique – une frontière émergente de la certification de la biodiversité.....	100
[E] La cuisson propre et preuve cryptographique d'impact.....	103
[E] Le grand transfert de patrimoine : une recomposition structurelle de la demande.....	125
[I] L'identité décentralisée et les attestations vérifiables.....	128
[E] Quelle responsabilité civile en termes d'engagements extra-financiers ?.....	133

LISTE DES 73 PROJETS WEB3 CITÉS

AAVE, AGUA, AgriDex, Algorand, Alpha Bonds, Amply, Anzi Finance, Arbol, AthenaDAO, Big Green DAO, Blink, Carbons, Centrifuge, Chainlink, Change Code, CirclesUBI, Clixpesa, Compound, CryoDAO, dClimate, Dowgo, EcoBridge, Ejara, Empowa, EthicHub, Etherisc, GainForest, Gitcoin, Giveth, Glo Dollar, GoodDollar, Grassroots Economics, Haraka, Helium, HesabPay, HiveOnline, Hypercerts, ImpactMarket, Initiativ/InEx, Inuk, IXO Protocol, Jia, JusToken, KlimaDAO, Kolektivo, M3tering Protocol, MakerDAO / Sky, Celo, Mento Labs, MiniPay, Molecule, Morpho, MultiKnip, Octant, Optimism Collective, PACT Protocol, Penomo, Pleno, PsyDAO, Quipu, Rahat, Regen Network, Shamba Network, Solana, Tadamon, terra0, Toucan Protocol, Untangled Finance, Uniswap, ValleyDAO, Worldcoin.

Synthèse en une page

La finance a toujours été une question politique autant que technique. Qui décide de quoi financer, selon quels critères, au profit de qui : ces choix ont façonné les trajectoires des économies, des sociétés et des territoires bien au-delà de ce que les taux de rendement peuvent mesurer.

Ce rapport part d'un constat simple. Les instruments que nos sociétés ont construits pour orienter le capital vers le bien commun, de l'exclusion éthique des portefeuilles quakers au crédit carbone du protocole de Kyoto, du microcrédit à l'investissement d'impact labellisé, ne parviennent pas à tenir leur promesse.

Les raisons en sont multiples, notamment le sous-financement chronique, les horizons de court terme, ou encore les conflits d'intérêts institutionnels, et ce rapport ne prétend pas toutes les traiter. Il s'intéresse à l'une d'entre elles en particulier, peut-être la moins visible parce que la plus structurelle : l'architecture de vérification sur laquelle reposent ces instruments. Tant que la preuve de l'impact dépend de l'auto-déclaration ou d'intermédiaires dont la probité ne peut être vérifiée qu'en leur faisant confiance, même les dispositifs les mieux intentionnés restent exposés à des dérives, largement documentées. C'est dans cet espace, celui de la vérification, de la traçabilité et de la transparence, que s'inscrivent les nouvelles architectures numériques construites sur les Technologies de registre distribué (DLTs*).

Ce rapport n'est pas un plaidoyer pour le Web3 ni un réquisitoire contre lui. Il ne cherche pas à opposer un système financier traditionnel défaillant à une solution technologique salvatrice. Il examine, avec la rigueur que requiert un sujet aussi investi d'enjeux politiques et commerciaux, ce que ces outils permettent réellement, ce qu'ils ne peuvent pas faire, et à quelles conditions leur déploiement peut servir une transition vers

une économie dite régénérative, c'est-à-dire une économie qui ne se contente plus de limiter ses dommages, mais qui renforce activement la capacité des systèmes vivants à se reproduire.

Ce rapport s'adresse à trois communautés que tout semble séparer, mais que la question de la vérification de l'impact finit par rassembler.

Aux professionnels de la Finance traditionnelle (TradFi*), il propose une généalogie des concepts et une cartographie des outils du Web3 à impact, sans supposer de familiarité préalable avec la cryptographie ou les protocoles décentralisés. Aux acteurs de la Finance décentralisée (DeFi*), il offre un ancrage dans la longue histoire de la finance responsable et une évaluation critique des promesses de leur propre écosystème, sans ménagement pour les angles morts ni pour les rhétoriques promotionnelles. Aux acteurs de la Finance centralisée (CeFi*), qui maîtrisent les codes de la TradFi* tout en ayant d'ores et déjà largement investi la DeFi*, il propose un cadre d'analyse de leur position singulière, à l'interface d'une convergence dont ce rapport documente les conditions et les risques.

Ces trois lectures sont indissociables et les enjeux qu'elles partagent ne peuvent être ni compris ni résolus dans les silos de chacune de ces communautés. La première partie examine les limites de la finance durable conventionnelle et les nouvelles infrastructures que le Web3 propose pour les surmonter. La seconde s'interroge sur la possibilité de substituer progressivement la preuve cryptographique à la simple déclaration d'impact, à quel prix, sous quelles conditions, avec quels risques systémiques.

C'est à ces questions, et non à ses seuls aspects promotionnels, que les développements qui suivent s'attachent à répondre.

Structure du rapport

Afin de rendre accessible un sujet à la fois technique et institutionnel, ce rapport adopte un plan en deux parties articulées autour d'une question centrale : à quelles conditions les nouvelles infrastructures numériques permettent-elles de passer de la déclaration d'impact à sa preuve cryptographique ?

La première partie établit le diagnostic structurel et cartographie les réponses architecturales du Web3. La deuxième partie soumet ces réponses à un examen rigoureux en adoptant une posture de neutralité analytique.

Le rapport s'adresse à deux publics. Les professionnels de la finance traditionnelle (TradFi) y trouveront les fondements conceptuels de l'économie régénérative et les instruments techniques qui en permettent la mise en œuvre décentralisée. Les praticiens de la Finance décentralisée (DeFi*) et du Web3 y trouveront une mise en perspective institutionnelle et réglementaire qui conditionne l'adoption de leurs architectures par les marchés de capitaux établis.

Nous privilégions une explication par les cas d'usage, indiqués en encadré gris et par ce pictogramme :  et pouvons également compter sur l'annuaire des projets à impact construits sur des blockchains publiques sur lequel travaille l'association Blockchain for Good depuis 2018.

Ce rapport documente ainsi 73 projets opérationnels, répartis sur l'ensemble des sections selon la thématique qu'ils illustrent.

Si vous n'êtes pas familier avec les Technologies de registre distribué (DLT) vous trouverez sur la version numérique un glossaire couvrant l'ensemble de leur terminologie. Sur une version imprimée, vous pouvez y accéder en scannant le QR Code figurant en annexe.



Ce rapport fait l'objet d'une publication en ligne. Si vous souhaitez échanger, annoter ou corriger certaines informations dans le corps du texte, rendez-vous sur la version collaborative. Sélectionnez le mot, la phrase ou le paragraphe à partir duquel vous souhaitez initier une discussion et rédigez votre commentaire.

Comme indiqué en fin d'ouvrage, nous avons recouru à des outils d'intelligence artificielle pour faciliter certaines tâches propres à la rédaction. Un [agent conversationnel dédié, dont les réponses sont fondées sur le présent rapport et sa bibliographie est accessible en version numérique.](#)

Introduction

L'idée que l'investissement peut et doit être responsable n'est pas une invention contemporaine. Elle ne date pas de l'essor du Web3, ni des premières agences de notation extra-financière, ni même du rapport Brundtland³ en 1987. Dès les 17^e et 18^e siècles, les Quakers refusaient de financer l'esclavage et les jeux de hasard, non par calcul de risque, mais par conviction morale. Ce précédent est instructif et révèle que la question de la finalité de la finance est aussi ancienne que la finance elle-même, et que l'idée selon laquelle l'argent n'aurait pas d'odeur – *pecunia non olet*, selon la formule attribuée à l'empereur Vespasien – n'a jamais été une réalité, mais une convention. Les sociétés ont collectivement choisi, à de nombreuses reprises dans l'histoire, de faire semblant que le capital ne sentait pas ce qu'il finançait. Ce rapport part du principe que cette convention est devenue intenable, et examine ce que des architectures techniques nouvelles peuvent apporter à son démantèlement.

Avant d'aller plus loin, une clarification terminologique s'impose, car la confusion entre trois notions voisines traverse une partie significative des débats publics sur la finance numérique. La finance traditionnelle, désignée dans ce rapport par l'acronyme anglais **TradFi*** (*Traditional Finance*), désigne l'ensemble des institutions et marchés financiers conventionnels, les banques commerciales, gestionnaires d'actifs, les bourses, compagnies d'assurance, dont l'infrastructure repose sur des registres centralisés, des intermédiaires accrédités et des cadres réglementaires nationaux ou supranationaux. La finance centralisée, dite **CeFi*** (*Centralized Finance*), désigne les plateformes et opérateurs qui permettent d'acheter,

de détenir ou d'échanger des crypto-actifs, mais en conservant la garde des fonds dans des structures centralisées dont l'architecture de risque n'est pas fondamentalement différente de celle d'une banque traditionnelle, hormis une réglementation actuellement beaucoup moins contraignante. Enfin, la finance décentralisée, dite **DeFi*** (*Decentralized Finance*), désigne l'ensemble des services financiers, les prêts, emprunts, échanges d'actifs, gestion de liquidité, construits directement sur des blockchains publiques *via* des *smart contracts**, sans intermédiaires institutionnels et accessibles à tout détenteur d'un portefeuille numérique, indépendamment de sa nationalité ou de son statut bancaire. Au sein de la finance décentralisée s'est constituée la finance dite régénérative, dite **ReFi*** (*Regenerative Finance*), que ce rapport examine en détail. Ce courant cherche à orienter les liquidités et les propriétés structurelles de la **DeFi*** vers des projets à impact environnemental et social mesurable, voire à des projets de régénération des systèmes vivants. Ces quatre notions ne s'opposent pas mais coexistent, et leur convergence partielle constitue précisément l'un des enjeux des sections qui suivent.

Ce rapport ne cherche pas à opposer un « ancien système traditionnel défaillant » à une « nouvelle solution salvatrice issue du Web3 ». Cette opposition est aussi commode que trompeuse. La finance traditionnelle a produit des instruments remarquables de mobilisation du capital et reste indispensable à toute ambition de financement à l'échelle. Les protocoles décentralisés ont produit des innovations réelles en matière de transparence, d'automatisation et d'accès, tout comme une vague massive de pure spéculation, de fraudes documentées, et des promesses non tenues. Aucun des deux univers ne détient un monopole sur la vertu ou sur la rationalité. Ce que ce rapport examine, c'est une question d'architecture. Quels outils, combinés de

³ Le rapport Brundtland, publié en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, sous le titre Notre avenir à tous (*Our Common Future*), est le texte fondateur du développement durable, dont la raison d'être est censée « répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ».

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

quelles façons, sous quelles conditions de gouvernance, permettent de rapprocher la finance responsable de sa fonction originelle, orienter le capital vers ce qui crée de la valeur pour l'ensemble du vivant et non pour le seul actionnaire.

Une question souvent posée comme préalable mérite d'être traitée ici, pour ne pas avoir à revenir dessus : celle de l'empreinte écologique de la technologie blockchain elle-même. La critique est fondée pour certains protocoles. Le mécanisme de consensus dit preuve de travail* (*Proof of Work*), utilisé par le réseau Bitcoin, est énergivore par conception, et c'est précisément cette dépense énergétique qui fonde sa sécurité. L'essentiel des protocoles sur lesquels s'appuient les applications de Finance Régénérative examinées dans ce rapport, et notamment les blockchains publiques Ethereum (depuis sa migration vers la preuve d'enjeu* en 2022), **Celo**, **Solana**, **Algorand**, fonctionnent toutefois selon des mécanismes de consensus dont la consommation énergétique est de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle de leurs prédécesseurs en preuve de travail*. La transition d'Ethereum seule a entraîné une réduction estimée à 99,95 % de sa consommation électrique, ramenée à environ 0,0026 TWh par an⁴, soit, selon le Cambridge Centre for Alternative Finance, l'équivalent de la consommation annuelle de quelques milliers de foyers européens, et un niveau comparable à celui d'un *data center* bancaire de taille intermédiaire⁵. L'argument énergétique, légitime lorsqu'il visait les protocoles en preuve de travail*, ne s'applique donc plus aux infrastructures *on-chain** examinées ici.

Un enjeu proprement juridique structure enfin en filigrane l'ensemble de ce rapport, et mérite d'être nommé explicitement dès l'introduction. Le droit de la responsabilité civile des entreprises repose aujourd'hui, dans la grande majorité des juridictions, sur une distinction fondamentale entre l'obligation de moyens, l'entreprise s'engage à déployer des efforts raisonnables pour atteindre un objectif, et l'obligation de résultat, l'entreprise s'engage à produire un effet précis et vérifiable. Les engagements environnementaux et sociaux des entreprises relèvent presque universellement de la première catégorie. Excepté pour les sociétés à mission⁶, une entreprise peut légalement affirmer qu'elle « vise » la neutralité carbone, qu'elle « cherche à » réduire son impact sur la biodiversité, ou qu'elle « s'efforce de » garantir des conditions de travail équitables dans sa chaîne d'approvisionnement, sans que ces formulations n'engagent de responsabilité vérifiable en cas d'écart entre l'intention déclarée et la réalité constatée. Or les instruments examinés dans la deuxième partie de ce rapport – *smart contracts** de financement conditionnel, *Impact Tokens*, systèmes de vérification numérique continue – ouvrent structurellement la voie à un glissement de l'obligation de moyens vers une obligation de résultat, vérifiable par le code informatique. Si ce glissement se consolidait dans les pratiques et dans les cadres réglementaires, il redéfinirait en profondeur la responsabilité civile des entreprises vis-à-vis de leurs engagements extra-financiers, ce qui constitue peut-être la transformation la plus significative, et la moins discutée, que les technologies de registre distribué pourraient apporter au droit et à la finance.

⁴ Neumüller, A. (2023, 26 avril). *Ethereum's climate impact: a contemporary and historical perspective*. Cambridge Centre for Alternative Finance, Cambridge Digital Assets Programme, Cambridge Judge Business School, University of Cambridge. <https://www.jbs.cam.ac.uk/2023/ethereums-climate-impact-a-contemporary-and-historical-perspective/>

⁵ Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). The energy consumption of blockchain technology: Beyond myth. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), 599–608. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>

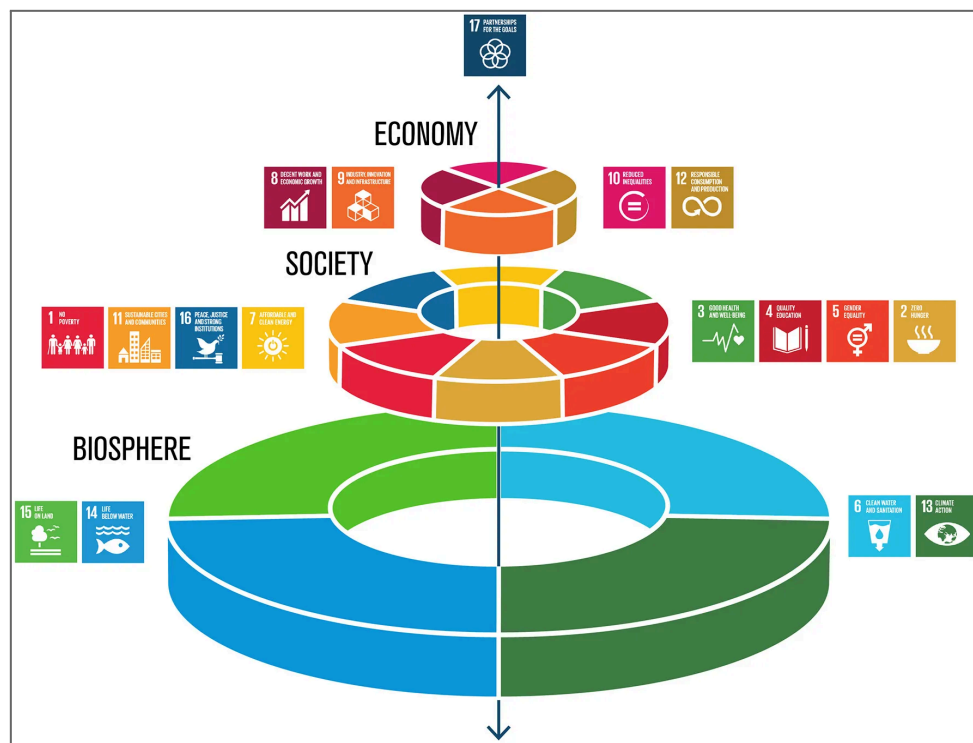
⁶ Qualité introduite par la loi du 22 mai 2019 relative à la croissance et à la transformation des entreprises, dite loi PACTE. Les objectifs sociaux et environnementaux inscrits aux statuts d'une société à mission sont soumis à vérification périodique par un organisme tiers indépendant (OTI) accrédité par le Comité français d'accréditation (COFRAC), et leur non-respect peut conduire, sur saisine du ministère public ou de toute personne intéressée, au retrait judiciaire de la mention par le président du tribunal de commerce.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Ce rapport vise trois publics interdépendants que sont les professionnels de la Finance traditionnelle (TradFi*) ainsi que ceux de la Finance centralisée (CeFi*) pour une initiation au Web3 à impact et aux outils décentralisés, mais aussi les acteurs du Web3 et de la Finance décentralisée (DeFi*), pour un ancrage historique dans la finance responsable et une évaluation critique de leur écosystème. Avant toute chose, il importe de rappeler l'horizon dans lequel s'inscrit ce rapport qui n'est pas celui des 17 Objectifs

de développement durable (ODD) considérés comme une liste d'ambitions équivalentes, mais celui proposé par Karl Polanyi, repris par le Stockholm Resilience Centre, où l'économie est nichée à l'intérieur de la société, elle-même nichée à l'intérieur de la biosphère.

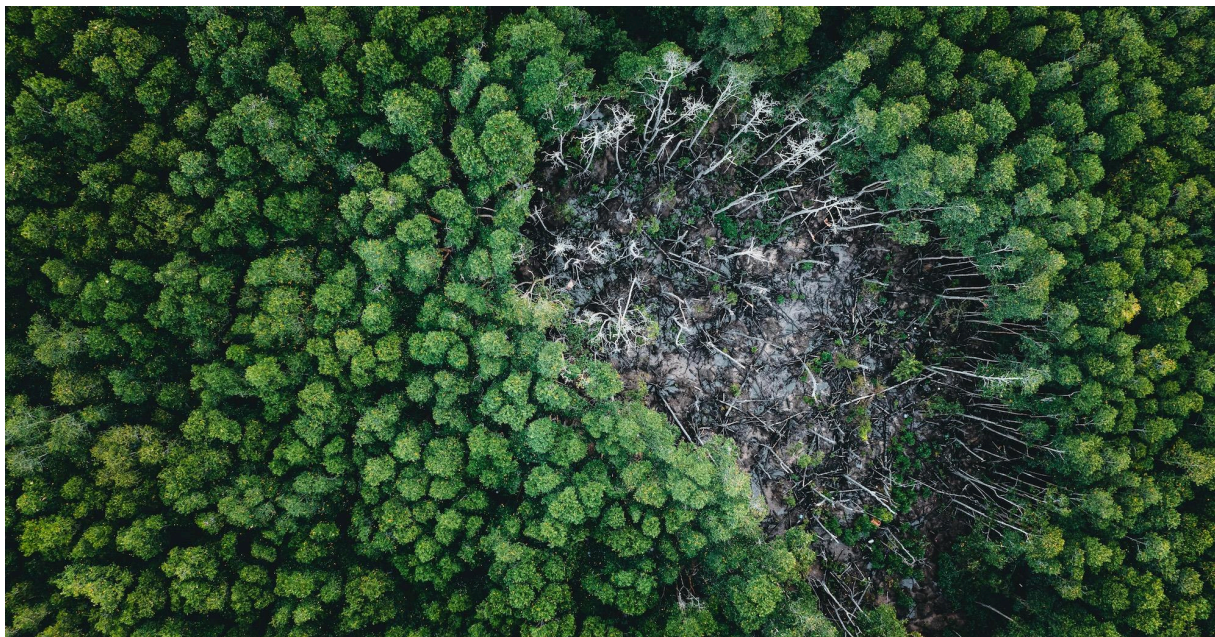
Ce cadre de lecture, qui ne s'applique pas qu'à l'échelle globale mais aussi à l'échelle des territoires et des communautés, est celui dans lequel les instruments que ce rapport examine trouvent le plus de pertinence.



[I] La pièce montée des Objectifs de développement durable

Source⁷

⁷ Simpson, G. B., & Jewitt, G. P. W. (2019). The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00008>. La pièce montée des Objectifs de développement durable est une autre façon d'appréhender les Objectifs de Développement Durable et leurs interconnexions où l'économie et la société sont enchâssées à l'intérieur de la biosphère.



PARTIE 1. Les limites de la finance ESG à l'aune d'une nouvelle infrastructure technologique

Depuis plus d'un demi-siècle, une question traverse les systèmes financiers et économiques mondiaux sans y avoir encore trouvé de réponse satisfaisante : comment orienter durablement le capital vers la création de valeur pour l'ensemble du vivant, et non pour le seul actionnaire ?

1.1 La genèse d'une économie au service du vivant

Cette question n'est ni nouvelle, ni propre au Web 3 et traverse l'histoire de la pensée économique, des premières exclusions éthiques des portefeuilles quakers au 18^e siècle jusqu'aux exigences de double matérialité inscrites aujourd'hui dans le droit européen. Elle a progressivement contraint la finance à élargir son horizon, de la maximisation du profit à court terme vers une prise en compte des parties prenantes, puis vers une mesure de l'impact social et environnemental, et enfin vers l'idée, plus ambitieuse encore, d'une économie dite

régénérative – c'est-à-dire d'une économie qui ne se contente plus de limiter ses dommages ou encore les neutraliser, mais une économie qui renforce activement la capacité des systèmes vivants à se reproduire.

Cette trajectoire n'est toutefois pas linéaire et à chaque étape, les instruments créés pour servir le bien commun ont révélé leurs limites. L'investissement socialement responsable (ISR) a produit des labels sans substance, les crédits carbone ont engendré un marché de dupes, la microfinance a parfois aggravé la situation des plus pauvres. Ce n'est pas tant la mauvaise foi des acteurs qui explique ces dérives, que la fragilité structurelle des systèmes d'évaluation sur lesquels ils reposaient – des systèmes fondés sur la déclaration, l'audit manuel et la confiance accordée à des intermédiaires centralisés, tout aussi faillibles que les institutions qu'ils étaient censés contrôler. Le contexte actuel où les États se débarrassent de leurs impératifs de solidarité font enfin peser sur la sphère privée en général, et la finance en particulier,

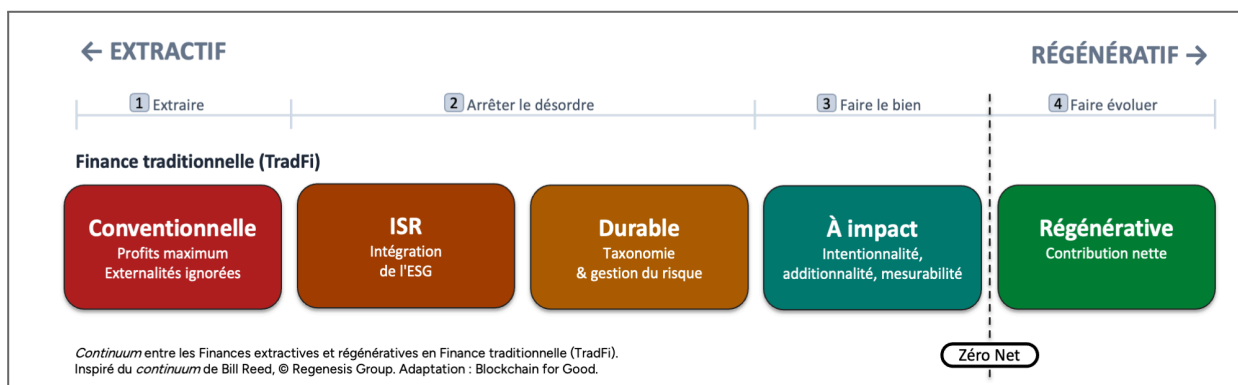
| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

une attente particulière de combler un vide grandissant, au nom d'un impératif de justice sociale et souci d'équité.

Ce premier chapitre retrace cette généalogie. Il part des fondements intellectuels de la finance responsable, de la théorie des parties prenantes à la notion de double matérialité, pour montrer comment s'est progressivement constitué un mouvement de pensée exigeant une économie tournée vers le vivant – une économie qui inscrit la préservation du capital naturel non comme une contrainte réglementaire, mais comme une condition de sa propre pérennité.

1.1.1 Quelle finance au service de qui et de quoi ?

La finance n'est pas monolithique. Sous ce terme générique coexistent des pratiques, des logiques et des ambitions profondément hétérogènes, qui ne se distinguent pas seulement par leurs instruments mais par la question fondamentale à laquelle elles prétendent répondre : au service de quoi la finance doit-elle être mise, et selon quelles règles ?



Il examine ensuite comment ce mouvement, initialement porté par des comptables, des biologistes et des économistes, a produit de nouveaux outils de mesure et de gouvernance – bien avant que le Web3 n'entre en scène. Et il analyse enfin pourquoi le système centralisé actuel, malgré des décennies de réformes, n'a pas réussi à tenir sa promesse, faute d'une infrastructure de vérification capable de transformer l'intention déclarée en preuve opposable.

C'est dans cet espace – celui de la vérification, de la transparence et de la traçabilité – que les nouvelles architectures numériques décentralisées interviennent. Non comme une solution miracle, mais comme un ensemble d'outils dont il faudra sans cesse évaluer, avec rigueur, les promesses et les limites.

[1] Le continuum entre les Finances extractives et régénératives

Source⁸

Pour rendre compte de cette hétérogénéité sans la caricaturer, il est nécessaire de la cartographier. Entre la finance extractiviste, qui maximise le rendement pécuniaire en ignorant ses coûts écologiques et sociaux et la finance régénérative, qui prétend renforcer activement les systèmes vivants dont elle dépend, il s'étend un « continuum de finances » intermédiaires, chacune représentant une exigence croissante d'intentionnalité, de mesure et de redevabilité.

⁸ La « *Trajectory of Ecological Design* » (Bill Reed, © Regenes Group) représente le continuum du dégénératif (pensée réductionniste, développement en silos) au régénératif (développement intégré, pensée en termes de systèmes vivants). Adaptation : Blockchain for Good. <https://online.flippingbook.com/view/443409299/25/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Ce *continuum* n'est pas une progression linéaire vers le progrès mais la cartographie des compromis que chaque époque a jugés acceptables entre la logique de rendement et la prise en compte du monde dans lequel ce rendement est prélevé.

Ce cadre analytique vaut d'abord pour la finance traditionnelle, qui a mis plus d'un demi-siècle à le conceptualiser et peine toujours à le construire et vaut également, en décalé et de façon beaucoup moins développée, pour la Finance décentralisée (DeFi*), avec une asymétrie frappante sur laquelle cette section reviendra.

1.1.1.1 Le *continuum* du devoir fiduciaire à la régénération du vivant

Toute cartographie suppose un point de départ et en matière de finance, ce point de départ est le paradigme qui a dominé les marchés de capitaux pendant la majeure partie du 20^e siècle : celui de la maximisation du rendement pour l'actionnaire, dans le cadre légal en vigueur, sans autre considération. Milton Friedman en a donné la formulation canonique en 1970, affirmant dans le New York Times qu'« *il n'y a qu'une et une seule responsabilité sociale de l'entreprise [...] accroître ses profits dans la mesure où elle respecte les règles du jeu* »⁹. Cette doctrine n'était pas seulement une position idéologique et s'est cristallisée en obligation fiduciaire, en norme comptable, en critère d'évaluation des dirigeants.

Les effets sociaux ou environnementaux d'une activité économique relevaient, dans ce cadre, de ce que les économistes appellent pudiquement des externalités, c'est-à-dire des effets, mais hors-champ, dont le marché n'avait pas à rendre compte.

Et ce paradigme demeure, en volume, celui dominant de la finance mondiale. Le Forum économique mondial estimait, en 2023,

que « 7 300 milliards de dollars ont été investis dans des activités nuisibles à la nature, contre seulement 200 milliards pour des solutions basées sur la nature¹⁰ », et que « le secteur privé est responsable de la majorité des flux financiers négatifs pour la nature, 4 900 milliards de dollars, mais ne contribue qu'à hauteur de 23 milliards aux solutions basées sur la nature »¹¹.

Même si ce paradigme a été progressivement contesté, de l'intérieur même des marchés financiers, par une série d'approches qui ont déplacé, chacune à leur manière, la frontière entre ce que la finance doit prendre en compte et ce qu'elle peut continuer d'ignorer. Ce devoir fiduciaire faisant primer la rentabilité financière à tout prix progressivement a été remis en question au sein même des marchés financiers, selon diverses méthodes. Chacune d'elles a redéfini, à sa manière, ce que la finance doit prendre en compte et ce qu'elle peut encore laisser de côté.

Au delà de la finance conventionnelle, la première strate de ce *continuum* est l'investissement socialement responsable (ISR), dont les racines remontent aux convictions religieuses des Quakers et des méthodistes aux 17^e et 18^e siècles, mais qui ne se formalise comme pratique institutionnelle qu'à partir des années 1960 et 1970, notamment sous l'impulsion des mouvements contre la guerre du Vietnam et contre l'apartheid en Afrique du Sud. En retirant massivement leurs capitaux, les universités, les églises et les fonds de pension établissent alors un précédent fondamental, montrant que le capital peut être mobilisé pour des raisons morales et politiques, et non plus exclusivement pour des considérations de rendement.

⁹ Friedman M. (1970) "A Friedman Doctrine – The Social Responsibility of Business is to Increase its Profits" New York Times, 13 September 1970

¹⁰ World Economic Forum. (2026). *50 investible opportunities for a new nature economy* [Insight report]. <https://www.weforum.org/publications/50-investible-opportunities-for-a-new-nature-economy-insight-report/>

¹¹ Ibid.

[E] De la théorie des parties prenantes à la matrice des 3P

C'est dans le contexte des années 1970 que le milieu académique commence à formaliser ce que la pratique militante avait déjà pressenti. En 1984, le philosophe R. Edward Freeman publie *Strategic Management: A Stakeholder Approach*¹² et introduit la théorie des parties prenantes, Stakeholder Theory. Sa thèse est simple dans son principe, mais radicale dans ses implications. Pour Edward Freeman, la direction d'une entreprise ne peut se contenter de servir l'actionnaire et porte la responsabilité d'« *accorder la considération requise aux intérêts des autres parties prenantes, incluant les employés, les clients, les fournisseurs, les communautés, les financiers, les instances gouvernementales et l'environnement* »¹³. Ce déplacement conceptuel ne prétend pas nier la nécessité du profit mais en redéfinit la condition de légitimité. La rentabilité cesse d'être une fin en soi pour devenir le résultat d'une gouvernance attentive à l'ensemble des parties prenantes.

Cette rupture théorique est complétée treize ans plus tard par John Elkington, qui introduit en 1997 le concept de Triple Bottom Line dans son ouvrage *Cannibals with Forks*¹⁴. Sa matrice des « 3P » – Profit, People, Planet – propose de mesurer la performance d'une organisation selon trois piliers indissociables, la rentabilité économique, l'impact social et l'impact environnemental. L'idée est moins de remplacer la logique financière que de lui adjoindre deux dimensions jusqu'alors invisibles dans les bilans. Ce déplacement dans la théorie organisationnelle trouve un écho inattendu dans le champ de la finance

d'entreprise. En 2002, Michael Jensen, co-auteur avec William Meckling de l'article fondateur de la théorie de l'agence¹⁵, qui avait posé la primauté de l'actionnaire comme axiome de la gouvernance moderne, reconnaît que l'objectif de maximisation de la valeur actionnariale ne peut être atteint à long terme en ignorant les intérêts des parties prenantes. Il propose une « maximisation éclairée de la valeur »¹⁶ (*enlightened value maximization*) qui intègre les parties prenantes non comme des fins légitimes en soi, à la manière de Freeman, mais comme des contraintes opérationnelles dont la satisfaction conditionne la performance durable (Jensen, 2002). L'écart entre les deux positions est révélateur de la limite de ce consensus apparent : Freeman ancre la considération des parties prenantes dans une éthique de la responsabilité ; Jensen l'ancre dans une logique d'optimisation. La question de savoir si ce déplacement est normatif ou simplement instrumental, si l'entreprise doit considérer ses parties prenantes parce qu'elles ont des droits ou parce que cela maximise sa valeur – reste le point de fracture non résolu que les instruments de la finance durable, de l'ESG aux obligations à impact, héritent sans l'avoir tranché.

L'investissement socialement responsable (ISR) opère strictement dans les cadres de la finance traditionnelle, sans remettre en question ses structures de marché, et dont la performance financière reste le principal critère d'évaluation. Il ne prétend pas que le capital doit « faire le bien » mais prétend seulement qu'il « ne doit pas financer certains maux », en s'appuyant principalement sur trois stratégies : **l'exclusion**, qui consiste à écarter des secteurs entiers comme l'armement,

¹² Freeman, R. E. (1984). *Strategic management: A stakeholder approach*. Pitman.

¹³ *Ibid.*

¹⁴ Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone.

¹⁵ Jensen, M. C., & Meckling, W. H. (1976). Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure. *Journal of Financial Economics*, 3(4), 305–360.

¹⁶ Jensen, M. C. (2002). Value maximization, stakeholder theory, and the corporate objective function. *Journal of Applied Corporate Finance*, 14(3), 8–21.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

le tabac ou, de plus en plus, les énergies fossiles ; l'approche dite « **best-in-class** », qui sélectionne les entreprises les plus performantes sur le plan des critères environnementaux, sociaux, et de gouvernance (ESG) au sein de chaque secteur d'activité, sans exclure de secteur *a priori* ; et l'**engagement actionnarial**, qui consiste à utiliser les droits de vote en assemblée générale pour influencer les pratiques de gouvernance et de durabilité de l'entreprise. Ces trois stratégies ont en commun de reposer sur l'analyse ESG comme outil d'évaluation extra-financière. Il convient de noter que l'ISR, en tant que pratique d'investissement labellisée, est par construction limitée aux actifs cotés sur les marchés financiers. Dans le champ du *private equity* et des actifs non cotés, les mêmes critères analytiques s'appliquent, mais sous le seul vocable ESG, sans que la démarche ne soit désignée comme socialement responsable au sens institutionnel du terme.

La deuxième strate est celle de la finance dite durable au sens réglementaire du terme, dont la formalisation institutionnelle s'accélère en 2004, sous l'impulsion du Pacte mondial des Nations Unies¹⁷, qui introduit formellement l'acronyme dans le vocabulaire de la finance institutionnelle. L'approche ESG ne repose plus sur l'exclusion mais sur l'intégration des critères extra-financiers qui sont incorporés dans l'analyse des risques et des opportunités d'investissement.

Ce déplacement est réel, mais circonscrit dans sa portée. Comme le relève la littérature spécialisée, l'ESG reste fondamentalement une « *démarche de réduction des risques, qui se concentre sur les processus*¹⁸ », une vision dite *outside-in* qui se demande comment les risques climatiques ou sociaux menacent la rentabilité de l'entreprise, et non l'inverse.

¹⁷ ESG, 20 ans après : de l'intuition à la transformation globale
<https://pactemondial.org/2024/12/19/esg-20-ans-apres-de-lintuition-a-la-transformation-globale/>

¹⁸ Voir notamment l'Institut de la Finance Durable.

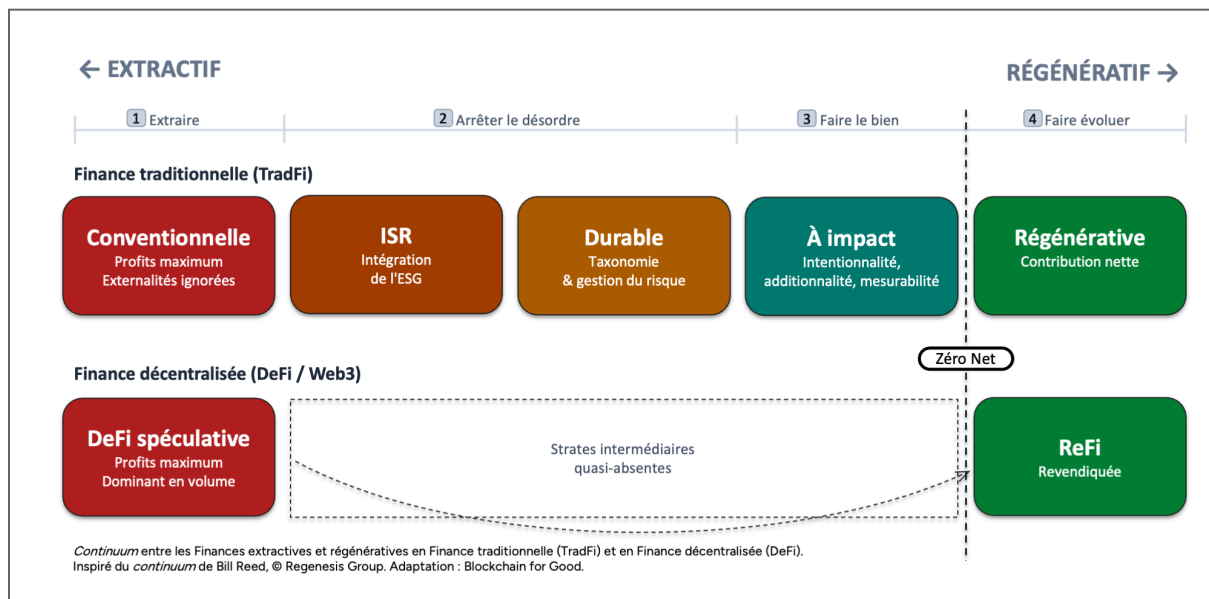
La vertu, dans ce cadre, est présentée comme rentable, ce qui est une façon élégante de ne jamais avoir à choisir entre les deux.

La troisième strate est celle de la finance dite durable au sens réglementaire du terme, telle que la Taxonomie européenne¹⁹, entrée en vigueur en 2020, cherche à la définir. L'exigence y est plus élevée en ce qu'une activité ne peut être qualifiée de durable que si elle contribue substantiellement à l'un des six objectifs environnementaux définis par le règlement, sans nuire significativement aux cinq autres, selon le principe dit de non-nuisance significative, ou *Do Not Significantly Harm* (DNSH). Par exemple, un projet d'énergie renouvelable qui détruirait gravement la biodiversité locale ne peut pas relever de la finance durable. Ce principe agit comme un filet de sécurité et acte la fin des approches en silo en imposant que la recherche d'une performance positive ne dispense jamais l'investisseur de maîtriser l'occurrence de ses externalités négatives.

La double matérialité, telle qu'elle est inscrite dans le règlement sur la transparence des investissements durables, Sustainable Finance Disclosure Regulation (SFDR), adopté en novembre 2019²⁰, ajoute une exigence supplémentaire. Les entreprises doivent rendre compte non seulement des risques que le climat et la biodiversité font peser sur leurs activités, mais également de l'impact que leurs activités font peser sur le climat et la biodiversité. L'entreprise « *n'est plus seulement exposée aux risques climatiques ou sociaux mais les génère et doit en rendre*

¹⁹ Règlement (UE) 2020/852 du Parlement européen et du Conseil du 18 juin 2020 sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables et modifiant le règlement (UE) 2019/2088 (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=cele_x:32020R0852

²⁰ *Ibid.* et Règlement (UE) 2019/2088 du Parlement européen et du Conseil du 27 novembre 2019, sur la publication d'informations en matière de durabilité dans le secteur des services financiers.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/ALL/?uri=CELEX%3A32019R2088>



compte²¹ ». C'est un déplacement conceptuel significatif, de la gestion du risque financier vers la redevabilité écologique mais il reste toutefois inscrit dans une logique de limitation des dommages, et non de restauration.

La quatrième strate est celle de la finance à impact, qui s'adresse plus aux classes d'actifs non cotés, dont la conceptualisation s'accélère à la fin des années 2000, et que Finance for Tomorrow définit comme une « démarche d'investissement qui vise à générer, en plus d'un rendement financier, des impacts positifs mesurables sur la société et l'environnement²² ». La finance à impact introduit deux exigences nouvelles et cumulatives que les strates précédentes ne formulaient pas : l'**intentionnalité**, c'est-à-dire que l'investissement doit avoir pour objectif explicite de produire un impact positif, et non simplement d'éviter d'en produire un négatif. Et l'**additionnalité**, c'est-à-dire que l'impact doit être démontrable et ne se serait pas produit sans l'investissement en question.

[I] Le continuum entre Finances extractives, régénératives, traditionnelle et décentralisée

Source²³

Ces deux critères élèvent considérablement le niveau d'exigence probatoire et supposent **une mesure a priori des objectifs**, un suivi en cours de vie et une évaluation ex post **des résultats**.

Parmi les mécanismes opérationnels que la finance à impact a développés pour atteindre des secteurs ou des géographies structurellement sous-financés, la finance mixte, ou *blended finance*, occupe une place notable. Elle combine des capitaux mis à disposition à des conditions préférentielles²⁴ et des capitaux privés au sein d'une même structure afin de réduire le profil de risque d'un investissement au point de le rendre acceptable pour des acteurs qui ne l'auraient pas supporté seuls.

²¹ Ibid.

²² Becquey, P., Boric, N., & Clerc, P. (2021). *Définition de la finance à impact*. Finance for Tomorrow. <https://institutdelafinancedurable.com/wp-content/uploads/2023/09/Finance-for-Tomorrow-Definition-de-la-finance-a-impact-Septembre-2021-5.pdf>

²³ La « *Trajectory of Ecological Design* » (Bill Reed, © Regenes Group) représente le continuum du dégénératif (pensée réductionniste, développement en silos) au régénératif (développement intégré, pensée en termes de systèmes vivants). Adaptation : Blockchain for Good. <https://online.flippingbook.com/view/443409299/25/>

²⁴ comme des taux bonifiés ou des garanties ou absorption des premières pertes, apportés par des acteurs publics, des institutions de financement du développement, ou encore des acteurs philanthropiques.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Au bout du *continuum* se trouve ce que l'on commence à désigner sous le terme de finance régénérative, une notion qui sera examinée en détail dans la section suivante, mais dont il convient de poser ici les contours. Là où la finance à impact mesure un impact positif net, la finance au service de l'économie régénérative prétend que le capital doit activement renforcer la capacité des systèmes vivants, écologiques, sociaux, territoriaux, à se reproduire et à prospérer. Ce n'est plus une logique de limitation des dommages, ni même de compensation mais une logique de contribution nette positive au vivant.

Ce *continuum* que nous venons de présenter n'est pas une progression vers un idéal mais la description de différents type de finances à l'oeuvre au sein du système financier mondial, et dans lequel coexistent des pratiques qui diffèrent non seulement par leurs instruments mais par leur rapport fondamental à la question de ce que le capital doit produire, et pour qui. L'écart entre les flux financiers qui dégradent le vivant et ceux qui prétendent le servir est considérable.

1.1.1.2 Le parallèle avec la Finance décentralisée (DeFi) : un *continuum* biaisé

Le *continuum* entre les Finances extractives et régénératives peut également s'interpréter dans l'écosystème de la Finance décentralisée (DeFi*) et constitue un angle d'analyse pertinent pour comprendre à la fois les ambitions et les fragilités du Web3 en matière d'impact.

La Finance décentralisée (DeFi*) telle qu'elle s'est déployée à partir de 2017-2018, et surtout lors de ce que le secteur a appelé le « DeFi* Summer » de 2020, correspond fonctionnellement à l'extrémité extractiviste du spectre du *continuum*. Les protocoles dominants en volume y sont conçus pour maximiser les rendements financiers par circulation de capitaux entre capitaux.

Les liquidités entrent dans le système pour y générer des rendements sur d'autres

liquidités, dans des cycles dont la valeur repose davantage sur l'afflux continu de nouveaux participants que sur la création de valeur productive. Raphaël Haupt, dans une analyse publiée par Curve Labs en 2022, décrit cet écosystème comme conçu *a priori* pour « l'optimisation des rendements financiers sans ancrage dans des activités réelles²⁵ ». Ce n'est pas un jugement moral mais la description de l'architecture d'incitation au cœur de la Finance décentralisée spéculative, qui n'a pas vocation à financer l'économie réelle car elle n'a pas été conçue pour cela.

Ce qui est frappant, en revanche, c'est l'étape qui a suivi au sein de l'écosystème du Web3. À partir de 2021, le mouvement de la Finance dite régénérative, *Regenerative Finance* - ReFi*, émerge avec l'ambition d'orienter les liquidités accumulées dans la Finance décentralisée (DeFi*) vers des projets à impact environnemental et social mesurable. La Finance régénérative (ReFi*) cherche à combiner les propriétés structurelles de la Finance décentralisée (DeFi*), transparence, programmabilité et accessibilité, avec les objectifs de la finance à impact²⁶. Mais observé à la lumière du *continuum* précité, il présente une asymétrie structurelle saisissante. Entre la DeFi* spéculative et la ReFi*, les strates intermédiaires que la finance traditionnelle a mis plus d'un demi-siècle à construire, l'équivalent d'une DeFi* socialement responsable, d'une DeFi* ESG, d'une DeFi* durable, sont quasi-absentes.

Ces catégories n'existent pas comme champs constitués dans l'écosystème Web3. Elles n'ont pas leurs standards de mesure, leurs obligations de reporting, leurs corps de doctrine. Le spectre a été court-circuité. Dans la finance traditionnelle, chaque strate intermédiaire a rempli une fonction précise et permis de forger des définitions, d'imposer

²⁵ Haupt, R. (2022, 23 février). The Promises and Pitfalls of Regenerative Finance: Towards a Critical Yet Constructive Dialogue. Curve Labs.

<https://web.archive.org/web/20241201222452/https://blog.curvelabs.eu/the-promises-and-pitfalls-of-regenerative-finance-4910f0f6f690?qi=44616d45ec9a>

²⁶ Ibid.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

des exigences croissantes de mesures et de preuves, et de développer des corps professionnels spécialisés. Les erreurs, les écueils et les scandales ont conduit aux correctifs suivants. L'Investissement socialement responsable (ISR) a généré du *greenwashing*²⁷ qui a appelé l'approche environnementale, sociale et de gouvernance (ESG) ; l'ESG a produit ses propres dérives qui ont appelé la finance à impact ; la finance à impact se heurte aujourd'hui à ses propres limites en matière de mesure et de transformation systémique. Chaque strate a servi de terrain d'apprentissage pour la suivante alors que la Finance régénérative (ReFi*) au sein du Web3 n'a pas disposé de ce terrain. Elle a revendiqué le pôle régénératif du *continuum* sans avoir traversé les étapes intermédiaires qui a permis, dans la finance traditionnelle, de donner plus de substance à la strate d'après.

Cette observation ne constitue pas un réquisitoire contre la Finance régénérative (ReFi*) du Web3. La chercheuse Kate Bennett établit, dans une étude de quarante initiatives ReFi* publiée dans *Frontiers in Blockchain* en 2025, que la conception des protocoles détermine si ceux-ci « *servent la régénération ou s'ils se limitent à optimiser des marchés existants sans en modifier la logique sous-jacente*²⁸ ». Certains protocoles ont produit des innovations réelles en matière de traçabilité, de gouvernance communautaire et d'accès au capital pour des acteurs ignorés de la finance traditionnelle. Bennett identifie également une fracture interne au mouvement, entre une ReFi* orientée vers la financiarisation des actifs naturels et une ReFi* ancrée dans les territoires et les communautés, fracture qui reflète précisément l'absence d'un cadre conceptuel intermédiaire stabilisé. **Penomo**²⁹ est une plateforme de tokenisation d'infrastructures

d'énergie renouvelable, permettant d'adosser des jetons numériques à des projets solaires ou éoliens afin d'en faciliter le financement via des marchés décentralisés. Le projet conditionne explicitement la sélection de ses actifs d'énergie renouvelable à un critère d'impact sur la transition énergétique au même titre que le rendement financier. Autre exemple avec **Dowgo**³⁰, une plateforme B2B française de tokenisation d'obligations vertes qui met en relation des fournisseurs d'énergies renouvelables et des investisseurs en fractionnant les tickets d'entrée à partir d'un euro par jeton. **Dowgo** structure son accès aux marchés privés autour d'une double performance financière et environnementale destinée aux investisseurs institutionnels européens, illustrent cette tentative d'occupation des strates intermédiaires manquantes, sans que l'on puisse encore parler, à ce stade, d'une catégorie constituée.

C'est dans cet espace - celui des strates manquantes, des standards absents, des exigences probatoires non formalisées - que se situe l'un des enjeux centraux de ce rapport. Non pas pour demander au Web3 de refaire en dix ans ce que la finance traditionnelle (*TradFi**) a mis cinquante ans à construire, mais pour identifier ce que chacun des deux systèmes peut apporter à l'autre. La finance traditionnelle (*TradFi**) dispose de l'architecture institutionnelle de la redevabilité. La finance décentralisée (*DeFi**) dispose des outils techniques de la vérification. Leur convergence, si elle se produit sous certaines conditions, pourrait permettre de franchir collectivement le seuil du zéro net, ce point du continuum où l'activité financière cesse de dégrader et commence à restituer.



La plateforme **Initiativ**³¹, dont le produit d'échange s'appelle **InEx**, propose le négoce de quotas d'émissions

²⁷ communication d'une organisation sur ses engagements environnementaux qui excède, enjolive ou contredit la réalité de ses pratiques.

²⁸ Bennett, K. (2025b). An evaluation of the regenerative claims of Web3's ReFi* movement. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1564083. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1564083>

²⁹ <https://penomo.com/>

³⁰ <https://www.dowgo.com/fr>

³¹ <https://www.takeinitiativ.com/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

européens (EUA), en spot et en contrats à terme, *via* une infrastructure d'échange numérique programmable. Là où les plateformes traditionnelles comme l'Intercontinental Exchange (ICE) imposent un lot standard de 1 000 EUA, **Initiativ** permet de négocier à partir d'un seul quota, représentant une tonne de CO₂. Ce seuil d'entrée réduit rend le marché de conformité carbone accessible à des opérateurs industriels de taille intermédiaire et à de nouveaux entrants qui en étaient structurellement exclus par les coûts de transaction. La plateforme est ouverte à la fois aux entités de conformité (opérateurs industriels soumis à l'EU ETS³²) et aux participants financiers (banques, brokers, fonds), sous réserve de qualification comme client professionnel au sens de la directive MiFID II³³.

Initiativ/InEx n'appartient pas à la Finance régénérative (ReFi*) et ne prétend pas régénérer les écosystèmes naturels. Elle occupe une strate intermédiaire que ce rapport identifie comme quasi absente dans l'écosystème Web3, celle de la conformité réglementaire, directement arrimée à la double matérialité imposée par le droit européen. Les entreprises soumises à l'EU ETS sont en effet tenues de mesurer simultanément leur impact sur le climat, la matérialité d'impact et le risque financier que font peser sur elles leurs obligations de quotas, la matérialité

financière. **Initiativ/InEx** traduit ce cadre réglementaire en infrastructure numérique granulaire, sans prétendre aller au-delà de ce que le droit exige, ni en deçà. Ce modèle illustre qu'une FinTech de conformité carbone, l'équivalent numérique de la finance ESG réglementaire, est techniquement réalisable et commercialement opérationnelle, même si elle reste marginale en volume au regard de l'ensemble du marché EU ETS. À ce titre, elle préfigure la convergence entre infrastructure numérique et marché de conformité examinée dans la section 2.3.3.

1.1.2 L'économie régénérative, un paradigme préexistant au Web3

La cartographie du spectre financier présentée dans la section précédente s'est achevée sur un constat d'écart, entre la promesse du pôle régénératif et le capital effectivement mobilisé en sa direction. Avant d'examiner pourquoi les instruments financiers peinent à combler cet écart, il faut s'assurer de comprendre ce que le pôle régénératif désigne réellement, et d'où il vient. L'économie régénérative n'est pas une invention propre au Web3 mais un mouvement intellectuel et pratique constitué, dont les racines remontent aux années 1980, et qui a produit au fil des décennies une littérature académique, des expérimentations territoriales et des cadres conceptuels solides, bien avant que les protocoles décentralisés ne s'emparent du terme. Si la finance régénérative, qu'elle soit traditionnelle ou décentralisée, prétend servir l'économie régénérative, encore faut-il savoir ce qu'elle est censée servir.

³² EU Emissions Trading System, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en

³³ MiFID II - *Markets in Financial Instruments Directive II*, est la directive européenne 2014/65/UE, entrée en vigueur en janvier 2018 qui encadre les marchés d'instruments financiers dans l'Union européenne. Elle impose aux plateformes de négociation des obligations strictes de transparence pré- et post-négociation, de protection des investisseurs, de déclaration des transactions et de qualification des participants (distinction client de détail / client professionnel / contrepartie éligible). Source : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0065>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

1.1.2.1 Du « ne pas nuire » à la triple rentabilité

Le point de bascule intellectuel qui distingue l'économie régénérative de ses prédécesseurs conceptuels tient à une question d'orientation, pas seulement de degré. Depuis la publication du rapport Brundtland en 1987³⁴, la pensée dominante du développement durable vise à limiter les externalités négatives, c'est-à-dire à faire moins de mal sans nécessairement faire davantage de bien. Dans les années 2010, cette logique s'est prolongée avec l'essor de l'économie circulaire, notamment portée par la Fondation Ellen MacArthur à partir de 2015, fondée sur l'idée que boucler les flux de matière permettrait de découpler croissance économique et épuisement des ressources.

Mais l'économie circulaire fait l'objet de critiques académiques croissantes. Le biologiste Keith Ronald Skene, dans une publication de 2018³⁵, souligne que cette approche repose sur une vision mécaniste qui ignore les réalités thermodynamiques fondamentales, selon lesquelles recycler et faire circuler la matière nécessite inévitablement une dépense énergétique et génère des pertes entropiques. Il conclut, de façon délibérément provocatrice, que « *l'économie circulaire ne peut pas fonctionner*³⁶ ». Dans la même veine, les méthodes d'Analyse du Cycle de Vie appliquées aux infrastructures dites vertes, comme les parcs éoliens *offshore* flottants étudiés par la chercheuse Gaia Brussa et ses collègues, démontrent que toute technologie, même décarbonée, génère une empreinte

matérielle et extractive³⁷. La simple limitation des dégâts s'avère mathématiquement insuffisante pour inverser la dégradation de la biosphère.

Face à l'entrée dans l'Anthropocène³⁸, des chercheurs appellent à reconfigurer fondamentalement la relation entre l'économie et son environnement. En 2021, Carl Folke et les chercheurs du *Stockholm Resilience Centre* affirment qu'il n'est plus seulement question d'atténuer le changement climatique, mais qu'il est devenu essentiel d'« *améliorer la capacité régénérative de la biosphère, et sa diversité, pour soutenir et maintenir le développement sociétal*³⁹ » et c'est ce basculement qui donne naissance au concept d'économie régénérative.

La rupture est forte. Les travaux de Joern Fischer et de ses collègues, publiés en 2025 dans *Ambio*, distinguent scientifiquement trois logiques d'action qui correspondent aux strates successives du *continuum* présenté précédemment⁴⁰. La durabilité cherche à « *faire moins de mal*⁴¹ », en supposant que les dommages sont réversibles.

³⁴ En 1987, la Commission des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (World Commission on Environment and Development, WCED) publiait le Rapport Brundtland, du nom de sa présidente, Gro Harlem Brundtland, et intitulé « Our Common Future ». Ce document est devenu la conception directrice du développement durable tel qu'on l'entend aujourd'hui encore. *En voici une version en français* :

<https://www.admin.ch/fr/1987-le-rapport-brundtland>

³⁵ Skene, K. R. (2018). Circles, spirals, pyramids and cubes: why the circular economy cannot work. *Sustainability Science*, 13, 479–492.

<https://doi.org/10.1007/s11625-017-0443-3>

³⁶ *Ibid.*

³⁷ Brussa, G., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2023). Life cycle assessment of a floating offshore wind farm in Italy. *Sustainable Production and Consumption*, 39, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.006>

³⁸ L'Anthropocène est l'un des récits, scientifiquement étayé, décrivant les basculements en cours dans les rapports des sociétés humaines à leurs environnements. Au sein de l'Holocène, dernière époque géologique du Quaternaire qui commence après la dernière glaciation et qui dure depuis 12 000 ans, l'Anthropocène peut être considéré comme l'époque de l'histoire de la Terre au cours de laquelle les activités humaines ont un impact significatif et global sur le système planétaire. Ressources de géographie pour les enseignants, Eduscol, ENS Lyon, <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/anthropocene>

³⁹ Folke, C., Polasky, S., Rockström, J., Galaz, V., Westley, F., Lamont, M., Scheffer, M., Österblom, H., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Seto, K. C., Weber, E. U., Crona, B. I., Daily, G. C., Dasgupta, P., Gaffney, O., Gordon, L. J., Hoff, H., Levin, S. A., ... Walker, B. H. (2021). Our future in the Anthropocene biosphere. *Ambio*, 50, 834–869. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01544-8>

⁴⁰ Voir 1.1.1.1 Le continuum du devoir fiduciaire à la régénération du vivant

⁴¹ Fischer, J., Farny, S., Pacheco-Romero, M., & Folke, C. (2025). Resilience and regeneration for a world in crisis. *Ambio*, 55, 24–34.

<https://doi.org/10.1007/s13280-025-02287-6>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

La résilience cherche à « *persister, s'adapter et se transformer* »⁴² face aux chocs. La régénération, quant à elle, vise à « *renouveler et contribuer positivement* »⁴³. Ce n'est pas une gradation rhétorique mais un changement de système. Dans le champ de la stratégie d'entreprise, Tobias Hahn et Maja Tampe définissent en 2021 les entreprises régénératives comme « *des entreprises qui renforcent la santé des systèmes socio-écologiques tout en prospérant grâce à eux, dans un processus co-évolutif* »⁴⁴. **Cette définition marque une rupture avec les strates intermédiaires du continuum, la santé des écosystèmes n'y est plus perçue comme une contrainte externe à gérer ou une variable de risque à intégrer, mais comme le fondement même de la création de valeur.** L'objectif ne consiste plus à lisser les dommages mais à renforcer les systèmes vivants dont dépend toute activité économique.

Cette ambition a été formalisée à l'échelle macro par l'économiste John Fullerton, qui propose en 2015 les huit principes du « Capitalisme Régénérateur »⁴⁵, dans lequel les capitaux naturel, social et financier se renforcent mutuellement plutôt qu'ils ne s'opposent. L'approche régénérative s'appuie sur ce que les chercheurs conceptualisent comme des « spirales ascendantes », *upward spirals*, des boucles de rétroaction positive où chaque action de renforcement écologique ou social engendre l'élan nécessaire pour catalyser le renforcement suivant du système⁴⁶. Ce paradigme, il convient de le souligner, était constitué bien avant que le terme « finance régénérative » n'apparaisse

dans le vocabulaire du Web3. Le Regenesi Group⁴⁷, fondé dans les années 1990 par Bill Reed, avait déjà développé une théorie du *design* régénératif appliquée aux territoires et aux communautés.

[E] Les quatre paradigmes de Carol Sanford⁴⁸ et la perspective « *Outside-in* »

Pour concevoir une véritable stratégie régénérative, Hahn et Tampe soulignent en 2021 que les objectifs commerciaux doivent adopter une perspective dite *outside-in*⁴⁹. La stratégie ne doit plus être dictée par la logique financière interne pour ensuite s'appliquer à l'environnement, mais doit être formellement dérivée des limites et des besoins des systèmes socio-écologiques locaux. Cette évolution cognitive fait écho aux travaux de Carol Sanford, qui distingue quatre postures historiques. (1) **Extraire (Extract Value)** : La nature est un gisement à exploiter (approche néoclassique). (2) **Arrêter le désordre (Arrest Disorder)** : Le développement durable (principe *Do Not Significantly Harm* DNSH), qui cherche à ralentir les dommages. (3) **Faire le bien (Do Good)** : L'approche de la philanthropie et de la restauration, qui cherche à réparer sans changer le modèle sous-jacent. (4) **Faire évoluer le potentiel inhérent (Evolve Inherent Potential)** : L'approche régénérative, où l'activité économique co-évolue avec les systèmes vivants. Une autre manière de se représenter les différents spectres de la finance pourrait s'interpréter à l'aune de ce graphique, afin de distinguer la finance conventionnelle, la finance verte, la finance durable, la finance à impact et la finance régénérative.

⁴² *Ibid.*

⁴³ *Ibid.*

⁴⁴ Hahn, T., & Tampe, M. (2021). Strategies for regenerative business. *Strategic Organization*, 19(3), 456–477. <https://doi.org/10.1177/1476127020979228>

⁴⁵ Fullerton, J. (2015). *Regenerative Capitalism, How Universal Principles and Patterns Will Shape Our New Economy*. Capital Institute. <https://capitalinstitute.org/wp-content/uploads/2015/04/2015-Regenerative-Capitalism-4-20-15-final.pdf>

⁴⁶ Fischer, J., Farny, S., Abson, D. J., et al. (2024). Mainstreaming Regenerative Dynamics for Sustainability. *Nature Sustainability*. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01368-w>

⁴⁷ Regenesi Group, Inc.

<https://regenesigroup.com/team/bill-reed>

⁴⁸ Sanford, C. (2017). *The regenerative business: Redesign work, cultivate human potential, achieve extraordinary outcomes*. Nicholas Brealey Publishing.

⁴⁹ Hahn, T., & Tampe, M. (2021). Strategies for regenerative business. *Strategic Organization*, 19(3), 456–477. <https://doi.org/10.1177/1476127020979228>

1.1.2.2 Les nouvelles grammaires de la valeur écologique

Le paradigme régénératif pose la primauté du vivant comme fondement de toute activité économique. Cette affirmation engage deux types de réponses que l'on a trop souvent tendance à opposer. La première, dialogique et qualitative, réhabilite les droits, les pratiques culturelles et les savoirs locaux comme sources légitimes de connaissance et d'orientation, en contrepoint d'une prééminence des approches quantitatives qui a longtemps structuré la pensée économique dominante. Cette voie privilégie le renforcement de la gouvernance, la construction de contre-pouvoirs et le travail d'alignement entre parties prenantes plutôt que la multiplication des indicateurs. La seconde réponse, comptable et technique, cherche à rendre le vivant visible dans les outils d'allocation du capital, à partir du constat que tant que la dégradation de la biosphère n'apparaît nulle part en tant que perte dans les bilans, le paradigme régénératif reste une déclaration d'intention sans prise sur les décisions financières.

Ce rapport s'intéresse principalement à cette seconde voie, non parce qu'elle serait supérieure, mais parce que c'est elle que les nouvelles infrastructures numériques cherchent à outiller. Il importe cependant de garder à l'esprit que la quantification sans gouvernance produit exactement le risque d'inflation narrative que les praticiens désignent sous le terme de *regen-washing*, soit la tendance à se revendiquer d'une démarche régénérative sans en respecter les exigences substantielles. Les outils comptables présentés dans cette section, aussi rigoureux soient-ils, s'inscrivent dans une logique d'assignation de valeur aux entités naturelles qui reste étrangère, voire contradictoire, au paradigme régénératif dans sa version la plus exigeante. Ce dernier ne cherche pas à mieux mesurer la nature, il cherche à reconfigurer le rapport des organisations aux systèmes vivants dont elles

dépendent. Pour Pierre Musseau-Milesi, chercheur en Science Politique à l'Université Paris 1 Panthéon Sorbonne/CESSP, « ces méthodes sont des instruments de transition lorsqu'elles sont déployées sans la gouvernance de leurs instruments de mesure, et peuvent devenir des instruments d'incarnation du régénératif lorsque cette gouvernance est mise en place »⁵⁰.

Mais si le cadre théorique de l'économie régénérative pose la primauté du vivant, son application à la finance se heurte à un obstacle structurel que l'on ne peut comprendre sans remonter à son substrat comptable. La finance n'est pas neutre dans ses catégories : elle est gouvernée par des ratios, rentabilité des capitaux propres, endettement, valeur d'actif, qui sont eux-mêmes des constructions issues d'une ontologie comptable particulière, historiquement et politiquement déterminée. Celle du Plan Comptable Général d'après-guerre, dont l'architecture repose sur un modèle distinguant capitaux propres et capitaux empruntés, mais excluant le capital naturel de toute représentation comptable.

Comme l'a montré dès 1988 Jacques Richard⁵¹, ce choix n'était pas technique et tranchait à vif un débat alors actif entre comptabilité moniste et comptabilité dualiste, en faveur d'un modèle qui allait structurer durablement la façon dont nos économies capitalistes rendent, ou ne rendent pas, compte de la nature. C'est de cet héritage que procède l'obstacle structurel hérité de l'après-guerre, notamment la normalisation de la comptabilité nationale par l'Organisation des Nations Unies (ONU) en 1953 et de l'invisibilité de la nature dans les bilans comptables.

⁵⁰ Entretien Blockchain for Good x Pierre Musseau-Milesi, Doctorant CIFRE en Science Politique à Metapolis, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne/CESSP.

⁵¹ Jacques Richard. Pour un plan comptable moniste français. Actes du neuvième congrès, Mai 1988, France. pp.cd-rom. Hal-00823789.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Dans l'économie classique, la dégradation de la biosphère n'apparaît nulle part en tant que perte de capital⁵². Ce risque d'invisibilité comptable n'est pas nouveau et dès les années 1970, des chercheurs identifient les limites de ce que l'on appellera la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) à rendre compte des externalités environnementales et sociales. C'est de cette critique, prolongée dans les années 1990 par les travaux sur l'approche intégrative, notamment la corrélation entre performance financière, modèle d'affaires et impacts environnementaux⁵³, que naît le champ des comptabilités multi-capitaux, bien avant que la rhétorique régénérative ne s'impose dans les discours académiques et institutionnels. Dès les années 2010, plusieurs cadres institutionnels et comptables émergent pour traduire ces dynamiques en données opposables.

Le **système de comptabilité économique et environnementale**, dit *System of Environmental-Economic Accounting* (SEEA), constitue le cadre statistique de référence adopté par les Nations Unies pour articuler données environnementales et économiques. Son cadre central, le *SEEA Central Framework* (SEEA-CF), a été adopté comme norme statistique internationale en 2012⁵⁴. Il a été complété en mars 2021 par le *SEEA*

Ecosystem Accounting (SEEA-EA), adopté lors de la 52^e session de la Commission de statistique des Nations Unies, qui fournit une méthodologie standardisée spécifiquement dédiée à l'évaluation des stocks et flux des écosystèmes, combinant données biophysiques et économiques dans une approche spatiale⁵⁵. Le **modèle de comptabilité intégrée pour le respect de l'écologie**, le *Comprehensive Accounting in Respect of Ecology* (C.A.R.E.⁵⁶), initié par Jacques Richard, Alexandre Rambaud et Hervé Gbego, intègre la préservation des écosystèmes directement au bilan, au compte de résultat et aux annexes comptables de l'entreprise en inscrivant les coûts incompressibles nécessaires à la préservation des entités naturelles et humaines au passif, sous forme de « dette écologique⁵⁷ ». Cette logique de dette serait, selon Pierre Musseau-Milesi, « le mouvement qui rapproche le plus ces méthodes du paradigme régénératif, non pas parce qu'elle serait universellement supérieure, mais parce que son ontologie, – la nature comme créancière, pas comme actif, rejoint directement l'affirmation centrale du régénératif »⁵⁸. Enfin, le **modèle de comptabilité multi-capitaux** *Limits and Foundations Towards Sustainability* (LIFTS), développé par Delphine Gibassier et ses équipes⁵⁹, publié en 2024, alloue à chaque

⁵² La provision pour risque environnemental est une somme inscrite au passif du bilan d'une entreprise pour anticiper des dépenses futures liées à des dommages environnementaux dont elle est responsable comme la remise en état de sites pollués, la décontamination, etc. Pour une analyse empirique de la fiabilité de ces provisions dans les groupes cotés français, voir Maurice, J. (2013, 25 avril). *Les provisions comptables environnementales sont-elles fiables ? Une lecture institutionnelle du cas des sociétés cotées françaises* [Communication, séminaire THEMA]. Université de Cergy-Pontoise.

⁵³ Pérez, R. (2005). Quelques réflexions sur le management responsable, le développement durable et la responsabilité sociale de l'entreprise. <https://www.proquest.com/openview/bd96f0483e43f421edddbc8add6ad51f/1?pq-origsite=gscholar&cbl=26544>

⁵⁴ Nations Unies et al. (2012). *Cadre central du Système de comptabilité économique et environnementale*, 2012. Nations Unies. https://seea.un.org/sites/seea.un.org/files/seea_cf_final_fr.pdf

⁵⁵ Nations Unies et al. (2021). *System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting* (SEEA EA). Commission de statistique des Nations Unies, 52e session. <https://seea.un.org/ecosystem-accounting>

⁵⁶ Cercle des Comptables Environnementaux & Sociaux <https://www.cerces.org>

⁵⁷ Rambaud, A., & Richard, J. (2015). The "Triple Depreciation Line" instead of the "Triple Bottom Line": Towards a genuine integrated reporting. *Critical Perspectives on Accounting*, 33, 92–116. <https://doi.org/10.1016/j.cpa.2015.01.012>

⁵⁸ Entretien Blockchain for Good x Pierre Musseau-Milesi, Doctorant CIFRE en Science Politique à Metapolis, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne/CESSE.

⁵⁹ Édition française Gibassier, D. (dir.), Antheaume, N., Carn, C., Cordano, E., Faure, E., Gaschignard, L., Hsissou, H., Pernias, M., & Taïbi, S. (2024). *La comptabilité multi-capitaux : le modèle LIFTS (Limits and Foundations Towards Sustainability Accounting Model)*. Presses des Mines. ISBN 978-2-38542-538-8.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

organisation des budgets stricts calculés à partir de deux référentiels scientifiques complémentaires, les limites planétaires à ne pas dépasser, définies par Johan Rockström et ses collègues en 2009, et les fondations sociales à atteindre, issues du cadre du « Donut » de Kate Raworth⁶⁰. Ce double ancrage permet d'évaluer scientifiquement si une activité opère dans un espace à la fois écologiquement sûr et socialement juste.

Sur le plan normatif, cette structuration s'est accélérée en France avec la publication en décembre 2024 de l'AFNOR SPEC « Économie Régénérative »⁶¹, premier guide normatif cherchant à poser un cadre exigeant pour éviter les dérives d'interprétation, en définissant la régénération autour d'un triptyque, restauration écologique, amélioration sociale et création de valeur économique ancrée dans les territoires. Cette initiative illustre toutefois une tension que la littérature internationale n'a pas manqué de relever. Le paradigme régénératif est, par nature, pluriversel, c'est-à-dire fondé sur la reconnaissance que les formes de relation au vivant sont irréductiblement diverses selon les contextes écologiques, culturels et cosmologiques dans lesquels elles s'enracinent. Arturo Escobar, dans ses travaux sur les ontologies territoriales et les économies du Sud global⁶², soutient que toute tentative de normalisation universelle du régénératif risque de reproduire la logique d'abstraction et de domination épistémique propre au paradigme qu'elle prétend dépasser.

<https://www.pressesdesmines.com/produit/la-comptabilite-multi-capitaul/>

⁶⁰ What on Earth is the Doughnut?...

<https://www.kateraworth.com/doughnut/>

⁶¹ L'économie régénérative pose une première pierre en normalisation

<https://www.afnor.org/actualites/economie-circulaire/economie-regenerative-premiere-normalisation/> et AFNOR SPEC 2315, décembre 2024 AFNOR SPEC 2315

<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/afnor-spec-2315/aspec-economie-regenerative/fa209119/426267>

⁶² Escobar, A. (2018). Designs for the pluriverse. Radical interdependence, autonomy, and the making of worlds. Duke University Press.

<https://doi.org/10.1215/9780822371649>

La norme AFNOR, utile comme outil de cadrage dans le contexte institutionnel français et européen, doit donc être lue pour ce qu'elle est, un instrument de transition dans un espace réglementaire donné, et non comme une définition universelle de ce que signifie régénérer.

Cette critique épistémologique en recouvre une autre, plus immédiatement opérationnelle qui est celle de la détermination de l'état de référence à partir duquel toute mesure de régénération ou de dégradation est évaluée. Qui fixe ce niveau de référence ? Selon quelle représentation du « bon état » ? Par quel processus et avec quelle légitimité ? Ces questions ne relèvent pas d'une lacune technique mais constituent un enjeu de gouvernance au sens fort, car les choix opérés à ce stade orientent l'ensemble des décisions d'allocation qui suivront. Faute d'une co-construction des instruments de mesure avec les communautés locales et les gestionnaires des écosystèmes concernés, les cadres comptables les plus rigoureux risquent de reproduire, sous une forme technicisée, des asymétries de pouvoir que les infrastructures numériques, à elles seules, ne sauraient corriger.

Ces innovations démontrent que le besoin de mesurer, vérifier et valoriser la contribution d'une activité sur le vivant préexiste largement aux technologies de registre distribué et aux blockchains. Cependant, l'application de ces méthodes multi-capitales à grande échelle se heurte à des limites concrètes de vérification, de coût d'audit et d'asymétrie de la donnée. Ces limites opérationnelles constituent le point de départ de la section suivante, qui examine les nouvelles infrastructures numériques non comme une solution clé en main, mais comme un ensemble d'outils dont les apports et les limites méritent toute notre attention.

1.1.3 L'écueil du système centralisé

Les limites structurelles du système centralisé et notamment, l'auto-déclaration non vérifiable, l'asymétrie d'information et le *green washing* systémique, constituent moins des dysfonctionnements isolés que les symptômes d'une architecture de confiance fondamentalement inadaptée.

1.1.3.1 Auto déclaration et asymétrie d'information

L'évaluation de la performance extra financière d'une organisation repose, depuis toujours, sur un modèle déclaratif qui engendre une asymétrie d'information structurelle entre l'émetteur de la donnée, la plupart du temps l'entreprise et ses récepteurs, c'est-à-dire l'investisseur, et le régulateur ou la société civile. Cette idée a été au centre des travaux de George Akerlof, prix Nobel d'économie en 2001. Dans son article fondateur *The Market for Lemons* (1970)⁶³, il analyse les asymétries d'information entre vendeurs et acheteurs et leur impact sur le fonctionnement des marchés. Il montre que lorsque les vendeurs disposent d'une information supérieure sur la qualité des biens échangés, les acheteurs, incapables de distinguer les bons produits des mauvais, ne sont prêts à payer qu'un prix moyen. Ce mécanisme conduit les vendeurs de biens de qualité à se retirer du marché, provoquant une sélection adverse qui peut, dans les cas extrêmes, aboutir à l'effondrement total du marché.

Dans ce système, l'entreprise est le plus souvent juge et partie puisqu'elle produit, sélectionne et consolide les informations censées évaluer son propre impact sur les systèmes socio-écologiques.

La nature majoritairement volontaire de ces *reportings* a longtemps créé une pression structurelle incitant les entreprises à « *ne divulguer que des informations positives*⁶⁴ » ou ne partager que des succès. Une multinationale de l'agroalimentaire peut ainsi mettre en avant la plantation de 10 000 arbres tout en omettant de déclarer le stress hydrique sévère causé par ses prélèvements d'eau dans la même région. Cette opacité originelle, où l'évaluateur dépend des informations fournies par l'évalué, limite structurellement la capacité des marchés à allouer le capital de manière efficiente.



L'affaire **DWS Group** illustre parfaitement ce mécanisme. DWS Group est la filiale de gestion d'actifs de Deutsche Bank, cotée en bourse depuis 2018 et soumise aux obligations déclaratives les plus strictes de la finance institutionnelle européenne. Dans son rapport annuel 2020, le groupe déclare que 459 milliards d'euros de ses encours sous gestion intègrent des critères environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG).

Cette auto-déclaration n'est pas périphérique dans la stratégie du groupe mais constitue le fondement même de son positionnement commercial, attirant ainsi des mandats institutionnels soucieux d'alignement ESG et justifiant des frais de gestion supérieurs à ceux des fonds conventionnels. L'investisseur qui souscrit à un fonds labellisé durable de DWS n'a toutefois, dans cette configuration, aucun accès aux processus internes du gestionnaire et doit s'en remettre aux seules

⁶³ Akerlof, G. (1970). The Market for "Lemons": Quality Uncertainty and the Market Mechanism », Quarterly Journal of Economics, vol. 84, no 3, p. 488-500

⁶⁴ Becquey, P., Boric, N., & Clerc, P. (2021). Définition de la finance à impact. Finance for Tomorrow. <https://institutdelafinancedurable.com/wp-content/uploads/2023/09/Finance-for-Tomorrow-Definition-de-la-finance-a-impact-Septembre-2021-5.pdf>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

déclarations de l'entreprise. Or, en août 2021, Desiree Fixler, ancienne directrice développement durable du groupe, révèle publiquement que la réalité opérationnelle interne diverge substantiellement des chiffres communiqués : une fraction seulement des actifs déclarés fait l'objet d'une analyse ESG substantielle, et les outils de *scoring* utilisés en interne sont insuffisants pour étayer les volumes affichés. La *Securities and Exchange Commission* (SEC) américaine et le *Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht* (BaFin) ouvrent des enquêtes parallèles. En septembre 2023, DWS accepte une amende de 19 millions d'euros sans admettre ni contester les faits⁶⁵. Ce qu'illustre cet épisode n'est pas une fraude spectaculaire mais quelque chose de plus structurel : un gestionnaire qui opère dans le cadre des règles déclaratives en vigueur peut, légalement, afficher une performance ESG que ses propres processus internes ne justifient pas. La règle du jeu autorise cette distance entre la promesse et la réalité.

Le contrôle de ces déclarations se heurte à des limites opérationnelles tout aussi profondes. La vérification repose généralement sur des audits manuels, réalisés *a posteriori*, sur une base le plus souvent annuelle, par des tiers de confiance centralisés. Ces audits se concentrent fréquemment sur l'existence de processus internes comme la mise en place d'une politique de responsabilité sociétale des entreprises (RSE) ou l'adoption d'indicateurs de suivi, plutôt que sur la réalité tangible et continue de l'impact généré sur le terrain.

Il en résulte une incapacité chronique à garantir que la donnée produite est à la fois crédible, précise et complète.

Cette fragilité est redoublée par le verrou économique du « coût de la confiance ». Dans l'architecture financière actuelle, la certification de l'impact se heurte à la barrière structurelle du coût élevé de la vérification. L'établissement d'une preuve d'impact repose aujourd'hui sur des audits humains tiers, des processus manuels longs et des certifications onéreuses. Cette « taxe sur la confiance » crée une exclusion de fait parce qu'elle rend les petits projets locaux ou communautaires économiquement inéligibles à la finance à impact, car les frais d'audit dépassent souvent la valeur des bénéfices générés. C'est ici que l'ingénierie des protocoles blockchain devient une solution originale puisqu'elle automatise la preuve par le code et les données, et réduit drastiquement le coût unitaire de la preuve.

Selon une analyse de Reed Smith LLP citant une enquête menée en 2023 par BNP Paribas auprès de 420 investisseurs institutionnels, 71 % d'entre eux considèrent que « *les données incohérentes et incomplètes constituent le principal obstacle à l'investissement respectant les critères environnement, social, gouvernance (ESG)* »⁶⁶. La multiplication des agences de notation extra-financière aggrave ce tableau. En l'absence de standardisation sémantique mondiale, les méthodologies d'évaluation divergent considérablement d'un acteur à l'autre, rendant la comparaison entre entreprises particulièrement hasardeuse. Des résultats en apparence très favorables peuvent découler de jeux de données peu

⁶⁵ BaFin. (2023, 25 septembre). *BaFin imposes fine of EUR 19 million on DWS Investment GmbH* [Communiqué de presse]. Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht. https://www.bafin.de/SharedDocs/Veroeffentlichungen/EN/Pressemitteilung/2023/pm_230925_DWS_en.html

⁶⁶ ESG Ratings – the challenges of comparison and reliability, Reed Smith LLP, 4 July 2024 <https://www.reedsmith.com/our-insights/blogs/structure-d-finance-in-brief/102k6lq/esg-ratings-the-challenges-of-comparison-and-reliability/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

granulaires ou de conventions de calcul divergentes, sans que l'investisseur dispose des moyens de le détecter. Cette fragmentation limite fortement la capacité des marchés à orienter les capitaux vers les projets véritablement transformateurs et peine à résorber l'écart, souvent béant, entre l'ambition affichée par les directions générales – qui s'engagent sur des objectifs de neutralité carbone voire de régénération – et la réalité opérationnelle de leurs chaînes de valeur mondialisées.

De nouveaux cadres réglementaires tentent de corriger ces défaillances. La directive européenne sur le reporting de durabilité des entreprises, la *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD), exige désormais des preuves documentées et soumet les déclarations à des vérifications par des tiers accrédités. Mais le goulot d'étranglement de la vérification manuelle, l'opacité des chaînes d'approvisionnement et le coût croissant de l'audit demeurent des enjeux systémiques que la réglementation seule ne résout pas. C'est précisément cette asymétrie que les nouvelles architectures numériques de mesure, de reporting et de vérification – le *digital Measurement, Reporting and Verification* (dMRV) – tentent aujourd'hui de résoudre par l'automatisation de la preuve, comme nous l'examinerons dans la section 2.1.

[E] De la donnée ESG à la donnée d'impact, un saut de complexité

Pour bien comprendre la crise de l'auto-déclaration, il est nécessaire de différencier la donnée environnement, social, gouvernance (ESG) classique de la donnée d'impact. Sur le papier, le type d'information brute ne varie pas nécessairement entre les deux approches. Par exemple, les tonnes d'équivalent CO₂ émises ou les litres d'eau consommés sont

des grandeurs identiques. Mais la contextualisation fait toute la différence. Une entreprise qui déclare avoir économisé un million de litres d'eau produit une donnée environnement, social, gouvernance (ESG). Préciser que cette économie a eu lieu dans une zone en stress hydrique extrême, qu'elle a permis de restaurer le niveau de la nappe phréatique locale, et que cet effet est mesurable et durable dans le temps transforme cette déclaration en une donnée d'impact.

La donnée d'impact ne se contente pas d'un bilan statique. Elle doit être comparable à un scénario de référence pour prouver l'additionnalité du changement, et doit permettre de suivre l'évolution temporelle de cet impact à travers son échelle, sa profondeur et sa durée. Fournir, certifier et maintenir ce niveau de preuve granulaire dépasse largement les capacités techniques et financières des reportings statiques et des audits déclaratifs actuels.

1.1.3.2 Le *greenwashing* systémique, crise de confiance et marché de dupes

Cette asymétrie d'information, couplée à une absence de vérification continue et indépendante, n'a pas seulement produit des données imparfaites. Elle a transformé certains instruments phares de la transition écologique en symptômes d'un *greenwashing* et d'un *social washing* endémiques. Loin d'être des anomalies isolées imputables à des acteurs de mauvaise foi, ces dérives sont le produit direct d'une infrastructure centralisée structurellement faillible. Et elles frappent avec une intensité d'autant plus grande que l'instrument se situe vers le pôle régénératif du continuum présenté en 1.1.1, puisque c'est précisément là que les exigences probatoires sont les plus élevées et les moins vérifiables.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Pour comprendre les défaillances du marché volontaire des crédits carbone, il faut remonter à sa genèse institutionnelle. Le protocole de Kyoto, signé en 1997 lors de la troisième conférence des parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et entré en vigueur en 2005, reposait sur l'idée fondatrice d'internaliser le coût de la pollution dans l'économie mondiale en instaurant une responsabilité partagée entre États face au changement climatique. Pour y parvenir, le protocole crée notamment le Mécanisme de Développement Propre (MDP), qui permet aux pays industrialisés de financer des projets de réduction d'émissions dans les pays en développement et d'en comptabiliser les réductions dans leurs propres engagements. Il pose ainsi les fondements conceptuels du crédit carbone, une unité représentant la réduction ou l'évitement d'une tonne équivalent CO₂, échangeable sur un marché.

C'est sur ce socle que se développe, à partir des années 2000, le marché volontaire des crédits carbone, distinct du marché réglementaire mais héritant de la même logique de compensation. Des organismes de certification privés, au premier rang desquels Verra⁶⁷, se constituent pour évaluer et valider les projets. Ce dispositif semblait élégant, car il devait permettre de mobiliser des financements privés vers des projets climatiques dans les pays du Sud, tout en offrant aux entreprises des pays du Nord un mécanisme de neutralisation de leurs émissions résiduelles.

Mais en confiant le soin de certifier les projets à des organismes dont l'indépendance vis-à-vis des parties qu'ils évaluent n'est pas structurellement garantie, le système a reproduit le même écueil que le *reporting*

extra-financier classique : l'évaluateur dépend des informations fournies par l'évalué. Ce défaut d'architecture n'est pas propre aux acteurs privés. Le Mécanisme de Développement Propre (MDP), créé par le Protocole de Kyoto et supervisé par un Conseil exécutif placé sous l'autorité de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques⁶⁸ (CCNUCC), en offre l'illustration. Malgré sa nature intergouvernementale, il a été largement discrédité pour avoir validé des projets dont l'additionnalité était fictive, les gouvernements des pays hôtes ayant un intérêt économique direct à l'approbation des dossiers soumis sur leur territoire⁶⁹. La question n'est donc pas de savoir si le contrôleur est privé ou public, mais si son indépendance vis-à-vis du contrôlé est institutionnellement protégée, une condition que ni Verra ni le MDP n'ont su garantir. La question n'est pas de savoir si le contrôleur est privé ou public, mais si son indépendance vis-à-vis du contrôlé est institutionnellement protégée – ce que ni Verra ni les dispositifs réglementaires existants ne garantissent pleinement.

Ce marché fait depuis longtemps l'objet de critiques étayées. Des analyses récentes montrent que ces mécanismes peuvent retarder la baisse réelle des émissions en offrant aux entreprises un moyen de continuer à polluer sans réduire leurs émissions à la source, ce que le réalisateur Martin Voill qualifie de « *véritable marché de dupes* » dans son documentaire Neutralité carbone, le grand mensonge⁷⁰.

⁶⁸ Qu'est-ce que la CCNUCC, la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques? <https://unfccc.int/fr/processus-et-reunions/qu-est-ce-qu-e-la-ccnucc-la-convention-cadre-des-nations-unies-sur-les-changements-climatiques>

⁶⁹ Schneider, L. (2009). Assessing the additionality of CDM projects: practical experiences and lessons learned. *Climate Policy*, 9(3), 242–254. <https://doi.org/10.3763/cpol.2008.0533>

⁷⁰ Voill, M. (Réalisateur). (2024). Neutralité carbone, le grand mensonge [Film documentaire]. ARTE.tv

⁶⁷ Verified Carbon Standard <https://verra.org>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Une étude systématique publiée dans *Nature Communications* en 2024⁷¹, portant sur 2 346 projets et couvrant près d'un milliard de tonnes de CO₂ équivalent, a établi que moins de 16 % des crédits émis correspondent à des réductions réelles d'émissions. Cette conclusion recoupe les résultats d'une enquête menée conjointement par *The Guardian*, *Die Zeit* et *SourceMaterial*⁷², étayée par trois études scientifiques indépendantes, qui a établi que plus de 90 % des crédits forêts tropicales certifiés par Verra, le principal certificateur mondial qui approuve les trois quarts des compensations volontaires, sont très probablement des « crédits fantômes » ne correspondant à aucune réduction réelle d'émissions, conclusions que Verra conteste.

Le mécanisme en cause mérite d'être explicité, car il illustre la fragilité structurelle de tout système fondé sur le déclaratif. La création d'un crédit carbone de type « déforestation évitée » repose sur une simulation, l'estimation de la déforestation qui aurait eu lieu en l'absence du projet, ce que les praticiens appellent le scénario de référence. Or le choix de la zone de référence est le plus souvent laissé à l'appréciation des porteurs de projets eux-mêmes. En sélectionnant des zones où la déforestation historique est particulièrement forte pour les comparer à leur zone de protection, ces porteurs peuvent artificiellement gonfler le volume de CO₂ prétendument « sauvé » et ainsi émettre davantage de crédits générateurs de

revenus⁷³. Un système d'évaluation opaque, fondé sur du déclaratif et des modèles hypothétiques, peut ainsi légalement certifier un impact environnemental quasi nul. En l'absence de traçabilité immuable, des problèmes de double comptage et d'opacité des flux financiers privent en outre souvent les communautés locales des revenus censés leur revenir.

Sur le plan social, la microfinance traditionnelle offre un parallèle saisissant. Fondée par Muhammad Yunus (Prix Nobel de la Paix 2006) et la Grameen Bank avec l'ambition de briser le cycle de la pauvreté en prêtant sans garanties aux populations exclues du système bancaire, elle a progressivement souffert d'une profonde dérive de mission⁷⁴. Les lourdeurs administratives des institutions centralisées, conjuguées à la recherche de rentabilité, ont engendré des coûts opérationnels si élevés qu'ils se sont traduits par des taux d'intérêt parfois usuraires appliqués aux emprunteurs les plus vulnérables. Accompagnées de pratiques de recouvrement coercitives, ces dérives ont conduit à des tragédies sociales bien documentées, dont le surendettement fatal de milliers de fermiers en Inde⁷⁵.

Ces deux exemples convergent vers un même enseignement : la défaillance n'est pas seulement une question de régulation, mais d'architecture.

⁷¹ Probst, B. S., Toetzke, M., Kontoleon, A., Díaz Anadón, L., Minx, J. C., Haya, B. K., Schneider, L., Trotter, P. A., West, T. A. P., Gill-Wiehl, A., & Hoffmann, V. H. (2024). Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects. *Nature Communications*, 15, 9562. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53645-z>

⁷² Greenfield, P. (2023, 18 janvier). Revealed: more than 90% of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoc>

⁷³ Voill, M. (Réalisateur). (2024). Neutralité carbone, le grand mensonge [Film documentaire]. ARTE.tv

⁷⁴ Mersland, R., & Strøm, R. Ø. (2010). Microfinance mission drift? *World Development*, 38(1), 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.05.006> ; Acclassato, D.-H. (2008).

Les plafonnements de taux d'intérêt en microfinance servent-ils réellement les pauvres et petits opérateurs économiques ? *Mondes en développement*, 141(1), 93–109. <https://doi.org/10.3917/med.141.0093>

⁷⁵ Knowledge at Wharton. (2012, 18 juillet). The dark side of microfinance: An industry where the poor play 'cameo roles'. University of Pennsylvania. <https://knowledge.wharton.upenn.edu/podcast/knowledge-at-wharton-podcast/the-dark-side-of-microfinance-an-industry-where-the-poor-play-cameo-roles/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Tant que la preuve de l'impact repose sur la déclaration et l'intermédiation opaque, elle reste exposée à la capture.

Des réponses émergent à la marge de l'écosystème numérique décentralisé. **Initiativ / InEx**⁷⁶, plateforme d'accès aux marchés de quotas d'émissions réglementés, oppose à l'opacité chronique des marchés carbone des journaux d'audit *on-chain** immuables, une tarification transparente sans frais cachés et un règlement le jour même, rendant le marché des quotas aussi lisible qu'un marché boursier réglementé. Dans un registre complémentaire, **Inuk**⁷⁷ impose à ses clients un « KYC Carbone » destiné à s'assurer que les crédits carbone s'intègrent dans un plan de décarbonation global et documenté, et non dans une logique de compensation déconnectée de toute réduction à la source. Ces dispositifs n'éliminent pas le risque de *greenwashing* systémique - ils en déplacent le périmètre, de l'opacité déclarative vers la vérifiabilité technique, dont les limites seront examinées dans la section 2.2.

[E] La dérive des intentions et le défi de l'immunité systémique

L'histoire de la finance à impact révèle une tendance récurrente : des instruments initialement fondés sur une philosophie profondément positive finissent par s'écarter de leur mission première. Ce phénomène de « dérive de mission » n'est pas le fruit du hasard mais la conséquence d'une opacité structurelle. Il soulève une question d'architecture que ni la réglementation ni la bonne volonté des acteurs ne suffisent à résoudre seules.

Le protocole de Kyoto reposait sur l'idée d'une responsabilité partagée face au

changement climatique et visait à internaliser le coût de la pollution dans l'économie mondiale. La microfinance, fondée sur le principe du crédit sans garantie aux plus vulnérables, cherchait à briser le cycle de la pauvreté par l'accès direct au capital. Dans les deux cas, l'intention originelle était solide – et dans les deux cas, l'absence d'une architecture de vérification indépendante et continue a permis une dérive progressive vers des logiques contraires à la mission initiale.

Ce que ces trajectoires enseignent, c'est qu'un système d'impact ne peut reposer durablement sur la confiance accordée à ses opérateurs. Il doit être conçu de telle sorte que la transparence soit structurelle, et non déclarative – ce qui pose les fondements de la question que ce rapport explore dans sa deuxième partie.

La question n'est pas seulement de savoir quoi financer, mais comment concevoir des systèmes où la vérifiabilité des données remplace la confiance accordée aux institutions, sans pour autant supposer que la technologie suffise à résoudre des problèmes qui sont d'abord politiques. C'est précisément cette question qui structure la deuxième partie de ce rapport.

⁷⁶ <https://www.takeinitativ.com/>

⁷⁷ <https://inuk.co/>

1.2 Les nouvelles infrastructures financières du Web3

La première partie de ce rapport a montré pourquoi les instruments de la finance responsable – de l'investissement socialement responsable (ISR) à la finance à impact – n'ont pas tenu leur promesse de transparence et de vérifiabilité. La difficulté n'est pas d'abord un problème de régulation ou de mauvaise volonté des acteurs mais un problème d'architecture. Tant que la preuve de l'impact repose sur la déclaration, l'audit discontinu et la confiance accordée à des intermédiaires centralisés, elle reste exposée à la capture, qu'il s'agisse du *greenwashing* des crédits carbone ou de la dérive de mission des institutions de microfinance.

C'est dans cet espace, celui de la vérification, de la transparence et de la désintermédiation, que s'inscrivent les nouvelles infrastructures numériques construites sur les Technologies de registre distribué (DLT*). Cette section en examine trois applications distinctes, dont aucune ne constitue une solution en soi, mais dont chacune reconfigure une contrainte structurelle identifiée auparavant.

La première est un mouvement au sein de la Finance décentralisée (DeFi*) qui cherche à mobiliser les propriétés des registres distribués, et notamment l'immutabilité, la transparence, et l'automatisation par *smart contracts**, au service de projets à impact environnemental et social mesurable, voire à des projets régénératifs. La seconde est la tokenisation des actifs réels et du capital naturel, qui transforme des droits de propriété sur des actifs physiques, comme des crédits carbone, des crédits de biodiversité, en instruments numériques liquides, traçables et uniques, leur empêchant d'être comptés plus d'une seule fois. La troisième est la Micro-finance Décentralisée (Micro-DeFi*), qui connecte directement des emprunteurs non bancarisés à des réservoirs de liquidité mondiaux, en substituant au suivi personnalisé de terrain, coûteux et difficilement

extensible⁷⁸, des mécanismes d'évaluation et de remboursement automatisés.

Ces trois applications partagent une limite commune, que les sections suivantes s'attacheront à ne pas occulter car elles déplacent les problèmes structurels de la finance à impact plus qu'elles ne les suppriment. La qualité de la donnée inscrite sur la chaîne dépend de la rigueur des mécanismes de vérification qui la précèdent. La désintermédiation radicale reste une promesse théorique lorsqu'elle est confrontée aux réalités des contextes juridiques fragiles et des populations sans accès numérique. Et la gouvernance des protocoles décentralisés peut reconstituer, sous d'autres formes, les asymétries de pouvoir qu'elle prétend supprimer. Ces tensions seront au cœur de la deuxième partie de ce rapport.

1.2.1 L'émergence de la ReFi* au sein de la Finance Décentralisée

La Finance décentralisée (DeFi*, *Decentralized Finance*) est née d'une rupture technologique, l'invention des *smart contracts** sur la blockchain publique Ethereum en 2015, qui a rendu possible la construction de services financiers sans intermédiaires institutionnels. Mais dans sa première itération dominante, cet écosystème est resté profondément auto-référentiel. Des capitaux y circulaient pour y générer des rendements sur d'autres capitaux, sans ancrage dans l'économie réelle.

C'est en réaction à cette hyper financiarisation qu'émerge au sein du Web3*, à partir de 2021, le mouvement dit de la Finance régénérative, en anglais *Regenerative Finance*, ReFi*,

⁷⁸ Le modèle dit "high touch", jargon propre aux métiers du conseil et des services financiers, désigne un modèle qui repose sur un contact humain intensif et personnalisé entre l'institution et le client, par opposition à un modèle automatisé. Dans la microfinance traditionnelle, cela désigne concrètement les agents de terrain qui rendent visite aux emprunteurs, évaluent leur situation, accompagnent le remboursement et gèrent les incidents. C'est ce qui rend la microfinance traditionnelle à la fois efficace socialement et coûteuse opérationnellement.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

dont l'ambition est d'orienter les liquidités de la Finance décentralisée (DeFi*) vers des projets présentés comme régénératifs, bien que la plupart ne le soient pas vraiment⁷⁹. Cette section examine d'abord les fondements technologiques qui rendent cette ambition structurellement possible – registre public, immuabilité, désintermédiation par *smart contracts** –, puis la fracture interne qui traverse le mouvement entre une Finance régénérative (ReFi)* orientée vers la financiarisation des actifs naturels et une Finance régénérative (ReFi)* ancrée dans les territoires et les communautés.

1.2.1.1 Un registre public de confiance

Les défaillances analysées dans la section précédente, le modèle déclaratif, l'opacité des chaînes de certification, l'incapacité à garantir la continuité et l'intégrité de la donnée, ne sont pas d'abord le produit de la mauvaise volonté des acteurs. Elles tiennent grandement à l'architecture même des systèmes centralisés sur lesquels repose l'évaluation de l'impact. Ces systèmes désignent des bases de données privées, contrôlées par l'entité évaluée, des audits discontinus conduits par des tiers accrédités qui demeurent eux-mêmes sujets aux mêmes limites structurelles ; et une confiance accordée, faute de mieux, à des intermédiaires dont la probité ne peut être vérifiée qu'en leur faisant confiance. La question tient d'abord à l'architecture du système : **peut-on concevoir des systèmes dans lesquels la preuve de l'impact cesserait d'être une déclaration pour devenir une trace vérifiable par tout acteur, en tout temps ?**

C'est dans ce cadre que s'inscrit les Technologies de registre distribués (DLT*). Le 31 octobre 2008, sous le pseudonyme de Satoshi Nakamoto, est publié le livre blanc fondateur du réseau Bitcoin⁸⁰, dont le premier

bloc est généré le 3 janvier 2009. Là où la finance traditionnelle repose sur des bases de données privées et cloisonnées détenues par des autorités centrales uniques, banques commerciales, banques centrales ou chambres de compensation, une blockchain publique est un registre ouvert, partagé et synchronisé en temps réel sur un réseau mondial d'ordinateurs fonctionnant en pair-à-pair. Aucun acteur unique n'en détient le contrôle et chaque participant du réseau en conserve une copie intégrale, la validation de chaque nouvelle inscription étant assurée par un mécanisme de consensus algorithmique, c'est-à-dire par l'accord automatique d'une majorité des nœuds du réseau⁸¹.

La proposition de valeur fondamentale de cette architecture repose sur deux propriétés complémentaires.

La première est la **transparence native** puisque sur une blockchain publique, l'intégralité de l'historique des transactions est accessible à tout acteur disposant d'une connexion internet, sans autorisation préalable, notamment *via* des outils de consultation publique appelés « explorateurs de blocs* »⁸².

La seconde est l'**immutabilité**, c'est-à-dire que chaque transaction est horodatée, validée par le mécanisme de consensus, puis scellée par la cryptographie dans un « bloc » mathématiquement relié au précédent, formant une chaîne continue. Une fois une donnée inscrite et validée par le réseau, elle ne peut plus être altérée, falsifiée ou effacée rétroactivement sans que l'ensemble des participants ne le détecte.

⁸¹ *Ibid.*

⁸² Un explorateur de blocs* est un outil en ligne permettant de visualiser, suivre et vérifier en temps réel l'intégralité des activités enregistrées sur un registre distribué. Mempool.space (<https://mempool.space>) remplit ce rôle pour le réseau Bitcoin ; Etherscan (<https://etherscan.io>) pour la blockchain Ethereum.

⁷⁹ Bennett, K. (2025b). An evaluation of the regenerative claims of Web3's ReFi* movement. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1564083. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1564083>

⁸⁰ Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin : A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Des chercheurs comme Primavera De Filippi, Morshed Mannan et Wessel Reijers ont conceptualisé en 2020 ce dispositif comme une « machine à confiance⁸³ » (*confidence machine*), en ce qu'il est structurellement capable de suppléer aux défaillances de contrôle des institutions humaines.

Ces deux propriétés produisent une conséquence directe sur la question de l'audit : tout acteur, tout investisseur, tout régulateur ou tout citoyen peut vérifier publiquement et en continu l'intégralité de l'historique des flux inscrits sur ce registre distribué. Cette auditabilité permanente et non permissionnée contraste structurellement avec le modèle de l'audit classique, réalisé *a posteriori*, sur échantillon, par un tiers accrédité dont la crédibilité n'est elle-même vérifiable qu'en recourant à d'autres tiers. C'est sur ce socle qu'opèrent les nouveaux outils numériques de mesure, de reporting et de vérification – les dMRV* (*digital Measurement, Reporting and Verification*) – que nous examinerons dans la section 2.1.



Celo⁸⁴ illustre concrètement ce que signifie une blockchain publique accessible depuis un téléphone d'entrée de gamme dans un pays émergent. Initialement déployée comme blockchain indépendante optimisée pour les téléphones portables, **Celo** a migré en 2024 vers une architecture de Layer 2* sécurisée par Ethereum, réduisant ses frais de bloc à moins de 0,001 dollar par transaction, soit un coût inférieur à celui d'un SMS. Cette infrastructure est devenue l'épine dorsale de dizaines de projets à impact : **GoodDollar** (revenu universel de base *on-chain**), Haraka (micro-crédit de groupe pour PME

africaines), **Grassroots Economics** (monnaies communautaires au Kenya), **MiniPay** (portefeuille mobile pour les marchés émergents, 8 millions de wallets* activés à fin 2025). Sa compatibilité native avec les stablecoins USDT et USDC, et son intégration à l'oracle* **Chainlink**, en font une infrastructure polyvalente qui permet à un agriculteur kenyan d'accéder depuis son téléphone Android au même registre vérifiable que celui utilisé par un gestionnaire d'actifs institutionnel. **Mento Labs** opère le protocole monétaire décentralisé de la blockchain **Celo**, émettant une famille de *stablecoins**, cUSD, cEUR, cREAL et plusieurs devises africaines, indexés sur des monnaies fiduciaires. La singularité analytique de ce dispositif tient à son mécanisme de réserve : la *Mento Reserve*⁸⁵ est sur-collatéralisée à hauteur d'environ 1,4 fois ses émissions de stablecoin par des actifs consultables *on-chain** en temps réel par tout acteur disposant d'une connexion internet.

Ce modèle illustre « l'auditabilité permanente et non permissionnée » que rend possible un registre distribué public et s'applique en l'occurrence à un mécanisme de politique monétaire habituellement opaque. Dans un système bancaire traditionnel, la vérification de l'adéquation des réserves d'une banque centrale ou commerciale nécessite un audit institutionnel accrédité, conduit *a posteriori* et sur échantillon. Sur la *Mento Reserve*, cette vérification est permanente, automatique et accessible à tout tiers, investisseur, régulateur ou citoyen, et sans autorisation préalable ni intermédiaire de confiance.

⁸³ De Filippi, P., Mannan, M., & Reijers, W. (2020).

Blockchain as a confidence machine: The problem of trust & challenges of governance. *Technology in Society*, 62, 101284. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101284>

⁸⁴ <https://docs.celo.org/legacy/overview>

⁸⁵ <https://reserve.mento.org/> et <https://www.mento.org>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Une seconde évolution significative intervient en 2015 avec le lancement du réseau Ethereum, dont les spécifications techniques avaient été formalisées par Gavin Wood en 2014⁸⁶. Cette nouvelle génération de blockchain introduit les *smart contracts**, que Vitalik Buterin qualifie plutôt de « scripts persistants », et qui sont des programmes informatiques autonomes où les termes d'un accord sont directement écrits dans le code informatique. Ces programmes s'activent automatiquement lorsque des conditions prédéfinies sont remplies, sans nécessiter d'intervention humaine ni d'intermédiaire chargé d'en constater l'exécution. Dans le cadre d'un projet de reforestation, par exemple, un *smart contract** peut libérer automatiquement des fonds vers une communauté locale dès qu'une analyse satellitaire confirme que la superficie forestière a dépassé un seuil convenu, sans qu'une organisation mandataire soit requise pour valider le constat.

L'association d'un registre public distribué et de ces *smart contracts** produit un effet structurel sur les coûts et la forme de l'intermédiation. Historiquement, un transfert de valeur ou l'exécution d'un accord financier exige la rémunération de multiples tiers de confiance pour assurer la vérification des soldes, la conformité réglementaire, ou encore la garantie de livraison, et qui s'interposent entre la source du financement et son destinataire. Dans l'écosystème décentralisé, ces étapes sont remplacées par des règlements dits « atomiques* », où le transfert de propriété est quasi instantané et indissociable de la condition qui le déclenche. Comme l'établissent les économistes Yan Chen et Cristiano Bellavitis dans une étude de 2020, cette architecture peut « *réduire les coûts de transaction, rendre les plateformes décentralisées plus faciles à utiliser et favoriser la confiance distribuée, jetant ainsi les bases de nouveaux modèles*

commerciaux »⁸⁷. C'est cette propriété qui ouvre structurellement la voie à de nouveaux modèles d'inclusion financière à coût réduit, comme la Micro-DeFi* que nous explorerons dans la section 1.2.3.

[E] Le paradoxe du concept *trustless*, la confiance sans intermédiaire

Les infrastructures décentralisées sont fréquemment décrites par leurs concepteurs comme des systèmes *trustless* – terme anglais signifiant littéralement « sans confiance ». Comme l'ont analysé les chercheurs Miscione et Kavanagh dès 2015, les premiers architectes du Web3 insistaient sur cette qualification pour souligner que le système « *ne s'appuie pas sur des intermédiaires centraux de confiance* »⁸⁸. Le terme est néanmoins paradoxal car la confiance ne disparaît pas de la transaction mais change de cible. Les économistes Christian Catalini et Joshua S. Gans expliquent qu'avec l'avènement des blockchains, la confiance se déplace d'une entité centrale faillible vers « *des règles de code et de consensus* »⁸⁹. L'utilisateur n'a plus à supposer la probité d'une banque ou d'une agence de notation ; il doit en revanche accorder sa confiance à la robustesse mathématique de la cryptographie et au code d'un *smart contract**. Et puisque ce code est, dans les systèmes publics, « *ouvert et transparent pour que quiconque puisse l'examiner* », la confiance repose désormais sur la vérifiabilité permanente plutôt que sur la

⁸⁶ Wood, G. (2014). Ethereum : A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger. Ethereum Project Yellow Paper. <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>

⁸⁷ Chen, Y., & Bellavitis, C. (2020). Blockchain disruption and decentralized finance: The rise of decentralized business models. *Journal of Business Venturing Insights*, 13, e00151. <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2019.e00151>

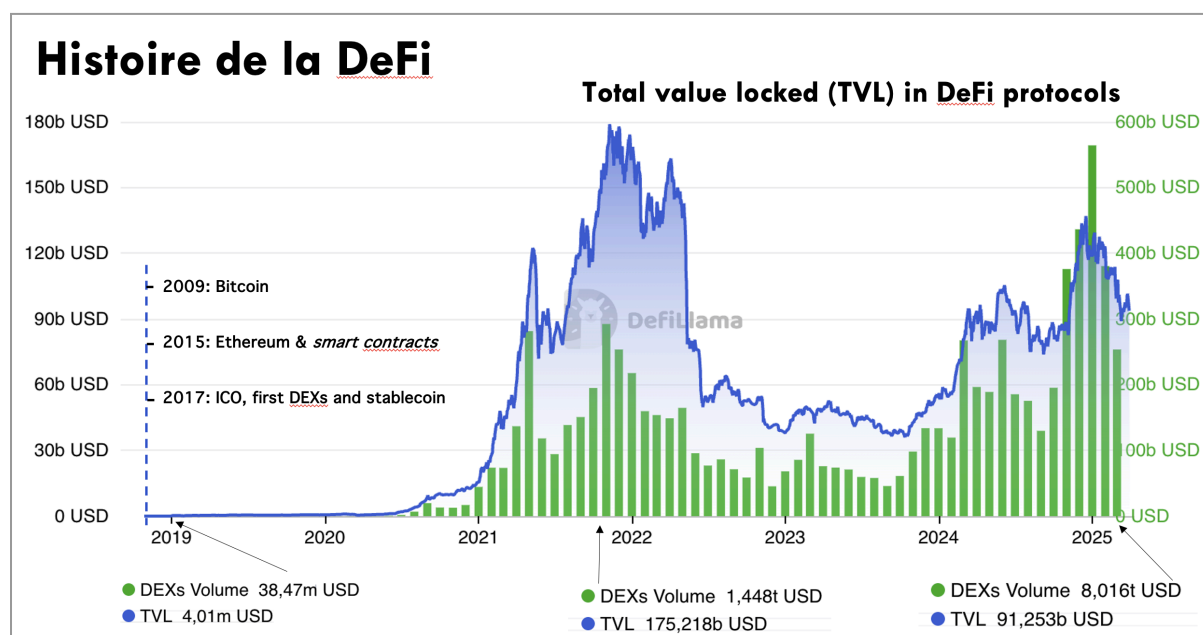
⁸⁸ Kavanagh, D., & Miscione, G. (2015). Bitcoin and the blockchain: A coup d'état through digital heterotopia? Communication présentée à la Critical Management Studies Conference, Leicester. SSRN Working Paper. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2624922

⁸⁹ Catalini, C., & Gans, J. S. (2020). Some simple economics of the blockchain. *Communications of the ACM*, 63(7), 80–90. <https://doi.org/10.1145/3359552>

réputation d'un intermédiaire. Ce déplacement n'est pas sans conséquence. Si le code contient une erreur, une faille ou une logique mal alignée sur les objectifs attendus, l'automatisation garantit que cette défaillance s'appliquera avec la même rigueur et la même immuabilité que toute règle correctement formulée. La confiance *trustless* n'est donc pas l'absence de confiance : c'est le transfert de cette confiance vers un objet différent, vérifiable, mais non infaillible – ce que nous retrouverons dans l'analyse du risque garbage in, garbage out à la section 2.2.1.

1.2.1.2 De la Finance décentralisée (DeFi) spéculative à celle régénérative

Les propriétés décrites dans la section précédente – transparence, immuabilité, exécution automatique *via smart contracts** – ont d'abord servi de substrat à une infrastructure financière d'un genre nouveau, désignée sous l'acronyme DeFi* pour *Decentralized Finance*, finance décentralisée. La DeFi* désigne l'ensemble des services financiers – prêts, emprunts, échanges d'actifs, gestion de liquidité – construits *via des smart contracts** sur des blockchains publiques, sans recours à des intermédiaires institutionnels. Ces services sont accessibles, avec une connexion au réseau internet, à tout détenteur d'un portefeuille numérique, sans ouverture de compte ni vérification d'identité préalable.



[I] Une courte histoire de la Finance décentralisée (DeFi)

Source⁹⁰

L'écosystème, encore très immature, s'est constitué autour de trois jalons techniques successifs. Bitcoin, dont la genèse a été décrite précédemment, a posé le principe d'une monnaie numérique pair-à-pair, émise sans banque centrale. Ethereum, lancé en 2015, a ajouté la programmabilité nécessaire aux applications financières complexes.

⁹⁰ <https://defillama.com/> et Blockchain for Good.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Le DAI de **MakerDAO**, premier *stablecoin* décentralisé créé en 2017 et indexé sur le dollar américain sans émetteur central, a fourni une unité de compte stable servant de fondation aux premières applications de prêt et d'épargne décentralisées.

La croissance de cet écosystème a été rapide et quantitativement significative. La valeur totale déposée dans les protocoles DeFi* (Total Value Locked, TVL) est passée de quelques millions de dollars en 2019 à près de 180 milliards au pic de 2021, avant de se contracter à environ 91 milliards en 2025.

Cette montée en puissance a cependant mis en lumière une limite structurelle de la DeFi* dans sa première itération dominante : celle d'un écosystème profondément auto-référentiel. Les capitaux entraient dans le système pour y générer des rendements sur d'autres capitaux, dans des cycles dont la valeur reposait davantage sur l'afflux continu de nouveaux participants que sur la création de valeur productive. Raphaël Haupt, dans une analyse publiée par Curve Labs en 2022, décrit cet écosystème comme conçu *a priori* pour « l'optimisation des rendements financiers sans ancrage dans des activités réelles », et souligne que la « ReFi* » devra rompre avec cette logique pour tenir ses promesses⁹¹. C'est en effet dans ce contexte qu'émerge, à partir de 2021, le mouvement de la Finance Régénérative (*Regenerative Finance*, ReFi*), avec l'ambition d'orienter les liquidités accumulées dans la DeFi* vers des projets à impact environnemental et social mesurable.

⁹¹ Haupt, R. (2022, 23 février). The Promises and Pitfalls of Regenerative Finance: Towards a Critical Yet Constructive Dialogue. Curve Labs.
<https://medium.com/m/global-identity-2?redirectUrl=https%3A%2F%2Fblog.curve.labs.eu%2Fthe-promises-and-pitfalls-of-regenerative-finance-4910f0f6f690>

Le mouvement de la ReFi* propre au Web3 cherche à combiner les propriétés structurelles de la DeFi* – transparence, programmabilité, accessibilité – avec les objectifs de la finance à impact analysés dans la première partie de ce rapport.

L'application de cette ambition a cependant rapidement révélé une fracture interne au mouvement. Lors de l'engouement médiatique de l'automne 2021, des projets tels que **Toucan Protocol**⁹² et **KlimaDAO**⁹³ ont concentré l'attention en connectant les marchés volontaires des crédits carbone à des blockchains publiques. Le mécanisme consistait à importer massivement des crédits carbone préexistants – souvent de faible valeur sur les marchés conventionnels – pour les convertir en jetons numériques, dans l'objectif de créer une liquidité mondiale et une dynamique de prix favorable.

Dans sa publication de mars 2025 dans *Frontiers in Blockchain*, la chercheuse Kate Bennett établit que ces initiatives ont suscité de vives critiques en raison de leur « focalisation sur la financiarisation et l'efficacité des marchés plutôt que sur les principes économiques régénératifs⁹⁴ ». En absorbant des crédits à bas prix, ces protocoles ont par ailleurs été accusés d'inciter à la résurrection de projets à l'impact environnemental contestable – les praticiens parlent de « projets zombies » – et à une forme de conservation forestière fictive. Dans son évaluation empirique de quarante initiatives ReFi* publiée en juin 2025, Bennett confirme ce diagnostic en établissant que la conception des protocoles détermine si ceux-ci servent la régénération ou s'ils se

⁹² <https://toucan.earth/>

⁹³ <https://www.klimaprotocol.com/>

⁹⁴ Bennett, K. (2025a). The ReFi movement in Web3: implications for the Global Commons. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1564073.
<https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1564073>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

limitent à optimiser des marchés existants sans en modifier la logique sous-jacente⁹⁵.

D'autres projets ont cherché à mobiliser les mêmes outils selon une logique différente, en partant non des marchés financiers mais des territoires. **Regen Network**⁹⁶, initié dès 2017 et dont le registre principal (*Regen Ledger*) a été lancé en 2021, s'est concentré sur la vérification *via* la blockchain de services écosystémiques réels – santé des sols, biodiversité, rétention d'eau – pour en émettre des éco-crédits adossés à des données de terrain. Contrairement aux protocoles importateurs de crédits préexistants, **Regen Network** a construit sa propre chaîne de vérification, s'appuyant sur un réseau de scientifiques et d'écologues chargés de garantir que les métriques utilisées sont « crédibles et régionalement pertinentes ».

Sur le plan de la gouvernance, la Fondation Regen a développé des structures de type Organisation Autonome Décentralisée biorégionale (*Bioregional Steward Decentralized Autonomous Organizations*), associant des communautés locales et autochtones à la gestion des territoires concernés, dans une démarche explicitement conçue pour contrer le risque d'accaparement foncier désigné dans la littérature sous le terme de *green grabbing*.

Dans une veine comparable, le protocole **Kolektivo**⁹⁷, déployé à partir de 2019 sur la blockchain **Celo**⁹⁸, a développé des outils permettant aux communautés locales de créer et de gérer des économies circulaires ancrées dans leurs territoires, en combinant monnaies communautaires et mécanismes d'incitation économique définis à l'échelle locale – ce que

ses concepteurs désignent sous l'expression *place-based tokenomics* (économie des jetons fondée sur le territoire).

D'autres initiatives ont emprunté une voie différente encore, en mobilisant non les actifs naturels mais les rendements financiers de la *DeFi** comme vecteur d'impact. **Glo Dollar**⁹⁹ est un *stablecoin* dont le seigniorage – c'est-à-dire le rendement généré par les réserves investies – est intégralement et automatiquement reversé à des programmes de lutte contre la pauvreté extrême, sans friction supplémentaire pour l'utilisateur : le simple fait de détenir ce *stablecoin* génère un impact social mesurable. **GoodDollar**¹⁰⁰ applique une logique voisine à l'échelle d'un revenu universel de base décentralisé : les rendements des réserves investies dans des protocoles de prêt (**AAVE**¹⁰¹, **Compound**) alimentent automatiquement une distribution quotidienne de G\$ à plus de 500 000 bénéficiaires dans les économies émergentes, sans intermédiaire de redistribution. Ces modèles ne tokenisent pas la nature mais mobilisent la mécanique des rendements de la Finance décentralisée, *DeFi**, comme substitut à un mécanisme de redistribution institutionnel.

Ces exemples illustrent que la distinction entre une Finance décentralisée, *DeFi**, orientée vers la régénération et celle simplement réorientée vers des actifs labellisés verts ne tient pas à la technologie sous-jacente, qui est en substance identique dans les deux cas, mais à l'architecture

⁹⁹ <https://www.glodollar.org>

¹⁰⁰ <https://www.gooddollar.org>

¹⁰¹ <https://aave.com/> Il convient de noter que la résilience d'Aave a été éprouvée en avril 2026 lors du hack de Kelp DAO (perte estimée à 43 millions de dollars). Bien que le code d'Aave soit resté intègre, l'attaquant a utilisé le protocole pour recycler les fonds dérobés, entraînant la formation d'une créance douteuse d'environ 4,3 millions de dollars sur le marché WETH de la version 3. Cet incident systémique a nécessité l'intervention de la gouvernance et l'activation du module de sécurité d'Aave pour couvrir les pertes sans impacter les déposants.

⁹⁵ Bennett, K. (2025b). An evaluation of the regenerative claims of Web3's ReFi movement. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1564083. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1564083>

⁹⁶ <https://www.regen.network/>

⁹⁷ <https://kolektivolabs.com/>

⁹⁸ <https://celo.org/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

des incitations et à la place accordée aux communautés dans la définition, la gouvernance et la vérification de l'impact. C'est cette distinction – entre la forme et la substance – qui sera au cœur des développements sur la tokenisation du capital naturel (section 1.2.2) et sur les risques systémiques de la ReFi* (section 2.2).

[E] Le clivage de la ReFi* – Carbon DeFi* contre Bioregional ReFi*

L'évolution du Web3 à impact a fait émerger deux approches dont les présupposés sont fondamentalement distincts.

La première, que les praticiens désignent sous le terme de Carbon DeFi* – illustrée par des protocoles comme Toucan ou **KlimaDAO** –, part du diagnostic que la crise climatique est *a priori* un problème de liquidité et d'efficacité des marchés du carbone. Sa réponse consiste à transformer les actifs naturels en unités hautement standardisées, fongibles et liquides pour les intégrer aux circuits de la finance mondiale. Ce faisant, elle risque de reproduire dans l'espace décentralisé le même écueil que celui identifié dans le marché volontaire classique des crédits carbone (section 1.1.3.2) : l'hyper-financiarisation d'un bien commun dont la valeur écologique réelle reste invérifiée à la source.

La seconde, dite Bioregional ReFi* – représentée par **Regen Network** ou **Kolektivo** –, part d'un diagnostic différent : la crise écologique est d'abord une crise des relations entre les sociétés et leurs territoires. Elle mobilise les Technologies de registre distribué (DLT*) non pour abstraire la nature en actifs négociables sur des marchés globaux, mais pour fournir des outils de comptabilité écologique et d'auto-organisation aux communautés locales. Ce courant considère que le capital naturel ne peut être dissocié de sa réalité

matérielle et territoriale, et que la technologie doit en conséquence s'articuler à la gouvernance locale plutôt que la supplanter.

La tension entre ces deux courants ne se résout pas sur le plan technique. Elle renvoie à la question, posée dès la section 1.1.2, de la finalité de l'outil financier : instrument d'optimisation de marchés existants, ou vecteur d'une transformation structurelle des rapports entre capital et territoire ? C'est cette tension que nous retrouverons dans l'analyse des risques d'hyper-financiarisation et de green grabbing à la section 2.2.

1.2.2 La tokenisation des actifs réels (RWA*) et du capital naturel

La tokenisation est le mécanisme par lequel des actifs environnementaux, comme des crédits carbone, des droits liés à la biodiversité, des certificats d'énergie renouvelable ou encore des obligations vertes sont représentés sous forme numérique pour circuler, être financés et vérifiés sur des registres distribués. La « représentabilité » de ces actifs sous forme de droits individualisables et transférables est un cadre que contestent précisément de nombreux courants régénératifs, attachés à des logiques de *stewardship* ou de communs.

La tokenisation soulève également des limites techniques propres. Appliquée au capital naturel, elle révèle deux asymétries fondamentales. La première concerne les crédits carbone : enregistrés *on-chain**, ils gagnent en traçabilité et perdent leur capacité au double comptage, mais la qualité de l'actif reste entièrement tributaire des mécanismes de vérification qui précèdent son inscription sur la chaîne. La recherche actuelle, consciente de cette limite, préconise l'intégration de mécanismes de filtrage directement au niveau du *smart contract**, sous forme d'algorithmes de réputation ou de stratégies d'analyse forensique, afin de

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

prévenir l'entrée de données redondantes, manipulées ou malveillantes sur la chaîne¹⁰². Ces garde-fous demeurent néanmoins insuffisants lorsque la falsification intervient en amont, au moment de la saisie humaine de la donnée environnementale, avant même qu'elle ne soit soumise à l'oracle*.

La seconde asymétrie concerne les crédits de biodiversité : leur hétérogénéité structurelle, car la biodiversité n'est pas fongible, pose des limites conceptuelles à toute standardisation, et *a fortiori* à toute tokenisation globale. Cette section examine ces deux dimensions et établit pourquoi la tokenisation, sans dispositifs de vérification numérique robustes, ne fait que déplacer dans un registre immuable les problèmes d'intégrité que la première partie de ce rapport a documentés.

1.2.2.1 La tokenisation : fractionnement, liquidité et interopérabilité

La Finance Régénérative (ReFi*), le mouvement propre au Web3 cherche, comme nous l'avons vu, à capter et orienter des liquidités de la finance décentralisée (DeFi*) vers des projets à impact réel. Mais pour qu'un projet de reforestation, une obligation verte ou un certificat d'énergie renouvelable puisse être financé, échangé ou suivi sur une blockchain publique, ses droits de propriété doivent d'abord être représentés sous une forme numérique compatible avec cette infrastructure. C'est la fonction que remplit la **tokenisation**. « *La tokenisation des marchés financiers est une révolution technologique aussi importante que celle connue à la fin des années 1980 lors du passage de la "corbeille" et la crie à l'informatisation des marchés financiers*¹⁰³ » explique Hubert de Vauplane, responsable de

l'activité Fintech au sein du cabinet d'avocat Morgan Lewis.

Elle désigne le processus par lequel des droits de propriété sur un actif réel sont convertis en un jeton numérique, un token, enregistré sur un registre distribué et public. Le Forum Économique Mondial, dans son rapport de mai 2025 publié avec Accenture, la définit comme le processus qui utilise « *un registre programmable pour représenter numériquement la propriété d'un actif sous un format cryptographique transférable*¹⁰⁴ ». Le spectre des actifs concernés est large : instruments financiers classiques (obligations, actions, parts de fonds), actifs réels (immobilier, matières premières), ou actifs naturels et environnementaux (crédits carbone, droits liés à la biodiversité, certificats d'énergie renouvelable).

La valeur ajoutée de cette représentation numérique tient à trois propriétés complémentaires que les praticiens et les institutions financières résument par le triptyque fractionnement, liquidité et interopérabilité. Le **fractionnement** désigne la capacité à diviser un actif en unités d'échange de faible valeur nominale, abaissant ainsi le seuil d'entrée pour les investisseurs particuliers et les acteurs de taille modeste, jusqu'alors exclus de certaines classes d'actifs par des minimums de souscription élevés. Une obligation verte émise à un million d'euros, ou un crédit carbone portant sur une parcelle forestière entière, peuvent ainsi être découpés en milliers de jetons échangeables, dont chacun représente une fraction de la propriété ou du droit sous-jacent. Ce mécanisme abaisse le seuil d'entrée pour les investisseurs particuliers et les acteurs

¹⁰² Al-Breiki, H., Rehman, M. H. U., Salah, K., & Svetinovic, D. (2020). Trustworthy blockchain oracles: review, comparison, and open research challenges. IEEE access, 8, 85675-85685.

¹⁰³ « #Stablecoins* ? ou Tokenized Deposits ? », Hubert de Vauplane, [LinkedIn](#) post. 2 avril 2026.

¹⁰⁴ World Economic Forum & Accenture. (2025, mai). Asset Tokenization in Financial Markets: The Next Generation of Value Exchange. World Economic Forum. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Asset_Tokenization_in_Financial_Markets_2025.pdf

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

de taille modeste, jusqu'alors exclus de certaines classes d'actifs par des minimums de souscription élevés. Comme le souligne l'analyste du Forum Économique Mondial, le fractionnement « *démocratise l'accès à des actifs à haute valeur nominale*¹⁰⁵ » qui étaient de facto réservés à l'investissement institutionnel.



Ejara, plateforme camerounaise d'épargne et d'investissement comptant plusieurs centaines de milliers d'utilisateurs en Afrique francophone et dans sa diaspora, a annoncé en mai 2025 un partenariat avec la Fondation Starknet pour développer une infrastructure de tokenisation d'obligations souveraines et de RWA*. L'objectif serait de permettre une propriété fractionnée d'obligations africaines, un marché historiquement réservé aux seuls investisseurs institutionnels, pour des montants accessibles aux épargnants individuels¹⁰⁶.

La **liquidité** désigne la facilité avec laquelle un actif peut être cédé contre sa valeur marchande sans délai ni coût excessif. Les actifs réels, comme l'immobilier, des infrastructures énergétiques, des projets de reforestation, sont structurellement peu liquides dans la finance traditionnelle. Leur cession implique des délais de règlement-livraison de plusieurs jours ouvrés, des frais d'intermédiation multiples et des marchés secondaires étroits. La tokenisation de ces actifs permet leur négociation sur des places de marché décentralisées fonctionnant en continu, avec des délais de règlement réduits à quelques secondes ou minutes, ce qui réduit les frictions liées aux cycles de traitement traditionnels et ouvre des

possibilités de financement à court terme pour des projets jusqu'alors contraints par leur illiquidité structurelle.



AgriDex est une place de marché RWA* agricole construite sur Solana qui tokenise les transactions de matières premières agricoles, chaque transaction étant sécurisée par un jeton unique, un NFT*, enregistrant l'ensemble des métadonnées du contrat. En juillet 2024, la plateforme a réglé la première transaction agricole enregistrée sur une blockchain publique, l'expédition d'huile d'olive et de vin depuis Oldenburg Vineyards, une exploitation sud-africaine, vers un importateur londonien¹⁰⁷. Les fonds ont été reçus en quelques secondes, pour 5 livres sterling de frais, contre 3 à 6 % de commission dans les circuits financiers traditionnels. En septembre 2025, **AgriDex** a franchi le seuil de 9 millions de dollars de transactions en stablecoins (USDC) sur les marchés africains¹⁰⁸.

Cette propriété s'applique également à des classes d'actifs d'infrastructure à impact. **Penomo**¹⁰⁹ cible les actifs d'énergie renouvelable et d'infrastructure critique dans une fourchette de cinq à cent millions de dollars, un segment structurellement délaissé par les grands fonds d'infrastructure et inaccessible aux investisseurs de taille intermédiaire via les circuits traditionnels.

¹⁰⁷ Manoylov, M. K. *AgriDex completes first agricultural RWA* trade on Solana*. The Block. July 24, 2024.

<https://www.theblock.co/post/307055/agridex-completes-first-agricultural-rwa-trade-on-solana>

¹⁰⁸ The Defiant. *Solana-based AgriDex sees \$9M in stablecoin trades across African markets*. The Defiant. September 8, 2025

<https://thedefiant.io/news/infrastructure/solana-based-agridex-marks-usd9m-in-stablecoin-trades-across-african-markets>

¹⁰⁹ Penomo, *Evolving green energy finance with on-chain RWA: Meet, penomo!* August 7, 2024

<https://medium.com/penomo/evolving-green-energy-finance-with-onchain-rwa-meet-penomo-a02938ac800b>

¹⁰⁵ Ibid.

¹⁰⁶ Tokenized Bond Smart Contract*

<https://github.com/keep-starknet-strange/tokenized-bond>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Sa plateforme combine automatisation par IA (système CredOS™) et tokenisation *on-chain** pour rendre ces actifs liquides et traçables. Dans un registre comparable, **Dowgo** structure l'accès aux marchés privés européens à impact en apportant une liquidité continue et un règlement instantané 24/7 pour des actifs souvent fragmentés, avec plus de 300 millions d'euros de projets identifiés en attente de distribution.

L'interopérabilité, que les praticiens du Web3 désignent également par le terme de composabilité, désigne la capacité des jetons à interagir entre protocoles distincts au sein d'un même écosystème de registres distribués. Des crédits carbone tokenisés peuvent ainsi être utilisés comme collatéral dans des protocoles de prêt décentralisés, intégrés à des produits financiers structurés, ou transférés entre registres *via* des ponts cryptographiques (*bridges*), sans qu'un accord bilatéral distinct soit requis à chaque transaction¹¹⁰. Cette propriété constitue la condition technique d'un marché plus unifié des actifs environnementaux, réduisant la fragmentation qui caractérise aujourd'hui les marchés volontaires du carbone et de la biodiversité.

Appliquée aux actifs naturels et environnementaux, la tokenisation présente un avantage directement lié aux défaillances structurelles identifiées à la section 1.1.3.2 : **la traçabilité permettant d'adresser le problème du double comptage**. Dans la configuration actuelle des marchés volontaires de crédits carbone, rien n'empêche techniquement qu'un même crédit soit

comptabilisé simultanément dans le bilan de l'émetteur du projet et dans celui de l'acheteur, ou qu'il soit vendu à deux contreparties distinctes. Enregistré sur un registre public et immuable, chaque crédit tokenisé possède un identifiant unique attachant, son émission, ses transferts successifs, son retrait (*retirement*), accessible et consultable par tout acteur disposant d'une connexion internet. La neutralisation définitive d'un crédit, qui signifie qu'il a été utilisé pour compenser des émissions et ne peut plus circuler, est inscrite de manière permanente et non réversible dans la chaîne.



Centrifuge¹¹¹ est l'un des protocoles de tokenisation d'actifs réels (*Real-World Assets*, RWA*) les plus matures en termes d'infrastructure institutionnelle dans l'écosystème *DeFi**. Fondé en 2017 et opérationnel en production depuis 2021, il a structuré la tokenisation d'actifs de crédit privé comme des obligations d'entreprise, des créances commerciales, ou des prêts structurés, pour les rendre accessibles comme collatéral dans les protocoles *DeFi**, notamment **Sky**, un stablecoin* décentralisé (ex-**MakerDAO**) et **AAVE**, un protocole de prêt et d'emprunt décentralisé. Sa migration V3 *multichain* en juillet 2025 et le partenariat LayerZero en mars 2026 pour l'interopérabilité totale des actifs entre chaînes matérialisent le concept de *deRWA** (*decentralized Real World Asset*) : des actifs complexes, comme des répliques du S&P 500 ou des bons du Trésor sont transformés en jetons utilisables sur l'ensemble des plateformes de la Finance décentralisée (*DeFi*)* compatibles EVM*, sans conversion ni friction entre registres. **Centrifuge** illustre l'étape suivante du triptyque fractionnement / liquidité /

¹¹⁰ AAVE Horizon (multi-chaînes / EVM) est un marché de prêt dédié aux RWA* tokenisés, intégrant notamment des bons du Trésor américain tokenisés par Franklin Templeton et VanEck (token vBILL). L'architecture Hub-and-Spoke d'AAVE V4, combinée au standard ERC-4626, gère la liquidité de ces actifs institutionnels entre chaînes compatibles EVM*. Source : Aave Horizon Supports VanEck's Tokenized Treasury Fund VBILL <https://aave.com/blog/horizon-vaneck-vbill>

¹¹¹ <https://centrifuge.io/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

interopérabilité décrit dans cette section. Ce n'est plus la tokenisation d'un actif isolé sur une blockchain ou une application décentralisée* unique, mais la création d'un standard d'interopérabilité permettant à un actif réel et certifié de circuler librement entre protocoles et registres, sans perte d'information sur sa provenance ni sur ses caractéristiques de risque.

Ces propriétés ne résolvent cependant pas la question centrale posée dans la première partie de ce rapport : celle de la **qualité de la donnée à la source**. Tokeniser un crédit carbone surestimé ou adossé à un scénario de référence contestable ne fait que figer cet actif imparfait dans un registre inaltérable. La robustesse de la tokenisation comme instrument de la finance à impact reste conditionnée à la solidité des mécanismes de vérification qui la précèdent, et que nous examinerons dans la section 1.2.2.2 pour les crédits carbone et la biodiversité, et dans la section 2.1 pour les nouveaux instruments de preuve numérique.

[E] La tokenisation dans la finance institutionnelle – de l'expérimentation à l'intégration

La tokenisation des instruments financiers n'est plus, en 2026, une expérimentation marginale et fait l'objet de déploiement dans plusieurs juridictions, portée par un cadre législatif dont la France a d'ailleurs été pionnière à l'échelle mondiale.

L'ordonnance française n°2017-1674 du 8 décembre 2017 a été la première législation au monde à autoriser explicitement l'inscription de titres financiers sur un dispositif d'enregistrement électronique partagé. C'est ce cadre juridique qui a rendu possible, dès le 18 avril

2019, l'émission par Société Générale SFH de 100 millions d'euros d'obligations sécurisées, les OFH Tokens^{*112}, enregistrées directement sur la blockchain publique Ethereum. Il s'agit de la première émission obligatoire d'une grande banque mondiale sur une blockchain publique.

En avril 2021, la Banque Européenne d'Investissement (BEI) a émis sa première obligation entièrement numérique sur Ethereum (100 millions d'euros), réglée via un jeton de monnaie numérique de banque centrale de gros (wholesale CBDC) émis à titre expérimental et intra-day par la Banque de France dans le cadre de son programme d'expérimentation lancé en 2020 – avec SG Forge, Goldman Sachs et Santander comme chefs de file.

En avril 2023, SG Forge a lancé l'EUR CoinVertible (EURCV), premier stablecoin institutionnel en euros déployé en production sur Ethereum. En novembre 2023, SG Forge a émis la première obligation verte numérique sur une blockchain publique : 10 millions d'euros, souscrite par AXA Investment Managers et Generali Investments, avec option de règlement directement en EURCV on-chain*.

¹¹² Les OFH Tokens constituent la première émission d'obligations sécurisées sous forme de *security tokens* sur une blockchain publique par un établissement bancaire français. Le 18 avril 2019, Société Générale SFH a émis 100 millions d'euros d'obligations de financement de l'habitat directement enregistrées sur Ethereum, notées Aaa/AAA par Moody's et Fitch (Société Générale, *Société Générale émet la première obligation sécurisée sous forme de « security tokens » sur une blockchain publique*, communiqué de presse, 18 avril 2019, disponible sur societegenerale.com). Une seconde émission de 40 millions d'euros a suivi le 14 mai 2020, réglée pour la première fois en monnaie digitale de banque centrale (MDBC) de gros émise par la Banque de France sur blockchain (Société Générale, *Société Générale réalise la première transaction financière réglée en Monnaie Digitale de Banque Centrale*, communiqué de presse, 14 mai 2020, disponible sur societegenerale.com). Ces opérations ont été conduites par SG Forge, entité dédiée aux actifs numériques du groupe, dans le cadre du régime juridique ouvert par le Décret n° 2018-1226 du 24 décembre 2018 relatif à l'utilisation des dispositifs d'enregistrement électronique partagé (DEEP) pour la représentation et la transmission de titres financiers.

Comme l'informatique a entièrement reconfiguré l'infrastructure financière à partir des années 1980, la tokenisation des actifs financiers va probablement reconfigurer en profondeur les modalités d'émission, de règlement et de traçabilité des actifs. Cette convergence entre la finance réglementée et les registres distribués est précisément ce que nous examinerons dans la section 2.3.3 consacrée à l'hybridation entre la finance traditionnelle (TradFi*) et le Web3.

SG-Forge a réalisé en novembre 2025 sa première émission obligataire numérique aux États-Unis, sur la blockchain Canton Network¹¹³ via Broadridge Financial Solutions - l'une des premières opérations de ce type à destination d'investisseurs institutionnels américains. En début d'année 2025, la même entité avait validé le règlement d'une obligation tokenisée en combinant sa stablecoin EURCV et l'infrastructure de messagerie SWIFT, démontrant l'interopérabilité entre finance traditionnelle et règlement *on-chain**.

1.2.2.2 Les crédits carbone et la biodiversité *on-chain*

Si la tokenisation permet formellement le fractionnement, la liquidité et l'interopérabilité, il s'agit maintenant d'examiner ce qu'elle produit concrètement lorsqu'elle est appliquée aux deux principales classes d'actifs naturels que les marchés environnementaux tentent de valoriser – les crédits carbone et les crédits de biodiversité – et pourquoi ces deux classes appellent des traitements structurellement différents.

Les crédits carbone *on-chain** : traçabilité et suppression du double comptage

Un crédit carbone représente la réduction ou l'élimination d'une tonne équivalent CO₂, telle que définie par les principaux référentiels de

certification en vigueur, notamment le Verified Carbon Standard (VCS) de Verra et le Gold Standard. Sa valeur repose sur trois propriétés : il doit être réel (correspondre à une réduction vérifiable), additionnel (ne pas s'être produit sans le projet), et unique (ne pouvoir être comptabilisé qu'une seule fois). C'est cette troisième propriété que les marchés volontaires classiques peinent le plus à garantir. Dans la configuration actuelle des registres centralisés, chaque certificateur tenant son propre registre sans interopérabilité contraignante, en l'absence de mécanisme systématique de réconciliation entre ces registres, un crédit neutralisé dans l'un peut demeurer techniquement actif dans un autre, sans qu'aucun dispositif ne détecte ni ne corrige cette divergence. Rien n'interdit non plus que la même réduction d'émissions soit déclarée simultanément dans le bilan du vendeur et dans celui de l'acheteur.

Enregistré *on-chain**, chaque crédit carbone reçoit un identifiant cryptographique unique lié à l'ensemble de son historique : projet d'origine, méthode de certification, date d'émission, transactions successives, et – point décisif – son retrait définitif lorsqu'il est utilisé pour compenser des émissions. Cette opération de neutralisation est inscrite de manière permanente et non réversible dans le registre distribué, accessible et vérifiable par tout acteur disposant d'une connexion internet. Le problème du double comptage ne disparaît pas pour autant : il se déplace. Des projets cherchent à combiner cette traçabilité avec d'autres instruments financiers. **EthicHub**¹¹⁴, plateforme de prêt agricole décentralisé opérant principalement au Mexique, intègre *via* le protocole Toucan la génération et la tokenisation de crédits carbone issus des pratiques d'agroforesterie de ses emprunteurs : le remboursement du prêt et la vente de crédits carbone *on-chain** constituent deux flux de revenus distincts pour le même agriculteur, articulant directement microfinance décentralisée et marché carbone.

¹¹³ <https://www.canton.network/>

¹¹⁴ <https://ethichub.com>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

La tokenisation empêche la circulation frauduleuse d'un crédit *après* son enregistrement *on-chain**, mais elle ne résout pas la question de la qualité du crédit *avant* cet enregistrement. Comme l'établissait l'étude de Probst et al. publiée dans *Nature Communications* en 2024¹¹⁵ – analysée dans la section 1.1.3.2 –, moins de 16 % des crédits émis par le principal certificateur mondial correspondaient à des réductions réelles d'émissions. Numériser un actif surestimé revient à le figer dans un état dégradé avec la même rigueur et la même permanence que tout actif de qualité.

Les crédits de biodiversité *on-chain** : le problème de la fongibilité

Si les crédits carbone présentent des défis de vérification substantiels, les crédits de biodiversité soulèvent une question plus fondamentale encore : celle de leur fongibilité. Une tonne de CO₂ est une unité physique identique quelle que soit sa provenance. La biodiversité, au contraire, est par nature localisée, contextuelle et non substituable. Comme le formule explicitement The Nature Conservancy dans son analyse de 2024 des marchés de crédits de biodiversité, celle-ci est « *non fongible – la biodiversité qui est impactée ou perdue en un endroit ne peut pas être remplacée par des améliorations de la biodiversité ailleurs*¹¹⁶ », et « *il n'existe pas de métrique unique ou d'unité de crédit qui puisse capturer efficacement l'ensemble des caractéristiques et des valeurs de la biodiversité*¹¹⁷ ». Cette hétérogénéité structurelle est confirmée dans la littérature académique et Wunder et al. notent en 2025, dans *Business Strategy and the Environment*,

que si la fongibilité des crédits de biodiversité était admise sans exigence d'équivalence écologique rigoureuse, elle risquerait de « *compromettre les résultats en matière de biodiversité dans les marchés de conformité en facilitant une perte nette*¹¹⁸ » des espèces et des écosystèmes les plus menacés.

Cette contrainte limite considérablement la portée de la tokenisation appliquée à la biodiversité. Un jeton représentant un crédit de biodiversité forestière tropicale n'est pas échangeable contre un jeton représentant un crédit de biodiversité de récif corallien ou de prairie tempérée – ou du moins ne devrait pas l'être si l'on souhaite conserver une signification écologique à l'instrument. Cela n'empêche pas la tokenisation d'apporter une valeur ajoutée réelle en matière de traçabilité, d'auditabilité et de financement de projets de conservation : plusieurs initiatives, dont le standard de biodiversité de Verra et les premières expérimentations menées dans le cadre du Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal adopté en 2022, cherchent à définir des métriques suffisamment précises pour permettre des transactions vérifiables dans des périmètres géographiques et taxonomiques définis. Mais le marché volontaire des crédits de biodiversité reste, en 2026, structurellement fragmenté et peu liquide¹¹⁹. Selon Bloomlabs, les ventes cumulées depuis les premières transactions documentées ont atteint 6,72 millions de dollars à la mi-2026, dont 2,9 millions pour la seule année 2025, en hausse de 38 % par rapport à 2024¹²⁰.

¹¹⁸ Wunder, S., et al. (2025). Biodiversity credits: An overview of the current state, future opportunities, and potential pitfalls. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.70018>

¹¹⁹ Pollination Foundation, cité par BASE – Energy & Finance. (2025). State of the play of biodiversity credits and habitat banks. <https://energy-base.org/news/financing-for-biodiversity-a-state-of-the-play-of-biodiversity-credits-and-habitat-banks/>

¹²⁰ Bloomlabs, The Voluntary Biodiversity Market, KPMG Oslo, 11 mai 2026. Bloomlabs est une plateforme commerciale d'intelligence de marché spécialisée dans les crédits de biodiversité, dont l'activité consiste à agréger et commercialiser les

¹¹⁵ Probst, B. S., Toetzke, M., Kontoleon, A., Díaz Anadón, L., Minx, J. C., Haya, B. K., Schneider, L., Trotter, P. A., West, T. A. P., Gill-Wiehl, A., & Hoffmann, V. H. (2024). Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects. *Nature Communications*, 15, 9562. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53645-z>

¹¹⁶ The Nature Conservancy. (2024). TNC View: Biodiversity Credits. https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/TNCView_BiodiversityCredits_EXTERNAL.pdf

¹¹⁷ *Ibid.*

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Ces volumes restent sans commune mesure avec ceux du marché volontaire du carbone, dont les transactions annuelles se comptent en plusieurs milliards de dollars.



Kolektivo¹²¹ est l'un des rares protocoles à avoir tenté de répondre simultanément aux deux défis décrits dans cette section : la traçabilité des crédits carbone *on-chain** et la tokenisation d'actifs de biodiversité locaux, non substituables. Déployé à partir de 2019 sur la blockchain **Celo** et sélectionné par l'UNICEF Venture Fund, **Kolektivo** opère à Curaçao et à Trinidad-et-Tobago.

À Trinidad, le *Cashew Token** représente des crédits de biodiversité associés à des forêts alimentaires locales. La valorisation de ces crédits est conditionnée à des métriques écologiques vérifiées sur le terrain et notamment la surface forestière, la diversité des espèces, les pratiques agroforestières, selon le **Kolektivo Framework** de mesure et vérification de l'impact (dMRV).

À Curaçao, le *Carbon-Backed Green Coin* (CGC) est un *stablecoin* adossé à des actifs carbone locaux, conçu pour ancrer la monnaie communautaire dans des ressources naturelles vérifiables plutôt que dans des réserves de devises étrangères. Ce dispositif illustre directement la tension théorique posée dans la présente section : en attribuant un identifiant unique et géoréférencé à chaque actif de biodiversité (*GeoNFT**), **Kolektivo** tente de préserver la non-substituabilité écologique propre aux crédits de biodiversité tout en les rendant finançables par des

investisseurs externes via un marché décentralisé.

La limite structurelle demeure celle décrite plus haut : la robustesse de l'actif tokenisé reste conditionnée à la rigueur des mécanismes de vérification terrain, que nous examinerons dans la section 2.1¹²².

Le dMRV comme condition nécessaire, non comme solution suffisante

Qu'il s'agisse de crédits carbone ou de crédits de biodiversité, la robustesse de l'actif tokenisé reste conditionnée à la qualité des données qui lui sont sous-jacentes. C'est précisément pour répondre à ce défi que se développe le dMRV (*digital Measurement, Reporting and Verification* – Mesure, Notification et Vérification Numériques) : l'intégration de technologies de collecte et de vérification continues – imagerie satellitaire, capteurs, algorithmes d'apprentissage automatique – dans les processus de certification des projets environnementaux. Ce mécanisme, son fonctionnement technique, ses apports réels et ses limites feront l'objet d'un traitement approfondi dans la section 2.1. Il suffit d'indiquer ici que sans un dMRV robuste, la tokenisation ne fait que déplacer le problème structurel identifié dans la section 1.1.3 : l'asymétrie d'information entre le porteur du projet et le marché subsiste, fût-elle désormais inscrite dans un registre immuable.

[E] Carbone et biodiversité – deux logiques de marché

Les marchés de crédits carbone et les marchés de crédits de biodiversité partagent une ambition commune, celle d'internaliser la valeur des services

données qu'elle collecte. En l'absence de publication académique ou institutionnelle indépendante portant sur les volumes du marché volontaire de la biodiversité à cette date, ces chiffres sont retenus à titre indicatif. Ils devront être recoupés dès lors qu'une source non commerciale viendra les confirmer ou les réviser.

¹²¹ <https://www.kolektivo.network/>

¹²² Regeneration Needs Location Astral's Geospatial Role in the Kolektivo Framework
<https://medium.com/kolektivo-co/regeneration-needs-location-b538cae97ff7>

écosystémiques dans les décisions d'allocation du capital, mais reposent toutefois sur des présupposés économiques distincts, avec des conséquences directes sur leur tokenisation.

Le marché carbone est fondé sur la fongibilité : une tonne de CO₂ évitée en Amazonie vaut, dans le cadre des mécanismes de compensation, autant qu'une tonne évitée en Indonésie ou en Europe. Cette propriété rend les crédits carbone naturellement adaptés à la tokenisation et aux échanges sur des marchés globaux. Elle est aussi la source de ses principales dérives, dans la mesure où elle incite à produire des crédits à faible coût sans égard pour la qualité réelle de la réduction.

Les marchés de biodiversité opèrent selon une logique opposée : leur principe fondateur, dans les marchés réglementaires de compensation écologique comme dans les débats académiques sur les marchés volontaires, est la non-substituabilité. Un hectare de forêt primaire ne compense pas la destruction d'un récif corallien, même si les deux abritent des espèces à statut de conservation équivalent. Cette non-fongibilité protège l'intégrité écologique de l'instrument, mais rend sa tokenisation et sa circulation sur des marchés globaux structurellement plus complexes. L'International Advisory Panel on Biodiversity Credits (IAPB), initiative indépendante co-lancée par la France et le Royaume-Uni en juin 2023, soulignait que les marchés de crédits de biodiversité nécessitent des mesures « *efficaces, robustes et fondées sur la science*¹²³ », permettant simultanément d'assurer « *l'hétérogénéité reflétant la diversité de la*

*nature*¹²⁴ », deux exigences difficilement réconciliables dans un instrument financier standardisé à vocation mondiale.

1.2.3 L'émergence d'une Micro-finance Décentralisée (Micro-DeFi)

La microfinance a constitué l'une des tentatives les plus documentées d'orienter le capital vers des populations exclues du système bancaire classique. Elle a produit des résultats réels – des millions d'emprunteurs ont accédé au crédit pour la première fois – mais a aussi engendré des dérives systémiques graves, dont les ressorts structurels ont été établis dans la section précédemment (voir 1.1.3.2), à savoir des coûts opérationnels élevés, des taux d'intérêt usuraires, et une dérive de mission au profit de clientèles plus rentables.

La Micro-finance Décentralisée (Micro-DeFi*) n'est pas la négation de la microfinance traditionnelle : elle en est un correctif architectural. En substituant l'automatisation par *smart contracts** à certaines fonctions coûteuses de l'intermédiation institutionnelle, et en connectant directement des emprunteurs locaux à des réservoirs de liquidité mondiaux, elle cherche à modifier la structure de coûts qui conditionne mécaniquement les taux d'intérêt élevés. Cette section examine d'abord pourquoi cette contrainte est d'ordre architectural et non seulement réglementaire, puis documente les applications concrètes – accès aux liquidités mondiales, gestion du risque dans des contextes non bancarisés, construction d'un historique de crédit *on-chain** – en distinguant ce qui relève de la promesse vérifiable de ce qui reste à ce stade une ambition non validée.

¹²³ Fawcett, A., & Goulard, S. (2024, janvier 11). *How biodiversity credits can finance nature-positive outcomes*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2024/01/how-biodiversity-credits-can-finance-nature-positive-outcomes/>

¹²⁴ Ibid.

1.2.3.1 La microfinance traditionnelle à l'aune de la désintermédiation

La microfinance a été conçue, dès ses premières formulations dans les années 1970, pour offrir une inclusion financière aux populations que le système bancaire classique juge structurellement non rentables à servir. Muhammad Yunus et la Grameen Bank au Bangladesh ont popularisé ce modèle en démontrant qu'il était possible d'accorder des prêts sans garanties à des emprunteurs très pauvres, en s'appuyant non sur la caution individuelle mais sur la pression et la responsabilité collectives au sein de groupes de solidarité. Cette preuve de concept a été saluée – Yunus reçoit le prix Nobel de la paix en 2006 – et le modèle a été répliqué dans des dizaines de pays. Mais la généralisation à grande échelle a révélé une contrainte structurelle que la vision initiale n'avait pas pleinement anticipée : le coût de la proximité.

Le modèle *high-touch* et ses conséquences sur les taux d'intérêt

Les institutions de microfinance (IMF) servent des emprunteurs géographiquement dispersés, dont les besoins de financement sont faibles, les garanties inexistantes et les dossiers de crédit vierges. Pour évaluer chaque dossier, instruire les prêts, suivre les remboursements et maintenir la relation de confiance nécessaire à des prêts sans collatéral, les institutions de microfinance (IMF) ont développé un modèle dit à haute intensité relationnelle (*high-touch*) : agents de terrain, réunions régulières des groupes d'emprunteurs, visites de suivi, enregistrement manuel des transactions. Ce modèle est à la fois la condition de leur efficacité sociale – c'est la connaissance directe des emprunteurs et la solidarité entre pairs qui rend possible des taux de remboursement élevés – et la source de leurs coûts opérationnels structurellement élevés.

Ces coûts doivent être récupérés sur la marge d'intérêt or la relation est arithmétiquement défavorable : les coûts de gestion d'un micro-prêt – visite terrain, instruction du dossier, suivi des remboursements – sont relativement fixes quel que soit le montant, si bien que le ratio coût-revenu d'une IMF se dégrade mécaniquement à mesure que la taille moyenne des prêts diminue. Autrement dit, un prêt de 150 euros à un petit agriculteur rural pourrait mobiliser presque autant de ressources humaines qu'un prêt de 2 000 euros à un entrepreneur urbain, mais générer bien moins de revenu pour l'institution.

Cette asymétrie arithmétique explique que le taux d'intérêt moyen pratiqué par les institutions de microfinance (IMF) se situe autour de 35 %, selon les données¹²⁵ du Groupe consultatif d'assistance aux pauvres (CGAP, 2008), avec des écarts considérables selon les contextes – de 17 % au Sri Lanka à plus de 80 % en Ouzbékistan à la même période.

Le cas de Banco Compartamos au Mexique est devenu emblématique de ce phénomène : lors de son introduction en bourse en avril 2007, qui a cristallisé le débat dans l'ensemble du secteur, l'institution pratiquait un taux effectif d'environ 86 % nets de taxes sur son portefeuille de prêts – soit près de 100 % avec la TVA applicable¹²⁶. Hudon et Sandberg documentent en 2013 que cette situation n'est pas isolée et constitue l'une des dimensions de ce qu'ils qualifient de « *crise éthique*¹²⁷ » de la microfinance, où la pression

¹²⁵ Rosenberg, R., Gaul, S., Ford, W., & Tomilova, O. (2008). Variations in microcredit interest rates. CGAP Brief, juillet 2008.

<https://www.cgap.org/sites/default/files/CGAP-Brief-Variations-in-Microcredit-Interest-Rates-Jul-2008.pdf>

¹²⁶ Rosenberg, R. (2007). *CGAP Reflections on the Compartamos Initial Public Offering: A Case Study on Microfinance Interest Rates and Profits*. CGAP Focus Note, juin 2007.

<https://www.cgap.org/research/publication/cgap-reflect-ions-on-compartamos-initial-public-offering>

¹²⁷ Hudon, M., & Sandberg, J. (2013). The ethical crisis in microfinance: Issues, findings, and implications. Business

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

vers la rentabilité génère des conditions d'emprunt que les populations ciblées peuvent difficilement supporter.

Cette dynamique produit ce que les chercheurs désignent par l'expression de « pénalité de pauvreté », *poverty penalty* : une situation paradoxale où les clients les plus pauvres supportent le coût d'emprunt le plus élevé, précisément en raison de la petite taille de leurs prêts. Ramírez Rocha et al. établissent en 2018 qu'il existe un effet de médiation significatif entre le niveau des taux d'intérêt et la performance financière des institutions de microfinance (IMF), confirmant que la structure de coûts du modèle pousse mécaniquement vers des taux élevés pour les emprunteurs les plus vulnérables¹²⁸.

La dérive de mission comme résultante structurelle

Cette pression vers la rentabilité a engendré un phénomène documenté de longue date dans la littérature académique : la *mission drift*, dérive de mission. Mersland et Strøm établissent en 2010, sur un panel de 379 institutions de microfinance (IMF) dans 71 pays couvrant onze années, que la commercialisation progressive des institutions conduit à un glissement de la clientèle servie – du plus pauvre vers le moins pauvre – à mesure qu'augmentent les objectifs de profit et les coûts moyens de fonctionnement¹²⁹. Le mécanisme est simple : un client plus aisé, empruntant un montant plus élevé en zone urbaine, coûte moins à instruire et génère davantage de revenus ; la rationalité financière de l'institution pousse donc progressivement ses agents à cibler ces profils au détriment des populations les plus difficiles à atteindre.

Ethics Quarterly, 23(4), 561–589.

<https://doi.org/10.5840/beq201323440>

¹²⁸ Ramírez Rocha, A., Cervantes Zepeda, M., & Bernal Ponce, L. A. (2018). Mediation effect of interest rates on MFIs' financial performance. *Contaduría y Administración*, 64(4). <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2018.1518>

¹²⁹ Mersland, R., & Strøm, R. Ø. (2010). Microfinance mission drift? *World Development*, 38(1), 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.05.006>

Par ailleurs, contrairement aux intuitions issues de la théorie économique classique, une concurrence accrue entre institutions de microfinance (IMF) n'a pas produit de baisse généralisée des taux : tant que la structure de coûts du modèle *high-touch* demeure inchangée, les opérateurs se retrouvent dans une situation où la viabilité financière contraint les taux, indépendamment de la pression concurrentielle¹³⁰.

Dans ses manifestations les plus graves, cette dérive a produit des dommages sociaux documentés et graves. Des pratiques de recouvrement coercitives, associées à des taux usuraires, ont engendré des spirales de surendettement dans plusieurs pays. La crise de l'État de l'Andhra Pradesh en Inde en 2010 – marquée par une vague de suicides de fermiers surendettés – en constitue l'illustration la plus tragique et la plus documentée, et a été analysée en section 1.1.3.2 de ce rapport dans le cadre de la dérive systémique de la finance à impact.

La promesse structurelle de la désintermédiation par le Web3

C'est précisément à cette contrainte d'architecture que les nouvelles infrastructures décentralisées proposent une réponse. La promesse de la Micro-DeFi* (microfinance décentralisée) n'est pas de remplacer la relation humaine qui fonde le modèle de la microfinance, mais de substituer à certaines fonctions coûteuses de l'intermédiation institutionnelle des mécanismes automatisés moins onéreux.

L'automatisation par *smart contracts** des fonctions d'instruction, de décaissement et de remboursement peut supprimer plusieurs couches d'intermédiation administrative. Mais la réduction potentielle des coûts ne tient pas seulement au caractère

¹³⁰ Acclassato, D.-H. (2008). Les plafonnements de taux d'intérêt en microfinance servent-ils réellement les pauvres et petits opérateurs économiques ? *Mondes en développement*, 141(1), 93–109. <https://doi.org/10.3917/med.141.0093>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

auto-exécutable du contrat : elle repose plus largement sur la décomposition de la chaîne de valeur microfinancière et sur l'approche décentralisée que ces infrastructures rendent possible. Les fonctions traditionnellement concentrées au sein d'une institution unique, collecte des fonds, validation de l'identité, évaluation du risque, décaissement, suivi du remboursement, peuvent être réparties entre différents acteurs ou protocoles : prêteurs internationaux, validateurs locaux, registres partagés, mécanismes de garantie collective et outils automatisés de règlement. Un *smart contract** libérant automatiquement des fonds selon des conditions prédéfinies (validation de l'identité de l'emprunteur, mise en place d'un mécanisme de remboursement, atteinte d'un seuil de garantie collective) ne remplace donc pas seulement une opération manuelle ; il permet de coordonner à moindre coût des fonctions auparavant intégrées dans une intermédiation institutionnelle lourde. Des chercheurs ayant conduit des entretiens semi-structurés auprès d'experts de la microfinance et des blockchains concluent en 2024 que la technologie peut « *créer des profils financiers crédibles, automatiser la contractualisation et attirer des fonds à moindre coût* »¹³¹ pour les emprunteurs non bancarisés, tout en soulignant que les complexités de coordination et les enjeux de protection des données constituent des obstacles réels à son déploiement à grande échelle.

Des protocoles comme PACT / **ImpactMarket**¹³², avec 1,8 milliard de dollars de micro-prêts distribués et plus d'un million d'emprunteurs actifs via la blockchain **Celo**, apportent une mesure empirique à cette promesse. **Jia**, déployé au Kenya et aux Philippines depuis 2022 avec plus de dix millions de dollars décaissés, propose aux

PME locales du financement de stocks, de l'affacturage de factures et des fonds de roulement avec un déblocage en moins de vingt-quatre heures, éliminant structurellement les intermédiaires bancaires locaux tout en s'appuyant sur des nœuds de validation locaux pour l'instruction des dossiers¹³³.

La désintermédiation abolit également les contraintes géographiques de la liquidité. Un système fondé sur des *smart contracts** peut connecter directement un groupe d'agriculteurs mexicains à des réserves de capitaux constituées par des investisseurs européens ou asiatiques, sans passer par des établissements bancaires locaux dont les coûts de fonctionnement et le manque de capitaux engendrent précisément les taux élevés constatés. **EthicHub**, déployé depuis 2017 sur la blockchain Ethereum et dorénavant sur la blockchain **Celo**¹³⁴, illustre cette architecture : des prêteurs internationaux financent directement des coopératives agricoles mexicaines, dont certaines membres supportaient auparavant des taux de crédit informels dépassant 100 % par an, et perçoivent en échange un rendement de 8 à 10 % – l'écart de taux qui était *in fine* capté par les intermédiaires est partagé entre emprunteurs et prêteurs¹³⁵.

Le second levier est la constitution d'un historique de crédit *on-chain**. L'une des raisons structurelles pour lesquelles les banques conventionnelles excluent les populations non bancarisées est l'absence de données sur leur comportement de remboursement passé. Enregistrée de manière immuable sur un registre distribué, chaque transaction de prêt et chaque remboursement constituent *a priori* un dossier de crédit vérifiable par tout prêteur potentiel, sans dépendre d'une institution centralisée qui en serait le dépositaire exclusif.

¹³¹ Hoque, M. M., Kummer, T.-F., & Yigitbasioglu, O. (2024). How can blockchain-based lending platforms support microcredit activities in developing countries? An empirical validation of its opportunities and challenges. *Technological Forecasting and Social Change*, 203, 123400. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123400>

¹³² <https://pactfoundation.com/>

¹³³ <https://www.jia.xyz>

¹³⁴ <https://celo.org/>

¹³⁵ EthicHub. (s.d.). Invest with purpose – How it works. <https://www.ethichub.com/en/what-is-it-and-how-does-it-work>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Ce « passeport financier » numérique est particulièrement pertinent pour les populations qui ont démontré une capacité de remboursement auprès d'une institution de microfinance (IMF) locale mais restent invisibles pour les marchés de capitaux internationaux.



HiveOnline est une plateforme qui numérise les groupes d'épargne VSLA (*Village Savings and Loan Associations*) en Afrique subsaharienne, des structures de microfinance communautaire fonctionnant sans accès bancaire, dans lesquelles les membres cotisent collectivement et s'accordent des prêts selon des règles internes. L'application remplace les livrets papier par des enregistrements sur registre distribué : un seul smartphone par groupe suffit pour accéder au registre partagé et immuable de l'ensemble des transactions du groupe.

En décembre 2025, **HiveOnline** a achevé la migration de 75 000 utilisateurs vers la blockchain Hedera Hashgraph, construisant pour chacun d'eux un historique de crédit immuable et portable¹³⁶. Ce registre *on-chain** est la condition opérationnelle pour que des banques partenaires, et notamment Kingdom Bank Kenya, Microbanco Confiance au Mozambique, puissent évaluer automatiquement la solvabilité d'un groupe rural sans contact physique préalable avec l'institution, ouvrant un accès à la liquidité mondiale pour des emprunteurs jusqu'alors invisibles pour les marchés de capitaux.

Ces promesses restent cependant conditionnelles. La sélection des emprunteurs, l'évaluation de la viabilité des projets et la gestion des défaillances exigent une compréhension du contexte local que les algorithmes ne peuvent remplacer unilatéralement. Les applications concrètes de la Micro-DeFi* les plus abouties – que nous examinerons dans la section 1.2.3.2 – ont précisément résolu cette tension non pas en supprimant l'acteur local, mais en redéfinissant son rôle : non plus collecteur et redistributeur de fonds, mais nœud de validation et de garantie au sein d'un système de liquidité décentralisé.

[E] La concurrence entre institutions de microfinance sans baisse des taux d'intérêt

Dans la théorie économique classique, la concurrence entre prestataires d'un même service conduit à une convergence vers les prix les plus bas, les opérateurs les moins efficaces étant progressivement éliminés du marché. Cette logique s'est avérée largement inopérante dans le secteur de la microfinance, pour une raison structurelle que Del Pilar Miranda documente en 2019 pour l'Amérique latine : les coûts opérationnels liés au modèle *high-touch* sont si élevés et si peu compressibles – représentant parfois 30 à 40 % de l'encours de crédit – que la marge de manœuvre sur les taux reste étroite quel que soit le niveau de concurrence¹³⁷. Banco Compartamos illustre cette limite. L'analyse du CGAP publiée par Rosenberg en 2007 montre que même en ramenant son taux de retour sur fonds propres au niveau de rentabilité comparable à d'autres banques mexicaines, soit 15 % environ au lieu de plus de 50 %, l'institution aurait pu réduire ses taux

¹³⁶ HiveOnline, *hiveonline Completes Strategic Migration to Hedera to Scale Financial Inclusion for 75,000 Users*, december 16th, 2025. <https://www.hivenetworkonline/2025/12/hiveonline-completes-strategic-migration-to-hedera-to-scale-financial-inclusion-for-75000-users/>

¹³⁷ Del Pilar Miranda, D. (2019, 20 février). Disparities in the cost of microcredit in Latin America. Georgetown Public Policy Review. <https://gppreview.com/2019/02/20/disparities-cost-microcredit-latin-america/>

d'intérêt à une fourchette de 65 à 70 %, et non à des niveaux accessibles pour les emprunteurs les plus pauvres. La source du problème n'est donc pas exclusivement la rente des actionnaires, mais la structure de coûts d'un modèle qui ne peut atteindre ses populations cibles sans une intensité relationnelle incompressible. C'est cette contrainte d'architecture, et non seulement la régulation ou la gouvernance, que la désintermédiation par smart contracts* cherche à modifier.

1.2.3.2 Liquidité mondiale, gestion du risque et historique *on-chain*

La désintermédiation décrite dans la section précédente n'est pas restée au stade de la proposition théorique. À partir de 2017, dans le sillage du lancement d'Ethereum et des premiers protocoles de Finance Décentralisée (DeFi*), plusieurs initiatives ont tenté de mettre en œuvre une Micro-finance Décentralisée (Micro-DeFi*) dont l'analyse révèle trois axes : l'accès direct aux bassins de liquidité internationaux, la conception de mécanismes de gestion du risque adaptés à des emprunteurs sans garanties, et la constitution progressive d'un historique de crédit *on-chain** pour les populations non bancarisées.

L'accès direct aux liquidités mondiales : le cas EthicHub



La plateforme **EthicHub**, fondée en Espagne en 2017 et opérant principalement au Mexique, illustre de manière documentée le passage de la désintermédiation théorique à une architecture financière fonctionnelle. Son modèle connecte directement de petits agriculteurs non bancarisés à des investisseurs internationaux *via* des *smart contracts** déployés sur la blockchain Ethereum, supprimant les intermédiaires

locaux dont les taux de crédit dépassaient régulièrement 100 % par an selon les données propres de la plateforme. La sécurisation du prêt repose sur un mécanisme dit de « garantie collective » (*crowd-collateral*) : des prêteurs tiers déposent un capital de sécurité dans un *smart contract** qui absorbe les premiers défauts de paiement, rendant l'opération acceptable pour les prêteurs internationaux sans exiger de garanties matérielles de la part des emprunteurs. À partir de données déclarées par la plateforme, celle-ci indique avoir financé plus de 600 communautés agricoles pour un volume total supérieur à six millions de dollars américains (USD), avec un taux de défaut déclaré d'environ 1 %¹³⁸. Ces chiffres proviennent de sources institutionnelles internes et n'ont pas, à ce stade, fait l'objet d'une validation académique indépendante, ce qui ne les invalide pas mais impose toutefois de les traiter comme des données indicatives.

Ce modèle de connexion directe entre liquidité mondiale et emprunteurs locaux requiert cependant de résoudre le problème de la « dernière ligne » (*last mile*) : la sélection des emprunteurs, l'évaluation de la viabilité des projets et l'accompagnement restent assurés par des nœuds locaux humains (*Originators*), dont le rôle n'est pas supprimé mais redéfini. **EthicHub** ne désintérmedie donc pas l'ensemble de la chaîne de valeur, elle en reconfigure la structure de coût en substituant à un circuit financier local capturé par des prêteurs informels un accès à des réservoirs de capitaux globaux à des conditions plus favorables pour les deux parties.

¹³⁸ EthicHub. (s.d.). How it works.

<https://www.ethichub.com/en/what-is-it-and-how-does-it-work> ; et

<https://www.ethichub.com/en/docs/introduction/ethichub> (Données déclaratives internes, non vérifiées par une source académique indépendante à ce stade.)

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

La gestion du risque dans les contextes non bancarisés : le pilote colombien

L'intégration de populations sans garanties matérielles dans des protocoles de Finance Décentralisée (DeFi*, *Decentralized Finance*) pose un problème spécifique de gestion du risque qui dépasse les mécanismes classiques de la DeFi* – conçus pour des actifs numériques, non pour des emprunteurs physiques dont la solvabilité ne peut être vérifiée *on-chain**. Un projet pilote¹³⁹ conduit par Mercy Corps Ventures en Colombie en 2024-2025 a expérimenté une réponse architecturale à cette contrainte. Le modèle hybride développé avec les protocoles **Anzi Finance** et **Quipu** connecte les liquidités de la DeFi* à une institution locale de micro-crédit agissant comme interface de confiance vers les emprunteurs finaux. Un capital dit de « première perte » est immobilisé dans un *smart contract** : il absorbe les premiers défauts de paiement et permet ainsi d'attirer des prêteurs institutionnels ou particuliers qui n'auraient pas accepté le profil de risque brut de ce type de portefeuille. Cette architecture de financement mixte (*blended finance*) – dans laquelle un capital philanthropique ou public de première perte catalyse l'entrée de capitaux privés – est l'un des mécanismes les plus étudiés pour l'extension du crédit décentralisé à des contextes à risque élevé. Nous l'examinerons dans ses dimensions plus larges dans la section 2.3.1.

L'historique de crédit *on-chain* comme infrastructure d'inclusion

Plusieurs plateformes explorent une troisième voie, distincte du micro-crédit direct : la construction d'un historique de crédit enregistré sur un registre distribué pour des populations dont l'invisibilité financière tient

précisément à l'absence de toute trace dans les systèmes centralisés. Des initiatives comme **Hiveonline**, **Jia** ou **Clixpesa** fonctionnent sur ce principe : chaque transaction de prêt et chaque remboursement sont inscrits de manière immuable *on-chain**, constituant pour l'emprunteur un actif informationnel portable et vérifiable par tout futur prêteur, sans dépendre d'une institution centralisée intermédiaire. Cette logique rejoint les conclusions de Hoque, Kummer et Yigitbasioglu (2024), qui établissent que les blockchains peuvent « créer des profils financiers crédibles » susceptibles de réduire les coûts d'accès au capital pour les emprunteurs des pays en développement, tout en soulignant que la coordination entre acteurs et les enjeux de protection des données demeurent des obstacles opérationnels non résolus¹⁴⁰.

Les infrastructures de paiement comme condition d'accès : HesabPay en Afghanistan

Pour que la Micro-DeFi* soit opérante dans des environnements contraints, elle doit s'appuyer sur des infrastructures de paiement accessibles à des populations qui ne disposent ni de téléphones connectés à internet ni de comptes bancaires. La plateforme afghane **HesabPay**, lancée à Kaboul en 2016 et déployée sur la blockchain publique **Algorand**, illustre cette dimension. Elle est présentée par la fondation **Algorand** comme permettant des transactions hors ligne *via* des protocoles USSD (*Unstructured Supplementary Service Data*, données de service supplémentaires non structurées), qui fonctionnent sur des téléphones basiques sans connexion internet. Selon les données publiées par la fondation **Algorand** – source institutionnellement liée au protocole, dont les chiffres doivent être considérés avec les réserves d'usage – la plateforme gèrerait le paiement mensuel de

¹³⁹ Mercy Corps Ventures. (2025). Pilot insights: Unlocking DeFi*-powered credit for microentrepreneurs in Colombia. Mercy Corps.
<https://www.mercycorpsventures.com/blog/pilot-insights-unlocking-defi-powered-credit-for-microentrepreneurs-in-colombia>

¹⁴⁰ Hoque, M. M., Kummer, T.-F., & Yigitbasioglu, O. (2024). How can blockchain-based lending platforms support microcredit activities in developing countries? An empirical validation of its opportunities and challenges. *Technological Forecasting and Social Change*, 203, 123400. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123400>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

plus de 170 000 factures d'électricité, représentant 4 millions de dollars américains (USD) réglés en *stablecoins* (crypto-actifs à valeur stable), et aurait traité plus de 4,5 millions de transactions pour 400 000 utilisateurs actifs entre juillet 2023 et juin 2024¹⁴¹. Ces données illustrent l'ampleur potentielle de ces dispositifs dans des contextes de défaillance bancaire aiguë, même si leur vérification indépendante reste limitée.

Les monnaies d'inclusion communautaire comme liquidité micro-locale

Une troisième catégorie d'applications, conceptuellement distincte du micro-crédit et du paiement, concerne la création de liquidité au niveau micro-territorial *via* des monnaies complémentaires numériques. La fondation **Grassroots Economics**, au Kenya, permet à des communautés marginalisées d'émettre des bons d'actifs communautaires (BAC, appelés *Community Asset Vouchers* en anglais) enregistrés sur la blockchain **Celo**, fonctionnant comme un crédit mutuel adossé aux engagements productifs des participants. Clark, Mihailov et Zargham ont modélisé ces Monnaies d'Inclusion Communautaire (MIC, désignées en anglais sous le terme *Community Inclusion Currencies*, CIC) dans une étude publiée dans *Computational Economics* en 2024, établissant qu'elles peuvent « agir comme un dispositif institutionnel de fourniture de liquidité locale dans des régions économiques pauvres ou isolées¹⁴² », tout en soulignant que ces substituts monétaires sont perçus par leurs utilisateurs comme des instruments transitoires, inférieurs à la monnaie nationale lorsque celle-ci est accessible.

Au regard des données publiées par **Grassroots Economics** en avril 2026, la fondation compte 3 540 utilisateurs actifs, 141 réservoirs actifs et 752 bons d'actifs uniques émis par des individus et groupes locaux, des chiffres d'adoption modestes qui reflètent à la fois les conditions d'ancrage territoriale de ce modèle et les défis de son passage à l'échelle. Cette dimension sera approfondie dans la section 1.3.3.1, consacrée aux monnaies d'inclusion locale.

[E] La question du passage à l'échelle – pourquoi les cas d'usage restent locaux

Les applications de Micro-DeFi* documentées à ce jour partagent une caractéristique commune : elles fonctionnent à des échelles géographiques et démographiques étroites. **EthicHub** opère dans quelques centaines de communautés agricoles mexicaines ; **HesabPay**, dans un contexte de crise bancaire spécifique à l'Afghanistan ; **Grassroots Economics**, dans des zones rurales kényanes précisément délimitées. Ce confinement n'est pas un simple problème de notoriété ou de ressources. Il tient à une tension structurelle entre les propriétés des protocoles décentralisés – conçus pour des transactions numériques entre adresses pseudonymes – et les exigences de l'inclusion financière réelle, qui suppose une connaissance du terrain, une gestion de la confiance interpersonnelle et une capacité à traiter des défaillances dans des contextes juridiques souvent fragiles. Les protocoles qui ont réussi à dépasser le stade expérimental sont précisément ceux qui ont maintenu des acteurs locaux dans la boucle, au lieu de chercher à les remplacer. La désintermédiation radicale reste une promesse théorique ; la reconfiguration de l'intermédiation – moins coûteuse, plus transparente, connectée à des réservoirs de liquidité mondiaux – est ce que les cas documentés permettent d'observer.

¹⁴¹ Algorand Foundation. (2023). *How HesabPay became the first and only interoperable digital payments platform in Afghanistan*.

¹⁴² Clark, A., Mihailov, A., & Zargham, M. (2024). Complex systems modeling of community inclusion currencies. *Computational Economics*, 64(2), 1259–1294. <https://doi.org/10.1007/s10614-023-10445-9>

Ces limites seront analysées en détail dans la section 2.2.3, consacrée aux asymétries de pouvoir et au risque de ce que certains chercheurs désignent sous le terme de crypto-colonialisme.

1.3 La réinvention de la gouvernance et de l'allocation des biens communs

Les deux sections précédentes ont examiné, respectivement, l'émergence d'une économie régénérative et les nouvelles infrastructures financières que le Web3 met à sa disposition. Mais disposer d'une infrastructure – un registre public, des actifs tokenisés, des protocoles de financement – ne répond pas à la question la plus fondamentale de la finance à impact : qui décide de l'allocation, selon quelles règles, au bénéfice de qui, et avec quels mécanismes de contrôle ?

C'est cette question, celle de la gouvernance, que la présente section examine dans ses trois expressions les plus documentées. La gouvernance algorithmique des Organisations Autonomes Décentralisées (DAO*), d'abord, qui prétend substituer au conseil d'administration des *smart contracts**. L'allocation mathématique du financement quadratique* ensuite, qui cherche à révéler les préférences collectives là où le vote classique amplifie structurellement la voix des plus grands capitaux. Et enfin, à l'échelle la plus locale, les instruments qui créent de la liquidité et de l'infrastructure là où ni l'une ni l'autre n'existent – les Monnaies d'inclusion communautaire (CIC) et les Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePIN*).

À chaque niveau, cette même ambition de déplacer le pouvoir d'allocation vers ceux qui en sont le plus éloignés. À chaque niveau aussi, une même question ouverte : ce déplacement est-il réel, ou reproduit-il sous

une forme nouvelle les asymétries qu'il prétend corriger ?

1.3.1 Les Organisations Autonomes Décentralisées (DAOs*) à impact

Toute institution de gouvernance repose sur une délégation de pouvoir à un nombre restreint d'agents censés représenter le collectif. Cette délégation crée structurellement une asymétrie entre mandants et mandataires – et avec elle, le risque que les décisions prises au nom du groupe servent *in fine* des intérêts particuliers. Les Organisations Autonomes Décentralisées (DAO*, *Decentralized Autonomous Organizations*) proposent une réponse architecturale à ce problème ancien : remplacer l'autorité déléguée par du code. Les règles de gouvernance ne sont plus décidées par des hommes – elles sont encodées dans des *smart contracts**, exécutés automatiquement et vérifiables par tous.

La promesse est considérable. La réalité, à ce stade, est plus étroite. Selon les données de Snapshot Labs, principal outil de vote utilisé par les DAO*, le taux de participation moyen des détenteurs de jetons reste inférieur à 20 %¹⁴³. Le rapport *State of DeFi** 2025, co-publié par DL Research et DefiLlama en décembre 2025, documente une dégradation supplémentaire sur l'exercice écoulé : sur les six plus grandes DAO* analysées – **Aave**, **Lido**, **Uniswap**, **Arbitrum**, **Balancer** et **Frax** –, le nombre de propositions soumises a chuté d'au moins 60 % et jusqu'à 90 % en glissement annuel, tandis que la participation médiane des votants a reculé dans cinq des six protocoles¹⁴⁴.

¹⁴³ Snapshot Labs, cité dans DAOtimes. (2025). *Snapshot DAO Tool Report for 2025*.

<https://daotimes.com/snapshot-dao-tool-report-for-2025/>

¹⁴⁴ DL Research & DefiLlama. (2025, décembre). *State of DeFi** 2025. DL News. <https://www.dlnews.com/research/internal/state-of-defi->

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Les auteurs concluent que la gouvernance des DAO* a évolué d'une « expérimentation à haute fréquence vers un contrôle professionnalisé », la délégation à un nombre restreint de grands détenteurs devenant structurellement centrale au détriment de la participation directe. Cette tendance a conduit en 2025 des acteurs majeurs à abandonner leurs structures de gouvernance décentralisée : la plateforme d'échange Solana Jupiter a invoqué une « rupture de confiance », tandis que le PDG de Yuga Labs a qualifié publiquement l'Apecoin DAO* de « théâtre de gouvernance : lent, bruyant et souvent peu sérieux¹⁴⁵ ».

Les exemples d'organisations véritablement opérationnelles, comme **Big Green DAO**, qui a substitué les bénéficiaires aux donateurs dans les décisions d'allocation, ou **Octant**, qui redistribue les rendements d'une trésorerie collective, sont documentés précisément parce qu'ils font exception. Ils illustrent ce que le modèle peut produire lorsque les conditions sociales, techniques et incitatives sont réunies. Ils ne disent rien de ce qu'il produit en moyenne.

Automatiser des règles ne répond pas non plus à la question de qui les a écrites, ni à celle de qui détient les jetons qui permettent d'y participer. La section examine d'abord la mécanique formelle de ce transfert de pouvoir, puis ces deux initiatives à impact dont les architectures, et les limites – sont aussi instructives que les ambitions.

¹⁴⁵ [2025/](https://www.dnnews.com/articles/defi/daos-grew-quieter-in-2025-per-state-of-defi-report/) ; synthèse disponible sur <https://www.dnnews.com/articles/defi/daos-grew-quieter-in-2025-per-state-of-defi-report/>

¹⁴⁵ Gilbert, A. (2025, 9 juillet). Is there a future for DAOs ? CoinDesk. <https://www.coindesk.com/business/2025/07/09/is-there-a-future-for-daos>

1.3.1.1 Le transfert du pouvoir par les *smart contracts**

La question de la gouvernance traverse l'ensemble de l'histoire des institutions humaines : comment des individus aux intérêts divergents parviennent-ils à prendre des décisions collectives, à allouer des ressources communes et à en contrôler l'usage ? Les réponses institutionnelles classiques – l'assemblée délibérative, le conseil d'administration, la direction générale – reposent toutes sur une délégation de pouvoir à un nombre restreint d'agents censés représenter le groupe. Cette délégation crée inévitablement une asymétrie entre mandants et mandataires, et avec elle le risque que les décisions prises au nom du collectif servent *in fine* des intérêts particuliers. C'est précisément cette asymétrie que les Organisations Autonomes Décentralisées (DAO*) prétendent résoudre – non par une réforme des règles de gouvernance, mais par une substitution architecturale de leur support.

Ce que l'architecture d'une DAO* change structurellement

Une Organisation autonome décentralisée (DAO*) est une forme d'organisation dont les règles de fonctionnement et les mécanismes de décision sont encodés directement dans des *smart contracts** déployés sur une blockchain publique, accessibles, vérifiables et exécutés automatiquement sans intervention humaine. Contrairement à une entreprise ou à une organisation traditionnelle, dans lesquelles un conseil d'administration restreint détient l'autorité décisionnelle sur la trésorerie et la stratégie de l'organisation, une DAO* transfère cette autorité à l'ensemble de ses membres *via* un système de vote *on-chain**. Les membres participent à la gouvernance en détenant des jetons, dits *tokens* de gouvernance, qui leur confèrent des droits de

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

vote proportionnels à leur détention, ou selon des modèles alternatifs fondés sur la réputation ou encore la contribution. Par exemple, la DAO* **Uniswap**¹⁴⁶, un protocole d'échange décentralisé dont la trésorerie dépasse le milliard de dollars, soumet à ses détenteurs de *tokens* UNI toute décision relative à l'affectation des fonds, aux paramètres de frais ou aux évolutions du protocole. Chaque proposition est ainsi débattue publiquement, puis soumise à un vote enregistré *on-chain**, dont l'issue s'applique sans qu'aucune autorité centrale puisse s'y opposer.

Ce déplacement architectural a trois conséquences distinctes. La première est la **transparence structurelle** puisque l'intégralité des décisions prises, des votes exprimés et des flux de trésorerie est inscrite de manière permanente et vérifiable par tout acteur sur le registre public. Il n'est plus nécessaire de faire confiance aux déclarations d'un dirigeant ou aux rapports annuels d'un auditeur – la traçabilité est *a priori* totale et non permissionnée. La deuxième est **l'automatisation de l'exécution** : les décisions approuvées par le vote sont exécutées par les *smart contracts** sans nécessiter de validation humaine intermédiaire, éliminant les délais, les risques de non-exécution et les possibilités de détournement *ex post* entre la décision et son application. La troisième est **l'ouverture de la participation** : toute personne disposant d'une connexion internet et de jetons de gouvernance peut soumettre une proposition, voter sur celles des autres et auditer la trésorerie collective, indépendamment de sa nationalité, de son statut institutionnel ou de sa proximité géographique avec le siège de l'organisation.

Esposito, Tse et Goh, dans une analyse publiée dans *Frontiers in Blockchain* en 2025, résument cette reconfiguration en soulignant que les DAO* « *permettent une gestion démocratique d'actifs – dépenses organisationnelles, trésoreries partagées, gestion des biens communs – sans nécessiter d'autorité centrale de gouvernance*¹⁴⁷ », les décisions étant « *exécutées automatiquement*¹⁴⁸ » une fois approuvées par la communauté des détenteurs de jetons.

Le mécanisme du vote *on-chain** et ses présupposés

Dans sa configuration la plus répandue, la gouvernance d'une DAO* fonctionne en trois temps. Un membre soumet une proposition – allocation de fonds vers un projet, modification d'un paramètre du protocole, embauche d'un prestataire – accompagnée d'un délai de vote. L'ensemble des détenteurs de jetons de gouvernance peut alors exprimer son vote pendant ce délai, chaque jeton conférant une voix.

Si la proposition dépasse le seuil d'approbation fixé *a priori* dans le code du *smart contract** – par exemple une majorité simple ou un quorum minimum –, elle est exécutée automatiquement : les fonds sont transférés, les paramètres modifiés, les droits attribués, sans qu'un administrateur ait besoin d'en valider manuellement l'exécution.

Cette architecture repose sur un présupposé politique explicite, que Jha formule en 2025 comme le principe d'une « *autorité égale de prise de décision, souvent médiée par des smart contracts*¹⁴⁹ ».

¹⁴⁷ Esposito, M., Tse, T., & Goh, D. (2025). Decentralizing governance: exploring the dynamics and challenges of digital commons and DAOs. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1538227. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1538227>

¹⁴⁸ *Ibid.*

¹⁴⁹ Jha, R. (2025). Exploring the governance paradox: An analytical framework for decentralized accountability and

¹⁴⁶ <https://app.uniswap.org/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Ce présupposé – selon lequel la décentralisation du vote produit une gouvernance plus équitable – a cependant fait l'objet d'une critique croissante dans la littérature académique. Esposito et al. documentent que dans la pratique, le vote pondéré par les jetons tend à produire une gouvernance de fait oligarchique, dans la mesure où « *la concentration de pouvoir de gouvernance crée des incitations à la collusion et à l'achat de votes, les grands détenteurs de jetons pouvant former des cartels ou des structures de gouvernance déléguée pour maintenir leur contrôle*¹⁵⁰ ». Les données empiriques confirment cette tendance. Par exemple, dans la DAO* Decentraland, la participation moyenne par proposition s'établissait à 0,79 %, avec une participation médiane de 0,16 %. Sur 30 000 DAO* analysées par le DAO* Index en 2025, 53 % étaient inactives, sans aucune proposition soumise dans les six mois précédents. L'apathie des petits porteurs de jetons laisse *de facto* les décisions aux mains des grands détenteurs, reproduisant une forme de primauté actionnariale que la DAO* prétendait précisément supplanter.

[E] MakerDAO / Sky - dix ans de gouvernance décentralisée

MakerDAO trouve son origine dans un message posté sur le forum Reddit r/ethereum en 2015 par Rune Christensen, alors entrepreneur dans le secteur du recrutement international, sous le titre

impact in climate DAOs. International Journal of Cryptocurrency Research, 5(1), 25–43.

https://www.researchgate.net/profile/Rubhesh-Jha/publication/393858174_Exploring_the_Governance_Paradox_An_Analytical_Framework_for_Decentralized_Accountability_and_Impact_in_Climate DAOs/links/687df0697d202419e84d9b6d/Exploring-the-Governance-Paradox-An-Analytical-Framework-for-Decentralized-Accountability-and-Impact-in-Climate-DAOs.pdf

¹⁵⁰ Ibid.

Introducing eDollar, the ultimate stablecoin built on Ethereum. L'ambition est simple à formuler, complexe à réaliser : créer une monnaie stable et décentralisée, sans dépendre de réserves bancaires.

La construction technique (2017–2019)

En décembre 2017, un premier livre blanc formel décrit le système DAI à collatéral unique (Single-Collateral Dai, ou Sai), dans lequel tout utilisateur peut générer du DAI en déposant de l'Ether comme garantie via des smart contracts* appelés Collateralized Debt Positions (CDP). En novembre 2019, le protocole franchit une étape décisive en acceptant des actifs de garantie multiples – ouvrant l'architecture à une diversification du risque. Le jeton de gouvernance MKR confère à ses détenteurs le droit de voter sur les paramètres du protocole – taux de stabilité, plafonds de dette, types de collatéraux acceptés – selon un principe d'une voix par jeton.

Le Jeudi Noir : le premier test systémique (mars 2020)

Le 12 mars 2020, une chute brutale du prix de l'Ether provoque une congestion du réseau Ethereum qui empêche les oracles* de prix de mettre à jour leurs flux en temps utile. Pour 8,32 millions de dollars américains (USD) d'ETH liquidé, aucun acheteur ne se présente aux enchères, laissant le protocole avec 5,67 millions de dollars de dette non couverte. Une action collective est déposée contre la Maker Foundation, représentant jusqu'à 3 000 investisseurs ayant subi des pertes lors de cet événement. La crise révèle deux failles : la dépendance aux oracles* comme point de défaillance centralisé, et l'inadaptation du mécanisme d'enchères à des conditions de marché extrêmes. **MakerDAO** répond par une action de gouvernance d'urgence – émission de nouveaux jetons MKR pour couvrir le déficit – et par l'introduction du stablecoin centralisé USDC comme garantie

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

d'urgence, entérinant une première concession au pragmatisme au détriment des principes de décentralisation.

L'intégration des actifs réels et la montée en puissance (2021–2022)

En juillet 2021, **MakerDAO** devient le premier protocole de Finance Décentralisée (DeFi*) à étendre une ligne de crédit de 100 millions de dollars à une banque traditionnelle, via SocGen Forge, adossée à des actifs du monde réel (Real World Assets, RWA*). En 2022, les RWA* – bons du Trésor américain, dette immobilière, créances privées – génèrent plus de 100 millions de dollars de revenus annuels pour le protocole. Le modèle prouve qu'une DAO* peut opérer à l'interface de la finance décentralisée et du système financier traditionnel – au prix, cependant, d'une dépendance croissante à des actifs réglementés et centralisés.

La crise de gouvernance et l'« Endgame » (2022–2023)

C'est dans ce contexte de croissance que les tensions internes éclatent. En octobre 2022, Rune Christensen soumet un plan de refonte intégrale du protocole – l'« Endgame Plan » – prévoyant la création de sous-DAO* (MetaDAOs) autonomes, une restructuration des jetons et, à terme, un décrochage du DAI par rapport au dollar. La proposition divise profondément la communauté. L'analyse des votes révèle une contradiction structurelle irréductible avec les principes de la gouvernance décentralisée : sur les propositions clés de l'Endgame, environ 74 % du pouvoir de vote ayant approuvé les mesures provenait de jetons délégués par Christensen lui-même, conduisant un analyste interne à résumer la situation ainsi : « *si 122 personnes ont voté, une seule compte, puisqu'elle représente 63 % du résultat* ». Christensen lui-même reconnaît que l'apathie des détenteurs de jetons et les très faibles taux de participation constituent le problème

central de la gouvernance des DAO*, et que l'Endgame est conçu précisément pour y remédier.

Le rebrand **Sky** et ses controverses (2024)

En septembre 2024, **MakerDAO** se renomme **Sky** Ecosystem et lance deux nouveaux jetons : USDS, stablecoin de nouvelle génération, et SKY, jeton de gouvernance remplaçant MKR selon un taux de conversion de 1 MKR pour 24 000 SKY. La refonte déclenche de nouvelles tensions. La révélation que le stablecoin USDS intégrera une fonction de gel (*freeze function*) – permettant techniquement de bloquer des fonds – est perçue par une partie de la communauté comme une trahison des principes fondateurs de la DeFi*. Lors du vote confirmant le maintien du nom **Sky**, quatre entités seulement, sur une vingtaine de participants, représentent près de 80 % du pouvoir de vote exprimé – chacune pesant environ 20 % du total. La décentralisation proclamée dans l'architecture formelle contraste avec la concentration *de facto* du pouvoir décisionnel.

L'état actuel (2025–2026)

La valeur totale verrouillée dans le protocole s'établit à environ 6 milliards de dollars américains en 2026, dont 2,18 milliards adossés à des bons du Trésor américain – première catégorie d'actifs de réserve – et 1,40 milliard en Ether. Le DAI maintient une capitalisation boursière d'environ 5,36 milliards de dollars avec une volatilité hebdomadaire de l'ordre de 0,003 %. En février 2025, une proposition d'urgence hors calendrier modifie les paramètres de marché du MKR en doublant le plafond de dette – suscitant une nouvelle vague de critiques sur la centralisation réelle du pouvoir de gouvernance et la question de savoir si **Sky** est encore une DAO* ou « *simplement un conseil d'administration avec des étapes supplémentaires* ».

MakerDAO/Sky reste, à ce jour, l'un des rares protocoles de Finance décentralisée (DeFi*) à avoir traversé un cycle complet, ambition fondatrice, crise systémique, reconstruction technique, conflits de gouvernance, restructuration identitaire, sur une décennie. Son histoire documente, plus que toute démonstration théorique, la distance entre la promesse de la gouvernance décentralisée et les dynamiques de pouvoir réelles qui la structurent.

La relation entre code et pouvoir

Ce paradoxe – une architecture conçue pour distribuer le pouvoir qui tend à le reconcentrer – n'est pas contingent mais tient à la nature même du vote pondéré par des jetons dont la distribution initiale est rarement égalitaire. Les fondateurs du protocole, les premiers investisseurs et les équipes techniques détiennent structurellement des positions dominantes dans la gouvernance, y compris lorsque le code formel du *smart contract** ne leur accorde aucun droit spécial. Comme le soulignent Esposito et al., la gouvernance par *smart contracts** introduit une forme nouvelle d'asymétrie, dans laquelle le pouvoir réel réside moins dans les règles formellement encodées que dans la capacité à façonner ces règles *ab initio* – c'est-à-dire dans la conception initiale du protocole lui-même.

Des initiatives cherchent à déplacer ce pouvoir de conception vers des communautés plus éloignées de l'écosystème *crypto-natif*. La *Cosmo-Local Credit DAO* de **Grassroots Economics**, lancée en 2026¹⁵¹ au Kenya, transfère la gestion du crédit communautaire à une organisation décentralisée *on-chain** dans laquelle les membres, agriculteurs et groupes de femmes ruraux, décident collectivement des allocations *via* des

protocoles qui allient délibération locale et exécution par *smart contracts**.

Dans un registre différent, le *Glo Consortium* de **Glo Dollar** illustre l'encodage d'une obligation de reversement dans le protocole lui-même : les organisations qui adoptent le *stablecoin** **Glo Dollar** n'ont pas à faire confiance à une promesse de l'émetteur, le *smart contract** garantit mécaniquement que le seigneurage est reversé à des programmes d'éradication de la pauvreté, rendant le code juridiquement et techniquement opposable¹⁵².

Ce constat n'invalide pas la proposition institutionnelle des DAO*, mais en précise les conditions d'efficacité. Les protocoles qui ont développé des modèles de gouvernance alternatifs – vote quadratique*, où le coût marginal d'une voix supplémentaire croît avec le nombre de voix déjà exprimées ; vote par réputation, fondé sur les contributions passées plutôt que sur la détention de jetons ; ou modèles bicaméraux comme celui de l'**Optimism Collective**, combinant une chambre de détenteurs de jetons et une chambre de citoyens sélectionnés sur leur contribution – cherchent précisément à corriger ce biais structurel. Ces mécanismes alternatifs feront l'objet d'un examen détaillé dans la section 1.3.2, consacrée au financement quadratique* et à ses défis.

[E] La DAO* comme héritière du débat sur la gouvernance des communs

La proposition institutionnelle des DAO* s'inscrit dans une tradition intellectuelle plus ancienne que le Web3, celle de la gouvernance des biens communs (commons governance). La politiste Elinor Ostrom, prix Nobel d'économie en 2009, a établi dans ses travaux fondateurs que des

¹⁵¹ <https://grassecon.org/about>

¹⁵² <https://www.glodollar.org>

communautés pouvaient gérer collectivement des ressources partagées sans privatisation ni contrôle étatique, à condition de satisfaire huit principes structurels – parmi lesquels la définition claire des membres, des règles adaptées au contexte local, des mécanismes de décision collective, et des systèmes de sanction graduée¹⁵³.

Esposito, Tse et Goh mobilisent explicitement ce cadre pour évaluer les DAO* en 2025, concluant que si les smart contracts* fournissent des outils techniques pour satisfaire certains principes d'Ostrom – transparence, traçabilité, automatisation de l'exécution –, ils ne garantissent pas la satisfaction d'autres, notamment l'adaptation des règles au contexte local et la résolution équitable des conflits. Une DAO* hérite des avantages formels de la gouvernance algorithmique, mais aussi de ses limites : elle ne peut coder que ce qui est quantifiable, et les dynamiques sociales, culturelles et politiques qui fondent la légitimité d'une décision collective dépassent la capacité d'expression de tout smart contract*.

Cette tension – entre la robustesse formelle du code et la richesse de la délibération humaine – constitue la limite fondamentale que les applications pratiques des DAO* à impact, que nous examinerons dans la section 1.3.1.2, ont tenté de résoudre avec des degrés variables de succès.

1.3.1.2 Autonomiser le terrain : des exemples de DAO*

La déconnexion entre détenteurs de capital et détenteurs de la connaissance terrain constitue l'un des angles morts structurels de la finance à impact. Dans les dispositifs conventionnels d'allocation et notamment les fondations philanthropiques, les fonds d'investissement à impact ou encore les

programmes de financement public, ce sont systématiquement les premiers qui définissent les critères d'éligibilité, les échéances et les exigences de reporting ; les seconds n'y accèdent qu'en traduisant leurs priorités réelles dans le langage attendu par les financeurs, au prix d'une reformulation qui en altère souvent la substance. Le résultat reproduit les travers documentés dans la finance à impact classique : une friction croissante entre l'intention déclarée et l'action effective, et une concentration du pouvoir normatif dans les mains de ceux qui fixent les règles plutôt que de ceux qui conduisent les projets. C'est précisément cette asymétrie que les Organisations autonomes décentralisées (DAO*) à impact cherchent à reconfigurer, en cherchant à redistribuer l'autorité décisionnelle *via* des mécanismes de gouvernance *on-chain**, substituant, du moins dans leur principe, au jugement discrétionnaire des financeurs des règles d'allocation encodées et collectivement délibérées. Deux initiatives aux architectures distinctes permettent d'en évaluer la portée concrète.

Big Green DAO : quand les bénéficiaires deviennent décideurs

Big Green est une organisation à but non lucratif américaine fondée en 2011 par Kimbal Musk et Hugo Matheson, consacrée à la justice alimentaire et au développement de l'agriculture communautaire. En novembre 2021, l'organisation a lancé une DAO* dont l'ambition explicite était de « *démanteler les structures de pouvoir inéquitables en philanthropie* » en plaçant les organisations bénéficiaires aux commandes de l'allocation des fonds, selon les termes de sa propre charte institutionnelle¹⁵⁴. Le mécanisme est simple dans son principe mais radical dans ses implications : chaque participant – donateur ou association bénéficiaire – reçoit un jeton de gouvernance \$GARDEN, non transférable,

¹⁵³ Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.

¹⁵⁴ Big Green. (s.d.). Big Green DAO: Decentralized grantmaking for food justice. <https://biggreen.org/our-impact/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

lui conférant une voix dans les décisions d'attribution de subventions. La règle fondamentale est l'égalité absolue des suffrages : quel que soit le montant apporté au trésor commun, chaque membre ne dispose que d'un seul vote. Kimbal Musk lui-même a publiquement renoncé à voter dans la DAO*, afin de ne pas peser sur les décisions d'organisations qu'il finançait en tant que donateur¹⁵⁵.

Cette architecture produit des effets quantifiables sur la structure de coûts. Musk l'a explicité dans un entretien accordé à CoinDesk en 2022 : dans une fondation philanthropique classique gérant 100 millions de dollars par an, environ 15 % sont absorbés par les frais de personnel chargés de la sélection des projets et du reporting, et les associations bénéficiaires consacrent elles-mêmes environ 25 % de leurs ressources à la collecte de fonds, si bien que seulement 65 % des capitaux atteignent le travail de terrain. La **Big Green DAO** se fixe un plafond de frais généraux de 5 %, portant *a priori* à 95 % la part des fonds disponibles pour l'action directe¹⁵⁶. Ces chiffres sont déclaratifs et n'ont pas fait l'objet d'une vérification par une source académique indépendante, mais ils illustrent la logique structurelle de la désintermédiation appliquée à la philanthropie. À ce jour, la fondation indique avoir distribué plus de 4,4 millions de dollars américains directement à des projets communautaires *via* la **Big Green DAO**¹⁵⁷.

L'expérience a néanmoins révélé des limites opérationnelles que ses concepteurs n'avaient pas anticipées. Les praticiens de terrain, peu familiers des outils numériques du Web3, ont

nécessité un accompagnement important pour participer effectivement à la gouvernance *on-chain**. La charge de temps liée à la gouvernance s'est avérée substantielle pour des organisations dont les ressources humaines sont contraintes. Ce décalage entre la promesse d'une gouvernance horizontale et les prérequis techniques qu'elle suppose illustre la tension, analysée dans la section 1.3.1.1, entre l'architecture formelle des DAO* et les conditions sociales de leur fonctionnement effectif.

Octant : le rendement de la mise en jeu au service des biens publics

Octant est une initiative lancée par la Golem Foundation qui illustre une troisième architecture, distincte des deux précédentes par son mécanisme de génération de fonds. Plutôt que de s'appuyer sur des dons de donateurs, **Octant** utilise les rendements générés par la mise en jeu (*staking**) de 100 000 jetons Ether (ETH) immobilisés dans sa trésorerie pour constituer un fonds de financement continu des biens publics numériques. La mise en jeu consiste à immobiliser des jetons dans un protocole de validation du réseau Ethereum en échange d'une rémunération – c'est *in fine* le réseau lui-même qui produit les fonds distribués, sans appel à la générosité externe.

L'allocation de ces fonds n'appartient pas à la Golem Foundation, mais aux utilisateurs qui verrouillent des jetons GLM sur la plateforme et acquièrent ainsi le droit de vote lors de cycles de financement réguliers désignés sous le terme d'« époques »¹⁵⁸. À chaque époque, les participants votent pour désigner les projets d'intérêt général qui recevront les fonds disponibles, en protégeant *a priori* le processus d'allocation contre les biais ou les

¹⁵⁵ Musk, K. (2022, juin). Entretien avec CoinDesk. In Kimbal Musk and his Big Green DAO. CoinDesk. <https://www.coindesk.com/business/2022/06/02/kimbal-musk-and-his-big-green-dao>

¹⁵⁶ *Ibid.*

¹⁵⁷ Musk, K. (2025, octobre). A Big Green Bright Future. Medium. <https://medium.com/@kimbal/a-big-green-bright-future-e83567a05351> (Données cumulatives déclarées par le fondateur ; non vérifiées par une source académique indépendante.)

¹⁵⁸ Bizkova, T., & Simon, D. (2024). *Exploring the Octant Ecosystem Part 1: Octant's Innovative Approach to Funding Public Goods Through Community Governance*. Crypto Altruists. <https://www.cryptotaltruists.com/blog/exploring-the-octant-ecosystem-part-1-inside-octant-funding-public-goods-through-innovative-community-governance>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

volontés unilatérales de grands financeurs institutionnels. Ce modèle présente l'avantage d'être structurellement indépendant des cycles de levée de fonds philanthropiques, dans la mesure où les rendements du *staking** constituent une source de revenus récurrente et prévisible – pour autant que la valeur de l'ETH et les taux de rendement du réseau demeurent stables, ce qui constitue une hypothèse non garantie dans un environnement de marché volatile.

Dans tous les cas, ces deux exemples partagent la même conviction selon laquelle les acteurs directement engagés dans l'action disposent d'une connaissance du terrain que les décideurs centralisés ne peuvent acquérir à distance. D'autres initiatives ont cherché à exporter ce modèle au-delà d'une communauté unique : **Gitcoin**, après avoir distribué plusieurs centaines de millions de dollars *via* son mécanisme de financement quadratique, a lancé en décembre 2024 une branche de services professionnels destinée à aider d'autres organisations à déployer leurs propres programmes de subventions décentralisés, exportant son modèle de gouvernance vers des écosystèmes tiers¹⁵⁹ sans en centraliser le contrôle¹⁶⁰. L'architecture des DAO à impact cherche précisément à traduire cette conviction en mécanisme opérationnel, en substituant à la délégation de décision vers le haut une délégation vers le bas, outillée par des *smart contracts*. Les deux modèles examinés illustrent deux voies distinctes pour atteindre cet objectif : l'égalité formelle du suffrage indépendamment du montant apporté (**Big Green DAO**) et la redistribution communautaire des rendements générés par une trésorerie collective (**Octant**).



Kolektivo constitue un quatrième modèle, structurellement distinct des trois précédents par son ancrage territorial

explicite. Déployé depuis 2019 sur la blockchain **Celo** à Curaçao et à Trinidad-et-Tobago, **Kolektivo** n'est pas une DAO de financement de projets : c'est une infrastructure permettant aux communautés caribéennes de créer et de gérer des économies circulaires fondées sur leurs ressources naturelles locales, en combinant monnaies communautaires, mécanismes d'incitation économique et gouvernance décentralisée – ce que ses concepteurs désignent sous le terme de *place-based tokenomics* (économie des jetons fondée sur le territoire). Le projet a été sélectionné par l'UNICEF Venture Fund parmi sept initiatives retenues sur quatre cents candidatures¹⁶¹. L'architecture de gouvernance de **Kolektivo** diffère de celle de **Big Green DAO**, de **Giveth** et d'**Octant** sur un point décisif : elle ne cherche pas à optimiser l'allocation d'un capital externe vers des bénéficiaires locaux, mais à donner aux communautés elles-mêmes les outils pour valoriser, certifier et gouverner leurs propres ressources naturelles, forêts alimentaires, actifs de biodiversité, engagements de production agroforestière. Les décisions d'allocation ne portent pas sur un fonds externe : elles portent sur la définition même de ce qui constitue une ressource locale valorisable, et sur la règle de distribution des bénéfices de sa valorisation. Ce modèle soulève directement la tension documentée dans l'encadré suivant : la gouvernance est ici *de facto* ancrée dans le territoire, mais elle suppose une maîtrise technique minimale des outils *on-chain** de la part de communautés dont ce n'est pas nécessairement la première priorité. La question de qui, concrètement, code les règles et les paramètres du *smart contract** reste posée, et avec elle, la question de la distance entre la gouvernance formelle et la gouvernance réelle.

¹⁵⁹ Comme ZKsync, Sei, Avalanche.

¹⁶⁰ Gitcoin, 2025, <https://gitcoin.co/blog>

¹⁶¹ Kolektivo, 2025, <https://kolektivo.network>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Chacune de ces architectures présente des avantages et des limites spécifiques – en termes d'accessibilité, d'incitations et de résistance à la reconcentration du pouvoir – que les sections suivantes et la deuxième partie de ce rapport permettront d'analyser plus précisément, notamment dans l'examen des risques d'illusion de décentralisation à la section 2.2.3.

[E] Gouvernance de terrain ou gouvernance crypto-native ?

Les trois exemples analysés dans cette section soulèvent une question que la littérature sur les DAO* à impact commence à formuler explicitement : à qui appartient de facto le pouvoir de gouvernance dans ces structures ?

Dans la **Big Green DAO**, le principe d'égalité des votes neutralise formellement l'avantage lié au montant des contributions. Mais la participation effective à la gouvernance *on-chain** suppose une maîtrise minimale des outils numériques du Web3 – création d'un portefeuille numérique, compréhension des mécanismes de vote *on-chain**, familiarité avec les interfaces de gouvernance – qui exclut structurellement les acteurs de terrain les moins dotés en capital numérique. L'architecture formelle de la DAO* peut ainsi reproduire, sous une forme différente, l'asymétrie qu'elle prétend supprimer : non plus entre donateurs riches et associations pauvres, mais entre participants crypto-natifs et praticiens de terrain.

Jha documente ce paradoxe en 2025 en établissant que dans les DAO* à impact climatique, « l'accès limité à l'expertise compromet la qualité des décisions » et que la complexité de la gouvernance *on-chain** crée des barrières à l'entrée qui tendent à concentrer le pouvoir décisionnel entre les

moins des membres les plus techniquement familiers avec l'écosystème (Jha, 2025).

Ce constat rejoint la critique plus large adressée aux mécanismes de vote pondéré par des jetons, examinée dans la section 1.3.1.1 : le déplacement du pouvoir opéré par les DAO* n'est pas toujours au bénéfice des acteurs de terrain, mais parfois au bénéfice d'une nouvelle élite technique.

1.3.2 L'allocation démocratique

Dans tout système où l'influence est proportionnelle au capital apporté, la délibération collective dérive structurellement vers la ploutocratie – non par corruption, mais par *design*. Un don de 10 000 euros d'un unique contributeur l'emporte invariablement sur cent dons de 100 euros, quelle que soit la légitimité communautaire que reflète le second schéma.

Le financement quadratique* (*Quadratic Funding*) est une proposition mathématique pour corriger ce biais. En amplifiant l'abondement non pas en proportion du montant des contributions mais du nombre de contributeurs, il cherche à révéler ce que les marchés financiers classiques ne peuvent pas voir – l'épaisseur d'un soutien communautaire, indépendamment de sa profondeur financière.

L'élégance théorique est documentée, et les applications à grande échelle en attestent la faisabilité opérationnelle. Mais la propriété mathématique qui confère au mécanisme sa force distributive est précisément celle qui le rend vulnérable : si amplifier le nombre compte davantage qu'amplifier le montant, simuler le nombre devient la fraude la plus rentable. Cette section examine les deux faces du dispositif – sans que l'une n'occulte l'autre.

1.3.2.1 Le financement quadratique* (*Quadratic Funding*)

Dans tout système d'allocation de capital où l'influence est proportionnelle au montant apporté, les acteurs disposant de ressources importantes exercent structurellement une capacité décisionnelle sans commune mesure avec leur représentativité au sein de la communauté concernée. Cette asymétrie s'observe aussi bien dans les marchés financiers classiques – où les grands investisseurs institutionnels orientent les prix et les flux – que dans les mécanismes de financement participatif des biens publics, où une contribution de 10 000 euros d'un unique donateur l'emporte invariablement sur cent contributions de 100 euros chacune, indépendamment du soutien communautaire réel que reflète le second schéma. Le financement quadratique* (*Quadratic Funding*, QF) est un mécanisme de conception de marché conçu pour corriger précisément cette asymétrie.

Les fondements théoriques

Le mécanisme a été formalisé par Vitalik Buterin, Zoë Hitzig et E. Glen Weyl dans un article publié dans *Management Science* en 2019, intitulé *A Flexible Design for Funding Public Goods*¹⁶². Les auteurs partent d'un problème classique de la théorie économique : le sous-financement des biens publics. Un bien public est, au sens de la théorie économique, un bien dont la consommation est non exclusive et non rivale, comme une infrastructure logicielle ouverte, un protocole de vérification d'impact partagé, une base de données environnementale en accès libre. Parce que chaque acteur peut en bénéficier sans contribuer à son financement, le marché privé le sous-produit

systématiquement : c'est le problème classique du passager clandestin (*free rider*). Les mécanismes conventionnels – vote majoritaire, don volontaire, subvention publique centralisée – ne résolvent ce problème qu'imparfaitement, en ne révélant pas fidèlement l'intensité des préférences collectives.

Le financement quadratique* propose une réponse qui s'appuie sur la structure mathématique suivante. Chaque individu contribue librement au(x) projet(s) de son choix. Le montant total reçu par un projet n'est pas la simple somme des contributions individuelles, mais le carré de la somme des racines carrées de ces contributions, la différence entre ce total et la somme des contributions individuelles étant couverte par un fonds de contrepartie (*matching pool*) abondé par des financeurs institutionnels ou publics¹⁶³. L'effet de cette formule est contre-intuitif mais rigoureusement démontré : un projet soutenu par cent personnes contribuant chacune un euro reçoit un abondement nettement supérieur à celui d'un projet recevant cent euros d'un seul contributeur, bien que les montants bruts collectés soient identiques.

Formellement, cent contributeurs d'un euro chacun génèrent une somme des racines carrées de 100 ($10 \times \sqrt{1} = 10$, soit un total financé de $100^2/100 = 100$, auquel s'ajoute l'abondement), tandis qu'un contributeur unique de 100 euros génère une racine carrée de $\sqrt{100} = 10$, et un total financé identique mais sans abondement comparativement supérieur. Le mécanisme amplifie donc l'abondement en proportion directe du nombre de contributeurs distincts, et non du montant total apporté. En termes économiques, l'abondement agit comme un signal de préférence collective : là où de nombreuses personnes contribuent, même modestement, le fonds de contrepartie investit davantage, révélant ainsi la valeur

¹⁶² Buterin, V., Hitzig, Z., & Weyl, E. G. (2019). A flexible design for funding public goods. *Management Science*, 65(11), 5171–5187.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.2018.3279> (Version preprint : Buterin, V., Hitzig, Z., & Weyl, E. G. (2018). *Liberal radicalism: A flexible design for philanthropic matching funds*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3243656>

¹⁶³ Ibid.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

sociale agrégée d'un projet au-delà de sa seule attractivité pour les grands capitaux.

Les conditions d'application à la finance à impact

Ce mécanisme présente un intérêt direct pour la finance à impact et la Finance Régénérative (ReFi*) pour une raison structurelle : les projets à impact – reforestation communautaire, infrastructures d'eau en zone rurale, développement de protocoles de vérification écologique ouverts – présentent souvent les caractéristiques des biens publics au sens de Buterin et al. : ils génèrent un impact pour un nombre d'acteurs très supérieur à ceux qui les financent directement, et leur valeur sociale est difficile à révéler par les mécanismes de marché classiques. Le financement quadratique* offre alors un dispositif capable de faire émerger les préférences collectives à partir des contributions individuelles, tout en incitant les détenteurs de grands capitaux à abonder un fonds de contrepartie plutôt qu'à exercer un contrôle direct sur l'allocation.

La plateforme **Gitcoin**¹⁶⁴ constitue la mise en œuvre la plus documentée de ce mécanisme à grande échelle. Spécialisée dans le financement de projets de logiciels libres et, progressivement, d'initiatives à impact environnemental et social, **Gitcoin** a distribué plus de 67 millions de dollars américains (USD) à des milliers de projets en utilisant le financement quadratique* comme mécanisme principal d'allocation¹⁶⁵. La plate-forme organise des cycles de financement, les **Gitcoin Grants Rounds**, au cours desquels les contributeurs allouent librement de petites sommes aux projets de leur choix, tandis qu'un fonds de contrepartie abondé par des partenaires institutionnels amplifie les dons en proportion du soutien communautaire agrégé. Cette architecture a permis à des projets de faible notoriété auprès des grands investisseurs institutionnels de recevoir des

financements substantiels sur la seule base de leur ancrage communautaire.

Octant propose une déclinaison structurellement différente du même mécanisme. Plutôt que de mobiliser des dons externes, la Golem Foundation immobilise 100 000 ETH dans un protocole de *staking** et utilise les seuls rendements générés, sans recourir à la générosité de financeurs tiers – pour constituer un fonds de financement quadratique des biens publics numériques. Les utilisateurs qui verrouillent des jetons GLM acquièrent des droits de vote lors d'époques trimestrielles de financement. Depuis août 2023, onze époques ont redistribué plus de 2 866 ETH à 120 projets, avec une V2 introduisant des *vaults** ERC-4626 à fenêtre glissante de trente jours, évolution vers un mécanisme continu et auto-alimenté¹⁶⁶. Ce modèle répond à une limite du mécanisme classique : sa dépendance structurelle à l'abondement d'un fonds de contrepartie par des financeurs institutionnels, dont les préférences peuvent elles-mêmes biaiser les allocations.

La transposition à la finance à impact : promesses et difficultés

L'application du financement quadratique* à des contextes plus larges que le financement de biens publics numériques soulève des questions d'ordre économique et institutionnel que les auteurs originaux identifient eux-mêmes. La première est celle de la taille du fonds de contrepartie : le mécanisme ne fonctionne que si des financeurs externes acceptent d'abonder le fonds, et la nature de ces financeurs – fondations, États, grands investisseurs institutionnels – peut elle-même introduire des biais dans l'orientation des allocations. La deuxième est celle des externalités géographiques et temporelles de l'impact : un projet de restauration d'un écosystème marin produit des bénéfices pour des populations qui ne participent pas

¹⁶⁴ Fund What Matters <https://gitcoin.co>

¹⁶⁵ Octant, 2025, <https://docs.octant.app>

¹⁶⁶ *Ibid.*

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

nécessairement au vote de financement, ce qui peut conduire à un sous-financement relatif des projets dont les bénéfices sont diffus et à long terme.

L'extension du financement quadratique* à d'autres champs que le numérique est documentée dans le domaine de la recherche scientifique. **ValleyDAO**, **AthenaDAO** et **CryoDAO**, des BioDAOs rassemblant plusieurs milliers de membres actifs, appliquent des variantes du mécanisme à l'allocation de fonds de recherche en biologie synthétique, en médecine de longévité et en cryonique, soumettant les décisions de financement à un vote *on-chain** pondéré par les contributions et la réputation au sein de chaque communauté scientifique¹⁶⁷.

Ces limites, qui ne remettent pas en cause la robustesse théorique du mécanisme, appellent des adaptations institutionnelles qui sont au cœur de la section suivante.

[E] Financement quadratique et théorie des biens publics

Le financement quadratique* n'est pas une invention *ex nihilo* du Web3. Il s'inscrit dans une longue tradition de réflexion économique sur le problème des biens publics, qui remonte aux travaux de Samuelson¹⁶⁸ en 1954, sur la condition d'optimalité de Pareto pour les biens non rivaux, et aux mécanismes de Groves-Ledyard¹⁶⁹ en 1977, sur la révélation des préférences en matière de biens collectifs.

Ce que Buterin, Hitzig et Weyl ont apporté en 2019 est double. Sur le plan théorique, ils

démontrent que sous leurs hypothèses de base – notamment que les individus ignorent leur impact sur le déficit du fonds de contrepartie –, le financement quadratique* produit un niveau de financement optimal des biens publics, résolvant ainsi le problème du passager clandestin sans centralisation de la décision. Sur le plan pratique, ils soulignent que les infrastructures de registres distribués fournissent pour la première fois un substrat technique permettant d'automatiser ce mécanisme à grande échelle, avec des frais de transaction marginaux très faibles : une condition opérationnelle que les marchés financiers conventionnels ne pouvaient remplir.

La tension fondamentale que les auteurs reconnaissent eux-mêmes est celle de la robustesse du mécanisme face à la collusion : si des acteurs coordonnent leurs contributions pour simuler un soutien communautaire large sans en avoir la réalité, le mécanisme amplifie une information fausse. C'est ce risque – désigné sous le terme d'attaque Sybil (Sybil attack) – que nous examinerons dans la section suivante.

1.3.2.2 Les défis du modèle : intégrité et vulnérabilité

La propriété mathématique qui confère au financement quadratique* sa force – amplifier l'influence du nombre de contributeurs plutôt que de leur volume financier – est précisément celle qui le rend vulnérable à une catégorie d'attaque spécifique. Si la prime d'abondement est fonction du carré du nombre de contributeurs distincts, **tout acteur capable de simuler une multiplicité de contributeurs distincts peut capter frauduleusement une part disproportionnée du fonds de contrepartie**. Cette vulnérabilité porte le nom d'attaque Sybil – en référence à un ouvrage de psychologie de 1973 documentant un cas de trouble dissociatif de l'identité – et constitue le défi technique

¹⁶⁷ Molecule, 2025, <https://www.molecule.to/blog/valleydao-imperial-college-london>

¹⁶⁸ Samuelson, P. A. (1954). The pure theory of public expenditure. *Review of Economics and Statistics*, 36(4), 387–389. <https://doi.org/10.2307/1925895>

¹⁶⁹ Groves, T., & Ledyard, J. (1977). Optimal allocation of public goods: A solution to the "free rider" problem. *Econometrica*, 45(4), 783–809. <https://doi.org/10.2307/1912672>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

central de toute mise en œuvre du financement quadratique* à grande échelle¹⁷⁰.

La nature structurelle de la vulnérabilité Sybil

Une attaque Sybil se produit lorsqu'un acteur crée artificiellement un grand nombre d'identités numériques distinctes – sous forme d'adresses de portefeuilles (*wallets**) différentes sur une blockchain publique – pour simuler un soutien communautaire large en faveur d'un projet qu'il contrôle ou dont il bénéficie. La barrière à l'entrée pour ce type d'attaque est structurellement faible dans les environnements de Finance Décentralisée (DeFi*) : créer une nouvelle adresse *on-chain** ne requiert ni identification, ni délai, ni coût significatif. Un acteur disposant d'un capital limité peut ainsi multiplier ses vecteurs d'influence à un coût marginal quasiment nul, capturant un abondement sans commune mesure avec son soutien communautaire réel. Dans les cycles **Bitcoin** Grants 1 à 15, cette vulnérabilité a été exploitée de manière systématique : des analyses *on-chain** ont mis en évidence que des failles pouvaient générer des taux de retour supérieurs à 100 % sur le capital engagé par les attaquants, en dirigeant les abondements vers des projets qu'ils contrôlaient¹⁷¹.

La vulnérabilité Sybil n'est pas seulement un problème d'intégrité financière – elle est une menace pour la légitimité même du mécanisme. Si les contributeurs légitimes perçoivent que les allocations sont systématiquement captées par des acteurs coordonnés plutôt que reflétant les

préférences réelles de la communauté, la confiance dans le dispositif s'érode et la participation authentique décline. Or le financement quadratique* ne produit son effet d'optimisation que si les contributions reflètent des préférences sincères – ce que les économistes désignent par le terme de révélation des préférences (*preference revelation*).

Les réponses techniques déployées : preuve d'humanité et agrégation d'attestations

La réponse dominante développée par l'écosystème est la preuve d'humanité (*proof of personhood*) : un dispositif permettant à un utilisateur de démontrer qu'il est un individu unique, sans multiplier ses identités numériques, sans pour autant révéler son identité réelle. Ce défi technique – prouver l'unicité sans révéler l'identité – est l'un des problèmes ouverts les plus actifs de la cryptographie appliquée.

L'outil **Bitcoin** Passport, lancé pour sécuriser les cycles de financement **Bitcoin** et rebaptisé Human Passport¹⁷² en décembre 2024 après son acquisition par la fondation Holonym, illustre une approche fondée sur l'agrégation d'attestations (*credential aggregation*) : l'utilisateur accumule des « tampons » (*stamps*) provenant de sources d'identité distinctes – compte GitHub, nom ENS (*Ethereum Name Service*), présence sur des réseaux sociaux, attestations de protocoles de preuve d'humanité comme BrightID ou Proof of Humanity – qui sont pondérés pour calculer un score de vraisemblance d'unicité.

Ce score n'est pas binaire – il ne certifie pas avec certitude qu'un utilisateur est unique –, mais probabiliste : il augmente le coût économique d'une attaque Sybil en exigeant que l'attaquant crée non seulement de multiples adresses *on-chain**, mais aussi de multiples présences vérifiables dans des systèmes d'identité hétérogènes.

¹⁷⁰ L'appellation « attaque Sybil » est introduite dans la littérature informatique par John R. Douceur dans : Douceur, J. R. (2002). The Sybil attack. In Proceedings of the First International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2002), Lecture Notes in Computer Science, vol. 2429, 251–260. Springer.

https://doi.org/10.1007/3-540-45748-8_24

¹⁷¹ Chainscore Labs. (s.d.). The hidden cost of quadratic voting: Sybil attacks and the Bitcoin case. <https://www.chainscorelabs.com/en/blog/dao-governance-lessons-from-the-frontlines/governance-post-mortems/the-hidden-cost-of-quadratic-voting-sybil-attacks-and-the-bitcoin-case>

¹⁷² <https://app.passport.xyz/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Human Passport revendique en 2025 avoir sécurisé plus de 430 millions de dollars américains de capital distribué *via* des programmes d'allocation et des cycles de financement, avec 2,2 millions d'utilisateurs et plus de 120 partenaires¹⁷³.

Cette approche ne supprime pas la vulnérabilité – elle déplace le seuil de rentabilité de l'attaque. **Gitcoin** adopte explicitement une logique de défense en profondeur (*defense-in-depth*) : le score de preuve d'humanité est combiné à des modèles d'analyse comportementale *on-chain**, à la détection de grappes de wallets* coordonnés (*cluster analysis*) et à des analyses de l'écart entre les contributions et les comportements de financement habituels. Malgré ces dispositifs, les concepteurs reconnaissent que la résistance Sybil reste un problème ouvert : *« aucun système n'atteint simultanément les trois propriétés – décentralisé, respectueux de la vie privée, et résistant aux attaques Sybil. Gitcoin Passport utilise des oracles*. Worldcoin utilise du matériel biométrique. Le trilemme persiste »*¹⁷⁴.

Octant adopte une stratégie de gouvernance active complémentaire : au-delà du score **Gitcoin** Passport requis pour participer, un *Grants Council* communautaire supervise les candidatures, des *rounds* thématiques délimitent les catégories de projets éligibles, et la suspension temporaire du fonds de contrepartie lors de l'Epoch 11, consécutive à la migration V2, illustre la nécessité d'une intervention humaine correctrice que l'automatisation seule ne peut remplacer¹⁷⁵.

¹⁷³ Human Tech. (2025). Human Passport x Gitcoin Grants: Defending GG23 with model-based Sybil detection. <https://human.tech/blog/human-passport-x-gitcoin-grants-defending-gg23-with-model-based-sybil-detection>

¹⁷⁴ Chainscore Labs. (s.d.). The hidden cost of quadratic voting: Sybil attacks and the Gitcoin case. <https://www.chainscorelabs.com/en/blog/dao-governance-lessons-from-the-frontlines/governance-post-mortems/the-hidden-cost-of-quadratic-voting-sybil-attacks-and-the-gitcoin-case>

¹⁷⁵ Octant, 2025, <https://docs.octant.app/en-FN/quadratic-funding.html>

Ces deux cas, **Gitcoin** et **Octant**, illustrent que la robustesse opérationnelle du financement quadratique* est moins une propriété technique qu'une construction sociale active, nécessitant une gouvernance continue que le code ne peut entièrement déléguer.

Le trilemme identité-décentralisation-vie privée

Ce trilemme mérite d'être explicité, car il reflète une tension fondamentale qui dépasse le seul financement quadratique* et traverse l'ensemble de la question de la gouvernance décentralisée. Tout système de preuve d'unicité doit articuler trois propriétés qui se contraignent mutuellement : la résistance aux attaques Sybil, qui exige une forme d'ancrage dans l'identité réelle ou dans des processus de vérification difficiles à contourner ; la protection de la vie privée, qui interdit de lier de manière permanente et publique une adresse *on-chain** à une identité réelle ; et la décentralisation, qui interdit de confier la vérification à une autorité centrale susceptible d'exclure arbitrairement des participants ou de constituer un point de défaillance unique.

Les approches biométriques – comme le scan d'iris opéré par le protocole **Worldcoin** pour son identifiant World ID – résolvent le problème de l'unicité de manière robuste, mais au prix d'une centralisation des données biométriques et de risques éthiques documentés, notamment dans des contextes de populations vulnérables. Ces risques feront l'objet d'une analyse détaillée dans la section 2.2.3, consacrée aux asymétries de pouvoir et au risque de *crypto-colonialisme*. Les approches par agrégation d'attestations sociales préservent mieux la vie privée mais dépendent de la résistance à la collusion des systèmes d'identité tiers qu'elles agrègent.

La collusion comme limite complémentaire

La vulnérabilité Sybil est la plus immédiatement visible, mais elle n'est pas la seule menace à l'intégrité du financement

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

quadratique*. La collusion entre contributeurs réels – lorsque des individus distincts et authentiques coordonnent leurs contributions non par préférence sincère mais pour manipuler les allocations en faveur de projets liés – constitue une attaque que les systèmes de preuve d'humanité ne peuvent par définition pas détecter. L'article fondateur¹⁷⁶ de Buterin, Hitzig et Weyl identifie explicitement ce risque et propose des variantes du mécanisme de base – notamment le *Capital-Constrained Liberal Radicalism* – qui limitent partiellement les possibilités de collusion, sans les éliminer entièrement. Cette limite rappelle ce que Jha soulignait pour les DAO* à impact dans la section 1.3.1.1 : la robustesse formelle d'un mécanisme algorithmique ne suffit pas à garantir la robustesse sociale de ses résultats.

1.3.3 La coordination locale et l'inclusion communautaire

Les mécanismes examinés jusqu'ici – gouvernance par *smart contracts**, financement quadratique*, tokenisation d'actifs – supposent tous, implicitement, l'existence d'une liquidité à distribuer et d'une infrastructure à laquelle se connecter. Que se passe-t-il lorsque ces conditions préalables font défaut ? Lorsqu'il n'y a pas de monnaie nationale disponible parce que les circuits bancaires ne pénètrent pas le territoire, ou pas d'infrastructure à utiliser parce qu'aucun opérateur n'a jugé le déploiement rentable ?

C'est à cet espace – celui que la finance conventionnelle ne peut ou ne veut pas atteindre – que s'adressent les deux instruments de cette section. Si leur logique est commune, ils se distinguent toutefois par leurs architectures, et leurs limites et révèlent qu'ils ne constituent pas une solution

générale, mais opèrent dans un ensemble de conditions précises – au-delà desquelles leurs effets s'inversent ou disparaissent.

1.3.3.1 Les monnaies d'inclusion locale (CIC)

Les sections précédentes ont examiné comment les Organisations autonomes décentralisées (DAO*) reconfigurent la gouvernance des décisions d'allocation, et comment le financement quadratique* permet d'amplifier les préférences communautaires dans la distribution des ressources collectives. Ces deux mécanismes supposent cependant un présupposé commun : l'existence d'une monnaie dans laquelle les contributions peuvent être exprimées et les fonds distribués. C'est précisément ce présupposé que contestent les Monnaies d'inclusion communautaire (désignées en anglais sous l'acronyme CIC pour *Community Inclusion Currencies*) – des instruments monétaires complémentaires qui ne cherchent pas à améliorer la distribution d'une liquidité existante, mais à créer une liquidité là où aucune n'existe structurellement.

Le problème auquel répondent les monnaies d'inclusion communautaire

Dans de nombreuses régions en développement – zones rurales kenyanes, communautés insulaires, quartiers périphériques de grandes métropoles –, la pénurie de monnaie nationale ne reflète pas une absence de ressources réelles. Les habitants disposent de compétences, d'une capacité productive, de services qu'ils peuvent offrir et dont ils ont besoin. Ce qui leur manque est un instrument d'échange suffisamment disponible localement pour faire circuler cette valeur. La monnaie nationale est produite par la banque centrale, distribuée par les banques commerciales, et ne pénètre ces zones qu'*a posteriori* – par les transferts de fonds de la diaspora, par les salaires des agents de l'État, par les recettes des exportations agricoles –, avec des cycles de liquidité erratiques qui laissent des pans

¹⁷⁶ Buterin, V., Hitzig, Z., & Weyl, E. G. (2019). A flexible design for funding public goods. *Management Science*, 65(11), 5171–5187. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2018.3279> (Version preprint : Buterin, V., Hitzig, Z., & Weyl, E. G. (2018). *Liberal radicalism: A flexible design for philanthropic matching funds*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3243656>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

entiers de l'économie locale en hibernation contrainte.

Cette configuration est précisément celle que Clark, Mihailov et Zargham identifient en 2024 comme le contexte d'émergence des monnaies d'inclusion communautaire : ces instruments cherchent à « *agir comme un dispositif institutionnel de fourniture de liquidité locale dans des régions économiques pauvres ou isolées* », servant « *de mécanisme fondé sur le marché pour atténuer la pauvreté*¹⁷⁷ ». La formulation est importante : les auteurs ne présentent pas les monnaies d'inclusion communautaire comme un substitut à la monnaie nationale, mais comme un mécanisme complémentaire permettant à une économie locale de fonctionner *en parallèle* au système monétaire conventionnel, dans les intervalles où ce dernier fait défaut.

L'architecture du mécanisme

Une monnaie d'inclusion communautaire est un bon numérique émis par un individu ou une organisation locale, représentant un engagement formel à fournir une quantité déterminée de biens ou de services futurs – une heure de travail agricole, un kilo de maïs, une séance de formation – en échange d'une contrepartie équivalente en bons émis par d'autres membres du réseau. Ces bons sont enregistrés sur un registre distribué, ce qui leur confère les propriétés déjà examinées dans ce rapport : immuabilité de l'historique des transactions, vérifiabilité par tout participant, absence de risque de double utilisation.

La fondation **Grassroots Economics**, opérant principalement au Kenya depuis 2010, est l'organisation dont l'activité est la plus documentée dans ce domaine. C'est une fondation à but non lucratif qui « *cherche à donner aux communautés marginalisées les*

*moyens de prendre en charge leurs propres moyens de subsistance et leur avenir économique*¹⁷⁸ ». Les premières monnaies d'inclusion communautaire étaient en format imprimé, avant d'être numérisées. Après plusieurs itérations techniques, elle a migré vers la blockchain **Celo** en 2023 pour déployer son protocole de *Commitment Pooling* (mise en commun des engagements). Le mécanisme est le suivant : des individus, des groupes ou des coopératives déposent leurs engagements productifs dans des réservoirs communs (*commitment pools*), qui émettent des bons d'actifs communautaires (*Community Asset Vouchers*, CAV) en proportion de ces engagements. Ces bons circulent au sein du réseau comme moyen d'échange, les participants pouvant les utiliser pour acquérir des biens et des services auprès d'autres membres sans nécessiter de shillings kenyans. Les transactions s'effectuent *via* des protocoles USSD (*Unstructured Supplementary Service Data*, données de service supplémentaires non structurées) – fonctionnant sur des téléphones basiques sans connexion internet –, ce qui les rend accessibles aux populations les moins dotées en équipements numériques.

Les données publiées par **Grassroots Economics** en avril 2026 font état de 3540 utilisateurs actifs, 141 réservoirs d'engagements actifs et 752 bons d'actifs uniques émis par des individus et des groupes locaux. Ces pools ont soutenu des activités de restauration agroforestière sur plus de 485 hectares, de construction d'infrastructures communautaires et d'amélioration de la sécurité alimentaire pour plus de 26600 individus¹⁷⁹ – illustrant la capacité de ces instruments à mobiliser des capacités productives locales qui resteraient autrement inactives faute d'instrument d'échange.

¹⁷⁷ Clark, A., Mihailov, A., & Zargham, M. (2024). Complex systems modeling of community inclusion currencies. *Computational Economics*, 64(2), 1259–1294. <https://doi.org/10.1007/s10614-023-10445-9>

¹⁷⁸ Karibu (Welcome to) Grassroots Economics' Docs <https://docs.grassecon.org>

¹⁷⁹ Grassroots Economics Foundation. (2024). One Year of Impacts 2024. <https://www.grassrootseconomics.org/impacts-2024>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Des modèles d'émission contrastés

Le modèle **Grassroots Economics** repose sur un engagement collectif : c'est la coopérative ou la communauté villageoise qui constitue le réservoir et détermine la valeur du bon. D'autres architectures ont fait le choix inverse, en plaçant l'individu au cœur du mécanisme d'émission. **CirclesUBI**, déployé depuis 2021 sur la blockchain **Gnosis**, illustre cette logique jusqu'à son terme : chaque utilisateur émet sa propre monnaie personnelle au rythme d'un CRC par heure, et la confiance relationnelle entre membres sert de collatéral implicite à la circulation de ces bons. La valeur d'un CRC n'est pas garantie par un bien tangible ou un engagement de service formalisé, mais par la réputation de son émetteur au sein de son réseau de proches. Pour décourager la thésaurisation, défaut structural des monnaies conventionnelles dans les économies à faible consommation, le protocole intègre une dépréciation annuelle de 7 % : la valeur des bons non utilisés s'érode progressivement, ce qui crée une incitation structurelle à la circulation plutôt qu'à l'accumulation. Une intégration récente avec Gnosis Pay permet par ailleurs aux utilisateurs de dépenser leurs CRC *via* un terminal de paiement Visa, posant ainsi la question, encore non résolue, de l'interopérabilité entre monnaies communautaires et circuits monétaires officiels.

La comparaison entre ces deux modèles est analytiquement instructive. Le modèle collectif de **Grassroots Economics** produit une liquidité adossée à des capacités productives vérifiables et génère des données d'impact mesurables en termes d'hectares restaurés ou de bénéficiaires alimentaires. Le modèle individuel de **CirclesUBI** produit une liquidité adossée à la confiance sociale et génère des données d'adoption difficiles à agréger en indicateurs d'impact environnemental ou économique. Ces deux architectures répondent donc à des contraintes différentes et appellent des méthodes d'évaluation distinctes – ce qui

pose un premier défi pour leur intégration dans des dispositifs de finance à impact formalisés.

La question de l'échelle mérite également d'être posée. **GoodDollar**, protocole de revenu de base universel décentralisé déployé depuis 2020, compte 618 000 utilisateurs uniques répartis dans plus de 10 000 villes à travers le monde ; son token G\$ est émis par une réserve DeFi* dont seuls les rendements financent la distribution, ce qui le rend indépendant de tout flux de capital public ou privé exogène[80]. Ces chiffres sont les plus importants documentés dans la catégorie des monnaies d'inclusion numérique, et ils méritent d'être lus avec précaution : une adoption étendue ne garantit pas une intégration dans des circuits économiques réels, et la nature exacte des usages du G\$ – épargne spéculative, transactions quotidiennes, simple inscription sans activité – n'est pas documentée de façon indépendante à ce jour.

L'infrastructure monétaire qui sous-tend plusieurs de ces dispositifs est **Mento Labs**. Elle opère le protocole qui émet les quinze *stablecoins* en devises locales utilisés par **GoodDollar**, **MiniPay** et **Haraka**, dont le cUSD, le cEUR et le cREAL, tous adoptés par plus de sept millions d'utilisateurs dont plus d'un million en Afrique subsaharienne. Ces *stablecoins* locaux ne sont pas des monnaies communautaires au sens de Clark et al., car ils ne sont pas émis par les communautés elles-mêmes, mais ils remplissent une fonction analogue dans les contextes de faible accès bancaire : unités de compte stables face aux dévaluations locales, accessibles depuis un téléphone mobile, utilisables sans compte bancaire¹⁸⁰.

¹⁸⁰ Mento Labs, 2025, <https://www.mento.org/blog/bringing-stablecoins-to-the-world---one-local-currency-at-a-time>

Un cas de service public : EnergyKnip

Les exemples précédents relèvent tous d'initiatives de la société civile ou du secteur privé. Un cas de service public européen documente une autre voie : le programme **MultiKnip**, développé aux Pays-Bas avec le soutien de la Fondation IOTA, a distribué cinq millions d'euros à 20 000 ménages de la ville d'Emmen sous forme d'**EnergyKnip** – un token à usage unique dont les règles d'utilisation sont intégralement encodées dans un *smart contract*¹⁸¹ : liste restreinte de commerçants partenaires spécialisés dans la rénovation énergétique, zone géographique délimitée, date d'expiration programmée. Le token ne peut pas être transféré, revendu ou utilisé hors du périmètre défini. Ce dispositif – qualifié par ses concepteurs de Programme à But Tokenisé (*Purpose-Bound Token**) – ne constitue pas, à proprement parler, une monnaie d'inclusion communautaire au sens de Clark et al. car il n'est pas émis par la communauté et n'est pas adossé à des engagements productifs locaux. Il relève plutôt d'une catégorie adjacente, celle de la monnaie publique à destination programmée, et participe au Sandbox réglementaire européen sur la blockchain¹⁸¹. Son intérêt analytique pour cette section réside dans le fait qu'il partage avec les CIC une propriété fondamentale : l'encodage des conditions d'usage dans le protocole lui-même, rendant tout détournement techniquement impossible sans nécessiter de contrôle administratif *ex post*.

Les propriétés économiques distinctives des monnaies d'inclusion communautaire

Les monnaies d'inclusion communautaire possèdent deux propriétés économiques qui les distinguent structurellement des monnaies nationales et expliquent leur pertinence spécifique dans les contextes de pénurie de liquidité.

La première est leur caractère *contra-cyclique* : parce que les bons sont adossés à des capacités productives locales et non à des flux de capitaux externes, leur disponibilité n'est pas affectée par les crises de liquidité du système monétaire national. Lorsque les shillings kenyans se raréfient – en raison d'une sécheresse, d'une chute des prix agricoles ou d'une crise de change –, les bons d'actifs communautaires restent disponibles dans la mesure où les capacités productives des membres du réseau n'ont pas disparu. Clark et al. modélisent cette dynamique et établissent que les CIC « *peuvent agir comme un dispositif contra-cyclique de stabilisation*¹⁸² » qui permet aux économies locales de maintenir un niveau d'activité minimale pendant les phases de contraction de la liquidité nationale.

La seconde est leur ancrage *territorial* : contrairement aux crypto-actifs à vocation mondiale, les CIC ne cherchent pas à se substituer à la monnaie nationale ni à alimenter des marchés d'échange globaux. Leur valeur est intrinsèquement locale, définie par la confiance que les membres du réseau accordent aux engagements des émetteurs. Cette localisation produit des effets économiques documentés : en maintenant les flux de valeur à l'intérieur d'un territoire défini, les CIC réduisent les fuites économiques – la tendance des revenus locaux à être immédiatement réemployés hors du territoire – et renforcent la densité des échanges intra-communautaires, ce que les économistes du développement désignent comme multiplicateur local (*local multiplier effect*).

Les limites structurelles du modèle

Clark et al. documentent également une limite fondamentale que leurs simulations révèlent : les monnaies d'inclusion communautaire sont perçues par leurs utilisateurs comme des

¹⁸¹ European Blockchain Sandbox European blockchain regulatory sandbox for Distributed Ledger Technologies <https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/european-blockchain-sandbox-en>

¹⁸² Clark, A., Mihailov, A., & Zargham, M. (2024). Complex systems modeling of community inclusion currencies. *Computational Economics*, 64(2), 1259–1294. <https://doi.org/10.1007/s10614-023-10445-9>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

instruments transitoires, dont la valeur est *de facto* inférieure à celle de la monnaie nationale lorsque celle-ci est disponible. Autrement dit, les participants préfèrent détenir des shillings kenyans dès qu'ils en ont accès, et n'utilisent les bons communautaires que par défaut de disponibilité de la monnaie officielle. Cette préférence reflète rationnellement la plus grande liquidité et la plus grande universalité d'acceptation de la monnaie nationale – qui peut être utilisée pour payer des impôts, rembourser des dettes formelles et acheter des biens hors du réseau local, ce que les monnaies d'inclusion communautaire ne permettent pas. Les auteurs concluent que les monnaies d'inclusion communautaire sont des instruments de second rang (*inferior goods*) au sens de la théorie économique : leur usage s'étend quand les alternatives se raréfient et se contracte quand elles s'améliorent.

Cette limite ne remet pas en cause l'utilité des monnaies d'inclusion communautaire dans les contextes de pénurie structurelle, mais elle précise leur rôle : non pas une alternative à la finance conventionnelle, mais un mécanisme de résilience économique locale activé dans les espaces que la finance conventionnelle ne peut ou ne veut pas desservir. C'est dans ce cadre précis – non comme modèle généralisable, mais comme dispositif de stabilisation locale dans des contextes spécifiques – que leur pertinence pour la finance à impact et la Finance Régénérative (ReFi*) doit être appréciée.

[E] Monnaies d'inclusion communautaire et monnaies complémentaires

Les monnaies d'inclusion communautaire ne sont pas une invention du Web3. Elles s'inscrivent dans une tradition de monnaies locales complémentaires (*complementary currencies*) dont les premières expérimentations remontent aux années 1930, notamment le Wörgl-Schwundgeld autrichien –

une monnaie locale à dépréciation programmée introduite dans la ville de Wörgl en 1932 pour stimuler l'activité économique pendant la Grande Dépression. Plus récemment, les Systèmes d'Échange Local (SEL), les *Local Exchange Trading Systems* (LETS) anglophones ou le WIR Franc suisse – en circulation depuis 1934 dans les réseaux de petites et moyennes entreprises helvétiques – ont démontré la viabilité de long terme des instruments monétaires complémentaires dans des contextes économiques contraints.

Ce que les blockchains apportent à cette tradition n'est pas le concept, mais sa mise en œuvre opérationnelle à coût marginal faible. L'enregistrement numérique des transactions sur un registre distribué remplace les registres papier, réduit les risques de fraude et de duplication des bons, et permet la vérification instantanée des soldes et des historiques. La technologie USSD permet en outre d'étendre cette infrastructure aux populations sans accès à des téléphones connectés à internet. L'apport décisif du Web3 est donc avant tout une réduction des coûts d'administration d'un mécanisme monétaire communautaire – et non l'invention d'un modèle institutionnel radicalement nouveau.

1.3.3.2 Les réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePINs)

Les mécanismes examinés dans les sections précédentes – gouvernance par *smart contracts**, financement quadratique*, monnaies d'inclusion communautaire – opèrent tous dans l'espace de la coordination financière et de l'allocation de capital. Les Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (*Decentralized Physical Infrastructure Networks*, DePINs) représentent une extension de cette logique vers un espace différent : la construction et l'exploitation d'infrastructures matérielles – réseaux sans fil, infrastructures de production

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

énergétique, systèmes de capteurs environnementaux – *via* des incitations cryptographiques coordonnées *on-chain**. Ils constituent, à ce titre, le point de contact le plus direct entre le Web3 et les besoins d'investissement en capital physique des économies réelles, en particulier dans les pays en développement où le déficit d'infrastructures représente l'un des principaux obstacles à la croissance économique inclusive.

L'architecture économique des DePINs*

Un Réseau d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) repose sur un mécanisme d'incitation à trois niveaux que la littérature émergente désigne sous le terme de *DePIN flywheel* (volant d'inertie DePIN*) : des fournisseurs de ressources déploient des équipements physiques – panneaux solaires, antennes de communication, serveurs de stockage, capteurs environnementaux – qu'ils connectent à un réseau coordonné par *smart contracts** et rémunérés en jetons natifs proportionnellement à leur contribution vérifiée au réseau ; des utilisateurs finaux accèdent aux services produits par ces équipements à des tarifs en principe inférieurs à ceux des opérateurs centralisés, leur utilisation alimentant la demande qui justifie les émissions de jetons ; la gouvernance du protocole calibre les paramètres d'émission et de tarification pour maintenir l'équilibre entre l'offre de ressources et la demande de services. Comme le formalisent les auteurs d'une revue de littérature publiée dans *Frontiers in Blockchain* en 2025, les jetons DePINs* remplissent trois fonctions interdépendantes : l'utilité – ils servent de monnaie native pour accéder aux services du réseau –, la gouvernance – ils confèrent des droits de vote sur les paramètres du protocole –, et le *staking** – ils permettent aux fournisseurs de déposer des garanties attestant leur fiabilité opérationnelle¹⁸³.

Ce mécanisme présente une propriété structurelle distincte des modèles d'investissement en infrastructures conventionnels : il permet de mobiliser du capital physique distribué sans nécessiter un investisseur centralisé disposant du capital suffisant pour déployer une infrastructure à grande échelle. Là où un opérateur de télécommunications traditionnel doit financer en amont l'intégralité de son réseau d'antennes avant d'en tirer des revenus, un Réseau d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) peut croître de manière organique, chaque participant finançant sa propre contribution en anticipation des revenus futurs en jetons. Cette propriété de croissance organique est particulièrement pertinente pour des infrastructures dont le déploiement est coûteux et dont la rentabilité commerciale pour un opérateur centralisé est incertaine dans des zones à faible densité de population ou à faible pouvoir d'achat.

Les applications à l'impact environnemental et social

Dans le domaine des télécommunications, le réseau **Helium** – fondé en 2019 et migré vers la blockchain Solana en 2023 – constitue la référence la plus documentée. Les participants déploient des boîtiers *hotspot* qui fournissent une couverture réseau pour les objets connectés (*IoT**, *Internet of Things*) et la cinquième génération de téléphonie mobile (5G), et sont rémunérés en jetons HNT (*Helium Network Token**) en proportion de la couverture qu'ils fournissent et des données qu'ils transmettent. En début d'année 2025, le réseau comptait plus de 335 000 *hotspots IoT** et 24 800 *hotspots* mobiles dans 190 pays, et le volume de données transférées en quatrième trimestre 2024 avait augmenté de 555 % sur un an¹⁸⁴. Ces chiffres sont déclaratifs et proviennent des publications institutionnelles de la Helium

¹⁸³ Alshater MM (2026) Decentralized physical infrastructure networks (DePIN) tokenomics. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1644115>

¹⁸⁴ Helium Foundation. (2025). *Helium Network Q4 2024 Data Report*. Helium Foundation. <https://messari.io/report/state-of-helium-q4-2025>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Foundation – source structurellement liée au protocole –, mais ils illustrent l'ordre de grandeur de la capacité de déploiement rapide que permet ce modèle d'incitation distribué.

Dans le domaine de l'énergie, plusieurs protocoles cherchent à transposer cette logique à la production et à la distribution décentralisées d'électricité renouvelable, avec une pertinence particulière dans les régions souffrant d'un déficit structurel d'approvisionnement électrique. En Afrique subsaharienne, où environ 600 millions de personnes n'ont pas accès à l'électricité selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), des initiatives comme le **M3tering Protocol**¹⁸⁵, au Nigeria, permettent à des particuliers de déployer des compteurs intelligents connectés à des panneaux solaires, de produire et de vendre localement de l'électricité à leurs voisins, et d'être rémunérés en jetons pour les kilowattheures injectés dans le micro-réseau. Ce modèle transforme structurellement les rapports entre producteur et consommateur d'énergie : un individu qui était *de facto* exclu du système de distribution électrique centralisé devient simultanément producteur, distributeur et investisseur dans sa propre infrastructure énergétique, sans nécessiter d'intermédiaire financier pour coordonner ces fonctions¹⁸⁶.

Dans le domaine des paiements, **Blink**, portefeuille Bitcoin construit sur le *Lightning Network** à El Salvador, constitue un exemple de DePIN de paiement : des nœuds gérés par des particuliers (Umbrel, Raspibltz) constituent un réseau de règlement mondial sans propriétaire central, interconnecté *via*

Blink et étendu aux points de vente physiques via BTCPay Server et WooCommerce. Ce modèle transforme chaque opérateur de nœud en fournisseur d'infrastructure de paiement, rémunéré en frais de routage, dans un réseau qui alimente déjà une vingtaine d'économies circulaires Bitcoin en Afrique du Sud, au Honduras et au Salvador¹⁸⁷. Son articulation avec les monnaies communautaires examinées dans la section 1.3.3.1 – notamment via les *Stablesats* (solde en dollars stables au sein d'un *wallet** Lightning) – représente précisément la combinaison de stabilité monétaire et d'infrastructure décentralisée que les CIC cherchent à atteindre par d'autres voies.

La dimension environnementale de ces Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) énergétiques présente une articulation directe avec les mécanismes de certification examinés dans la section 1.2.2. Les infrastructures décentralisées de production d'énergie renouvelable sont, par leur nature même, en mesure de générer de manière automatisée et traçable des Certificats d'Énergie Renouvelable (CER) – des instruments attestant qu'une quantité donnée d'énergie a été produite à partir de sources renouvelables, et qui constituent un actif négociable sur les marchés de la conformité environnementale.

Un *smart contract** peut être configuré pour émettre automatiquement un CER tokenisé pour chaque mégawattheure de production vérifiée, créant ainsi un flux de revenus complémentaire qui améliore la rentabilité du déploiement de panneaux solaires dans des zones où la demande locale seule ne suffirait pas à justifier l'investissement.

C'est précisément ce mécanisme, la combinaison d'une rémunération en jetons natifs pour la fourniture de services énergétiques et d'une génération automatisée d'actifs écologiques, qui constitue l'articulation la plus directe entre le concept

¹⁸⁵ M3tering est un protocole incité par jetons (tokens), visant à stimuler l'investissement en capital dans les ressources énergétiques distribuées (DER), telles que les projets solaires sur toiture. Son objectif est d'apporter de l'électricité propre aux communautés mal desservies, particulièrement en Amérique latine et en Afrique subsaharienne, en encourageant les particuliers et les institutions à devenir fournisseurs d'électricité par le biais d'accords d'achat d'énergie solaire sur toiture (*rooftop solar PPAs*) <https://docs.m3ter.org/>

¹⁸⁶ CARBON Copy. (2024). The Impact DePIN Report 2024. <https://carboncopy.news/content/assets/The%20State%20of%20ReFi%20Report%202024.pdf>

¹⁸⁷ Blink, 2025, <https://www.blink.sv>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

de Réseau d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) et la Finance Régénérative (ReFi*) examinée dans ce rapport.

Les limites structurelles du modèle

L'enthousiasme analytique pour ce modèle doit être tempéré par deux familles de limites structurelles que la littérature académique actuelle commence à documenter de manière rigoureuse.

La première est le **problème de la durabilité économique des incitations**. Le *DePIN* flywheel* ne fonctionne que si la demande de services génère des revenus suffisants pour justifier les émissions de jetons. Dans sa phase initiale, un Réseau d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) peut attirer des fournisseurs de ressources par l'espoir d'une appréciation future des jetons – une dynamique spéculative qui peut masquer une insuffisance de demande réelle. La revue de *Frontiers in Blockchain* (2025) identifie ce risque comme le principal facteur limitant la durabilité des Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) : « la véritable durabilité dépend de la conversion d'utilisateurs non-Web3 en clients payants, ancrant ainsi la valeur du jeton dans la demande réelle plutôt que dans la spéculation¹⁸⁸ ». Ce diagnostic s'applique avec une acuité particulière aux Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) à impact déployés dans des zones à faible pouvoir d'achat, où la demande solvable peut être insuffisante pour soutenir un modèle économique viable sans subvention externe.

La seconde est le **problème de la vérification**. L'ensemble du mécanisme d'incitation repose sur la capacité du protocole à vérifier *on-chain** que les ressources physiques déclarées ont bien été déployées et qu'elles fonctionnent comme prévu.

Cette vérification – désignée sous le terme de *Proof of Physical Work* dans la littérature DePIN – constitue un problème technique non trivial : contrairement à la *preuve de travail* (*proof of work*) du protocole Bitcoin, qui porte sur une opération mathématique vérifiable par le réseau, la preuve qu'un panneau solaire a produit un kilowattheure ou qu'une antenne a fourni une couverture réseau dans une zone géographique donnée requiert des oracles* – des interfaces entre le monde physique et la blockchain – dont la fiabilité est elle-même sujette aux risques analysés dans la section 2.2.1 de ce rapport. Un Réseau d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) dont les oracles* peuvent être manipulés est un système dont les incitations peuvent être détournées sans que le protocole ne s'en aperçoive.

[E] Les réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*)

La question posée par les Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) dans le contexte du développement économique est celle de leur positionnement par rapport à l'investissement public en infrastructures. Deux lectures sont possibles.

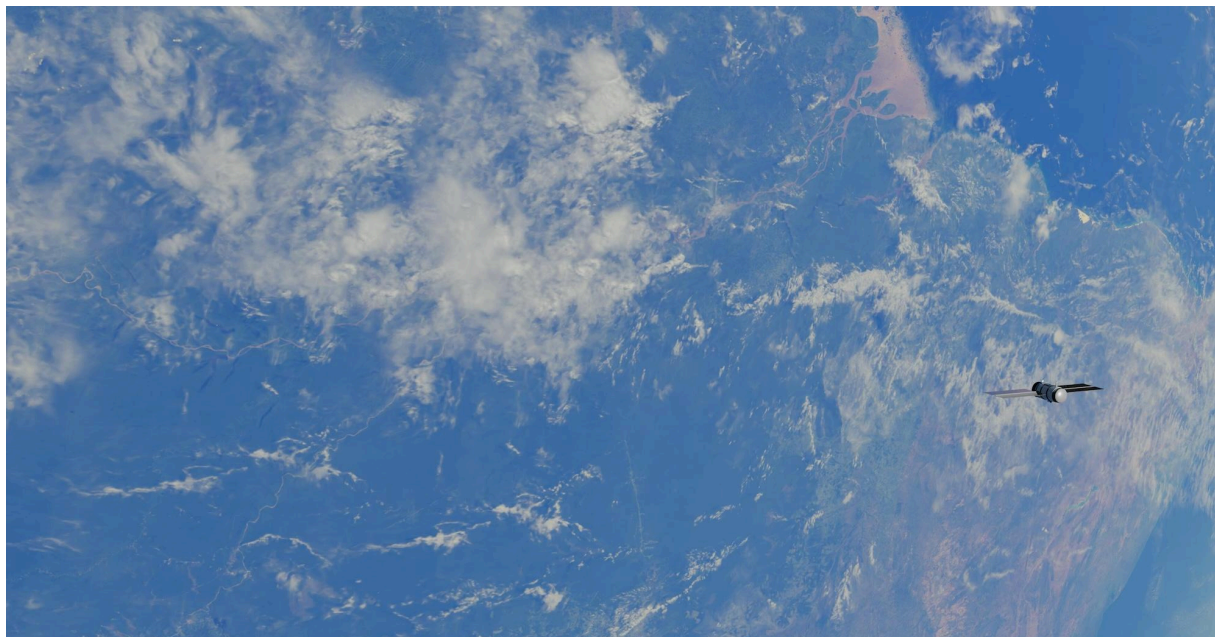
La première est que les Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) comblent des lacunes spécifiques là où l'investissement public est absent et où les opérateurs privés centralisés estiment la rentabilité insuffisante : des zones rurales peu denses, des régions transfrontalières, des contextes institutionnels instables. Dans cette lecture, les Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) ne remplacent pas les politiques publiques d'infrastructure, mais servent de mécanisme de déploiement temporaire ou complémentaire jusqu'à ce que l'environnement économique permette une réponse institutionnelle plus robuste.

¹⁸⁸ Alshater MM (2026) Decentralized physical infrastructure networks (DePIN) tokenomics. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1644115>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

La seconde, que les partisans les plus technophiles du mouvement Web3 tendent à privilégier, est que les Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) représentent un modèle supérieur aux infrastructures publiques ou aux monopoles réglementés, et qu'ils pourraient à terme les supplanter. Cette position heurte des réalités économiques bien documentées : les infrastructures en réseau présentent des externalités positives considérables, des coûts fixes très élevés et des rendements croissants qui justifient,

dans de nombreux cas, soit la fourniture publique soit la régulation d'un monopole naturel. Les Réseaux d'infrastructures physiques décentralisées (DePin*) ne modifient pas fondamentalement ces propriétés économiques mais modifient plutôt la structure de propriété et les mécanismes de coordination, non la nature du problème économique sous-jacent. Il est *a priori* prématuré, au stade actuel de maturité des déploiements documentés, de conclure à la supériorité systémique d'un modèle sur l'autre.



PARTIE 2. De la déclaration d'impact à sa preuve cryptographique

La première partie de ce rapport a établi un diagnostic structurel et mis en lumière que les défaillances de la finance à impact ne sont pas des anomalies imputables à des acteurs de mauvaise foi, mais le produit prévisible d'architectures fondées sur la déclaration, l'audit discontinu et la délégation de confiance à des intermédiaires dont les intérêts ne coïncident pas toujours avec ceux des bénéficiaires. Elle a également montré que les nouvelles infrastructures numériques du Web3 – registres distribués, *smart contracts**, tokenisation* – proposent à ces défaillances des réponses d'ordre architectural, dont la valeur réelle dépend des conditions dans lesquelles elles sont déployées.

La deuxième partie soumet ces réponses à un examen rigoureux en deux temps. Le premier examine les instruments qui permettent effectivement de déplacer la frontière entre déclaration et preuve : la vérification numérique continue (dMRV*), les oracles* qui connectent le monde physique aux Technologies de registre distribué (DLT*),

et les nouveaux instruments financiers et notamment, comme nous le verrons, les *Impact Tokens**, *Hypercerts* et *Alpha Bonds* qui transforment une preuve d'impact vérifiée en actif financier mobilisable.

Le second recense les limites structurelles et les risques systémiques de cette architecture : la vulnérabilité des oracles* comme point de défaillance centralisé dans un système présenté comme décentralisé, la loi de Goodhart appliquée à la tokenisation de l'impact, le risque d'hyper-financiarisation de la nature, et les asymétries de pouvoir que les protocoles décentralisés tendent à reproduire sous de nouvelles formes.

Ces deux temps ne sont pas séquentiels : les promesses et les limites se répondent, et c'est dans leur articulation, plutôt que dans leur opposition, que réside la question la plus productive que ce rapport souhaite apporter.

2.1 Automatisation, vérification et instruments conditionnels

La première partie de ce rapport a établi le diagnostic structurel que le *greenwashing* systémique n'est pas principalement le produit de mauvaises intentions individuelles, mais celui d'une architecture défaillante. Lorsque l'impact est auto-rapporté, la vérification épisodique et l'auditeur économiquement dépendant du certifié, l'asymétrie d'information ne se réduit pas mais s'institutionnalise.

La deuxième partie de ce rapport pose une question d'une autre nature. Est-il possible de remplacer la déclaration par une preuve ? Non pas une preuve certifiée *a posteriori* par un tiers exposé aux conflits d'intérêts documentés à la section 1.1.3, mais une preuve générée en continu, ancrée dans des données physiques indépendantes du porteur de projet et inscrite de manière immuable dans un registre public. Ce déplacement – de la déclaration à la preuve cryptographique – est l'ambition centrale des dispositifs examinés dans cette section.

Que ce déplacement soit techniquement possible ne signifie pas toutefois qu'il soit sans conditions ni que les nouvelles architectures qu'il requiert soient exemptes des fragilités qu'elles prétendent corriger.

2.1.1 Le dMRV : digital Measurement, Reporting and Verification

Un audit réalisé tous les deux ou trois ans, sur la base de relevés partiellement constitués par le porteur de projet lui-même : tel est le fondement empirique sur lequel reposent aujourd'hui la majorité des crédits des marchés volontaires du carbone. La Mesure, Notification et Vérification Numériques (dMRV, *digital Measurement, Reporting and Verification*) propose de rompre avec cette discontinuité en substituant à l'audit

périodique une vérification continue, automatisée et fondée sur des données collectées de manière indépendante – imagerie satellitaire, capteurs IoT* (*Internet of Things*, Internet des Objets), modèles d'apprentissage automatique.

Les gains documentés sont réels. Mais la rupture introduite par le dMRV ne se limite pas à une réduction de coûts : elle modifie la nature même de l'information disponible pour les marchés, en substituant à un certificat émis à intervalles fixes un flux de données actualisé en quasi temps-réel. Ce déplacement – de l'image statique au flux continu – est précisément ce que cette section examine dans ses deux dimensions : la collecte automatisée des données physiques d'abord, puis la question de leur intégrité entre le moment de leur collecte et celui de leur utilisation par un investisseur ou un régulateur. Peut-on remplacer l'audit physique, une image statique certifiée *a posteriori* par un flux continu de données ? Et que changent les blockchains publiques – non pas à la qualité des données, mais à leur intégrité une fois collectées ?

2.1.1.1 L'automatisation du suivi écologique

La première partie de ce rapport a établi pourquoi le modèle déclaratif de la finance à impact centralisée est structurellement exposé au *greenwashing*, notamment parce que l'opacité des chaînes de certification, l'audit discontinu et l'asymétrie d'information entre porteurs de projets et marchés de capitaux produisent des crédits dont la valeur environnementale réelle reste invérifiable.

L'enjeu de la Mesure, Notification et Vérification Numériques (dMRV*, *digital Measurement, Reporting and Verification*) est précisément de refermer cette brèche – non pas par une meilleure régulation, mais par une transformation architecturale du dispositif de preuve.

Les limites structurelles du MRV traditionnel

Historiquement, l'évaluation de l'impact environnemental des projets climatiques repose sur un processus de Mesure, Notification et Vérification (MRV, *Measurement, Reporting and Verification*) fondé sur des relevés manuels de terrain, des échantillonnages périodiques et la production de rapports documentaires statiques. Un organisme de validation et de vérification (*Validation and Verification Body*, VVB) agréé se rend physiquement sur le site du projet à intervalles pluriannuels, effectue des mesures selon des protocoles définis par les référentiels de certification – Verified Carbon Standard¹⁸⁹ de Verra, Gold Standard¹⁹⁰, méthodologies REDD+¹⁹¹ – et produit un rapport sur la base duquel des crédits carbone sont émis ou rejetés.

Ce modèle présente quatre limitations structurelles directement préjudiciables à la liquidité et à l'intégrité des marchés climatiques.

- La première est la **discontinuité temporelle** : entre deux audits, l'état réel du projet – couverture forestière, biomasse, pratiques agricoles – peut avoir évolué significativement sans que les marchés en soient informés.
- La seconde limitation est la **structure de coûts élevés** inhérente au processus d'audit : les missions de terrain dans des zones reculées, les honoraires des organismes de validation et de vérification (OVV, désignés en anglais par l'acronyme VVB pour *Validation and Verification Body*) accrédités et la production documentaire forment un ensemble de charges fixes que les projets de petite taille

peinent à absorber. Le Rocky Mountain Institute estime que les dépenses de MRV peuvent représenter entre 20 et 30 % des revenus totaux tirés des crédits carbone, rendant économiquement non viables des initiatives à fort impact environnemental mais à volume de crédits insuffisant pour amortir ces frais sur une base étendue¹⁹².

- La troisième est l'**incapacité à passer à l'échelle** : le nombre limité d'organismes de vérification accrédités et la nature séquentielle du processus d'audit constituent un goulot d'étranglement qui empêche les marchés volontaires de carbone d'atteindre les volumes nécessaires à un impact climatique systémique.
- La quatrième, enfin, est la **vulnérabilité à la manipulation** : un processus fondé sur des documents que le porteur de projet contribue lui-même à constituer reproduit l'asymétrie d'information identifiée dans la section 1.1.3 de ce rapport.

La rupture introduite par le dMRV

Pour pallier ces limites et répondre aux exigences de passage à l'échelle des marchés climatiques, le secteur déploie progressivement le dMRV, une approche technologique qui substitue à la surveillance épisodique une vérification continue, automatisée et fondée sur des données collectées indépendamment du porteur de projet.

Le dMRV s'appuie sur quatre familles de technologies complémentaires. L'imagerie satellitaire à haute résolution – fournie notamment par les constellations Sentinel-1 et Sentinel-2 de l'Agence Spatiale Européenne (ESE), par les satellites GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*) de la NASA et par des opérateurs privés comme Planet Labs – permet de suivre en

¹⁸⁹ The Verified Carbon Standard Version

<https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/>

¹⁹⁰ Gold Standard certification

<https://www.goldstandard.org>

¹⁹¹ Le rôle de REDD+ dans la protection des forêts 21 mars 2023

<https://unfccc.int/fr/news/le-role-de-redd-dans-la-protection-des-forets>

¹⁹² Rocky Mountain Institute. (2023). *How to build a trusted voluntary carbon market*. RMI.

<https://rmi.org/how-to-build-a-trusted-voluntary-carbon-market/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

quasi-temps réel les changements d'occupation des sols, la croissance de la biomasse forestière et les dynamiques de déforestation sur des surfaces pouvant atteindre plusieurs millions d'hectares. Les technologies LiDAR (*Light Detection and Ranging*) embarquées sur drones ou satellites cartographient les canopées forestières en trois dimensions, permettant des estimations précises du stock de carbone aérien. Les capteurs IoT* (*Internet of Things*, Internet des Objets) déployés *in situ* mesurent en continu des paramètres comme l'humidité et le carbone des sols, les flux de méthane ou la qualité de l'air. Les modèles d'apprentissage automatique (*machine learning*) intègrent et analysent ces flux de données hétérogènes pour produire des estimations continues de stocks et de flux de carbone, détectant anomalies et déviations avec une sensibilité que l'audit humain périodique ne peut atteindre.

L'effet cumulé de ces technologies est une réduction drastique des coûts de vérification : selon les estimations disponibles dans la littérature du secteur, l'intégration d'outils de télédétection satellitaire permet de réduire les besoins en échantillonnage de terrain de 60 à 70 % tout en maintenant la rigueur statistique requise par les méthodologies Verra¹⁹³, et les plateformes de dMRV les plus avancées revendiquent des coûts de mesure inférieurs à 10 dollars américains (USD) par acre à l'échelle continentale, contre 50 à 100 USD pour l'échantillonnage traditionnel au sol¹⁹⁴. Ces gains d'efficacité ne sont pas seulement financiers : ils élargissent structurellement le périmètre des projets éligibles à la certification, en rendant économiquement viables des projets de petite taille ou dans des zones reculées qui ne pouvaient auparavant pas supporter les coûts d'audit.

Les implications pour la finance climatique

L'intérêt du dMRV pour la finance climatique dépasse la seule réduction des coûts de vérification. Il modifie la temporalité de l'information disponible pour les marchés. Là où les crédits carbone traditionnels sont émis sur la base d'audits pluriannuels – produisant une image statique d'une réalité dynamique –, le dMRV peut alimenter en continu les tableaux de bord des investisseurs, des acheteurs de crédits et des régulateurs avec des données de suivi actualisées. Cette continuité informationnelle est la condition d'une classe d'actifs climatiques réellement vérifiable : non plus une déclaration d'impact certifiée à intervalle fixe, mais un flux de données en quasi-temps réel attestant de l'état d'un projet.

Des protocoles documentés dans ce rapport appliquent déjà cette logique. **Grassroots Economics** intègre depuis 2026 l'analyse géospatiale et l'IA en temps réel pour transformer les transactions du réseau Sarafu au Kenya en données d'impact vérifiables, rendant lisibles des flux économiques communautaires qui ne généraient auparavant aucun signal traçable pour un investisseur externe¹⁹⁵. **Kolektivo** déploie dans les Caraïbes un cadre MRV automatisé pour les forêts alimentaires, dans lequel les données de terrain déclenchent directement les récompenses en *tokens* accordées aux acteurs de la régénération écologique locale¹⁹⁶. Dans le domaine du carbone bleu, **Pleno** utilise la télédétection et l'apprentissage automatique pour cartographier en continu les stocks de carbone dans les mangroves indonésiennes, rendant économiquement viables des projets de certification que les coûts d'audit traditionnel auraient rendus prohibitifs à cette échelle¹⁹⁷.

¹⁹³ Perennial / Verra, VM0042 v2.2 Methodology, approuvée par l'ICVCM en novembre 2024. Données rapportées par Sustainability Atlas (2026). <https://sustainableatlas.org>

¹⁹⁴ Sustainability Atlas. (2026). Trend analysis: Soil carbon MRV & incentives. <https://sustainableatlas.org>

¹⁹⁵ Grassroots Economics, 2026, <https://grassecon.org/about>

¹⁹⁶ Kolektivo, 2025, <https://medium.com/kolektivo-co/regeneration-needs-location-b538cae97ff7>

¹⁹⁷ Pleno, 2025, <https://eblockchainconvention.com/pleno-refi/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

La Banque des Règlements Internationaux (BRI) et l'Autorité Monétaire de Hong Kong (*Hong Kong Monetary Authority*, HKMA) ont été parmi les premières institutions financières de premier rang à explorer opérationnellement cette convergence dans le cadre du *Project Genesis* (2021-2022). Ce programme d'expérimentation a développé des prototypes de plateformes d'émission d'obligations vertes tokenisées combinant blockchain, *smart contracts** et IoT* pour permettre le suivi en temps réel des sorties environnementales des projets financés. La version Genesis 2.0, conduite en 2022 avec Goldman Sachs et le *UN Climate Change Global Innovation Hub*, a poussé plus loin l'expérimentation en introduisant les *Mitigation Outcome Interests* (MOI) – des instruments financiers adossés directement à des unités de réduction d'émissions tokenisées et suivies *via* des capteurs IoT*, permettant aux investisseurs de percevoir un rendement lié à la performance environnementale vérifiée du projet sous-jacent¹⁹⁸.

Cette expérimentation illustre l'ambition centrale du dMRV dans le contexte de la finance climatique : déplacer la frontière entre la déclaration et la preuve, et en faisant cela, transformer la nature même de l'actif climatique – d'un certificat émis *ex post* sur la base d'une évaluation documentaire, vers un actif dont la valeur est ancrée dans un flux de données vérifiées en continu.

[E] Quelles données en entrée ? La limite fondamentale du dMRV

L'automatisation du suivi écologique ne résout pas intégralement le problème

¹⁹⁸ BIS Innovation Hub & HKMA. (2021). Project Genesis: prototype digital platforms for green bond tokenisation. BIS. <https://www.bis.org/publ/othp43.htm> ; BIS Innovation Hub, HKMA & UN Climate Change Global Innovation Hub. (2022). Project Genesis 2.0. BIS. https://www.bis.org/about/bisih/topics/green_finance/green_bonds.htm

d'intégrité des marchés climatiques. Elle déplace la question de la fiabilité de l'auditeur humain vers la fiabilité des données en entrée du système.

Deux problèmes subsistent. Le premier concerne la qualité des données satellitaires elles-mêmes : la couverture nuageuse, les limitations de résolution dans certains types d'écosystèmes et les hypothèses des modèles allométriques utilisés pour convertir des indices de végétation en stocks de carbone introduisent des marges d'incertitude qui doivent être quantifiées et communiquées aux marchés. La communauté scientifique a montré que des biais systématiques dans ces modèles peuvent conduire à des surestimations significatives des stocks de carbone séquestrés – un problème que la tokenisation sur blockchain ne résout pas, puisqu'elle ne fait que figer dans un registre immuable une donnée potentiellement fausse.

Le second problème est celui des oracles* : pour que des données de capteurs IoT* ou d'imagerie satellitaire alimentent un *smart contract** qui déclenchera automatiquement l'émission d'un crédit ou le paiement d'un rendement, ces données doivent transiter par une interface entre le monde physique et la blockchain. Cette interface, l'oracle*, constitue un point de défaillance centralisé dans un système qui se présente comme décentralisé. Si l'oracle* est compromis, manipulé ou simplement défaillant, l'ensemble de la chaîne de valeur du crédit tokenisé est affectée. Ce risque, structurel et non résolu à ce stade, sera analysé dans la section 2.2.1.

2.1.1.2 Fiabilité et inaltérabilité des rapports

L'automatisation de la collecte des données physiques constitue une avancée décisive dans la résolution de la discontinuité

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

temporelle du MRV traditionnel. Mais elle ne répond qu'à la moitié du problème puisque des données collectées en continu et en temps quasi réel ne valent que si leur intégrité peut être garantie entre le moment de leur collecte et celui de leur utilisation par un marché, un régulateur ou un investisseur. C'est sur ce second front – celui de l'inaltérabilité et de la traçabilité des rapports – que les Technologies de registres distribués (DLT*) apportent une contribution structurelle distincte du dMRV entendu comme simple outil de mesure.

Le problème de l'intégrité des données après collecte

Dans le système de MRV traditionnel, le problème de l'intégrité des données est largement résolu par la délégation à un tiers de confiance : l'organisme de validation et de vérification (OVV) accrédité produit un rapport signé dont la valeur probante repose sur sa réputation institutionnelle et son accréditation. Cette solution est coûteuse, discontinue et, comme l'a montré la section 1.1.3.2, exposée à des conflits d'intérêts documentés.

Dans un système de dMRV, ce problème se déplace. Si les données sont collectées automatiquement par des capteurs IoT* ou par imagerie satellitaire, elles transitent par des couches de traitement – agrégation, transformation, modélisation – avant d'être présentées comme rapport d'impact. Chacune de ces couches constitue un point potentiel d'altération, volontaire ou non. La question de l'intégrité des rapports ne disparaît donc pas avec la numérisation de la collecte mais se reconfigure en une question d'architecture de données.

L'apport structurel de la blockchain : l'immutabilité comme preuve

C'est précisément cette architecture que les Technologies de registres distribués (DLT*) modifient. En enregistrant sur un registre public chaque événement de collecte, de traitement et de notification avec

un horodatage cryptographique, la blockchain publique utilisée transforme une simple déclaration numérique en une trace vérifiable et non réversible. Une donnée inscrite sur une blockchain publique ne peut être modifiée rétroactivement sans que la rupture dans la chaîne des empreintes cryptographiques ne soit immédiatement détectable par l'ensemble des nœuds du réseau. Comme l'établit une revue de la littérature publiée dans *Discover Environment* en 2025, « les registres distribués créent des enregistrements immuables sur l'origine, le suivi et la propriété des quotas carbone, soutiennent des transactions plus efficaces et réduisent les possibilités d'activités frauduleuses¹⁹⁹ ».

Cette propriété d'immutabilité produit trois effets directs sur l'architecture de la finance climatique. Le premier est la **traçabilité complète du cycle de vie d'un actif écologique** : de l'événement de terrain qui le génère, comme une superficie forestière mesurée, un hectare de sol carboné vérifié, jusqu'à son retrait définitif du marché (*retirement*), chaque étape est inscrite dans un registre consultable par tout acteur disposant d'une connexion internet, sans autorisation préalable. Le deuxième effet est la **neutralisation du double comptage** : un crédit enregistré *on-chain** avec un identifiant cryptographique unique ne peut être simultanément comptabilisé dans deux bilans distincts, une propriété directement liée à l'immutabilité du registre²⁰⁰. Le troisième effet est la **réduction de l'asymétrie d'information entre porteurs de projets et investisseurs** : ces derniers n'ont plus à s'en remettre à des rapports d'audit discontinus dont ils ne peuvent vérifier l'exactitude qu'en faisant

¹⁹⁹ Merlo, A.L.C., Mendonça, D.S., Santos, J. et al.

Blockchain for the carbon market: a literature review. *Discov Environ* 3, 68 (2025).

<https://doi.org/10.1007/s44274-025-00260-4>

²⁰⁰ European Commission – Technopolis Group. (2023, décembre). Study on the potential of blockchain technology and distributed ledger technology for EU climate policies. European Commission.

<https://technopolis-group.com/wp-content/uploads/2024/06/study-on-the-potential-of-blockchain-technology-and-ML0224255ENN.pdf>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

confiance à l'auditeur puisqu'ils accèdent directement à la source primaire des données de suivi.

Prenons un autre exemple dans le secteur agricole mondial, dont les chaînes de valeur mêlent des milliers d'intervenants répartis sur plusieurs continents et dont l'opacité est structurelle, constitue à cet égard un terrain d'application particulièrement révélateur.

Justoken et AgriDex



Justoken²⁰¹, plateforme latinoaméricaine de tokenisation d'actifs réels fondée sur des données géospatiales et une infrastructure blockchain, propose à travers son module *T&S Explorer*²⁰² une chaîne d'approvisionnement auditable dans laquelle la récolte d'un producteur n'est plus déclarée par celui-ci, mais certifiée par des capteurs et des données géoréférencées. Ce renversement du flux de preuve, du déclaratif vers l'instrumental, supprime *de facto* la dépendance de l'évaluateur aux informations fournies par l'évalué. Ce dispositif a notamment été déployé en partenariat avec le négociant Bunge²⁰³ pour assurer la traçabilité de soja sans déforestation, et permettait, à la date de rédaction du présent rapport, de certifier plus d'un million de tonnes de matières premières réparties sur onze catégories de produits et huit référentiels de certification.

AgriDex²⁰⁴, place de marché numérique fondée au Royaume-Uni en 2020 et construite sur l'infrastructure **Solana**, inscrit quant à elle les données de provenance et les *credentials* environnement, social, gouvernance

(ESG) directement sur la chaîne, les rendant opposables à tout acheteur mondial sans intermédiaire de vérification centralisé. La plateforme déclare couvrir la majorité des 1 100 points de données exigés par la réglementation européenne sur la publication d'informations en matière de durabilité dans le secteur des services financiers, le *Sustainable Finance Disclosure Regulation* (SFDR) de 2023, chaque transaction donnant lieu à la création d'un jeton non fongible (*non-fungible token*, NFT*) contenant les métadonnées complètes de l'échange : spécifications du produit, certificats de qualité, données de provenance et confirmation de règlement.

Ces deux cas illustrent comment l'automatisation de la preuve peut réduire structurellement le coût de vérification pour les actifs agricoles. Il convient cependant de les situer avec précision : Justoken et **AgriDex** sont des acteurs commerciaux privés dont les affirmations relatives à l'élimination de l'asymétrie d'information s'appuient, pour partie, sur leur propre communication institutionnelle, en l'absence d'évaluation académique indépendante publiée à ce jour. La question de la gouvernance des référentiels auxquels ces systèmes se rattachent - quels organismes accréditent les protocoles de capteurs, selon quels critères les *credentials* ESG sont sélectionnés parmi les 1 100 points disponibles, avec quelle légitimité ces choix sont opérés - reste entière. Elle constitue, comme on l'examinera à la section 2.2.3, un enjeu systémique propre à toute architecture de vérification décentralisée : l'automatisation de la preuve ne résout pas, par elle-même, la question de savoir qui définit ce qui mérite d'être prouvé.

Dans le domaine de la certification carbone et sociale, **Change Code** adopte une approche complémentaire fondée sur l'*Ethereum*

²⁰¹ <https://www.justoken.com/>

²⁰² <https://www.justoken.com/#solution-tse>

²⁰³ <https://www.bunge.com/>

²⁰⁴ <https://agridex.com/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Attestation Service (EAS)²⁰⁵ comme couche d'attestation immuable : chaque certification d'impact produite par sa pile technologique (GoodGenerator, Hypercert, EAS, ImpactReserve ERC-6551) est inscrite *on-chain** sous forme de *Change Credit* (ERC-721 - NFT), représentant un résultat vérifié, notamment une réduction carbone ou un impact social certifié via BCarbon. Une attestation EAS ne pouvant être modifiée *a posteriori*, ce dispositif répond directement aux exigences d'auditabilité des standards ESG institutionnels en produisant une trace inaltérable de bout en bout, de la donnée de terrain jusqu'à l'actif financier cessible²⁰⁶.

Les *smart contracts** comme moteur d'automatisation du reporting

Au-delà de la conservation immuable des données, les *smart contracts** permettent d'encoder dans le code les règles de calcul des bénéfices environnementaux et de déclencher automatiquement la génération de rapports de divulgation lorsque des seuils prédéfinis sont atteints. Dans le cadre des expérimentations du *Project Genesis 2.0* conduites par la Banque des Règlements Internationaux (BRI) et l'Autorité Monétaire de Hong Kong (*Hong Kong Monetary Authority*, HKMA) avec Goldman Sachs en 2022, ce mécanisme a été appliqué aux obligations vertes tokenisées : des capteurs IoT* mesurant la production d'énergie renouvelable des projets sous-jacents transmettaient leurs données à des *smart contracts** qui calculaient automatiquement les réductions d'émissions de CO₂ correspondantes et les reflétaient en temps réel dans la valeur des *Mitigation Outcome Interests* (MOI) attachés aux obligations²⁰⁷.

Ce modèle d'automatisation du reporting est particulièrement pertinent pour la finance réglementée, dont les contraintes de divulgation – Règlement sur la Taxonomie Verte de l'Union Européenne, Cadre de divulgation de l'Information Financière liée à la Nature (*Taskforce on Nature-related Financial Disclosures*, TNFD), Directive sur le Reporting de Durabilité des Entreprises (*Corporate Sustainability Reporting Directive*, CSRD) – exigent des données environnementales de plus en plus précises, auditables et continues. Un *smart contract** peut être configuré pour produire automatiquement des rapports de conformité dans des formats standardisés dès que les données de suivi atteignent un seuil de confiance statistique suffisant, réduisant *a priori* les délais et les coûts associés à la production documentaire manuelle.

Les limites persistantes : le problème de l'oracle* et de la donnée en entrée

Ces propriétés ne constituent pas une solution complète et sans condition. Une blockchain publique garantit l'intégrité des données *après* leur inscription sur le registre ; elle ne garantit en rien la qualité des données avant cette inscription. Autrement dit, une mesure inexacte ou délibérément manipulée bénéficiera, une fois inscrite *on-chain**, de la même garantie d'immuabilité qu'une mesure de haute qualité. C'est ce que les praticiens désignent par l'expression *garbage in, garbage out* : le registre distribué scelle avec la même rigueur cryptographique le vrai et le faux.

Ce problème de qualité des données en entrée est directement lié à la question des oracles* – ces interfaces entre le monde physique et la blockchain par lesquelles transitent les données de capteurs, d'imagerie satellitaire ou de modèles algorithmiques. Un oracle* constitue un point de défaillance centralisé au sein d'un système qui se présente par ailleurs comme décentralisé : s'il est compromis, défaillant ou simplement imprécis, l'ensemble de la chaîne de valeur du

²⁰⁵ Ethereum Attestation Service (EAS) <https://attest.org>

²⁰⁶ Change Code, 2025,

<https://docs.changecode.io/data-schemas/hypercerts/>

²⁰⁷ BIS Innovation Hub, HKMA & UN Climate Change

Global Innovation Hub. (2022). *Project Genesis 2.0*. BIS.

https://www.bis.org/about/bisih/topics/green_finance/green_bonds.html

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

crédit tokenisé s'en trouve affecté, sans que le registre lui-même ne signale la moindre anomalie. Ce risque, structurel et non résolu à ce stade de développement des marchés climatiques numériques, sera examiné en détail dans la section 2.2.1 de ce rapport.

[E] Ce que les blockchains publiques apportent réellement à l'audit environnemental

Hachage, horodatage et preuve cryptographique. La valeur d'une blockchain publique dans le contexte du MRV repose sur deux propriétés cryptographiques fondamentales dont il convient de préciser la portée pour un lecteur non technique.

La première est le hachage* (*hashing*) : toute donnée inscrite sur une blockchain est transformée par une fonction mathématique déterministe en une empreinte numérique de longueur fixe – le hash* – qui est unique à cette donnée. Modifier un seul bit de la donnée originale produit un hash* entièrement différent, rendant toute altération immédiatement détectable. Cette propriété garantit l'intégrité de chaque enregistrement individuel. (faites le test²⁰⁸ par vous-même).

La seconde est le chaînage des blocs : chaque nouveau bloc de transactions incorpore dans son hash* l'empreinte du bloc précédent, créant une chaîne continue où toute modification rétroactive d'un bloc invalide l'ensemble des blocs suivants. C'est cette propriété qui rend la falsification d'un historique de données *on-chain** computationnellement infaisable dans les systèmes utilisant des mécanismes de consensus robustes.

Appliquées aux données de MRV, ces propriétés permettent de constituer un

registre d'audit immuable (*immutable audit trail*) : tout acteur, qu'il soit régulateur, investisseur, organisation non gouvernementale (ONG), peut vérifier, de manière indépendante, qu'une donnée de suivi n'a pas été altérée depuis son inscription, sans avoir besoin de faire confiance à une institution centrale. C'est cette capacité à transférer la confiance d'un intermédiaire vers un protocole mathématique qui constitue l'apport spécifique d'une blockchain à la fiabilité des rapports de la finance climatique.

2.1.2 Le pont vers le monde physique : Oracle, IoT, IA et humains

Un *smart contract** est, par construction, aveugle au monde physique. Il ne peut exécuter que des opérations sur des données déjà présentes dans le registre ; il lui est structurellement impossible d'observer un sol, de lire un capteur ou d'interpréter une image satellitaire. Pour que la finance environnementale programmable fonctionne, c'est-à-dire, par exemple, qu'un paiement puisse être déclenché automatiquement par la mesure d'un stock de carbone ou d'un indice de biodiversité, il faut un pont entre la réalité physique et la blockchain. Ce pont a un nom technique : l'oracle*.

C'est précisément là que la promesse de décentralisation rencontre sa contrainte la plus fondamentale. Satellites, capteurs de l'internet des objets (IoT*) et modèles d'Intelligence Artificielle (IA) constituent les trois familles de sources qui alimentent ces oracles*, chacune avec ses performances documentées, ses angles morts et ses points de défaillance propres. Cette section examine leur architecture et leur complémentarité. Leurs vulnérabilités systémiques feront l'objet de la section 2.2.

²⁰⁸ SHA256
<https://emn178.github.io/online-tools/sha256.html>

2.1.2.1 Le rôle critique des Oracles et de l'Internet des Objets (IoT)

Les *smart contracts** fonctionnant sur une blockchain sont, par conception, techniquement isolés de leur environnement physique. Ce cloisonnement est inhérent à leur architecture : pour garantir un fonctionnement déterministe et vérifiable par l'ensemble des nœuds du réseau, un *smart contract** ne peut exécuter que des opérations sur des données déjà présentes dans le registre. Il est structurellement incapable d'accéder de manière native à des informations extérieures – prix de marché, données météorologiques, mesures de capteurs, images satellitaires. Caldarelli résume cette contrainte en 2020 dans une revue de la littérature publiée dans la revue *Information* : les données provenant du monde réel doivent être fournies par « *une source tierce univoque dont la fiabilité est indiscutable pour tous les nœuds* »²⁰⁹. Cette interface est désignée sous le terme d'oracle*.

La nature et le rôle des oracles* dans la finance environnementale

Un oracle* n'est pas un programme unique ou un dispositif spécifique, mais un concept architectural. Toute entité capable de fournir à un *smart contract** des données externes au registre peut être qualifiée d'oracle* – qu'il s'agisse d'un capteur physique, d'une API (*Application Programming Interface*, interface de programmation applicative) agrégeant des flux de données de marché, d'une image satellitaire traitée par un algorithme d'apprentissage automatique ou, dans le cas de données non automatisables, d'un opérateur humain saisissant directement une valeur²¹⁰. Dans le domaine de la finance environnementale, les oracles* constituent le maillon de connexion entre les données physiques de terrain – mesures de biomasse,

flux de méthane, production d'énergie renouvelable, couverture forestière – et les actifs tokenisés qui en dérivent : crédits carbone, obligations vertes à impact programmable, jetons de biodiversité.

La valeur pratique de ce dispositif est considérable. Sans oracle*, un *smart contract** de financement conditionnel ne peut libérer des fonds vers un projet de reforestation qu'une fois qu'un opérateur humain a manuellement saisi les données de mesure dans le système – reproduisant de *facto* l'asymétrie d'information et les risques de manipulation que la blockchain était censée éliminer. Avec un oracle* robuste connecté à des capteurs IoT* et à des flux d'imagerie satellitaire, le déclenchement peut être entièrement automatique, vérifiable en temps quasi réel et résistant à la manipulation unilatérale d'un acteur isolé.

L'écosystème technique : capteurs IoT, imagerie satellitaire et données de terrain

L'Internet des Objets (IoT*) constitue la source primaire la plus directe pour les oracles* de la finance environnementale. Des capteurs déployés *in situ* – sondes de teneur en carbone des sols, hygromètres, capteurs de flux de méthane, compteurs de production électrique pour les installations solaires – mesurent en continu et de manière automatisée des variables écologiques avec une granularité temporelle impossible à atteindre par l'audit humain périodique. Ces flux de données sont agrégés, filtrés et transmis *via* des protocoles sécurisés vers des oracles* qui les inscrivent dans le registre après validation.



IXO Protocol²¹¹ montre à voir la connexion directe entre un objet physique et un paiement conditionnel *on-chain**. Dans le cadre du projet SupaMoto en Zambie, des foyers de

²⁰⁹ Caldarelli, G. (2020). Understanding the blockchain oracle problem: A call for action. *Information*, 11(11), 509. <https://doi.org/10.3390/info1110509>

²¹⁰ *Ibid.*

²¹¹ <https://www.ixoworld.io/ixo-protocol>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

cuisson sont équipés de capteurs IoT* qui transmettent leurs données d'utilisation à des oracles* alimentés par l'IA, intégrés aux *Agentic Networks* développés par IXO. Lorsque les seuils d'utilisation sont atteints, un paiement conditionnel est automatiquement déclenché *on-chain**, par un *smart contract**, sans intervention humaine dans la chaîne de validation. Le modèle économique est à deux versants et repose à la fois sur un abonnement, payé par le ménage, avec une caution de 6,80 \$ pour le foyer de cuisson et 7,30 \$ par mois pour 30 kg de pellets, soit environ moitié moins que sa dépense antérieure en charbon de bois. Les pellets sont fabriqués à partir de déchets de scierie issus de plantations forestières durables zambiennes, transformant un déchet en chaîne de valeur locale. SupaMoto conserve la propriété des foyers de cuisson, les entretient et recourt au *mobile money* pour les paiements, supprimant toute friction bancaire.

En février 2025, le PIDG (*Private Infrastructure Development Group*) et EDFI Management Company ont investi conjointement 4 millions d'euros pour accélérer le déploiement du modèle en Zambie²¹². Cet investissement doit financer 14 800 nouveaux foyers connectés, bénéficiant à terme à 74 000 personnes. Le *Modern Cooking Facility for Africa* (MCFA) a par ailleurs alloué 0,6 million d'euros en subvention fixe et 1,4 million d'euros en financement basé sur les résultats, permettant de maintenir un coût d'accès minimal pour les ménages à faibles revenus. Les revenus issus de la vente de crédits carbone vérifiés, générés par l'usage mesuré IoT* des foyers et certifiés sous l'Article 6.2 de l'Accord de Paris en

partenariat avec le gouvernement zambien, sont explicitement prévus pour subventionner durablement l'accessibilité du service à mesure que les marchés carbone se développent.

L'imagerie satellitaire constitue une deuxième source complémentaire, particulièrement adaptée aux projets à grande emprise spatiale. Des constellations comme Sentinel-1 et Sentinel-2 (Agence Spatiale Européenne, ESE) ou GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*, NASA) fournissent des données multispectrales et LiDAR (*Light Detection and Ranging*) permettant d'estimer la biomasse aérienne, de détecter les changements de couverture forestière et de suivre les pratiques agricoles. Combinées à des modèles d'apprentissage automatique, ces données alimentent des oracles* capables de produire des estimations continues du stock de carbone séquestré, transmissibles directement à des *smart contracts** de certification.

La revue systématique publiée dans *Journal of Integrative Agriculture* sur les systèmes blockchain intégrant l'IoT* pour la finance carbone dans le secteur agricole établit que « la conception d'un système d'authenticité des données basé sur des événements » implique trois phases successives : l'évaluation de la réactivité et de la fiabilité des capteurs IoT*, la collecte de données géolocalisées par événement, et l'analyse des corrélations probabilistes entre ces événements pour évaluer leur fiabilité – un processus de validation multicouche qui réduit *a priori* le risque de données erronées ou manipulées atteignant le registre²¹³.

²¹² PIDG / Electrifi, « Scaling access to clean cooking solutions in Zambia », 24 February 24, 2025 pidg.org/scaling-access-to-clean-cooking-solutions-in-zambia

²¹³ Chaudhari, A., Karde, P., Randad, V., Limbhore, D., & Lonikar, R. (2025). A Blockchain-based Carbon Credit Ecosystem. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 13(11), 2450-2456. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.75904>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Les expérimentations institutionnelles de référence

Les applications institutionnelles les plus documentées de ce schéma oracle*-IoT* dans la finance environnementale sont issues du *Project Genesis 2.0*, conduit en 2022 par la Banque des Règlements Internationaux (BRI), l'Autorité Monétaire de Hong Kong (*Hong Kong Monetary Authority*, HKMA) et le *UN Climate Change Global Innovation Hub* avec Goldman Sachs²¹⁴. Ce programme a expérimenté la connexion directe entre des capteurs IoT* mesurant la production d'énergie renouvelable de projets sous-jacents et des *smart contracts** gérant des obligations vertes tokenisées, les données de capteurs alimentant automatiquement le calcul des *Mitigation Outcome Interests* (MOI) – instruments financiers adossés à des réductions d'émissions vérifiées – sans intervention humaine dans la chaîne de transmission²¹⁵.

Ces expérimentations restent pour l'essentiel à un stade pilote ou en développement, mais elles documentent la faisabilité technique de l'architecture oracle-IoT*-blockchain pour la certification environnementale automatisée.



À l'échelle commerciale, la plateforme **Arbol** illustre le passage de l'expérimentation à un déploiement opérationnel. Des oracles* alimentés par les données climatiques de dClimate²¹⁶ et sécurisés par le réseau **Chainlink**²¹⁷ déclenchent automatiquement des indemnités paramétriques agricoles

et de réassurance dès qu'un seuil météorologique prédéfini est atteint, sans intervention humaine dans la chaîne de validation²¹⁸. Depuis son lancement en 2020, **Arbol** a transacté plus d'un milliard de dollars de risque notionnel, avec 100 millions de dollars de primes au seul premier semestre 2022 et plus de 700 clients institutionnels. La robustesse opérationnelle du dispositif a été testée en conditions réelles lors de l'ouragan Milton en octobre 2024 : 20 millions de dollars d'indemnités paramétriques ont été versés à des réassureurs en moins de 30 jours après le sinistre, sans expertise contradictoire²¹⁹. En avril 2024, **Arbol** a levé 60 millions de dollars en Série B pour accélérer son expansion internationale.

Le problème de l'oracle* comme limite structurelle

Ces apports ne doivent pas occulter la limite fondamentale que Caldarelli a formulé dès 2020 et que la littérature académique a depuis amplement confirmée : les oracles* réintroduisent, dans un système conçu pour être décentralisé et *trustless*, une dépendance à des sources de données externes dont la fiabilité ne peut être garantie par la blockchain elle-même. Caldarelli qualifie cette dépendance de « deux pas en arrière vers la centralisation » (*two-step back from decentralization*) : en déléguant à un oracle* la responsabilité de fournir des données au *smart contract**, le système reconstitue un point de défaillance unique (*single point of*

²¹⁴ BIS Innovation Hub, HKMA & UN Climate Change Global Innovation Hub. (2022). *Project Genesis 2.0*. https://www.bis.org/about/bisih/topics/green_finance/green_bonds.htm

²¹⁵ *Ibid.*

²¹⁶ dClimate <https://www.dclimate.net> ; Jha, S. *dClimate: Smart contracts* for the warming world*. Nasdaq. October 11, 2022. <https://www.nasdaq.com/articles/dclimate-smart-contracts-for-the-warming-world>

²¹⁷ <https://chainlink/>

²¹⁸ Arbol & Chainlink. (2021). *Businesses and farmers can now hedge weather risk through the Arbol platform and Chainlink data*. <https://www.arbol.io/post/businesses-and-farmers-can-now-hedge-weather-risk-through-the-arbol-platform-and-chainlink-data>

²¹⁹ Reinsurance News. *Arbol parametric insurance pays out \$20m in under 30 days after Milton's landfall*. December 5, 2024. <https://www.reinsurancene.ws/arbol-parametric-insurance-pays-out-20m-in-under-30-days-after-miltons-landfall>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

failure) dans une architecture qui prétend en être dépourvue²²⁰.

Cette vulnérabilité prend des formes multiples. Les oracles* centralisés – un seul fournisseur de données agréant des mesures satellitaires ou des capteurs – peuvent être compromis par une défaillance technique, une manipulation délibérée ou une erreur de calibrage qui se propagera automatiquement dans l'ensemble de la chaîne de valeur sans que le registre lui-même n'en détecte l'anomalie. Les oracles* décentralisés – agréant des données de sources multiples selon un mécanisme de consensus – réduisent ce risque mais ne l'éliminent pas, et introduisent des complexités techniques et de gouvernance supplémentaires. Une revue publiée dans *Frontiers in Blockchain* en 2025 conclut que « *malgré les progrès technologiques significatifs, les défis conceptuels des oracles* persistent, en faisant un enjeu critique mais souvent négligé dans la recherche et la pratique blockchain*²²¹ ».



Le protocole **Etherisc**²²² illustre précisément le point de tension autour de la fiabilité des oracles* mais aussi ce que la combinaison oracle-blockchain peut changer pour les populations les plus vulnérables. La *Lemonade Crypto Climate Coalition* (LCCC), lancée en mars 2022 par la Lemonade Foundation²²³ avec **Etherisc**, **Chainlink**, **Avalanche**, **Hannover Re** et **Pula**, propose à des petits agriculteurs kenyans une

assurance paramétrique récolte à coût minimal, déclenchée automatiquement par des oracles* météorologiques sans dépôt de dossier ni expert humain²²⁴. Lors de la saison des pluies courtes d'octobre 2022 à janvier 2023, près de 7 000 agriculteurs kenyans ont souscrit une protection pour leurs cultures. La première agricultrice à bénéficier du dispositif, Eunice Jesang, dans le comté de Makeuni au Kenya, a assuré l'intégralité de sa récolte de maïs pour 0,83 dollar pour toute la saison²²⁵. Les agriculteurs souscrivent depuis un téléphone basique et paient moins d'un dollar pour couvrir l'ensemble de leur récolte contre la sécheresse et les inondations. En fin de saison, les transferts de fonds sont automatiquement déclenchés à partir des données de rendement de zone, triangulées avec des données météorologiques, et transmis aux *smart contracts** via des oracles* **Chainlink** standard²²⁶. En 2021, **Etherisc** avait déjà intégré plus de 17 000 petits agriculteurs de 17 régions du Kenya lors de sa première saison en partenariat avec **ACRE Africa**, **Chainlink**, **Mercy Corps Ventures** et la **Ethereum Foundation**. Au total, **Etherisc** a déployé une assurance paramétrique agricole et climatique dans plus de 15 pays, avec plus de 10 000 polices émises depuis 2021²²⁷. Le modèle économique repose entièrement sur la fiabilité des oracles* climatiques : le *Generic Insurance Framework* (GIF) d'**Etherisc** est conçu pour être

²²⁰ Caldarelli, G. (2020). Understanding the blockchain oracle problem: A call for action. *Information*, 11(11), 509. <https://doi.org/10.3390/info11110509>

²²¹ Caldarelli G (2025) Can artificial intelligence solve the blockchain oracle problem? Unpacking the challenges and possibilities. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1682623>

²²² <https://etherisc.com/>

²²³ Etherisc. (2022, March 26). *Etherisc becomes founding member of Lemonade Crypto Climate Coalition*. Etherisc Blog. <https://blog.etherisc.com/etherisc-becomes-founding-member-of-lemonade-crypto-climate-coalition-b48da7bd5d9c>

²²⁴ Lemonade Foundation. (2022). *Fighting world hunger with blockchain*. Lemonade Blog. <https://www.lemonade.com/blog/lccc-world-hunger/>

²²⁵ Etherisc. (2023, March 29). *Etherisc protects another 7,000 Kenyan farmers as part of the Lemonade Crypto Climate Coalition*. Etherisc Blog. <https://blog.etherisc.com/etherisc-protects-another-7-000-kenyan-farmers-as-part-of-the-lemonade-crypto-climate-coalition-e169eca3d6bc>

²²⁶ *Ibid.*

²²⁷ CoinLaw. (2026, March 16). *Decentralized insurance statistics 2025: Big numbers, bold moves*. <https://coinlaw.io/decentralized-insurance-statistics/>

agnostique quant à la source des oracles*, c'est à dire que toute la valeur du protocole, et l'intégralité de la protection accordée à des agriculteurs dont le niveau d'assurance au Kenya ne dépasse pas 3 % de la population, repose sur la qualité de ces données. Un oracle* défaillant ou manipulé ne produit pas seulement une erreur dans le registre : il prive des agriculteurs vulnérables d'une indemnisation à laquelle ils ont légitimement droit, ou déclenche des paiements injustifiés qui compromettent la viabilité du fonds. Ce cas illustre pourquoi la question de l'oracle* n'est pas seulement un problème d'architecture technique, mais un enjeu de justice distributive dans la finance à impact²²⁸.

Ce problème de la véracité de l'information et de la sécurité du code informatique n'est pas seulement théorique dans le contexte de la finance climatique puisque si un oracle* fournit des données de déforestation inexactes, par calibrage insuffisant d'un modèle satellitaire ou par manipulation d'un flux de capteurs par exemple, des crédits carbone surestimés seront émis et inscrits de manière immuable dans le registre, reproduisant *on-chain** la même asymétrie d'information que le dMRV* était supposé corriger. Cette limite sera analysée dans la section 2.2.1, consacrée au risque systémique du *garbage in, garbage out* dans l'architecture de la Finance Régénérative du Web3.

2.1.2.2 L'Intelligence Artificielle au service de la certification

L'Internet des Objets (IoT*) fournit les données brutes ; une blockchain publique garantit leur intégrité après inscription sur le

registre décentralisé ; mais entre ces deux couches se pose un problème d'une complexité croissante. Les données collectées par les capteurs et les satellites sont hétérogènes, volumineuses, bruitées et multi-modales : imagerie multispectrale, données LiDAR (*Light Detection and Ranging*), séquences d'ADN environnemental (aDNe, désigné en anglais par l'acronyme eDNA pour *environmental DNA*), enregistrements acoustiques, mesures de flux de gaz. Aucun auditeur humain, et aucun algorithme simple, n'est en mesure de traiter simultanément ces flux à l'échelle des projets environnementaux contemporains pour en extraire une estimation fiable d'un stock de carbone ou d'un indice de biodiversité. C'est dans cet espace – entre la donnée brute et la preuve certifiable – que l'Intelligence Artificielle (IA) s'impose comme le troisième pilier fonctionnel du dMRV.

Le défi de la certification à l'échelle : la multi-modalité des données écologiques

La certification rigoureuse d'un impact écologique – séquestration de carbone, conservation de la biodiversité, restauration des sols – exige de trianguler des sources de données fondamentalement hétérogènes. Un projet de reforestation en Amazonie, par exemple, mobilise *a minima* de l'imagerie satellitaire multispectrale pour détecter les changements de couverture végétale, des données LiDAR ou radar (*Synthetic Aperture Radar*, SAR) pour estimer la biomasse aérienne en trois dimensions, des mesures de capteurs IoT* pour le flux de méthane et la teneur en carbone des sols, et potentiellement des données d'eDNA pour évaluer la santé microbienne du sol ou la richesse spécifique de la faune et de la flore. Chacune de ces sources possède sa propre résolution spatiale, sa fréquence de mise à jour et ses marges d'incertitude spécifiques.

L'aDNe constitue à cet égard un développement particulièrement significatif pour la certification de la biodiversité dans les marchés du carbone. Cette technologie

²²⁸ Etherisc. (2023, March 29). *Etherisc protects another 7,000 Kenyan farmers as part of the Lemonade Crypto Climate Coalition*. Etherisc Blog. <https://blog.etherisc.com/etherisc-protects-another-7-000-kenyan-farmers-as-part-of-the-lemonade-crypto-climate-coalition-e169eca3d6bc>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

permet d'identifier la composition spécifique d'un écosystème – microbes, invertébrés, vertébrés – à partir de traces génétiques présentes dans l'eau, le sol ou l'air, sans capturer physiquement aucun organisme et sans requérir l'expertise taxonomique spécialisée qu'exigent les méthodes de relevé conventionnelles. Une analyse systématique publiée dans *Communications Earth & Environment* en 2024 portant sur 129 projets carbone forestiers et 396 études académiques a établi que les méthodes fondées sur l'adNe offrent une « *large portée taxonomique, un échantillonnage de terrain simplifié et des gains d'efficience à l'échelle* »²²⁹ particulièrement adaptés aux exigences de la certification dans les marchés carbone – là où les méthodes traditionnelles de surveillance de la biodiversité sont trop coûteuses, trop lentes et trop variables pour être intégrées de manière systématique dans les protocoles de vérification. Cette capacité à obtenir des informations holistiques sur la biodiversité à partir d'un seul prélèvement de terrain, combinée au traitement algorithmique de données de télédétection satellitaire pour extrapoler ces mesures ponctuelles à des surfaces étendues, est précisément ce qui rend l'IA indispensable à la certification écologique à grande échelle dans le contexte de la finance à impact.

Les architectures d'apprentissage automatique au service de la vérification

Les modèles d'apprentissage automatique – en particulier les réseaux de neurones profonds (*deep learning*), les forêts aléatoires (*random forests*) et les modèles de régression gaussienne – sont désormais déployés dans plusieurs fonctions critiques du dMRV. La première est la détection de changements d'usage des sols et de déforestation : des réseaux neuronaux convolutifs (*convolutional neural networks*, CNN) entraînés sur des

séries temporelles d'images satellitaires peuvent détecter des anomalies de couverture forestière avec une précision et une rapidité incomparables à l'analyse visuelle humaine, y compris sous couverture nuageuse partielle en utilisant des données SAR qui pénètrent les nuages. La deuxième est l'estimation de la biomasse et du stock de carbone : des modèles allométriques calibrés sur des données LiDAR et des mesures de terrain permettent de dériver des estimations continues du carbone séquestré sur des millions d'hectares. La troisième est la validation de la cohérence entre sources : des modèles d'apprentissage automatique sont utilisés pour identifier des incohérences entre les données IoT* de terrain et l'imagerie satellitaire – une technique de détection d'anomalies qui limite les risques de manipulation d'une source unique.

Wu et al. soulignent en 2026 dans *Ecology and Evolution* que « *l'intégration de l'eDNA avec l'apprentissage automatique assisté par reconnaissance d'images, la télédétection et les systèmes d'échantillonnage automatisés* » constitue une frontière de recherche active permettant d'améliorer la précision et le rapport coût-efficacité de la surveillance des conditions des écosystèmes aquatiques²³⁰.

Dans les environnements terrestres, une étude pilote publiée dans *PLOS ONE* en 2024 par des chercheurs de l'USDA (*United States Department of Agriculture*) a démontré la faisabilité opérationnelle d'un système de surveillance couplant la télédétection et l'eDNA pour quantifier annuellement les bénéfices environnementaux de projets d'agriculture durable dans l'Amazonie brésilienne, en calculant des indicateurs de changement de couverture forestière et de richesse spécifique directement utilisables pour des fonds d'investissement²³¹.

²²⁹ Allen, M.C., Lockwood, J.L., Ibanez, R. et al. eDNA offers opportunities for improved biodiversity monitoring within forest carbon markets. *Commun Earth Environ* 5, 801 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01970-y>

²³⁰ Wu, Y., et al. (2026). Environmental DNA (eDNA) technology in biodiversity and ecosystem health research: Advances and prospects. *Ecology and Evolution*, 16, e72891. <https://doi.org/10.1002/ece3.72891>

²³¹ Dyson, K., Nicolau, A. P., Tenneson, K., Francesconi, W., Daniels, A., Andrich, G., Caldas, B., Castaño, S., de Campos,

De la donnée brute à la preuve certifiable : le rôle de l'IA dans l'architecture dMRV

Dans l'architecture du dMRV, l'IA occupe une position charnière entre la collecte brute des capteurs et l'inscription sur le registre distribué. Son rôle n'est pas simplement de traiter des données : il est de les transformer en métriques standardisées, accompagnées de leurs intervalles de confiance, dans des formats compatibles avec les méthodologies de certification agréées – Verra VCS, Gold Standard, **Regen Network** – et directement exploitables par les *smart contracts** qui déclenchent l'émission de crédits ou de paiements. C'est dans cette fonction de traduction que réside la valeur distinctive de l'IA pour la finance climatique : **elle n'automatise pas seulement la collecte, elle automatise la conversion de la donnée physique en actif financier vérifiable.**

Le réseau **Shamba Network**²³² illustre cette architecture dans le domaine africain : il agit comme un oracle* spécialisé qui collecte des données d'observation terrestre auprès d'agences spatiales, les traite *via* des algorithmes d'apprentissage automatique pour en dériver des indicateurs de santé des sols et de couverture végétale, puis inscrit ces métriques cryptographiquement sur le registre distribué pour enclencher l'exécution de *smart contracts** de paiement aux agriculteurs participant à des projets d'agriculture régénérative.

Deux protocoles explorent une déclinaison spécifique de cette architecture, combinant IA et preuve à connaissance nulle* (*zero-knowledge*) pour résoudre une tension particulière : produire des certifications

N., Dilger, J., Guidotti, V., Jaques, I., McCullough, I. M., McDevitt, A. D., Molina, L., Nekorchuk, D. M., Newberry, T., Pereira, C. L., Perez, J., Richards-Dimitrie, T., ... Saah, D. (2024). Coupling remote sensing and eDNA to monitor environmental impact: A pilot to quantify the environmental benefits of sustainable agriculture in the Brazilian Amazon. *PloS one*, 19(2), e0289437. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289437>

²³² Verifiable Earth Data for a Regenerative Economy <https://www.shamba.network>

auditables par des tiers institutionnels sans révéler les données brutes des bénéficiaires. **IXO Protocol** déploie via son agent WISP un mécanisme de vérification fondé sur le *Zero-Knowledge Machine Learning* (ZKML) : l'IA certifie un impact climatique sans exposer les données de terrain sous-jacentes, permettant aux fondations et régulateurs d'auditer la preuve sans accéder aux informations sensibles des porteurs de projets²³³. PACT Foundation / **ImpactMarket** applique la même architecture à l'évaluation d'impact social : les analyses ZKML produisent des certifications transparentes et auditables des programmes de micro-crédit tout en préservant la confidentialité des données individuelles des emprunteurs²³⁴.

Les limites de l'IA dans la certification écologique

Ces capacités analytiques ne sont pas sans limites. La première est le risque de biais des modèles : un algorithme entraîné sur des données d'un type d'écosystème ou d'une région géographique peut produire des estimations fortement biaisées lorsqu'il est appliqué à des contextes différents. Les modèles allométriques de biomasse développés pour les forêts tropicales humides ne sont pas directement transférables aux savanes ou aux forêts boréales, et leur application sans recalibrage peut conduire à des surestimations systématiques du carbone séquestré – reproduisant *on-chain** et avec la garantie d'immutabilité de la blockchain une erreur de modélisation.

La seconde limite est celle de l'explicabilité (*explainability*) : les modèles de *deep learning* les plus performants sont des « boîtes noires » dont le processus de décision interne est difficile à auditer et à comprendre pour des non-spécialistes. Or la certification écologique suppose que les méthodes soient documentées, reproductibles et vérifiables par

²³³ IXO, 2025, <https://docs.ixoworld.com/guides/digital-mrv>

²³⁴ ImpactMarket, 2025, <https://docs.impactmarket.com/impactmarket-apps/master/the-concept>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

des tiers accrédités. Un modèle neuronal produisant une estimation de carbone sans fournir un raisonnement auditable crée une opacité algorithmique qui reproduit, sous une forme différente, le problème de confiance que le dMRV était censé résoudre. Les organismes de normalisation – ICVCM (*Integrity Council for the Voluntary Carbon Market*) et Gold Standard notamment – travaillent à l'élaboration de cadres d'audit des modèles d'IA utilisés dans les processus de certification, mais ces cadres restent en cours de développement en 2026.

Ces limites ne sont pas propres à la certification écologique. **Penomo**, qui déploie des agents IA pour analyser des *data rooms* et automatiser la structuration de transactions dans le crédit privé d'infrastructure, documente un problème analogue : si les documents soumis à l'analyse IA sont falsifiés ou incomplets, le système peut automatiser une décision de financement erronée. Le point de confiance n'est pas supprimé, il est déplacé du jugement humain vers la qualité des données documentaires en entrée, que les chercheurs désignent comme un « oracle* documentaire » soumis aux mêmes vulnérabilités structurelles que les oracles* de données physiques²³⁵.

[E] L'éco-acoustique – une frontière émergente de la certification de la biodiversité

Parmi les sources de données multi-modales utilisées dans le dMRV, l'éco-acoustique (ecoacoustics) constitue l'une des avancées les plus récentes et les moins documentées dans la littérature financière. Elle repose sur le principe que le « paysage sonore » (soundscape) d'un écosystème – la composition des sons produits par les espèces animales, les insectes, le vent et l'eau – est un indicateur de sa santé et de sa richesse biologique.

Des microphones déployés en forêt et connectés via IoT* à des plateformes d'analyse centrale enregistrent en continu ces paysages sonores, que des modèles d'apprentissage automatique analysent pour identifier les espèces présentes, détecter des perturbations (abattage illégal, activité humaine non autorisée) ou mesurer des indices de biodiversité acoustique.

Cette technologie présente un avantage opérationnel considérable par rapport à l'imagerie satellitaire ou aux relevés de terrain : elle peut fonctionner sous couvert végétal dense, en continu et à faible coût marginal. Elle présente cependant des limites méthodologiques importantes – sensibilité aux conditions climatiques, absence de bases de données de référence universelles pour les espèces tropicales, difficultés d'étalonnage entre sites – qui font que son intégration dans des protocoles de certification reconnus en est encore au stade expérimental. Elle illustre néanmoins la direction dans laquelle s'oriente la certification de la biodiversité : vers un suivi continu, multi-source et automatisé, où l'IA est l'infrastructure de traitement centrale.

Les architectures décrites dans la présente section positionnent l'Intelligence Artificielle comme un instrument de mesure : un outil passif, quoique puissant, qui transforme des données brutes en métriques exploitables par des *smart contracts**. Une frontière émergente repousse cette logique un cran plus loin : celle d'agents IA autonomes capables d'agir *on-chain** non plus sur le vivant mais au nom d'entités naturelles. Le projet **terraO**²³⁶, initié en 2016 par Paul Seidler, Paul Kolling et Max Hampshire à l'Universität der Künste de Berlin, posait la question dans sa forme la plus radicale : une forêt peut-elle s'auto-posséder ? Le mécanisme envisagé combinait un *smart contract** détenteur du titre de propriété d'une parcelle forestière, des données

²³⁵ Penomo, 2025, <https://penomo.com>

²³⁶ <https://terraO.org/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

satellites alimentant un oracle* et un algorithme de gestion automatisant la vente de licences d'exploitation, de sorte que la forêt accumule du capital et rachète progressivement sa propre valeur foncière.²³⁷

Ce concept, resté longtemps à l'état de provocation artistique, a franchi en 2024 une étape opérationnelle : **terra0** a acquis deux parcelles forestières à Reesdorf (Beelitz, Allemagne), administrées par un Verein de droit allemand - forme associative comparable à l'association loi 1901 en France - dont la gouvernance est déléguée à une Organisation autonome décentralisée* (DAO), (la première forêt allemande gérée par une DAO).²³⁸ Mais cette implémentation révèle aussi l'écart entre le concept et sa réalisation : la gouvernance de Reesdorf est exercée par des détenteurs humains de NFT*, non par un agent algorithmique autonome. L'architecture reste celle d'un commun numérique, pas d'une entité naturelle dotée d'agentivité propre²³⁹. Le passage du premier au second exigerait de résoudre un problème que ni la cryptographie ni l'apprentissage automatique ne suffisent à adresser : celui de la représentation légitime d'un écosystème dont les intérêts ne sont ni

exprimables ni réductibles à une fonction objective unique.

Ce problème n'est pas seulement technique, il est juridique et politique. Les cadres dits de « droits de la nature » adoptés par l'Équateur (constitution de 2008, reconnaissant les droits de la Pachamama), la Nouvelle-Zélande (loi de 2017 accordant la personnalité juridique au fleuve Whanganui, représenté par deux gardiens humains) et l'Espagne (personnalité juridique de la lagune du Mar Menor en 2022) posent le principe qu'un écosystème peut être titulaire de droits et représenté par un mandataire.

L'essor des agents IA *on-chain** en 2025–2026, dotés de portefeuilles cryptographiques propres et capables de participer à des votes de gouvernance de manière autonome, rend la convergence entre ces cadres juridiques et les architectures décentralisées techniquement envisageable. Un agent alimenté en continu par les flux de données satellitaires, acoustiques et de biodiversité documentés dans la présente section pourrait, en théorie, exercer un droit de veto dans une DAO* lorsqu'une décision de gestion menace un seuil écologique critique. Mais la question demeure : qui paramètre l'agent ? Si l'algorithme optimise la séquestration carbone au détriment de la biodiversité, ou s'il est entraîné sur des jeux de données géographiquement biaisés, le problème de l'oracle* documenté en section 2.2.1 se transpose en un problème d'alignement où l'agent ne représente plus la nature telle qu'elle est, mais telle que ses concepteurs l'ont modélisée, reproduisant sous une forme algorithmique l'asymétrie d'information que la décentralisation promettait précisément de corriger.

Ces expérimentations s'inscrivent dans un horizon conceptuel plus large, celui d'une « Terre numérique » (*Digital Earth*) dans laquelle des entités non humaines (écosystèmes, espèces, bassins versants) seraient incorporées à la gouvernance mondiale via des agents IA enchâssés dans

²³⁷ Seidler, P., Kolling, P. & Hampshire, M. (2016). terra0 – Can an augmented forest own and utilise itself? White paper, Universität der Künste Berlin. https://terra0.org/assets/pdf/terra0_white_paper_2016.pdf

²³⁸ LAS Art Foundation & terra0 (2024). Autonomous Forest. <https://www.las-art.foundation/programme/terra0-autonomous-forest>. Voir aussi : "terra0's Self-Governing Forests", Frieze, 2023. <https://www.frieze.com/article/terra0-profile-2023>

²³⁹ Agentivité (de l'anglais *agency*) : capacité d'un système à initier des actions de manière autonome en fonction de représentations de ses propres objectifs, et non en simple réponse à des instructions explicites. En philosophie de l'action, la notion implique traditionnellement intentionnalité et capacité à poursuivre des buts. Appliquée aux systèmes non humains, écosystèmes, entités juridiques fictives, agents algorithmiques etc., elle désigne par extension la faculté d'un système à agir pour son propre compte, c'est-à-dire à produire des effets dans le monde en vertu d'intérêts qui lui sont propres et non délégués par un mandant humain. C'est précisément cette attribution d'agentivité à une forêt que le projet terra0 cherche à opérationnaliser, et dont l'implémentation de Reesdorf montre qu'elle reste, à ce stade, une fiction juridique et technique plutôt qu'une réalité fonctionnelle.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

des crypto-institutions. Le philosophe Bruno Latour avait formulé dès 1991 l'idée d'un « Parlement des Choses » dans lequel les entités naturelles seraient représentées au même titre que les humains dans les processus délibératifs ; Isabelle Stengers, dans sa « proposition cosmopolitique » (2005), plaide pour l'inclusion de ce qu'elle appelle les « non-représentés » (les êtres vivants et les systèmes écologiques) dans les assemblées qui décident de leur sort.²⁴⁰

Ce qui relevait de la philosophie politique relève désormais, au moins partiellement, de l'ingénierie. Le chercheur Austin Wade Smith a formalisé le concept d'« institution écologique autonome » (*autonomous ecological institution*) : une DAO* arrimée à un élément écologique par des moyens juridiques, qui ingère des données d'oracles* environnementaux et exécute un ensemble fini d'actions lorsque des conditions biophysiques prédéfinies sont remplies ou transgressées.²⁴¹ L'infrastructure sous-jacente existe déjà à l'état fragmenté : le projet Earth Species Project utilise l'IA pour décoder les communications inter-espèces, le consortium CETI (Cetacean Translation Initiative) vise une communication bidirectionnelle avec les cétacés, et les cadres d'éco-jurisprudence recensent un nombre croissant de cas où des entités non humaines exercent des pouvoirs de gouvernance allant de la présence au conseil d'administration à la capacité contractuelle.²⁴² La question que ces développements posent à la Finance régénérative (ReFi) n'est pas de savoir si ces institutions sont techniquement possibles

(elles le sont), mais si les sociétés qui les déploient sauront résister à la tentation d'en paramétrer les objectifs selon la logique des marchés plutôt que selon celle des systèmes vivants qu'elles sont censées représenter.

2.1.3 Les nouveaux instruments de preuve

Mesurer l'impact en continu et inscrire cette mesure de manière immuable sur un registre distribué constituent des avancées réelles dans l'architecture de la vérification. Mais elles ne répondent qu'à la moitié du problème. L'autre moitié est financière : comment un résultat vérifié *on-chain** devient-il un actif que les marchés de capitaux peuvent reconnaître, valoriser et mobiliser ? Et surtout, comment le financement peut-il être structuré non plus autour de la promesse d'un impact futur, mais autour de la preuve d'un impact déjà produit ?

Cette inversion temporelle – du prospectif vers le rétrospectif – est l'enjeu central de la présente section. Elle examine les instruments qui tentent de la rendre opérationnelle (Impact Tokens*, **Hypercerts**, **Alpha Bonds**), les premières expérimentations qui en documentent la faisabilité, et les limites structurelles qui conditionnent leur reconnaissance, notamment par les cadres réglementaires de la finance durable.

2.1.3.1 Les Impact Tokens* : la tokenisation du résultat

La finance à impact bute depuis ses origines sur une contradiction structurelle : elle cherche à orienter des capitaux vers des résultats sociaux et environnementaux positifs, mais ces résultats sont précisément ce que les marchés financiers conventionnels ont le plus de mal à mesurer, à valoriser et à rémunérer. Un investisseur qui place des fonds dans un projet de reforestation en Amazonie ou dans un programme d'éducation au Mozambique ne dispose d'aucun instrument financier standardisé lui permettant de suivre

²⁴⁰ Latour, B. (1991). Nous n'avons jamais été modernes. La Découverte. Stengers, I. (2005). « La proposition cosmopolitique ». In : Lolive, J. & Soubeyran, O. (dir.), L'émergence des cosmopolitiques, La Découverte, 45–68.

²⁴¹ Wade Smith, A. (2025). « Ecological Institutions: Protocols to Grow Autonomous and Convivial Ecological Actors ». Paragraph, Regen Foundation. Cité dans : Rawson, P. & Borreani, L. (2026). The Green Crypto Handbook: Blockchain for Sustainability Professionals, CRC Press, chapitre 4.

²⁴² Eco-Jurisprudence Monitor (s.d.). <https://ecojurisprudence.org/?map-style=political> - Armstrong, K. (2024). « Towards Interspecies Communication ». In : Interspecies Future: A Primer, LAS Art Foundation, 89. Salguero (2024), ibid., 93.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

l'impact produit, d'en attester la réalité auprès de tiers, ou de le céder à un autre acteur souhaitant s'en attribuer le bénéfice. L'impact reste une externalité positive – réelle, mais comptablement invisible et financièrement illiquide.

Les sections précédentes ont montré comment le dMRV et la blockchain permettent de résoudre le premier volet de ce problème : la mesure et l'inaltérabilité de la preuve. La présente section examine la conversion de cette preuve en un actif financier cessible, programmable et intégrable dans des structures de financement conditionnelles. C'est l'objet des *Impact Tokens** – jetons d'impact – une classe d'actifs numériques dont la valeur est directement ancrée dans un résultat vérifié et documenté *on-chain**.

Un *Impact Token** est la représentation numérique d'une unité d'impact social ou environnemental qui a été formellement quantifiée, mesurée et vérifiée par un tiers indépendant, puis inscrite de manière immuable sur un registre distribué. En enregistrant cette preuve cryptographiquement, la technologie blockchain transforme ce qui était une déclaration – toujours contestable – en un actif numérique, à la fois liquide, programmable et échangeable sur des marchés ouverts et décentralisés. Cette transformation est la condition d'un financement véritablement conditionné au résultat, dans lequel le déclenchement d'un paiement ou d'un remboursement n'est plus soumis à l'appréciation d'un auditeur humain mais à l'exécution automatique d'un *smart contract* lisant des données vérifiées.

Sur le protocole IXO – l'un des protocoles de référence dans cet espace, développé en Afrique du Sud et opérationnel sur sa propre blockchain Cosmos depuis 2019 – un « Crédit d'Impact » (*Impact Credit*) peut représenter n'importe quel résultat social, environnemental, économique ou climatique formellement vérifié pour lequel des parties

prenantes sont disposées à payer ou à investir²⁴³. C'est précisément cette polyvalence qui distingue l'*Impact Token** du crédit carbone, dont le périmètre est limité à une classe unique de résultat.

[E] La cuisson propre et preuve cryptographique d'impact

Parmi les applications les plus documentées de l'architecture dMRV-blockchain dans un contexte de politique publique à grande échelle, la plateforme désignée au sein de l'écosystème IXO sous le nom d'Emerging Cooking Platform constitue un cas d'espèce intéressant. Son terrain d'application est le marché mondial des crédits carbone liés à la cuisson propre (*clean cooking*) – un secteur dont l'enjeu sanitaire et climatique est considérable puisque la combustion de biomasse traditionnelle (bois, charbon de bois) est « responsable de près de 2,9 millions de décès prématurés en 2021 » selon l'Organisation mondiale de la santé, « dont plus de 309 000 enfants de moins de cinq ans », et représente une source significative de déforestation et d'émissions de méthane et de carbone noir dans les pays du Sud global.

L'architecture déployée par le protocole IXO sur une blockchain dédiée (Impact Hub, construite sur le réseau Cosmos) traite chaque dispositif de cuisson propre – cuisinière électrique, foyer amélioré à biomasse, installation au biogaz ou à l'éthanol – comme un actif d'impact numérique individuellement identifiable. Contrairement aux méthodes de certification conventionnelles des crédits carbone *clean cooking*, fondées sur des enquêtes de terrain annuelles et des modèles statistiques d'usage estimé, le dispositif repose sur des capteurs IoT*

²⁴³ IXO Foundation. (2024). Impact Credits.

<https://www.ixoworld.com/impact-tokens> ; Center for a Digital Future. (2024). IXO Protocol.

<https://www.centerfordigitalfuture.org>

(Internet of Things) ou à des applications mobiles pour enregistrer en continu les données d'utilisation réelle de chaque appareil. Ces flux de données alimentent des oracles* d'impact – des algorithmes d'apprentissage automatique – qui calculent les réductions d'émissions de CO₂ équivalent correspondantes selon des méthodologies agréées, et déclenchent l'émission automatique d'Impact Tokens certifiés.

En mai 2024, à l'occasion du Sommet de l'Agence Internationale de l'Énergie sur la cuisson propre en Afrique, IXXO a lancé *Mission Control for Clean Cooking*²⁴⁴, un registre numérique décentralisé dédié à ce segment, permettant le suivi en quasi-temps réel des dispositifs déployés, des crédits carbone générés et des flux de financement associés, opéré en tant qu'infrastructure de biens publics numériques. La pertinence de ce mécanisme au regard des défaillances documentées dans la section 1.1.3.2 est directe. Le marché volontaire des crédits carbone *clean cooking* souffrait des mêmes travers structurels que le marché carbone forestier : des scénarios de référence construits sur des hypothèses d'usage contestables, une vérification périodique et coûteuse, et une opacité des flux financiers qui privait fréquemment les communautés locales des revenus censés leur revenir. La certification cryptographique fondée sur des données d'utilisation réelle substitue à ces estimations statistiques une preuve continue, et les *smart contracts** permettent une redistribution automatique et traçable d'une fraction des revenus des crédits carbone vers les porteurs de projets et, selon les architectures déployées, vers les bénéficiaires finaux – réduisant *de facto* les coûts d'intermédiation, estimés à 30 à 40 % dans les filières conventionnelles.

²⁴⁴ IXXO World. (2024, mai). *Mission Control : Launching a Decentralised Digital Registry for Clean Cooking*. Impacts Network – IXXO Chronicle. <https://chronicle.impacts.network/mission-control/>

Ce modèle a franchi en 2026 une étape institutionnelle significative. Le 18 février 2026, lors de la réunion ministérielle de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), une alliance désignée sous le nom de *Clean Cooking Accelerator* a été officiellement lancée, regroupant la Fondation Rockefeller, la *Clean Cooking Alliance* (CCA), le *Global Energy Alliance for People and Planet* (GEAPP) et *Energy Corps*²⁴⁵. Cette initiative s'inscrit dans le cadre de l'objectif *Mission 300*²⁴⁶, initiative portée conjointement par le Groupe de la Banque mondiale et la Banque africaine de développement depuis 2024, qui vise à connecter 300 millions de personnes à l'électricité en Afrique subsaharienne d'ici 2030, en faisant de la cuisson électrique propre une priorité stratégique. L'objectif agrégé affiché par l'alliance est d'atteindre un milliard de bénéficiaires à l'horizon 2030, pour un besoin d'investissement estimé à plus de 2 milliards de dollars par an²⁴⁷. La même période a vu le *Global Carbon Council* publier, en janvier 2026, une méthodologie *dMRV* spécifiquement dédiée à la cuisson propre, validant *de jure* l'usage de protocoles de suivi numérique – dont celui d'IXO – pour la certification carbone dans ce segment.

L'intérêt analytique de ce cas dépasse la seule démonstration technique. Il illustre le

²⁴⁵ The Rockefeller Foundation, Global Energy Alliance for People and Planet, Clean Cooking Alliance & Energy Corps. (2026, 18 février). Rockefeller Foundation, Global Energy Alliance, Clean Cooking Alliance, Energy Corps to Scale Modern Cooking Technologies in Africa. Communiqué de presse, PR Newswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/rockefeller-foundation-global-energy-alliance-clean-cooking-alliance-energy-corps-to-scale-modern-cooking-technologies-in-africa-302691490.html>

²⁴⁶ Banque mondiale & Banque africaine de développement. (2024). *Mission 300 : connecter 300 millions de personnes à l'électricité en Afrique subsaharienne d'ici 2030*. <https://www.worldbank.org/en/programs/energizing-africa/overview> ; <https://www.afdb.org/en/topics-and-sectors/initiatives-and-partnerships/mission-300>. L'initiative a été lancée lors des Assemblées de printemps 2024 des deux institutions.

²⁴⁷ The Rockefeller Foundation. (2026, 18 février). <https://www.rockefellerfoundation.org/news/rockefeller-foundation-global-energy-alliance-clean-cooking-alliance-energy-corps-scale-modern-cooking-technologies-in-africa/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

mécanisme par lequel des investisseurs institutionnels de premier rang – fondations philanthropiques, banques de développement multilatérales – conditionnent désormais leur engagement à une exigence de haute intégrité des crédits carbone que les systèmes déclaratifs conventionnels ne peuvent plus satisfaire. Le protocole IXO n'est pas, dans ce cadre, un opérateur de terrain : il fournit la couche logicielle et financière, le *trust layer*, qui rend les flux d'investissement massifs auditable en temps réel par les institutions qui les financent. Ce positionnement illustre l'une des hypothèses centrales de ce rapport : les nouvelles architectures numériques ne se substituent pas aux acteurs institutionnels de la finance à impact, mais modifient la structure de la preuve sur laquelle ces acteurs fondent leurs décisions d'allocation.

Ce cas appelle cependant les mêmes réserves analytiques que celles formulées en 2.1.1.1 et 2.2.1. La robustesse du mécanisme repose *in fine* sur la fiabilité des capteurs *IoT** et des algorithmes d'estimation des réductions d'émissions – deux couches dont les limites de calibrage et les risques de manipulation ont été documentés. Les chiffres d'impact avancés par les porteurs du projet proviennent à ce stade de sources institutionnellement liées au protocole, et n'ont pas encore fait l'objet d'une évaluation académique indépendante et publiée. Leur valeur illustrative est réelle ; leur valeur probante reste à établir.

Le projet Amply : la preuve par l'usage

Le projet **Amply**, déployé en Afrique du Sud à partir de 2017 en partenariat avec le Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF), constitue le premier cas de déploiement à grande échelle de ce mécanisme dans un contexte de politique publique. Son terrain d'application est le programme d'éducation de la petite enfance du gouvernement sud-africain, doté d'un budget annuel de 200 millions de dollars américains et couvrant environ 700 000 enfants de deux à cinq ans

dans des milliers de petits centres éducatifs disséminés sur l'ensemble du territoire. La gestion de ce programme reposait sur la transmission de registres de présence papier que les centres adressaient mensuellement au Département du développement social, avant qu'un processus de vérification administrative manuel ne détermine le montant de la subvention à verser. Ce système était lent, coûteux et exposé à des risques de fraude – notamment l'inscription d'enfants fictifs (*ghost children*) pour gonfler artificiellement le droit à subvention.

Amply a substitué à ce processus une application mobile permettant aux éducateurs d'enregistrer quotidiennement la présence de chaque enfant. Chaque présence validée génère une déclaration vérifiable (*verifiable claim*) inscrite de manière sécurisée et immuable sur la blockchain Ethereum. En fin de mois, le système agrègeait ces déclarations pour émettre un *Impact Token** certifiant avec exactitude la quantité de services éducatifs rendus. L'établissement scolaire transférait ce jeton au gouvernement comme preuve irréfutable de son activité, déclenchant le versement précis de la subvention correspondante²⁴⁸.

Ce mécanisme – présences attestées *via* application mobile, déclarations vérifiables inscrites sur registre distribué, agrégation mensuelle en un jeton d'impact, transfert au bailleur de fonds déclenchant le versement de la subvention – illustre la logique fondamentale de l'*Impact Token** dans sa forme la plus épurée : l'impact n'est plus déclaré, il est prouvé ; et cette preuve est le titre qui ouvre droit au financement.

Le projet **Amply** illustre la logique fondamentale du mécanisme, mais il ne s'agit pas d'un cas isolé. L'architecture protocole-jeton-*smart contract** qui le

²⁴⁸ Fernando, A. (2017, 10 octobre). Blockchain for schoolteachers and international development. Medium. <https://medium.com/@00AaronFernando/blockchain-for-schoolteachers-and-international-development-46ce29df-f8a0>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

sous-tend est généralisable à toute classe de résultat mesurable. C'est précisément ce que formalise la Fondation IXO avec son protocole à couche de base dédiée à la finance d'impact, aujourd'hui opérationnel sur sa propre blockchain Cosmos. Chaque projet déployé sur le protocole IXO génère des déclarations vérifiables (*verifiable claims*) pour chaque action relevant de son périmètre d'impact – utilisation d'un foyer de cuisson propre, consultation de santé délivrée, arbre planté et survécu – qui sont agrégées et converties en *Impact Credits* tokenisés selon une méthodologie prédéfinie. En mai 2024, IXO a lancé *Mission Control for Clean Cooking*, un registre de biens publics numériques décentralisé suivant en temps réel les projets de fourneaux propres (*clean cookstoves*), les dispositifs déployés, les crédits carbone générés et les flux de financement associés²⁴⁹. Pour chaque dispositif connecté, des capteurs transmettent des données d'utilisation en temps réel, qui sont automatiquement corrélées avec des déclarations d'achat de combustible pour calculer des réductions d'émissions selon la méthodologie Gold Standard et émettre les *Impact Tokens** correspondants.

South Pole a également mis en œuvre cette logique en partenariat avec la Fondation IXO et Gold Standard pour un projet pilote de photovoltaïque solaire en Thaïlande, dans lequel le protocole IXO facilitait la soumission de données de production vérifiées et l'émission automatique de crédits carbone certifiés – réduisant *a priori* les délais et les coûts associés au processus d'audit conventionnel²⁵⁰.

²⁴⁹ Center for a Digital Future. (2024). IXO Protocol. <https://www.centerfordigitalfuture.org/blog/60kqfdqb4f8kljy1j4ujvaqr1bx5y-364pg-bskhw-58qfs-c9t7w-cr3mn-Y6Fse-i9krz> ; IXO Foundation. (2024). Impact Credits. <https://www.ixoworld.com/impact-tokens>

²⁵⁰ South Pole, IXO Foundation & Gold Standard. (2018). *South Pole, ixo Foundation, Gold Standard develop blockchain app for carbon credits*. <https://www.southpole.com/news/southpole-ixo-goldstandard-blockchain-application-for-carbon-credit-tokenization>

Les Hypercerts : une standardisation ouverte du certificat d'impact

En parallèle de l'approche IXO, orientée vers les projets de développement et les marchés du carbone, Protocol Labs – infrastructure du Web3 notamment à l'origine du protocole IPFS et de la blockchain Filecoin – a développé à partir de 2022 un standard d'impact plus généraliste : les **Hypercerts** (*Hyper certificates of Impact*). Un *Hypercert* est un jeton semi-fongible (conforme au standard ERC-1155 d'Ethereum) représentant une déclaration d'impact structurée selon cinq dimensions formellement définies : l'étendue des travaux réalisés, l'étendue de l'impact produit, la période temporelle de ces travaux, la période temporelle de cet impact, et l'identité des contributeurs²⁵¹.

La distinction structurelle entre les **Hypercerts** et un crédit carbone conventionnel réside dans la temporalité du financement qu'ils rendent possible. Le modèle conventionnel est *prospectif* : des fonds sont versés avant la réalisation de l'impact, sur la base d'une promesse – exposant le financeur à un risque de non-délivrance et incitant le porteur de projet à présenter une vision optimiste de sa capacité à produire des résultats. Le modèle **Hypercerts** est *rétrospectif* : l'impact est d'abord produit et documenté, puis le *Hypercert* est émis et vendu à des financeurs qui paient pour un résultat dont ils ont pu constater l'existence avant de s'engager. Ce renversement temporel modifie fondamentalement la structure des incitations et récompense ce qui a fonctionné plutôt que ce qui promettait de fonctionner, créant un marché secondaire pour les preuves d'impact vérifiées. Protocol Labs caractérise les **Hypercerts** comme « une couche de données interopérable pour les mécanismes de

²⁵¹ Protocol Labs & Hypercerts Foundation. (2022). *Hypercerts: A new primitive for public goods funding*. <https://www.protocol.ai/blog/hypercert-new-primitive/> ; Bitcoin. (2023). *Hypercerts for public goods funding*. <https://www.gitcoin.co/blog/hypercerts-for-public-goods-funding>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

financement de l'impact », agnostique quant à la méthode de financement – financement quadratique*, vote pondéré, financement rétroactif de biens publics (*retroactive public goods funding*) – et compatible avec toute plateforme souhaitant l'intégrer²⁵².

Dans le domaine environnemental, **GainForest** – un partenaire de la Fondation **Hypercerts** – utilise ce standard pour documenter et financer des projets de conservation forestière dans des pays en développement, en émettant des **Hypercerts** attestant de superficies préservées et vérifiées par imagerie satellitaire. Optimism, une solution de mise à l'échelle d'Ethereum (Layer 2), a distribué plus de 100 millions de dollars américains (USD) en financement rétroactif de biens publics (*Retroactive Public Goods Funding*, RetroPGF) à 501 contributeurs, en partie en utilisant les **Hypercerts** comme standard de traçabilité de l'impact des contributions²⁵³.

Octant incarne une déclinaison complémentaire de ce principe dans sa V2 : des coffres-fort* (*vaults**) ERC-4626 à fenêtre glissante de trente jours immobilisent des ETH en *staking*, et seuls les rendements générés atteignent les bénéficiaires des projets sélectionnés. Le capital initial reste intact, permanent et non consommé. C'est, dans sa mécanique, la forme la plus pure du financement programmable : aucune décision humaine n'intervient transaction par transaction, et la règle d'allocation est entièrement encodée dans le protocole²⁵⁴.

²⁵² Uzsoki, D., & Guerdat, P. (2019). *Impact tokens: A blockchain-based solution for impact investing*. International Institute for Sustainable Development (IISD). <https://www.iisd.org/publications/report/impact-tokens-blockchain-based-solution-impact-investing>

²⁵³ Protocol Labs & Hypercerts Foundation. (2022). *Hypercerts: A new primitive for public goods funding*. <https://www.protocol.ai/blog/hypercert-new-primitive/> ; Bitcoin. (2023). *Hypercerts for public goods funding*. <https://www.bitcoin.co/blog/hypercerts-for-public-goods-funding>

²⁵⁴ Octant, 2025, <https://docs.octant.app>

Les limites communes aux *Impact Tokens** et aux *Hypercerts*

Ces deux approches partagent des limites structurelles que le rapport se doit d'identifier avec précision, au risque de présenter comme résolus des problèmes qui restent ouverts.

La première est le problème de la définition et de la comparabilité de l'impact. Un *Impact Token** certifiant une réduction de 340 kilogrammes de CO₂ calculée selon la méthodologie Gold Standard et un *Hypercert* attestant de la protection de dix hectares de forêt selon une méthodologie propriétaire ne sont pas directement comparables, même si tous deux sont inscrits *on-chain** avec les mêmes garanties cryptographiques. L'absence d'une ontologie d'impact standardisée – c'est-à-dire d'un système de classification formelle permettant de comparer des résultats de natures différentes – constitue la limite principale à la liquidité et à la fongibilité des marchés d'actifs d'impact. Protocol Labs a identifié ce problème explicitement, engageant un travail de cartographie des catégories de jetons d'impact visant à construire « un cadre fondamental et une couche sur lesquels les acteurs peuvent créer des standards²⁵⁵ ».

Des projets cherchent à adresser ce problème de comparabilité par des designs spécifiques. Le GeoNFT de **Kolektivo** représente un territoire physique géoréférencé (polygone GeoJSON) assorti d'un indice écologique calculé à partir de données terrain vérifiées, préservant ainsi la localisation et la non-substituabilité de chaque actif de biodiversité²⁵⁶. **Carbonds**²⁵⁷ émet des jetons conçus comme preuve cryptographique d'une réduction ou séquestration de CO₂ réelle, additionnelle et permanente, en positionnant

²⁵⁵ Protocol Labs. (2022). *Incentivizing impact beyond carbon*. <https://www.protocol.ai/blog/transcription-impact-tokenization-beyond-carbon/>

²⁵⁶ Kolektivo, 2025, <https://medium.com/kolektivo-co/regeneration-at-institutional-scale-591cfa972d8>

²⁵⁷ <https://carbonds.io/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

l'immuabilité *on-chain** comme garantie de l'additionnalité que les registres déclaratifs ne peuvent produire. **EcoBridge** adopte une logique complémentaire : les NFT de certificat d'impact ne sont émis qu'au moment du *retirement* définitif des crédits carbone, produisant une trace immuable de leur consommation irréversible et neutralisant ainsi le risque de double comptage²⁵⁸.

La seconde est le risque de divergence entre la déclaration *on-chain** et l'impact réel. Un *Hypercert* inscrit sur la blockchain garantit l'immuabilité et la traçabilité de la déclaration d'impact ; il ne garantit pas que l'impact déclaré correspond à une réalité physique ou sociale vérifiable par un tiers indépendant. Cette limite n'est pas propre aux *Hypercerts* – elle est inhérente à tout système de déclaration d'impact – mais elle est aggravée par la tendance à interpréter l'immuabilité cryptographique comme une forme de vérification, alors que la blockchain ne fait que sceller une affirmation dont elle n'a pas évalué le fondement. C'est pour cette raison que les *Hypercerts* prévoient une couche d'évaluateurs tiers – des organismes qui, à l'instar des agences de notation dans la finance traditionnelle, certifieraient la valeur des déclarations d'impact – mais cette infrastructure d'évaluation reste en cours de construction en 2026.

2.1.3.2 Le financement programmable et rétrospectif (*ex-post*)

La section précédente a établi qu'un *Impact Token** transforme un résultat vérifié en actif financier. La présente section examine la conséquence directe de cette transformation sur la structure temporelle du financement : si l'impact peut être tokenisé et certifié *on-chain**, alors le décaissement du capital peut être conditionné à la preuve de ce résultat plutôt qu'à la promesse de sa réalisation future. Ce renversement de la temporalité du financement – du *prospectif* vers le *conditionnel-progressif* ou le

rétrospectif – est l'innovation de gouvernance financière la plus substantielle portée par ces nouveaux instruments.

Le financement prospectif et ses limites structurelles

Le modèle dominant de la finance à impact publique et privée repose sur une allocation *ex-ante* : les fonds sont engagés avant que l'impact ne soit produit, sur la base d'une évaluation des capacités du porteur de projet, de la solidité de son plan d'action et de la crédibilité de ses indicateurs de résultat. Ce modèle génère deux problèmes structurels bien documentés dans la littérature sur le financement du développement. Le premier est le risque de non-délivrance : une fois les fonds décaissés, les incitations du porteur de projet à optimiser réellement les résultats plutôt qu'à satisfaire aux exigences formelles de reporting sont affaiblies. Le second est le biais de sélection : les projets les plus facilement finançables sont ceux dont les promoteurs sont les plus habiles à rédiger des propositions convaincantes, ce qui ne corrèle pas nécessairement avec leur capacité effective à produire de l'impact.

Le financement par jalons : AGUA comme cas de référence

Une première réponse à ces limites consiste non pas à financer *ex-ante* l'intégralité d'un projet, mais à conditionner les décaissements successifs à la validation de jalons intermédiaires. La plateforme **AGUA** (*Advancing Global Unified Accountability*), développée par la société argentine Atix Labs – lauréate de la première cohorte blockchain du Fonds Venture de l'UNICEF en 2018 – opérationnalise ce mécanisme sur blockchain²⁵⁹. **AGUA** structure chaque projet en une succession de jalons (*milestones*) et d'activités, chacun doté d'un budget défini,

²⁵⁸ EcoBridge, 2025, <https://www.ecotoken.live>

²⁵⁹ UNICEF Venture Fund. (s.d.). AGUA: Revolutionizing global collaboration for funding transparency. <https://www.unicefventurefund.org/story/agua-revolutionizing-global-collaboration-funding-transparency-growth-graduate-atix-labs>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

de critères d'acceptation formalisés et d'un auditeur désigné. Les fonds sont immobilisés dans un *smart contract** et ne sont décaissés vers le bénéficiaire qu'après qu'un auditeur externe a chargé les preuves de réalisation du jalon dans le système, déclenchant automatiquement le déblocage de la tranche correspondante. L'ensemble des transactions financières et des preuves associées est inscrit sur le registre distribué, créant un *audit trail* vérifiable par tous les bailleurs et inaltérable.

Ce modèle de financement conditionnel / progressif améliore l'alignement des incitations par rapport au financement prospectif intégral, mais il reste fondamentalement *ex-ante* dans sa logique : le porteur de projet accède au capital *avant* de produire l'impact, en échange d'une promesse de résultats formalisée dans des jalons. La novation réside dans l'automatisation et l'inaltérabilité du mécanisme de contrôle, non dans la temporalité du financement lui-même.



Rahat, (mot népalais signifiant « aide » ou « soulagement ») est une plateforme *open source* de distribution d'aide humanitaire développée par eSatya, déployée au Népal depuis 2020 en partenariat avec l'UNICEF et plusieurs ONG locales. Elle illustre le mécanisme du financement conditionnel dans sa forme la plus directement vitale : la distribution d'argent liquide à des populations sinistrées sans compte bancaire ni téléphone smartphone. Son module d'*Anticipatory Action* encode directement dans un *smart contract** les conditions de déclenchement de l'aide : si un seuil pluviométrique officiel (tiré de données météorologiques gouvernementales) est atteint, le transfert d'espèces est automatiquement déclenché *avant* la catastrophe, permettant aux ménages

d'acheter des fournitures d'urgence avant que les voies d'accès ne soient coupées. Les conditions sont codées, le paiement est automatique, sans décision humaine dans la boucle de validation. Les identités des bénéficiaires, stockées hors chaîne (*off-chain*) pour protéger les informations personnelles identifiables (PII), sont reliées à des QR code imprimables consultables par des téléphones basiques, rendant le dispositif opérationnel pour des populations sans infrastructure numérique personnelle²⁶⁰. Les conditions d'activation sont entièrement objectives et vérifiables, le déclenchement est automatique, et le bénéficiaire reçoit l'aide sans avoir à prouver son sinistre, à déposer un dossier ou à dépendre de la disponibilité d'un agent de terrain. Ce modèle pose néanmoins la même question structurelle que tous les instruments conditionnels : la fiabilité du déclencheur (ici, les données météorologiques gouvernementales) est la seule garantie que l'aide atteint les bonnes personnes au bon moment.

Les **Hypercerts** : le financement rétrospectif comme changement de paradigme

Le modèle des **Hypercerts**, introduit par Protocol Labs en 2022 et aujourd'hui déployé sur la blockchain Optimism²⁶¹ et plusieurs autres réseaux Ethereum, franchit une étape supplémentaire en inversant complètement cette temporalité. L'impact est d'abord *produit*, puis *documenté* dans un *Hypercert* tokenisé, puis *évalué* par des tiers indépendants, et enfin *financé* rétrospectivement par des acteurs qui paient pour s'attribuer le bénéfice d'un résultat dont la réalité est déjà établie. Ce mécanisme –

²⁶⁰ Rahat, 2025,

<https://rahat.esatya.io/blogs/rahat-an-open-source-block-chain-based-humanitarian-aid-distribution-management-system/>

²⁶¹ <https://www.optimism.io/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

désigné dans la littérature Web3 sous le terme de *retroactive public goods funding* – modifie fondamentalement la structure des incitations : un porteur de projet sait qu'il sera rémunéré à proportion de l'impact effectivement produit, non de la qualité de sa proposition initiale. Les **Hypcerts** créent ainsi un marché de l'impact *ex-post* où la valeur est attribuée *après* vérification du résultat plutôt qu'*avant* sa réalisation²⁶².

Protocol Labs décrit les **Hypcerts** comme « une couche de données interopérable pour les mécanismes de financement de l'impact²⁶³ », agnostique quant à la méthode de financement retenue – financement quadratique*, enchère ouverte, vote pondéré en jetons, grant institutionnel. L'architecture est composée de trois phases séquentielles. Dans la première phase, le porteur de projet réalise son travail et émet un **Hypcert** documentant ce qui a été accompli comme l'étendue des travaux, la période de réalisation, l'identité des contributeurs, l'étendue de l'impact revendiqué. Dans la deuxième phase, des évaluateurs indépendants examinent ces revendications et leur attribuent une crédibilité – leur rôle est structurellement analogue à celui des agences de notation dans la finance conventionnelle, avec cette différence que leurs évaluations sont elles-mêmes inscrites *on-chain** et donc traçables. Dans la troisième phase, des financeurs rétrospectifs – fonds d'impact, entreprises cherchant à attribuer des externalités positives à leur bilan, institutions publiques – achètent des fractions de ces **Hypcerts** pour s'approprier l'impact vérifié correspondant²⁶⁴.

En pratique, Optimism a distribué plus de 100 millions de dollars américains (USD) en financement rétroactif de biens publics à

501 contributeurs dans le cadre de son programme *Retroactive Public Goods Funding* (RetroPGF), en s'appuyant partiellement sur les **Hypcerts** comme standard de traçabilité des contributions²⁶⁵.

Les Alpha Bonds : le financement dynamique et cybernétique

Les **Alpha Bonds**, développés par la Fondation IXO en collaboration avec le cabinet de recherche BlockScience et l'Interchain Foundation, représentent une troisième architecture – plus complexe et plus ambitieuse – dans laquelle la tarification du financement est elle-même une variable dynamique, ajustée en temps réel en fonction des signaux de risque provenant du terrain. Formellement, les **Alpha Bonds** implémentent des *courbes de liaison ajustées au risque* (*Risk-Adjusted Bonding Curves*, RABC) – des mécanismes de marché continu dans lesquels le prix des jetons de participation à un contrat d'impact est déterminé algorithmiquement par une fonction mathématique qui intègre les estimations de probabilité d'atteinte des résultats du projet²⁶⁶.

Le mécanisme repose sur quatre composantes interdépendantes : deux fonctions de courbe de liaison standard – *bond-to-mint* (l'achat de jetons crée de la liquidité pour le projet) et *burn-to-withdraw* (le rachat de jetons retire cette liquidité) – et deux mécanismes de prédiction – *attest-positive* (des attestations de progression font augmenter le paramètre alpha, reflétant une probabilité croissante de succès) et *attest-negative* (des signaux défavorables le font diminuer). Le paramètre *alpha*, compris entre 0 et 1, représente la

²⁶⁵ Gitcoin. (2023). Hypcerts for public goods funding.

<https://www.protocol.ai/blog/hypcert-new-primitive/>

²⁶⁶ BlockScience & IXO Foundation. (2022). Alpha bonds: Risk-adjusted bonding curves for financing impact.

<https://blog.block.science/alpha-bonds-risk-adjusted-bonding-curves-for-financing-impact/> (Résultats de simulation issus d'une collaboration de recherche formalisée ; à compléter par la publication du modèle

cadCAD sur GitHub :

<https://github.com/BlockScience/Risk-Adjusted-Bonding-Curves>)

²⁶² Protocol Labs & Hypcerts Foundation. (2022).

Hypcerts: A new primitive for public goods funding.

<https://www.protocol.ai/blog/hypcert-new-primitive/>

²⁶³ *Ibid.*

²⁶⁴ Gitcoin. (2023). Hypcerts for public goods funding.

<https://www.gitcoin.co/blog/hypcerts-for-public-goods-funding>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

probabilité estimée que le projet atteigne ses objectifs : lorsqu'il tend vers 1, le prix des jetons de participation augmente, récompensant les investisseurs qui ont parié tôt sur le projet ; lorsqu'il tend vers 0, le prix diminue, incitant l'ensemble des parties prenantes à corriger les trajectoires défaillantes. Cette architecture transforme le contrat de financement d'un événement statique en une boucle de rétroaction continue : les données de terrain – résultats scolaires, niveaux d'utilisation d'un dispositif, métriques de santé écologique – alimentent des *alphaoracles* qui calculent la probabilité de succès et mettent à jour le paramètre *alpha*, modifiant en temps réel le coût et les conditions du financement. IXO a expérimenté ce mécanisme dans un pilot de financement d'apprentissage adaptatif en Inde, en partenariat avec la société Chimple (lauréate du concours Global XPRIZE en éducation) et l'UBS Optimus Foundation, dans lequel les données d'interaction des enfants avec une tablette d'apprentissage alimentaient directement les *alphaoracles* du contrat de financement²⁶⁷.

Les limites communes

Ces trois approches – financement par jalons (**AGUA**), financement rétrospectif (**Hypercerts**) et financement dynamique ajusté au risque (**Alpha Bonds**) – partagent deux limites structurelles que la section 2.2 traitera en détail. La première est leur dépendance à la qualité des données d'impact en entrée : un jalon validé sur la base de preuves manipulées, un *Hypercert* émis sur la base d'une déclaration non vérifiée ou un paramètre *alpha* alimenté par un oracle* défaillant produiront des effets financiers réels tout en ne reflétant aucun impact réel – **le problème du *garbage in, garbage out* s'applique ici avec une acuité particulière, puisque l'automatisation des décaissements amplifie mécaniquement les erreurs d'entrée.**

L'assurance paramétrique appliquée aux incendies de forêt illustre le même mécanisme sous une autre forme. Le produit lancé par **Arbol** en Californie en septembre 2025 déclenche automatiquement un paiement si les données satellitaires franchissent un seuil de proximité du feu prédéfini, sans expertise contradictoire ni instruction humaine dans la chaîne de validation. Le paiement suit la preuve physique, non la déclaration du sinistré. Cette architecture conditionne la viabilité commerciale du modèle à l'exactitude absolue des données de déclenchement, illustrant une fois encore que la valeur de l'automatisation dépend intégralement de l'intégrité des données à la source²⁶⁸.

La seconde est la question de la standardisation et de la reconnaissance institutionnelle : aucun de ces instruments n'est aujourd'hui reconnu dans les cadres réglementaires de la finance durable – taxonomie verte européenne, cadres de reporting TNFD ou CSRD – et leur intégration dans les portefeuilles d'investisseurs institutionnels suppose des clarifications juridiques et comptables qui restent à construire.

²⁶⁷ IXO Foundation / Chimple. (2022). *The journey to build a new tokenised education economy*. <https://impacts.ixoworld/refi-education/>

²⁶⁸ Arbol, 2025, <https://www.artemis.bm/news/arb-ol-automates-parametric-reinsurance-triggers-using-a-blockchain/>

2.2 Les écueils et risques systémiques de la Finance Régénérative du Web3

Les sections précédentes ont documenté les apports réels des nouvelles architectures de vérification : la continuité du suivi permise par le *dMRV*, l'inaltérabilité des rapports garantie par les registres distribués, et l'inversion temporelle du financement que rendent possibles les **Hypercerts** et les **Alpha Bonds**. Ces apports sont authentiques. Ils constituent une rupture structurelle par rapport au modèle de l'audit périodique et de la certification déclarative.

Mais toute architecture produit aussi les défaillances qui lui sont propres. L'automatisation des paiements amplifie mécaniquement les erreurs de données en entrée. La tokenisation du vivant peut reproduire, sous couvert d'innovation, les logiques extractives qu'elle prétend dépasser. Et la gouvernance des protocoles décentralisés tend à reconcentrer le pouvoir entre les mains de ceux qui détiennent le plus de jetons – reproduisant une forme de primauté actionnariale que la décentralisation formelle ne suffit pas à neutraliser.

Cette section examine ces trois familles de risques dans leur réalité empirique et dans leurs implications systémiques. Elle ne vise pas à invalider les instruments analysés précédemment, mais à préciser les conditions sans lesquelles leur déploiement risque de déplacer les problèmes de la finance à impact plutôt que de les résoudre.

2.2.1 La dépendance aux oracles et les distorsions de la mesure tokenisée

Le premier risque systémique de la Finance Régénérative (*Regenerative Finance*, ReFi*) est d'ordre infrastructurel. Il découle directement d'une contrainte technique fondamentale des *smart contracts** : leur

incapacité native à observer le monde physique. Pour qu'un *smart contract** déclenche automatiquement un paiement en réponse à une mesure de carbone séquestré ou à un indice de biodiversité restaurée, il faut que ces données lui soient transmises par une interface extérieure au registre – l'oracle*. Or cet oracle* constitue précisément le point de défaillance centralisé que l'architecture décentralisée était censée éliminer.

La vulnérabilité des oracles – défaillance technique, manipulation délibérée, biais de calibrage – est la face visible du problème. La face moins immédiatement perceptible est d'ordre incitatif : dès lors qu'un indicateur mesurable déclenche automatiquement une récompense financière, les porteurs de projets sont structurellement incités à optimiser cet indicateur spécifique, indépendamment de sa pertinence au regard de l'objectif systémique visé. C'est ce que le principe formulé par l'économiste Charles Goodhart en 1975 – reformulé par la sociologue Marilyn Strathern sous la forme « *dès lors qu'une mesure devient une cible, elle cesse d'être une bonne mesure* » – permet d'anticiper avec précision dans le contexte de la ReFi*.

Ces deux dimensions – la vulnérabilité des oracles* et la distorsion incitative par la mesure tokenisée – sont examinées successivement dans cette section, dont les conclusions alimentent directement les analyses des risques d'hyper-financiarisation (2.2.2) et des asymétries de pouvoir (2.2.3).

2.2.1.1 La vulnérabilité des Oracles

Les *smart contracts** sont, par conception, aveugles à ce qui se passe en dehors de leur propre réseau informatique. Pour interagir avec l'économie réelle – recevoir des données sur les conditions météorologiques, la qualité d'un sol, le taux de déforestation d'une parcelle ou le prix d'une matière première –, ils dépendent d'intermédiaires logiciels appelés oracles*, qui traduisent des événements du

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

monde physique en données numériques exploitables par le smart contract²⁶⁹.

Cette dépendance crée un paradoxe structurel. L'architecture des registres distribués est conçue pour éliminer le recours aux tiers de confiance ; l'intégration d'oracles* réintroduit précisément ce type d'intermédiaire au cœur du dispositif. Un oracle* constitue un point de défaillance unique (*single point of failure*) : si le capteur physique qui l'alimente est défaillant, si l'entité qui gère cet oracle* est compromise, ou si les données transmises sont volontairement falsifiées, le *smart contract** s'exécutera sur de fausses prémisses, de façon automatique et sans possibilité d'interruption manuelle. Les chercheurs de la Banque des règlements internationaux (BRI) soulignent que cette dépendance aux sources de données externes laisse une marge considérable pour la manipulation, rendant les systèmes décentralisés particulièrement exposés à des attaques ciblées²⁷⁰.

Des tentatives de mitigation existent. Les réseaux d'oracles* décentralisés – tels que **Chainlink**²⁷¹, créé en 2017 – agrègent les données provenant de multiples nœuds indépendants afin de réduire le risque qu'un seul fournisseur falsifie les informations transmises. Cette approche atténue effectivement le risque de manipulation individuelle, mais elle ne le résout pas dans son intégralité : si les données collectées en amont des nœuds – relevés satellites, rapports de terrain, capteurs IoT* – sont elles-mêmes erronées ou biaisées, l'agrégation décentralisée ne fait que consolider ces erreurs à plus grande échelle. La confiance est déplacée, non supprimée ; elle migre du gestionnaire d'un oracle* centralisé vers les opérateurs des nœuds du réseau, dont les

incitations et la fiabilité restent à vérifier au cas par cas.

Les cas documentés dans ce rapport illustrent cette limite de façon concrète. Chez **IXO Protocol**, dont les *Agentic Networks* connectent des foyers de cuisson IoT à des paiements conditionnels (voir section 2.1.2.1), le risque structurel est explicitement documenté par l'équipe : si les oracles* IA sont biaisés ou si un capteur est manipulé, l'ensemble de la chaîne de financement repose sur une preuve corrompue sans mécanisme d'interruption manuelle. **Arbol**, dont la robustesse opérationnelle a été validée lors de l'ouragan Milton en octobre 2024, demeure entièrement dépendant de l'intégrité de ses oracles* **dClimate** et **Chainlink** : une manipulation des données météorologiques d'entrée peut déclencher des paiements injustifiés à grande échelle, compromettant la viabilité d'un fonds dont la solvabilité est la seule garantie pour des centaines d'agriculteurs assurés. Ces deux cas illustrent pourquoi Caldarelli qualifie cette dépendance de « deux pas en arrière vers la centralisation » : le point de confiance ne disparaît pas, il migre vers l'opérateur de l'oracle*.

Il convient donc de nuancer le postulat d'infailibilité technologique fréquemment associé au Web3 : si la technologie de registre est robuste dans son exécution interne, le point de collecte et d'insertion de la donnée physique demeure une faille structurellement centralisée.

2.2.1.2 Le piège de la donnée et la Loi de Goodhart

La vulnérabilité des oracles* conduit au second écueil, d'ordre plus fondamental : le principe informatique du *garbage in, garbage out* – à une donnée erronée en entrée correspond nécessairement un résultat erroné en sortie. Un registre distribué garantit qu'une information ne peut être modifiée une fois enregistrée mais il n'a en revanche aucune capacité intrinsèque à vérifier la véracité de

²⁶⁹ Caldarelli, G. (2020). Understanding the Blockchain Oracle Problem: A Call for Action. *Information*, 11(11), 509. <https://doi.org/10.3390/info1110509>

²⁷⁰ Duley, C., Gambacorta, L., Garratt, R., & Koo Wilkens, P. (2023). The oracle problem and the future of DeFi*. *BIS Bulletin*, 76. <https://www.bis.org/publ/bisbull76.htm>

²⁷¹ <https://chain.link/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

cette information avant son inscription²⁷². Numériser un système d'évaluation défaillant ou frauduleux sur une blockchain publique ne corrige pas ces défaillances mais les fige. Comme le soulignent les chercheurs de la Banque des règlements internationaux (BRI), une fausse donnée une fois validée ne peut être corrigée, et les contrats financiers qui s'y réfèrent s'exécuteront durablement sur des prémisses erronées – rendant les erreurs bien plus coûteuses et difficiles à résorber que dans la finance traditionnelle²⁷³.

À ce risque d'intégrité de la donnée s'ajoute une distorsion incitative structurelle, décrite pour la première fois par l'économiste Charles Goodhart en 1975 et depuis connue sous le nom de loi de Goodhart. Goodhart observe que toute régularité statistique tend à se dégrader dès lors qu'elle est soumise à une pression de contrôle²⁷⁴. Cette intuition a été reformulée de façon plus directement applicable aux systèmes d'incitation par la sociologue Marilyn Strathern qui explique que « *dès lors qu'une mesure devient une cible, elle cesse d'être une bonne mesure*²⁷⁵ ».

Dans le contexte de la finance régénérative (ReFi*), ce principe prend une acuité particulière. Dès lors qu'un indicateur écologique ou social précis déclenche automatiquement une récompense financière – sous la forme d'un jeton d'impact (*impact token*) ou d'un paiement rétrospectif (*ex post*) –, les porteurs de projets sont structurellement incités à optimiser cet indicateur spécifique, indépendamment de sa

pertinence au regard de l'objectif systémique recherché.

Les acteurs sont alors poussés à maximiser des métriques facilement quantifiables et tokenisables – le nombre d'arbres plantés pour déclencher un crédit carbone, par exemple – au détriment d'objectifs plus complexes à mesurer et moins directement monétisables, tels que la préservation de la biodiversité endémique, la qualité des sols sur le long terme ou le respect des droits des populations riveraines. **KlimaDAO** constitue l'illustration empirique la plus documentée de cette distorsion dans l'écosystème ReFi. En devenant, à son apogée en 2021-2022, un acteur dominant sur le marché volontaire des crédits carbone tokenisés, le protocole a exercé une pression à la hausse sur le prix du *token KLIMA* qui s'est progressivement déconnectée de la qualité écologique des crédits sous-jacents. La pression à faire croître le cours du *token* a incité les acteurs du marché à maximiser la quantité de crédits agrégés plutôt que leur intégrité, reproduisant *on-chain** et avec une liquidité sans précédent les mêmes dynamiques de dégradation de la qualité que les marchés volontaires traditionnels. La migration du protocole vers Base et la publication d'un *whitepaper* 2.0 témoignent d'une tentative de recalibrage, mais le cas reste dans la littérature académique l'exemple de référence de l'application de la loi de Goodhart aux marchés carbone tokenisés²⁷⁶.

Cette dynamique ne résulte pas d'une défaillance technologique au sens strict, mais d'une tension inhérente à toute tentative de monétiser ou monétariser la preuve d'un impact systémique par des indicateurs discrets. Elle constitue une limite que la conception des protocoles de la Finance décentralisée à impact, la ReFi* ne peut ignorer, sous peine de voir la recherche de l'indicateur financièrement rentable se

²⁷² Caldarelli, G. (2020). Understanding the Blockchain Oracle* Problem: A Call for Action. *Information*, 11(11), 509. <https://doi.org/10.3390/info11110509>

²⁷³ Duley, C., Gambacorta, L., Garratt, R., & Koo Wilkens, P. (2023). The oracle problem and the future of DeFi*. *BIS Bulletin*, 76. <https://www.bis.org/publ/bisbull76.htm>

²⁷⁴ Goodhart, C. (1975). Problems of monetary management: The U.K. experience. Dans *Papers in Monetary Economics* (Vol. 1). Reserve Bank of Australia.

²⁷⁵ Strathern, M. (1997). 'Improving ratings': Audit in the British University System. *European Review*, 5(3), 305–321. <https://www.cambridge.org/core/journals/european-review/article/abs/improving-ratings-audit-in-the-british-university-system/FC2FE640C0C44E3DB87C29FB666E9AAB>

²⁷⁶ Ballesteros-Rodríguez A, De-Lucio J and Sicilia M-A (2024) Tokenized carbon credits in voluntary carbon markets: the case of KlimaDAO. *Front. Blockchain* 7:1474540. doi: 10.3389/fbloc.2024.1474540

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

substituer à la transformation réelle que la technologie cherchait initialement à certifier.

2.2.2 L'hyper-financiarisation de la nature

Le second risque systémique est d'une nature différente. Il n'est pas d'ordre technique, mais d'ordre conceptuel : c'est le risque que la ReFi*, en cherchant à mobiliser les marchés financiers au service du vivant, produise l'effet inverse – en transformant le vivant en une nouvelle classe d'actifs spéculatifs répondant à la logique des marchés plutôt qu'à celle des écosystèmes.

Ce risque se manifeste selon deux modalités complémentaires. La première est la *commodity frontier* – processus par lequel des composantes du vivant jusqu'alors soustraites aux logiques d'échange marchand sont progressivement titrées, mises en garantie et échangées sur des marchés à forte liquidité, avec une vitesse et une ampleur que l'infrastructure des registres distribués rend techniquement possible à une échelle inédite. La seconde est la limite intrinsèque de la quantification écologique : certaines dimensions du vivant – la biodiversité, les interactions entre espèces, la mémoire évolutive d'un écosystème – sont structurellement non fongibles, non substituables et, au sens strict, incommensurables. Les réduire à des métriques standardisées compatibles avec des instruments financiers négociables sur des marchés globaux comporte le risque de produire des actifs financièrement cohérents mais écologiquement vides.

Cette section distingue ces deux dimensions et examine les arguments académiques et empiriques qui permettent d'évaluer leur pertinence dans le contexte actuel de la ReFi*.

2.2.2.1 La transformation du vivant en actif spéculatif

L'un des risques systémiques de la Finance régénérative (ReFi*) réside dans sa propension à reproduire, sous couvert d'innovation technologique, certaines des logiques extractives qu'elle ambitionne pourtant de dépasser. Ce phénomène se manifeste par la marchandisation croissante des biens communs mondiaux (*Global Commons*) : de nouveaux marchés environnementaux attribuent un prix à des composantes du vivant afin de les échanger sous forme d'instruments financiers optimisables²⁷⁷.

L'infrastructure des registres distribués tend à accélérer cette dynamique en permettant à un nombre inédit d'actifs naturels d'être titrisés, mis en garantie et échangés sur des marchés primaires et secondaires à forte liquidité (Bennett, 2025)²⁷⁸. En appliquant ces mécanismes aux biens communs mondiaux, la technologie risque de les constituer en nouvelle *commodity frontier* – expression forgée par l'historien de l'environnement Jason W. Moore pour désigner le processus d'appropriation, d'exploitation et de fragmentation écologique que génère l'expansion continue des économies extractives^{279 280}.

Le danger inhérent à cette dynamique est de dissocier l'activité financière de l'impact physique réel. Des jetons numériques représentant des réductions d'émissions de carbone peuvent théoriquement financer des projets de séquestration authentiques ; ils peuvent tout aussi bien circuler sur des marchés secondaires à des fins purement

²⁷⁷ Bennett, K. (2025). An evaluation of the regenerative claims of Web3's ReFi movement. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1564083. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1564083>

²⁷⁸ *Ibid.*

²⁷⁹ Moore, J. W. (2000). Sugar and the expansion of the early modern world-economy: Commodity frontiers, ecological transformation, and industrialization. *Review (Fernand Braudel Center)*. <https://jasonwmoore.com/wp-content/uploads/2017/08/Moore-Sugar-and-the-Expansion-of-the-Early-Modern-World-Economy-REVIEW-2000.pdf>

²⁸⁰ Moore, J. W. (2015). *Capitalism in the Web of Life: Ecology and the Accumulation of Capital*. Verso.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

spéculatives, générant « des transactions sans bénéfice écologique tangible sur le terrain²⁸¹ ». Ce risque se manifeste concrètement dès lors que des actifs naturels tokenisés entrent dans des marchés secondaires à forte liquidité. **Pleno**, protocole de certification du carbone bleu dans les mangroves indonésiennes, devra naviguer une tension inhérente à son modèle : dès lors qu'un crédit de mangrove devient un actif négociable *on-chain**, sa valeur fluctue selon l'offre et la demande de carbone sur les marchés financiers, et non selon la santé écologique réelle de l'écosystème sous-jacent, dont la dégradation peut être simultanée à une hausse du prix du crédit²⁸².

Dès lors, si l'outil technologique se borne à accroître l'efficacité des marchés existants sans modifier la structure d'incitations qui oriente les capitaux vers le rendement à court terme, la monétarisation de la nature risque d'en accélérer la dégradation plutôt que d'en garantir la préservation – un constat que formulent également des économistes de l'environnement non rattachés au champ du Web3, à l'image des travaux du rapport Dasgupta sur l'économie de la biodiversité, qui rappelle l'incapacité structurelle des marchés à capter la réalité physique complexe du vivant : « Certains aspects de la nature sont mobiles ; d'autres sont invisibles, comme dans les sols ; et beaucoup sont silencieux. Ces caractéristiques signifient que les effets de nombre de nos actions sur nous-mêmes et sur les autres – y compris nos descendants – sont difficiles à tracer et ne sont pas comptabilisés, ce qui donne lieu à des "externalités" généralisées et rend difficile le bon fonctionnement des marchés²⁸³ ».

²⁸¹ Bennett, K. (2025). An evaluation of the regenerative claims of Web3's ReFi movement. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1564083. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1564083>

²⁸² Pleno, 2025, <https://eblockchainconvention.com/pleno-refi/>

²⁸³ Dasgupta, P. (2021). *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. HM Treasury. <https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>



KlimaDAO constitue le cas empirique le plus documenté de la tension entre financiarisation et intégrité dans les marchés carbone *on-chain**. Lancé en 2021, le protocole cherchait à constituer une réserve de crédits carbone tokenisés sur la blockchain Polygon et à en faire monter mécaniquement le prix de marché via un modèle de courbe de liaison, avec l'ambition déclarée de « se comporter comme une banque centrale de carbone ». À son apogée fin 2021, le prix du token KLIMA atteignait plusieurs milliers de dollars pour une tonne équivalent CO₂.

Deux analyses indépendantes – celle de CarbonPlan en 2022²⁸⁴ et celle de la chercheuse Kate Bennett en 2025²⁸⁵ – établissent que ce mécanisme a produit des effets contradictoires avec ses intentions déclarées. D'une part, les crédits agrégés par **KlimaDAO** provenaient en majorité de méthodologies de réduction/évitement de faible qualité (notamment des HFC-23 et des crédits forestiers REDD+), sans filtrage sur l'intégrité écologique. D'autre part, la liquidité spéculative générée par la valeur du token KLIMA a créé des incitations à maximiser la quantité de crédits agrégés plutôt que leur qualité, aggravant structurellement le problème documenté en section 1.1.3.2. Le protocole représentait moins de 1 % du marché volontaire carbone total au moment de son pic, illustrant à la fois la marginalité quantitative actuelle de la ReFi carbone et la capacité de petits volumes *on-chain** à distordre des mécanismes de prix sur des marchés en formation.

²⁸⁴ CarbonPlan, 2022,

<https://carbonplan.org/blog/klimadao-bct-response>

²⁸⁵ Bennett, K. (2025a). The ReFi movement in Web3: Implications for the Global Commons. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1564073. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1564073>

La migration vers la blockchain Base en 2025 et la refonte du modèle dans un *whitepaper* 2.0 constituent une tentative de corriger cette distorsion, mais le cas demeure dans la littérature académique l'illustration de référence du risque d'hyper-financiarisation du carbone dans l'écosystème Web3.

2.2.2.2 Les limites de la quantification écologique

Au risque spéculatif s'ajoutent les limites intrinsèques de toute tentative de quantification du vivant à des fins financières.

Une distinction analytique s'impose ici, que formule explicitement Bennett (2025a) : celle entre la quantification et la marchandisation²⁸⁶. Si la première désigne la capacité à mesurer des aspects du monde naturel à des fins d'intendance et de suivi, la seconde est « *le processus par lequel ces mesures sont converties en instruments financiers négociables*²⁸⁷ », soit la transformation de ces mêmes mesures en instruments financiers négociables. Bennett souligne à ce titre que la technologie des registres distribués rend possible une comptabilité environnementale qui ne requiert pas nécessairement de marchandisation, un registre peut suivre des indicateurs de santé écologique sans les convertir en actifs financiers, mais que la ReFi* doit rester attentive à la finalité qu'elle assigne à la quantification : relève-t-elle de l'intendance, ou ouvre-t-elle de nouveaux marchés qui approfondissent la financiarisation du vivant ?

Cette confusion est particulièrement problématique lorsqu'elle s'applique à des actifs naturels dont le propre est d'être fondamentalement non fongible. Les marchés du carbone reposent sur un postulat

d'équivalence : une tonne de dioxyde de carbone (CO₂) évitée ou capturée constitue, en première approximation, une unité physique comparable quelle que soit sa provenance géographique – quoique ce postulat soit lui-même contesté dès lors que l'on distingue carbone évité, carbone supprimé et carbone séquestré, ou que l'on intègre les questions de permanence et d'additionnalité. La biodiversité, en revanche, obéit à une logique radicalement différente, puisqu'elle est par essence, localisée, contextuelle et non substituable²⁸⁸. La richesse écologique d'un site spécifique – les interactions entre espèces, les dynamiques propres à un habitat, la mémoire évolutive d'un écosystème – ne peut être compensée par des améliorations réalisées dans une autre région du monde²⁸⁹.

Aucune métrique unique ne permet de capturer l'ensemble des caractéristiques, des interactions et des valeurs d'un système vivant complexe^{290 291}. Un hectare de forêt tempérée restauré en Europe ne présente pas les mêmes dynamiques écologiques qu'un récif corallien en Indonésie, et l'équivalence financière entre les deux, si elle venait à être institutionnalisée par un marché de la biodiversité, ne correspondrait à aucune réalité biologique. Traiter des écosystèmes complexes comme des jetons interchangeableables, sans exiger une équivalence écologique strictement définie, comporte le risque de faciliter une perte nette des espèces et des habitats les plus menacés – compromettant ainsi les objectifs de

²⁸⁸ Dasgupta, P. (2021). *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. HM Treasury.

<https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>

²⁸⁹ Mace, G. M., Meyers, B., Alkemade, R., Biggs, R., Chapin, F. S., Cornell, S. E., ... Woodward, G. (2014). Approaches to defining a planetary boundary for biodiversity. *Global Environmental Change*, 28, 289–297.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.07.009>

²⁹⁰ The Nature Conservancy. (2024). One future, many voices: 2024 annual report.

<https://www.nature.org/en-us/about-us/who-we-are/accountability/annual-report/2024-annual-report/>

²⁹¹ Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., ... Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59–67. <https://doi.org/10.1038/nature11148>

²⁸⁶ Bennett, K. (2025a). The ReFi movement in Web3: implications for the Global Commons. *Front. Blockchain*, 8, 1564073. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1564073>

²⁸⁷ Ibid.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

conservation que ces marchés sont précisément censés financer²⁹².

Certains acteurs cherchent à adresser ce risque par des architectures de vérification « haute intégrité ». **EcoBridge**, en partenariat avec **Regen Network** depuis novembre 2024, développe une plateforme de vérification en temps réel, scan.ecotoken.earth²⁹³ visant à maintenir des critères de qualité écologique différenciés à mesure que les crédits circulent entre plus de soixante-dix chaînes via le protocole CCEP. L'enjeu déclaré est précisément celui identifié dans cette section : éviter que la liquidité *cross-chain* ne nivelle la qualité écologique par le bas en traitant comme fongibles des crédits issus d'écosystèmes dont la valeur biologique est fondamentalement non substituable²⁹⁴.

Ce que désignent des économistes de l'environnement comme l'*incommensurabilité* du vivant, c'est-à-dire l'impossibilité de ramener des valeurs de nature hétérogène à une échelle de comparaison unique²⁹⁵, constitue une limite que la seule sophistication technologique ne saurait lever. La numérisation d'un indicateur écologique ne résout pas la question de sa représentativité mais elle en amplifie les effets, en bien comme en mal.

Face à cette tension entre fongibilité financière et non-substituabilité écologique, une piste de conception émerge dans l'écosystème Web3 sous le terme de « fongibilité conditionnelle » (*conditional fungibility*) comme la capacité d'un actif numérique à être échangeable au sein d'une classe définie, mais non interchangeable avec

les actifs d'une autre classe, les conditions de passage entre classes étant elles-mêmes paramétrables et ajustables par la gouvernance du protocole. Le concept prolonge une distinction analytique fondamentale dans la conception des actifs numériques : celle entre les jetons dits fongibles, c'est-à-dire interchangeables, et les jetons non fongibles, appelés aussi NFT* pour *Non Fungible Token*, uniques par définition. La fongibilité conditionnelle introduit un état intermédiaire : des actifs semi-fongibles, échangeables entre eux uniquement lorsqu'ils satisfont un ensemble de critères écologiques partagés.

La refonte du protocole **KlimaDAO** sous l'appellation Klima 2.0, documentée dans la présente section, illustre cette approche : les crédits carbone y sont organisés en « classes carbone » (*carbon classes*) dont l'interchangeabilité interne peut être dynamiquement ajustée en fonction de critères méthodologiques et géographiques.²⁹⁶

Cette architecture ne résout pas le problème de l'incommensurabilité du vivant posé par les économistes de l'environnement (un hectare de mangrove ne devient pas substituable à un hectare de forêt boréale par le seul fait qu'un protocole les classe différemment), mais elle constitue une tentative de conception qui prend acte de la non-fongibilité plutôt que de l'ignorer, en imposant des contraintes de qualité au sein même de l'infrastructure d'échange. Son efficacité réelle dépendra, comme pour les mécanismes de vérification analysés en section 2.1, de la rigueur des critères de classification et de l'indépendance de la gouvernance qui les définit.

²⁹² Wunder, S., et al. (2025). Biodiversity credits: An overview of the current state, future opportunities, and potential pitfalls. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.70018>

²⁹³ <https://scan.ecotoken.earth/>

²⁹⁴ EcoBridge / EcoToken, 2025, <https://medium.com/regen-network/ecotoken-partners-with-regen-network-to-bring-ecocredits-to-all-web3-eco-systems-8fea8b28f82b>

²⁹⁵ Martinez-Alier, J., Munda, G., & O'Neill, J. (1998). Weak comparability of values as a foundation for ecological economics. *Ecological Economics*, 26(3), 277–286. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00120-1)

²⁹⁶ Klima Protocol (2026). Klima 2.0 Whitepaper. <https://whitepaper.klimaprotocol.com/> ; Voir également : Rawson, P. & Borreani, L. (2026). *The Green Crypto Handbook*, CRC Press, chapitre 5, pour une analyse des transformations de fongibilité dans les actifs verts numériques.

2.2.3 Les asymétries de pouvoir

L'intégration des technologies du Web3 dans le secteur de la finance durable soulève une question que la rhétorique décentralisatrice tend à occulter : celle des rapports de pouvoir que ces systèmes reproduisent, voire amplifient. Deux dimensions distinctes méritent d'être distinguées. La première est interne aux protocoles eux-mêmes : les mécanismes de gouvernance des écosystèmes décentralisés concentrent structurellement l'influence entre les mains de ceux qui détiennent le plus de capital ou le plus de jetons. La seconde est géopolitique : appliquées aux pays du Sud global, les solutions de la finance régénérative (ReFi*) risquent de reproduire des schémas d'extraction et de dépendance que l'innovation technologique ne neutralise pas mécaniquement.

2.2.3.1 L'illusion d'une véritable décentralisation

La promesse fondamentale du Web3 repose sur l'avènement d'une gouvernance horizontale et démocratique. L'analyse empirique des écosystèmes décentralisés conduit à nuancer substantiellement cette promesse, au point que certains chercheurs parlent d'une « *illusion de décentralisation*²⁹⁷ ». Dans la pratique, les contraintes d'efficacité et les mécanismes de consensus tendent à concentrer le pouvoir. Le mécanisme de consensus par la preuve d'enjeu*, bien que moins énergivore que la preuve de travail*, favorise intrinsèquement la concentration de l'influence au profit de ceux qui détiennent déjà le plus de capital puisque la probabilité qu'un nœud soit sélectionné pour valider un bloc est en effet proportionnelle à la quantité de jetons mis en garantie, ce qui tend à consolider les positions acquises²⁹⁸.

Cette asymétrie se retrouve au sein des Organisations autonomes décentralisées (DAO*). Leurs modèles de gouvernance reposent le plus souvent sur un vote pondéré par la possession de jetons (*token-weighted voting*), architecture qui favorise l'émergence d'une ploutocratie où l'influence décisionnelle est strictement proportionnelle au capital détenu²⁹⁹. Les grands détenteurs – souvent désignés dans le jargon de l'écosystème comme les *whales*, terme qui désigne les acteurs dont les avoirs sont suffisamment importants pour influencer les marchés – ou les fondateurs techniques qui se sont attribué une fraction significative des jetons lors du lancement du protocole disposent ainsi d'un poids décisionnel que les petits détenteurs ne peuvent contrebalancer, quand bien même ils participeraient massivement aux votes.

À ce premier déséquilibre s'en ajoute un second, d'ordre sociologique : les taux de participation aux votes dépassent rarement 10 % dans les DAO documentées, laissant de *facto* les décisions structurantes aux mains d'une minorité de grands détenteurs actifs³⁰⁰. Ces deux phénomènes, la concentration ploutocratique par conception et l'apathie des participants minoritaires se cumulent sans se réduire l'un à l'autre : résoudre le second ne suffirait pas à corriger le premier. La technologie, loin de redistribuer le pouvoir de manière équitable, risque dans ce cadre de générer une nouvelle élite technocratique et financière dont les intérêts ne coïncident pas nécessairement avec les objectifs d'impact déclarés.

Cette dynamique de reconcentration n'est pas spécifique à telle ou telle implémentation défailante : elle résulte de propriétés structurelles des mécanismes de consensus eux-mêmes. La recherche académique a développé plusieurs instruments pour en

opportunity for the monetary system. BIS.
<https://www.bis.org/publ/arpdf/ar2021e3.htm>

²⁹⁹ Esposito, M., Tse, T., & Goh, D. (2025). Decentralizing governance: exploring the dynamics and challenges of digital commons and DAOs*. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1538227. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1538227>

³⁰⁰ *Ibid.*

²⁹⁷ Abid, A., & Farooq, O. (2026). *The illusion of the Web3 decentralization* <https://doi.org/10.2139/ssrn.5008910>

²⁹⁸ Bank for International Settlements. (2021). *Annual Economic Report 2021*, Chapter III: CBDCs: an

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

quantifier le degré de décentralisation d'un système. Le *Nakamoto Coefficient* exprime le nombre minimal d'acteurs qui devraient se coaliser pour compromettre la sécurité ou la gouvernance d'un protocole donné ; les coefficients de Gini appliqués à la distribution des jetons de gouvernance cartographient les inégalités de pouvoir décisionnel avec une précision comparable à celle de l'analyse des inégalités de revenus. Ces approches coexistent avec d'autres indicateurs mobilisés par la littérature, notamment l'entropie de Shannon, le nombre de nœuds actifs et l'indice Herfindahl-Hirschman, pour analyser le degré de décentralisation dans l'écosystème crypto. Ces instruments révèlent une constante : les réseaux présentant une décentralisation technique au niveau de l'infrastructure (nœuds distribués, participation permissionnée) maintiennent une centralisation politique au niveau de la gouvernance.

La distinction est analytiquement décisive. Comme le formule le rapport *Balancing Code and Law* produit par le Stanford Cyber Policy Center³⁰¹, « les systèmes blockchain n'éliminent pas la confiance ni le pouvoir ; ils les redistribuent ». Une redistribution qui, en pratique, tend à reconsolider les positions des premiers entrants, des grands validateurs et des équipes fondatrices dotées d'allocations initiales disproportionnées. L'évaluation la plus directe de ce phénomène reste ce que les chercheurs désignent comme le *Bahamas test* : un protocole survivrait-il à la disparition subite de ses fondateurs, à l'image de Satoshi Nakamoto ? Dans la quasi-totalité des écosystèmes ReFi documentés, la réponse est négative, ce qui révèle moins un défaut de conception qu'une limite inhérente à la gouvernance distribuée lorsque les ressources humaines et financières qui la font fonctionner

restent concentrées entre un petit nombre de mains³⁰².

Ces constats diagnostics (concentration ploutocratique, apathie des minoritaires, dépendance aux fondateurs) appellent cependant une réponse de conception, et non seulement de description. La littérature récente sur les crypto-institutions à vocation écologique identifie quatre tensions structurantes que tout concepteur de gouvernance décentralisée doit arbitrer, et dont l'arbitrage détermine si le protocole reproduira ou corrigera les asymétries documentées ci-dessus.³⁰³ La première oppose décentralisation et coordination : une gouvernance plus distribuée résiste mieux à la capture, mais ralentit les décisions, or un projet de conservation confronté à un incendie ou à une espèce invasive exige une capacité de réponse rapide, ce qui plaide pour des mécanismes d'autorité d'urgence coexistant avec une distribution large du pouvoir en régime ordinaire.

La deuxième oppose transparence et confidentialité : les registres ouverts renforcent la confiance, mais la localisation de gardiens de terres, de sites d'espèces menacées ou de données financières communautaires peut exposer des populations vulnérables : une tension que les preuves à connaissance nulle* (zero-knowledge proofs) documentées en section 2.1.2.2 commencent à adresser au niveau technique. La troisième oppose incitations financières et participation authentique : les récompenses en jetons attirent des liquidités mais aussi des acteurs extractifs, tandis que les systèmes fondés sur la réputation filtrent l'engagement réel mais limitent la croissance. La quatrième, peut-être la plus déterminante, oppose enracinement territorial et détachement numérique : Will Ruddick, concepteur du réseau de monnaies communautaires **Grassroots Economics**

³⁰¹ Sell, F. G. (2026). *Balancing Code and Law: Governance and Policy Challenges of Blockchain*. Stanford Cyber Policy Center, Program on Governance of Emerging Technologies. Stanford University.
<https://fsi.stanford.edu/publication/balancing-code-and-law-governance-and-policy-challenges-blockchain>

³⁰² *Ibid.*

³⁰³ Rawson, P. & Borreani, L. (2026). *The Green Crypto Handbook: Blockchain for Sustainability Professionals*, CRC Press, chapitre 4.

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

documenté en section 1.3.3.1, propose de cartographier les institutions selon deux axes : la proximité (partage du quotidien, présence incarnée) et la redevabilité (contrôle par les pairs, registres ouverts) ; et montre que les institutions proches et redevables sont celles qui maintiennent une participation durable au-delà des cycles spéculatifs.³⁰⁴ Ce cadre suggère que le problème documenté dans la présente section (la reconcentration du pouvoir dans les DAO*) est moins un défaut inhérent à la technologie qu'une conséquence prévisible du désenracinement territorial de protocoles conçus pour des marchés globaux plutôt que pour des communautés situées.

2.2.3.2 Le risque de crypto-colonialisme et de green grabbing

L'application des solutions de la Finance régénérative (ReFi*) dans les pays du Sud global soulève également des questions éthiques, sociales et territoriales que la littérature académique documente sous deux notions complémentaires. La première est celle de crypto-colonialisme, désignant le processus par lequel la technologie des registres distribués reproduit les schémas historiques d'exploitation et de dépendance économique du Sud global sous couvert d'innovation bienveillante³⁰⁵. La seconde est celle d'accaparement vert (*green grabbing* ou *virtual land grabs*), qui désigne le processus par lequel les droits des communautés locales sur leurs ressources naturelles se trouvent effacés au profit d'investissements verts et de la spéculation sur des actifs écologiques³⁰⁶.

Un exemple illustre la conjonction de ces deux risques dans le domaine des identités numériques. Le projet **Worldcoin**³⁰⁷ a organisé la collecte de données biométriques, via un scan de l'iris, auprès de populations de pays du Sud en échange d'une distribution de crypto-actifs, soulevant des controverses majeures en matière de consentement éclairé et de protection de la vie privée³⁰⁸. Cette approche comporte un risque de conversion des données d'identité sensibles de personnes déplacées ou marginalisées en empreintes numériques transactionnelles exploitables par des entités privées³⁰⁹. Dans le cadre de partenariats impliquant des agences internationales bénéficiant d'une immunité juridique, cette dynamique génère ce que Lemberg-Pedersen et Haioty (2020) désignent comme des failles d'externalisation où « *des entreprises technologiques privées peuvent ainsi tester de nouveaux outils numériques sur des populations du Sud global sans assumer de responsabilité juridique directe en cas de violation des droits*³¹⁰ ». Des chercheurs ont montré que ces identifiants, imposés depuis l'extérieur plutôt que construits avec les communautés concernées, risquent de renforcer le contrôle bureaucratique et commercial sur les populations les plus vulnérables plutôt que de les émanciper³¹¹.

Cette asymétrie ne se limite pas aux dispositifs d'identité biométrique. Dans le domaine du crédit *on-chain** aux PME, **Untangled Finance**, qui structure le financement de créances commerciales africaines via des *pools* tokenisés sur **Celo**, restreint l'accès de ses *pools* aux seuls

³⁰⁴ Ruddick, W. (2025). Community of Practice Framework. Grassroots Economics. Cité dans Rawson & Borreani (2026), *ibid*.

³⁰⁵ Colón Cruz, M. D. L. M. (2022). Blockchain Island A critical discourse analysis of the colonial construction of a Puerto Rican crypto utopia. N°264 Media@LSE, London School of Economics and Political Science. <https://www.lse.ac.uk/media-and-communications/assets/documents/research/msc-dissertations/2021/Colo%CC%81n.pdf>

³⁰⁶ Howson, P., Rosales, A., Jutel, O., Gloerich, I., Llorens, M. G., de Vries, A., et al. (2024). Crypto/space: computational parasitism, virtual land grabs, and the production of Web3 'exit zones'. *Political Geography*, 115, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2024.103210>

³⁰⁷ <https://world.org/>

³⁰⁸ Nothias, T. (2025). An intellectual history of digital colonialism. *Journal of Communication*. <https://doi.org/10.1093/joc/jqaf003>

³⁰⁹ Lemberg-Pedersen, M., et Haioty, E. (2020). Re-assembling the surveillable refugee body in the era of data-craving. *Citizenship Studies*, 24(5), 607–624. <https://doi.org/10.1080/13621025.2020.1784641>

³¹⁰ *Ibid*.

³¹¹ Cheesman, M. (2020). Self-sovereignty for refugees? The contested horizons of digital identity. *Geopolitics*, 27(1), 134–159. <https://doi.org/10.1080/14650045.2020.1823836>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

investisseurs accrédités (régime américain) et sophistiqués (régime EEE/Royaume-Uni). Les PME d'Afrique subsaharienne dont les créances constituent le sous-jacent de ces instruments n'ont aucune voix dans la gouvernance du *pool* qui les finance : la valeur générée par leur activité économique est capturée par des investisseurs institutionnels mondiaux, selon une logique structurellement analogue à celle documentée dans les marchés traditionnels du crédit aux pays émergents³¹².

Sur le plan foncier et environnemental, l'acquisition à grande échelle de droits carbone illustre les tensions territoriales engendrées par la financiarisation du vivant. Selon la coalition *Rights and Resources Initiative* (2024)³¹³, l'entreprise Blue Carbon Inc., basée à Dubaï, a signé des protocoles d'accord portant sur les droits d'échange de crédits carbone pour environ 20 % de la superficie du Zimbabwe, 10 % de la Zambie, 10 % du Libéria et 8 % de la Tanzanie – des périmètres d'une ampleur exceptionnelle. Ces accords auraient été conclus sans consultation publique ni consentement libre et éclairé des peuples résidant sur ces territoires³¹⁴. Des cas documentés montrent que cette logique peut conduire à des déplacements forcés de populations sous couvert de projets de compensation carbone, à l'image de la situation du peuple Ogiek au Kenya³¹⁵.

2.3 Les conditions d'un passage à l'échelle : financement, identité et régulation

Les deux sections précédentes ont cartographié les risques systémiques inhérents à l'architecture actuelle de la Finance Régénérative : la dépendance aux oracles*, les distorsions incitatives de la mesure tokenisée, le risque d'hyper-financiarisation du vivant, et les asymétries de pouvoir que les protocoles décentralisés tendent à reproduire sous de nouvelles formes. Ces risques sont réels et documentés. Ils ne condamnent pas le projet de la ReFi* – ils en précisent les conditions de réalisation.

Car la question n'est pas de savoir si les nouvelles architectures numériques peuvent, *in abstracto*, améliorer la vérifiabilité de l'impact et orienter les capitaux vers la régénération. Les expérimentations documentées dans ce rapport montrent qu'elles le peuvent, dans des conditions précises. La question est de savoir à quelles conditions ces expérimentations locales peuvent devenir un système financier à part entière, capable d'attirer des capitaux institutionnels, d'opérer dans des cadres juridiques reconnus, et de fonctionner pour des populations dont l'accès au numérique n'est pas garanti.

Cette section examine trois catégories de conditions. La première est économique : comment surmonter le trilemme du financement qui confine la plupart des projets ReFi* entre des critères de rentabilité incompatibles avec des logiques de capital-risque et des ressources philanthropiques insuffisantes. La seconde est infrastructurelle : comment construire des systèmes d'identité décentralisée qui servent réellement les populations exclues des systèmes centralisés, sans reproduire les asymétries de données et de gouvernance que ces systèmes généraient.

³¹² Untangled Finance, 2025, <https://untangled.finance>

³¹³ <https://rightsandresources.org/>

³¹⁴ Initiative des droits et ressources. (2024). État des droits sur le carbone des peuples autochtones, des communautés locales et des peuples afro-descendants dans les terres et forêts des zones tropicales et subtropicales (Note d'information). Initiative des droits et ressources (RRI).

<https://rightsandresources.org/fr/publication/etat-des-droits-sur-le-carbone-2024/>

³¹⁵ Marshall, C. (2023, 9 novembre). Kenya's Ogiek People Being Evicted for Carbon Credits – Lawyers. BBC News. <https://www.bbc.com/news/world-africa-67352067.amp>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

La troisième est réglementaire et institutionnelle : comment la Finance Régénérative peut-elle s'articuler avec les cadres normatifs de la finance traditionnelle – CSRD, MiCA, TNFD – sans s'y dissoudre, et sans constituer une zone d'opacité supplémentaire pour les investisseurs institutionnels.

2.3.1 Le défi économique : surmonter le trilemme du financement et l'adoption

Parmi les obstacles au passage à l'échelle de la Finance Régénérative, l'obstacle économique est structurellement le plus immédiat. La ReFi* se heurte à une configuration paradoxale que le secteur désigne, sans formulation académique encore stabilisée, comme un trilemme du financement : les projets qui visent une transformation systémique des rapports entre économie et écosystèmes ont par nature des horizons de maturité longs, des rendements financiers incertains à court terme, et une dépendance à des mécanismes de vérification dont les coûts restent élevés. Ces trois caractéristiques les rendent structurellement peu éligibles aux critères des fonds de capital-risque, et trop complexes pour les appels à projets philanthropiques classiques.

Cette section examine d'abord les voies par lesquelles ce trilemme peut être atténué – en particulier par la formalisation d'une « preuve économique » de la valeur de la régénération pour les investisseurs institutionnels, et par le recours à des mécanismes de finance mixte (*blended finance*) qui mobilisent du capital public ou philanthropique de première perte pour catalyser l'entrée de capitaux privés. Elle examine ensuite le défi complémentaire de l'adoption par le marché, qui suppose de construire des produits accessibles à des investisseurs non spécialisés dans les protocoles décentralisés – ce qui implique de masquer la complexité technique sans en masquer les risques.

2.3.1.1 Surmonter le trilemme du financement par la « preuve économique »

La transition d'une phase expérimentale vers un passage à l'échelle confronte les projets de ReFi* à ce que le secteur désigne, sans formulation académique encore stabilisée, comme un « *trilemme du financement* ». Ce trilemme désigne la difficulté à concilier simultanément l'accès à un capital suffisant, l'ampleur des financements nécessaires pour générer un impact systémique, et la viabilité commerciale des modèles économiques sous-jacents³¹⁶. Parce qu'ils privilégient la restauration à long terme des écosystèmes et l'inclusivité des bénéficiaires plutôt que l'extraction de rendements à court terme, de nombreux projets ReFi* peinent à satisfaire les critères de croissance exponentielle exigés par les fonds de capital-risque (*venture capital*). Faute de pouvoir attirer ces investisseurs, ils se retrouvent confinés à un écosystème de subventions hautement compétitif, dont les ressources disponibles restent structurellement insuffisantes pour assurer un développement à grande échelle³¹⁷.

Pour sortir de cette dépendance aux financements philanthropiques et capter l'attention des investisseurs institutionnels, le secteur est conduit à formaliser ce que Dumont (2026) désigne comme la « *preuve économique* » – établir que l'investissement dans les capacités du vivant ne constitue pas un coût ou une démarche de conformité, mais que les entreprises qui « *ancrent leur modèle dans le vivant réduisent leur exposition aux chocs (climat, réglementaire, social) et sécurisent leur ancrage territorial*³¹⁸ », générant ainsi un profil de flux de trésorerie structurellement plus résilient.

³¹⁶ CARBON Copy. (2024). The State of ReFi Report 2024. <https://carboncopy.news/reports/The%20State%20of%20ReFi%20Report%202024.pdf>

³¹⁷ *Ibid.*

³¹⁸ Dumont, J. (2026). Livre blanc – Ce que la régénération du vivant change pour les décisions d'entreprise. Nous Sommes Vivants. <https://noussoyonsvivants.co/livre-blanc-ce-que-regeneration-veut-dire-pour-une-entreprise/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

Sans la formalisation comptable et financière de cette preuve économique, les capitaux institutionnels continueront de considérer l'impact comme une contrainte assumée malgré le risque, et non comme un facteur structurant de rendement à long terme.



AAVE et **Sky** ont montré que des protocoles DeFi peuvent générer des revenus durables comparables à ceux d'institutions financières traditionnelles, sans dépôts garantis par l'État ni licence bancaire. Avec une *Total Value Locked* (TVL) située entre 34 et 44 milliards de dollars en 2025 et des revenus annualisés estimés entre 100 et 120 millions de dollars, **AAVE** génère des flux de trésorerie comparables à ceux d'une banque régionale de taille moyenne mais sans fonds propres réglementaires, sans réseau d'agences et sans garantie souveraine³¹⁹. La clôture sans sanction de l'enquête de la Securities and Exchange Commission (SEC) américaine en décembre 2024 et les partenariats institutionnels avec Circle, Franklin Templeton et VanEck (via **AAVE** Horizon, déployé pour la tokenisation de fonds du marché monétaire) constituent des signaux de validation réglementaire que les investisseurs institutionnels ont commencé à intégrer dans leurs analyses de risque.

Sky (ex-MakerDAO), dont le protocole émet le *stablecoin* USDS via des *vaults** de collatéral décentralisés, projette pour 2026 un revenu brut de 611,5 millions de dollars, en hausse de 81 % en glissement annuel, avec un bénéfice net de 157,8 millions de dollars, des ratios de rentabilité supérieurs à ceux de nombreuses banques commerciales de taille comparable³²⁰. Ces deux exemples n'invalident pas les critiques sur les limites

de la DeFi en matière d'impact systémique, mais ils démontrent que la soutenabilité économique d'un protocole décentralisé à l'échelle bancaire est désormais une réalité vérifiable, non une hypothèse prospective. C'est cette réalité qui constitue le premier argument crédible face aux investisseurs institutionnels sceptiques sur la viabilité économique de la ReFi.

Pour répondre à ce défi, des praticiens et observateurs du secteur proposent de nouvelles approches d'allocation du capital. L'une d'elles, désignée sous le terme d'investissement écosystémique ergodique³²¹ (*Ergodic Ecosystem Investing*, ou EEI), s'inspire du cadre théorique développé par l'économiste Ole Peters sur l'ergodicité en économie³²². Ce cadre montre que sous des dynamiques de rendements composés, la croissance moyenne observée sur un ensemble d'investisseurs diverge de la croissance que connaît chaque investisseur individuel dans le temps – exposant ce dernier, dans le cas isolé, à un risque de ruine³²³ irréversible même lorsque la moyenne agrégée est positive. L'investissement écosystémique ergodique (EEI) postule en conséquence qu'investir dans un écosystème de projets interconnectés et collaboratifs produit des rendements plus stables et réduit ce risque de ruine individuelle, tout en permettant de

³²¹ Ergodique : Qui permet de déterminer statistiquement toutes les réalisations d'un processus aléatoire à partir d'une réalisation isolée de ce processus. CNRTL <https://www.cnrtl.fr/definition/ergodique>

³²² Peters, O. (2019). The ergodicity problem in economics. *Nature Physics*, 15(12), 1216–1221. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0732-0>

³²³ Dans ce cadre, un projet ReFi* isolé, même porteur d'un modèle économique solide en moyenne, est exposé au risque que sa trajectoire temporelle spécifique – un choc de liquidité, une mauvaise saison, une défaillance d'oracle – le conduise à un état de non-retour avant d'avoir pu capitaliser sur ses perspectives de long terme. L'investissement dans un écosystème interconnecté de projets vise à rendre le système collectif plus ergodique : en partageant les ressources et en mutualisant les risques entre entités liées, on réduit la probabilité qu'un choc spécifique épuise définitivement un projet donné, et l'on rapproche la trajectoire individuelle de chaque composante de la moyenne collective.

³¹⁹ DefiLlama, 2025, <https://defillama.com/protocol/aave>

³²⁰ blockEden, 2026, <https://blockeden.xyz/blog/2026/04/03/dai-usds-migrati-on-makerdao-sky-protocol-stablecoin-rebrand/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

mutualiser les ressources face aux périodes de crise³²⁴.

2.3.1.2 Vers des investissements écosystémiques et des financements mixtes

Le second défi du passage à l'échelle est celui de l'adoption par le marché. Un nombre significatif de protocoles ReFi ont initialement orienté leur stratégie vers un public de profils hautement spéculatifs et natifs de l'écosystème crypto, désignés dans le jargon sectoriel comme les *degens*, attirés par la maximisation des rendements à court terme. Cette orientation s'est révélée une impasse : ce segment, bien que disposant de capitaux, ne place généralement pas la durabilité environnementale au cœur de ses critères d'investissement³²⁵.

[E] Le grand transfert de patrimoine : une recomposition structurelle de la demande

Le défi d'adoption que rencontre la finance régénérative (ReFi*) ne se joue pas uniquement sur le terrain de la complexité technique ou de la rentabilité des protocoles. Il se joue aussi sur celui de la composition du capital institutionnel, qui est en train de se transformer sous l'effet d'un phénomène démographique documenté : le transfert intergénérationnel de patrimoine. Cerulli Associates estime à 124 000 milliards de dollars la richesse qui changera de mains d'ici à 2048³²⁶.

Or les enquêtes disponibles documentent des préférences d'allocation sensiblement différentes chez les héritiers de ce capital. Selon le Sustainable Signals 2025 du

Morgan Stanley Institute for Sustainable Investing, une enquête portant sur 1 765 investisseurs actifs disposant de plus de 100 000 dollars d'actifs investissables dans trois zones géographiques, 97 % des millennials et 99 % des membres de la génération Z se déclarent intéressés par l'investissement durable, contre des proportions nettement inférieures chez les baby-boomers³²⁷.

Le World Wealth Report 2025 de Capgemini confirme que 88 % des gestionnaires de patrimoine observent chez leurs clients les plus jeunes un appétit accru pour les actifs alternatifs et une tendance à associer rentabilité et critères extra-financiers³²⁸. Des enquêtes sectorielles spécifiques documentent par ailleurs que cet appétit pour les actifs alternatifs inclut de façon croissante les actifs numériques : parmi les investisseurs fortunés âgés de 21 à 43 ans, 49 % déclaraient détenir des cryptoactifs et 14 % de leurs portefeuilles y étaient alloués, contre 1 % chez leurs aînés³²⁹.

Ces données appellent toutefois une lecture prudente. Une enquête annuelle conduite auprès de 2 072 investisseurs américains par David Larcker, Amit Seru et Brian Tayan pour la Stanford Graduate School of Business, la Hoover Institution et le Rock Center for Corporate Governance montre qu'en 2024, seuls 11 % des jeunes investisseurs jugeaient « extrêmement important » que les sociétés

³²⁴ CARBON Copy. (2025). The State of ReFi Report 2025. <https://carboncopy.news/reports/The%20State%20of%20ReFi%20Report%202025.pdf>

³²⁵ Ibid.

³²⁶ Cerulli Associates. (2024). *Cerulli anticipates \$124 trillion in wealth will transfer through 2048*. <https://www.cerulli.com/press-releases/cerulli-anticipates-124-trillion-in-wealth-will-transfer-through-2048>

³²⁷ Morgan Stanley Institute for Sustainable Investing. (2025). *Sustainable signals: Individual investors 2025*. https://www.morganstanley.com/content/dam/msdotcom/en/assets/pdfs/2025_Sustainable_Signals_Individual_Investors_2025_report.pdf

³²⁸ Capgemini Research Institute. (2025). *World wealth report 2025: Sail the great wealth transfer*. <https://www.capgemini.com/insights/research-library/world-wealth-report/>

³²⁹ Bank of America Private Bank. (2024, juin). *2024 Bank of America Private Bank study of wealthy Americans: As wealth transfer continues, outlooks and emotions influence financial decisions*. Bank of America Corporation. <https://newsroom.bankofamerica.com/content/newsroom/press-releases/2024/06/bofa-private-bank-study-of-wealthy-americans-finds-generational.html>

d'investissement exercent leur influence en faveur de priorités environnementales, contre 44 % en 2022 et 27 % en 2023, un recul attribué par les auteurs à la pression inflationniste de la période³³⁰. La préférence déclarée pour l'investissement à impact ne se traduit pas mécaniquement en allocation effective et reste sensible aux conditions macroéconomiques et ces chiffres signalent une variable de demande en formation, non une garantie de marché.

Un passage à l'échelle plus large supposerait de construire des produits accessibles aux investisseurs de la finance traditionnelle et aux utilisateurs finaux non spécialisés, ce qui implique de masquer la complexité technique inhérente au Web3, et notamment la gestion des portefeuilles cryptographiques et l'exécution des *smart contracts**. Des acteurs du secteur avancent que l'intégration d'interfaces conversationnelles fondées sur de grands modèles de langage (*Large Language Models* ou LLMs) pourrait contribuer à réduire cette friction technique, en permettant une allocation plus fluide vers des instruments liant rendement financier et impact écologique³³¹. Cette hypothèse reste à ce stade prospective et non étayée par des données d'usage à grande échelle.

Sur le plan des structures de financement, la finance mixte³³² (*blended finance*) constitue un levier identifié par la littérature académique et institutionnelle³³³ bien avant l'émergence du

Web3. Ce mécanisme mobilise du capital public ou privé pour constituer une tranche de première perte, absorbant les premiers défauts de paiement potentiels et réduisant ainsi le profil de risque des projets pour les investisseurs institutionnels privés. Dans un contexte ReFi, cette architecture peut être mise en œuvre par des contrats intelligents qui automatisent l'activation de cette protection, en rendant les conditions de déclenchement transparentes et vérifiables pour toutes les parties.

Des projets documentés dans ce rapport mettent en œuvre ces architectures à des stades de développement variables. **Empowa**, déployé au Mozambique et désormais en discussion avec la Bourse de Nairobi (NSE) pour un déploiement kenyan, combine capital institutionnel africain (NSE), capital crypto (jeton EMP sur Cardano) et subventions du programme Project Catalyst pour financer du logement abordable : chaque composante absorbe un niveau de risque différent, permettant à la tranche institutionnelle d'entrer sur un profil de risque compatible avec ses mandats³³⁴. **MiniPay**, avec ses 8 millions de *wallets* activés *via* le navigateur mobile Opera, illustre la logique d'investissement écosystémique à une autre échelle : Opera finance l'infrastructure de rail mobile, et des projets tiers (**Haraka**³³⁵, **GoodDollar**, **ImpactMarket**) se déploient sur ce rail sans reproduire leurs propres coûts d'acquisition d'utilisateurs, mutualisant l'infrastructure comme un bien commun numérique³³⁶. Dans le domaine du financement des marchés privés européens à impact, **Dowgo** cherche à connecter porteurs de

³³⁰ Larcker, D., Seru, A., & Tayan, B. (2024). *2024 survey: Investors, retirement savings & ESG*. Stanford Graduate School of Business ; Hoover Institution Working Group on Corporate Governance ; Rock Center for Corporate Governance.

<https://gsb.stanford.edu/faculty-research/publications/2024-survey-investors-retirement-savings-esg>

³³¹ CARBON Copy. (2025). *The State of ReFi* Report 2025*.

<https://carboncopy.news/reports/The%20State%20of%20ReFi%20Report%202025.pdf>

³³² OECD (2018), *Making Blended Finance Work for the Sustainable Development Goals*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264288768-en>.

³³³ Convergence. (2023). *The State of Blended Finance 2023*.

<https://www.convergence.finance/resource/state-of-blended-finance-2023/view>

³³⁴ Empowa, 2025,

<https://bitcoinke.io/2024/08/empowa-proposes-tokenization-solution-for-kenya-housing-market/>

³³⁵ Today we are shutting down the Bondy app and winding Haraka down, may, 2026

https://www.linkedin.com/posts/haraka-xyz_today-we-are-shutting-down-the-bondy-app-activity-7455981055758749696-SWA5

³³⁶ MiniPay, 2025,

<https://minipay.to/blog/minipay-2-years-stablecoins-everyday-payments>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

projets et investisseurs professionnels sur un segment structurellement délaissé par les circuits institutionnels classiques, avec plus de 300 millions d'euros de projets identifiés en attente de distribution.

Enfin, des véhicules d'investissement spécifiquement conçus pour l'économie réelle émergent pour tenter d'opérationnaliser la finance régénérative au niveau territorial. Les fonds de recherche à impact (*Impact Search Funds* ou ISF), en adaptant le modèle de l'entrepreneuriat par acquisition, permettent à des entrepreneurs d'acquérir des petites et moyennes entreprises (PME) essentielles à une communauté locale – dans les secteurs de l'agriculture, de la santé ou de l'éducation – afin de les transformer durablement, en privilégiant la pérennité de l'actif sur le territoire et la résilience des parties prenantes plutôt qu'une sortie financière à horizon court³³⁷. Ce modèle, encore en phase d'expérimentation et de formalisation, illustre comment de nouveaux instruments peuvent tenter de relier le capital institutionnel à la vitalité des territoires – à condition que leurs performances économiques et sociales soient documentées de façon rigoureuse et indépendante.

Un obstacle structurel au passage à l'échelle, que les développements précédents n'adressent qu'indirectement, est l'isolement opérationnel des protocoles de Finance régénérative (ReFi*) les uns par rapport aux autres. Chaque projet documenté dans ce rapport (de **GainForest** à **EthicHub**, de **Kolektivo** à **Regen Network**) opère selon sa propre architecture de gouvernance, ses propres registres et ses propres mécanismes de financement, sans interopérabilité institutionnelle systématique. Or les problèmes écologiques que ces protocoles cherchent à résoudre ne respectent pas les

frontières de chaque projet : un bassin versant traverse plusieurs juridictions, une espèce migratrice ne connaît pas les limites d'un crédit carbone géolocalisé. Des mécanismes de coordination inter-DAO (DAO-to-DAO, D2D) commencent à émerger pour adresser cette fragmentation. Parmi ceux documentés dans la littérature récente : les réserves de liquidité co-collatéralisées (*co-liquidity pools*), dans lesquelles deux crypto-institutions mutualisent des actifs pour stabiliser leurs échanges ; les co-assurances, fonds communs débloqués sous certaines conditions écologiques ou climatiques au bénéfice des participants des deux réseaux ; et la mise en commun de données (*data pooling*), par laquelle des institutions collaborent pour agréger, partager et licencier des données environnementales dont la valeur croît avec l'échelle d'agrégation.³³⁸

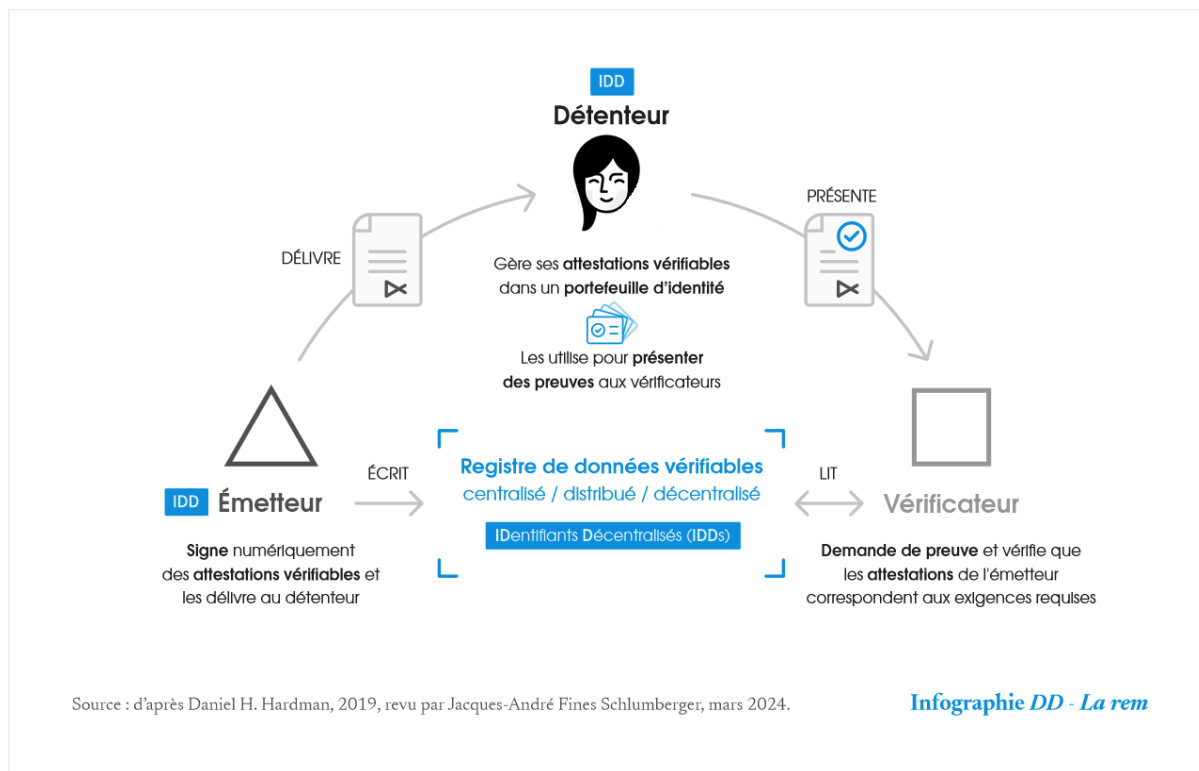
Le réseau Sarafu au Kenya illustre concrètement cette logique à l'échelle communautaire : deux monnaies locales distinctes ont établi un pool de liquidité inter-communautaire permettant des échanges croisés entre leurs économies respectives, avec des résultats empiriques documentés.³³⁹ La transposition de ces mécanismes D2D à l'échelle biorégionale (entre, par exemple, un protocole de crédits carbone forestier et un protocole de micro-assurance agricole opérant sur le même territoire) constitue l'une des conditions de passage de la Finance régénérative du stade de l'expérimentation locale à celui d'une infrastructure financière intégrée.

³³⁷ Reyazat, F. (2025). *The Impact Search Fund: A Regenerative Finance Approach to Transforming Community-Rooted Entrepreneurship*. Reyazat Institute Papers.
<https://www.reyazat.com/2025/11/14/the-impact-search-fund-a-regenerative-finance-approach-to-transforming-community-rooted-entrepreneurship/>

³³⁸ Rawson, P. & Borreani, L. (2026). *The Green Crypto Handbook: Blockchain for Sustainability Professionals*, CRC Press, chapitre 5 – Table 5.4 : « DAO-to-DAO Collaborative Policies ».

³³⁹ Ruddick, W. (2023). « Commitment Pooling ». *International Journal of Community Currency Research*, 27. Grassroots Economics (2025). Sarafu Network.
<https://sarafu.network/>

2.3.2 L'infrastructure de l'identité numérique



[I] L'identité décentralisée et les attestations vérifiables

Source³⁴⁰

La deuxième condition structurelle du passage à l'échelle est moins souvent discutée que le financement, mais elle en est le prérequis silencieux : sans capacité à identifier de façon fiable, portable et souveraine les emprunteurs, les porteurs de projets et les intermédiaires locaux, aucun des instruments de la ReFi examinés dans ce rapport - *Micro-DeFi**, monnaies d'inclusion communautaire, systèmes de vérification de l'impact - ne peut fonctionner à grande échelle. La raison en est structurelle : les populations que ces instruments cherchent à atteindre sont précisément celles que les systèmes d'identité centralisés ont historiquement le plus mal servies - non bancarisées, sans historique de

crédit, invisibles pour les marchés de capitaux formels. Les Identifiants Décentralisés* (DID, *Decentralized Identifiers*) et les attestations vérifiables* (AV, *Verifiable Credentials*) proposent une réponse architecturale à cette contrainte : permettre à un individu ou à une organisation de prouver son éligibilité à un financement, de constituer un historique de crédit portable ou d'attester de la réalité d'un impact, sans dépendre d'une base de données centralisée ni d'un intermédiaire qui en détiendrait le contrôle exclusif. C'est moins une question de technologie qu'une question de gouvernance de la donnée d'identité - et c'est à ce titre qu'elle conditionne l'ensemble des mécanismes examinés dans ce rapport. Cette section examine les premiers déploiements opérationnels de ce modèle dans des contextes de financement à impact, puis les obstacles qui en freinent l'adoption à l'échelle : fragmentation des standards entre acteurs, résistance institutionnelle à l'interopérabilité, et risque que la

³⁴⁰ Identité décentralisée. N°69-70 Printemps - été 2024
<https://www.la-rem.eu/identite-decentralisee/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

décentralisation de l'identité reproduise, sous une forme nouvelle, les asymétries de pouvoir qu'elle prétend corriger.

2.3.2.1 Les Identifiants Décentralisés (DID) et le financement à impact

L'accès au crédit, à l'investissement et aux instruments de la Finance Régénérative repose sur un présupposé que l'on énonce rarement : que les acteurs concernés - emprunteurs, porteurs de projets, organisations locales - peuvent être identifiés de façon fiable, vérifiable et portable par les contreparties financières. Ce présupposé est structurellement faux pour une fraction considérable des populations que la ReFi ambitionne de servir. Selon l'initiative pour l'identification au service du développement (ID4D) de la Banque mondiale, près d'un milliard de personnes dans le monde demeurent sans identité légalement reconnue, ce qui les exclut *de facto* des circuits financiers formels³⁴¹. Un agriculteur non bancarisé au Kenya, une coopérative rurale en Zambie, une petite organisation de la société civile au Sénégal n'existent pas dans les bases de données des marchés de capitaux formels. Ils sont solvables, actifs et porteurs de projets à impact réel - et pourtant financièrement invisibles, faute d'un identifiant reconnaissable par des institutions extérieures à leur territoire.

C'est précisément cette invisibilité que le modèle de l'identité auto-souveraine (*Self-Sovereign Identity*, SSI) cherche à résoudre par une rupture architecturale. Le paradigme SSI repose sur deux composantes techniques complémentaires dont les spécifications ont été ratifiées comme standards ouverts par le Consortium World Wide Web (W3C). Les Identifiants Décentralisés (DID, *Decentralized Identifiers*³⁴²), adoptés comme recommandation officielle du W3C le 19 juillet

2022, permettent à un individu ou à une organisation de créer et de contrôler son propre identifiant numérique sans dépendre d'une autorité centrale - banque, État ou plateforme. Les attestations vérifiables* (*Verifiable Credentials*), standardisées par le même consortium³⁴³, sont des certificats numériques signés cryptographiquement, émis par des tiers de confiance - institution financière, organisation certificatrice, administration locale - et stockés par leur détenteur dans un portefeuille numérique d'identité. Contrairement aux systèmes centralisés qui fusionnent l'identifiant, les données personnelles et la base de données au sein d'une même entité contrôlée par un tiers, ce paradigme sépare ces trois éléments : le registre distribué ne sert que d'infrastructure publique pour vérifier l'authenticité des signatures, sans stocker les données personnelles elles-mêmes.

Dans le contexte de la finance à impact, les implications sont directes. Un emprunteur ayant remboursé plusieurs cycles de microcrédit *on-chain** via une plateforme comme **EthicHub** peut constituer, transaction après transaction, un historique de crédit portable sous forme d'attestations vérifiables* - présentable à n'importe quel futur prêteur, sans dépendre d'une institution centralisée qui en serait le dépositaire exclusif. Une organisation locale ayant reçu une attestation vérifiable de sa capacité d'exécution peut la présenter à un fonds d'impact ou à un mécanisme de finance mixte sans soumettre un nouveau dossier complet à chaque bailleur. Un porteur de projet peut prouver la réalité de son ancrage territorial et de ses partenariats locaux sans transmettre l'ensemble de ses données opérationnelles à une plateforme centralisée.

Ces applications restent à ce stade largement expérimentales. Le passage à l'échelle du modèle SSI dans des contextes de financement à impact se heurte à des

³⁴¹ Banque mondiale - Initiative ID4D. (2021). *Identification for Development (ID4D) Global Dataset*.

<https://id4d.worldbank.org/global-dataset>

³⁴² DID, Decentralized Identifiers
<https://www.w3.org/TR/did-core>

³⁴³ World Wide Web Consortium. (2022). *Verifiable Credentials Data Model v1.1*. W3C Recommendation.
<https://www.w3.org/TR/vc-data-model/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

conditions d'infrastructure non triviales - connectivité, équipement, accompagnement - et à une question de gouvernance plus fondamentale : qui émet les attestations vérifiables*, selon quels critères, avec quelle responsabilité en cas de litige ? La valeur d'un DID dans un circuit financier dépend entièrement de la confiance que les contreparties accordent à ses émetteurs - ce qui ne fait que déplacer la question de la confiance, sans la supprimer. Quelques déploiements opérationnels documentent néanmoins des cas d'usage réels. En Inde, **Algorand** a relié son infrastructure de *wallet* de garde au registre national d'identité numérique DigiLocker, permettant à des milliers d'emprunteuses rurales d'accéder pour la première fois à un financement formel *via* un historique de crédit *on-chain** construit à partir de leurs justificatifs d'identité vérifiés³⁴⁴. **Jia**, actif au Kenya et aux Philippines, construit pour les PME locales une identité financière *on-chain** fondée sur la transparence totale de l'utilisation des fonds et des taux de remboursement, substituant la réputation vérifiable au collatéral physique comme garantie d'accès au crédit - traduisant concrètement la promesse des DID dans des contextes à forte informalité³⁴⁵.

2.3.2.2 Le défi de la standardisation et de l'interopérabilité mondiale

Si la promesse architecturale des identifiants décentralisés est réelle, son utilité dans les circuits financiers dépend d'une condition que la technologie seule ne peut remplir : la standardisation. Un DID émis par un protocole n'est reconnu par un bailleur de fonds que si ce dernier a préalablement accepté de lui accorder une valeur - ce qui

suppose un accord sur les formats, les méthodologies de vérification et les niveaux de confiance entre tous les acteurs d'un écosystème donné. En l'absence de tels accords, la prolifération de systèmes d'identité décentralisés incompatibles reproduit, sous une forme technologiquement sophistiquée, la fragmentation des registres centralisés qu'elle prétend corriger. La **Decentralized Identity Foundation**³⁴⁶ (DIF) travaille à prévenir cet écueil en développant des bibliothèques *open source*³⁴⁷ et des résolveurs* universels d'identité³⁴⁸ permettant à des systèmes hétérogènes de s'interpréter mutuellement, posant ainsi les bases techniques d'une interopérabilité à l'échelle mondiale.

À l'échelle des personnes morales, le standard d'identifiant juridique vérifiable (*verifiable Legal Entity Identifier*, vLEI), piloté par la *Global Legal Entity Identifier Foundation* (GLEIF)³⁴⁹, constitue l'effort de standardisation le plus avancé. Le vLEI combine cryptographiquement trois sources d'identité - l'identité de l'entité représentée par son code LEI, l'identité personnelle d'un individu, et le rôle officiel que cet individu exerce au sein de l'organisation - permettant une vérification instantanée et automatisée dans tout type d'interaction numérique, de la signature de rapports réglementaires à l'autorisation de paiements et à la diligence raisonnable dans les chaînes d'approvisionnement. Dans le contexte de la finance à impact, cette infrastructure est particulièrement pertinente pour les petites organisations locales qui doivent aujourd'hui

³⁴⁴ Algorand Foundation, 2025, <https://www.prnewswire.com/news-releases/thousands-of-first-time-women-borrowers-in-india-gain-access-to-formal-finance-through-blockchain-based-credit-scoring-302441299.html>

³⁴⁵ Jia, 2025, <https://www.thisdaylive.com/2025/01/01/blockchain-based-microcredit-promises-to-transform-financial-inclusion-in-africa/>

³⁴⁶ <https://identity.foundation/>

³⁴⁷ Universal Resolver implementation and drivers <https://github.com/decentralized-identity/universal-resolver/>

³⁴⁸ Le Résolveur universel résout les Identifiants Décentralisés (Decentralized Identifiers, DID) selon de nombreuses méthodes DID différentes, en s'appuyant sur les spécifications W3C DID Core 1.0 et DID Resolution. Il constitue un élément de travail du groupe de travail Identifiants & Découverte de la DIF (Decentralized Identity Foundation) <https://resolver.identity.foundation/>

³⁴⁹ Global Legal Entity Identifier Foundation (GLEIF). (2020–2026). *The verifiable LEI (vLEI)*. <https://www.gleif.org/en/organizational-identity/lei-vlei/the-verifiable-lei-vlei> ; documentation technique complète :

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

répéter les mêmes processus de *due diligence* auprès de chaque bailleur, absorbant une part significative de leurs ressources opérationnelles en frais d'audit et de reporting. Le potentiel du vLEI pour réduire ces frictions dans le financement des petites et moyennes entreprises a été documenté lors du premier hackathon mondial vLEI organisé par GLEIF en 2025, dont les équipes lauréates ont démontré des applications directes à l'accès au crédit agricole en Afrique et en Asie³⁵⁰.

Dans le domaine des preuves d'impact, une évolution analogue s'observe. **Hypercerts** V2 adopte l'ATProtocol hors chaîne combiné à l'*Ethereum Attestation Service* (EAS) comme infrastructure d'attestation, avec des identifiants *cross-apps* permettant à n'importe quel registre d'impact (carbone, éducation, santé, science) de se brancher sur la même couche de certification sans convertir ni recertifier³⁵¹. Pour les crédits de biodiversité et de carbone, **Regen Network** affronte une décision d'architecture dont l'enjeu est précisément l'interopérabilité mondiale : rester sur Cosmos SDK ou migrer vers un environnement EVM déterminera si les *ecocredits* certifiés sur **Regen Network** sont directement utilisables par des acheteurs opérant sur Ethereum, Polygon ou **Celo**, ou s'ils nécessiteront des passerelles coûteuses et fragilisant la chaîne de preuve³⁵². **Mento Labs** a résolu une version de ce problème pour ses *stablecoins* en adoptant explicitement le **Chainlink** Data Standard en mai 2025 pour sécuriser son mécanisme de teneur de marché automatisé (vAMM), et en déployant l'intégration Squid Router pour assurer la transférabilité du cUSD entre chaînes sans perte d'intégrité du mécanisme de réserve³⁵³.

La plateforme **Tadamon** illustre concrètement cette dynamique autour de l'identité numérique dans le contexte de la société civile. Regroupant quelque 5 200 organisations dans 57 pays membres de l'Organisation de la coopération islamique (OCI), la plateforme s'est associée à la Fondation Cardano pour intégrer un portefeuille d'identité décentralisée - le « Tadamon ID ». Chaque organisation locale y crée son identifiant décentralisé et reçoit une attestation vérifiable signée cryptographiquement, qu'elle peut présenter instantanément à différents bailleurs - dont le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et la Banque islamique de développement (BID) - sans soumettre à chaque fois un nouveau dossier de vérification³⁵⁴.

Ce cas illustre à la fois le potentiel du modèle et sa condition de réussite. L'interopérabilité ne se décrète pas techniquement : elle suppose un accord préalable entre institutions concurrentes sur les standards à adopter, une volonté de partager l'infrastructure de vérification plutôt que de la conserver comme avantage compétitif, et une gouvernance du système qui ne reconcentre pas, sous couvert de décentralisation, le pouvoir d'accréditation entre les mains des acteurs les mieux dotés techniquement. Sans ces conditions politiques et institutionnelles, la standardisation des identifiants décentralisés restera un chantier technique sans portée financière réelle.

³⁵⁰ The verifiable LEI (vLEI) <https://www.gleif.org/en/organizational-identity/lei-vlei/the-verifiable-lei-vlei>

³⁵¹ Hypercerts, 2025, <https://docs.hypercerts.org/core-concepts/what-is-hypercerts>

³⁵² Regen Network, 2025, <https://docs.regen.network/modules/ecocredit/>

³⁵³ Mento Labs, 2025, <https://www.mento.org>

³⁵⁴ Fondation Cardano. (2023). *UNDP Tadamon - Case Study*. <https://cardanofoundation.org/case-studies?search=UNDP>

2.3.3 L'hybridation et la double contrainte réglementaire

La troisième contrainte du passage à l'échelle est celle que les acteurs de la ReFi tendent à mentionner le plus tardivement dans leurs roadmaps, et qui se révèle pourtant l'une des plus déterminantes pour l'engagement des capitaux institutionnels : la clarté du cadre réglementaire. La Finance Régénérative opère à l'intersection de deux univers normatifs dont les cadres juridiques évoluent rapidement mais de façon non coordonnée – la finance durable, structurée par la directive sur le reporting de durabilité des entreprises (CSRD), le règlement sur la publication d'informations en matière de durabilité dans le secteur des services financiers (SFDR) et la taxonomie verte européenne d'un côté ; l'économie des crypto-actifs, encadrée par le règlement sur les marchés de crypto-actifs (MiCA) de l'autre.

À ces deux contraintes normatives s'en ajoute une troisième, plus fondamentale, que la pratique juridique commence seulement à formaliser : la question de la responsabilité des acteurs humains au sein de systèmes conçus pour opérer sans eux. La thèse de l'illégalité (l'idée que les protocoles décentralisés s'établiraient dans un espace hors-droit, gouvernés par leur seul code) se révèle, à l'épreuve de la jurisprudence récente, beaucoup moins robuste que ses promoteurs le supposent. Plusieurs développements illustrent cette évolution. Aux États-Unis, le Fifth Circuit a reconnu, dans l'affaire Tornado Cash, que les *smart contracts* immutables ne constituent pas une « propriété » saisissable au sens du droit des sanctions économiques, dans la mesure où aucun acteur humain n'en détient le contrôle, validant partiellement la thèse aléatiste pour le code autonome. Mais cette même décision a confirmé que les fondateurs du protocole restaient pleinement justiciables du droit pénal : l'illégalité protège le code, non les individus qui l'ont conçu. Dans le domaine des Organisations Autonomes Décentralisées

(DAO*), les juridictions américaines ont progressivement requalifié les DAO non incorporées en sociétés en nom collectif (*general partnerships*), exposant les détenteurs de jetons de gouvernance à une responsabilité solidaire et illimitée, à l'exact opposé de la promesse d'anonymat décentralisé. Ces évolutions convergent vers un diagnostic que formule avec précision le Stanford Cyber Policy Center³⁵⁵ : les cadres juridiques existants se réaffirment systématiquement aux points de contact entre le protocole et les acteurs humains identifiables. La double contrainte réglementaire qui pèse sur la ReFi n'est donc pas seulement celle de la coordination entre MiCA et la taxonomie verte : c'est aussi celle d'une responsabilité juridique individuelle qui suit inévitablement les porteurs de projet, les développeurs de *smart contracts** et les membres actifs de gouvernance, quelle que soit l'architecture formellement décentralisée du protocole qu'ils opèrent.

Les instruments qui se situent à l'intersection de ces deux univers – actifs naturels tokenisés, obligations vertes *on-chain**, structures de finance mixte activées par des *smart contracts** – n'ont pas encore de statut juridique unifié dans aucune juridiction. Cette incertitude n'est pas seulement un frein formel : elle détermine la capacité des gestionnaires institutionnels, soumis à des obligations fiduciaires précises, à s'engager dans des véhicules dont la nature juridique et comptable reste ambiguë. Cette section examine les cadres normatifs existants et émergents, les risques de *regen-washing* qu'une régulation insuffisante laisse prospérer, et les conditions d'une convergence entre la finance traditionnelle et le Web3 qui soit productive plutôt que simplement additive.

³⁵⁵ Sell, F. G. (2026). Balancing Code and Law: Governance and Policy Challenges of Blockchain. Stanford Cyber Policy Center, Program on Governance of Emerging Technologies. Stanford University. <https://fsi.stanford.edu/publication/balancing-code-and-law-governance-and-policy-challenges-blockchain>

[E] Quelle responsabilité civile en termes d'engagements extra-financiers ?

Le droit de la responsabilité civile des entreprises repose sur une distinction fondamentale que les débats publics sur la durabilité mentionnent rarement de façon explicite. L'obligation de moyens contraint le débiteur à déployer des efforts raisonnables et diligents en vue d'un objectif, sans que la non-atteinte de cet objectif engage nécessairement sa responsabilité, dès lors que les moyens ont été effectivement mis en œuvre. L'obligation de résultat, en revanche, lie directement la responsabilité du débiteur à l'atteinte d'un résultat précis et vérifiable : si ce résultat n'est pas produit, la défaillance est présumée, indépendamment des efforts consentis.

Les engagements environnementaux et sociaux des entreprises, comme la neutralité carbone, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le respect des droits humains dans les chaînes d'approvisionnement, relèvent, dans leur immense majorité, de l'obligation de moyens. Une entreprise qui « vise » la neutralité carbone à l'horizon 2050 ou qui « s'engage à » réduire son intensité carbone de 30 % ne s'expose à aucune sanction juridique automatique si l'objectif n'est pas atteint, pour autant qu'elle puisse démontrer avoir déployé des moyens proportionnés. La directive sur le reporting de durabilité des entreprises (CSRD) renforce les exigences de transparence et de vérification externe, mais elle ne modifie pas encore fondamentalement la nature juridique de ces engagements, qui plus est dans un moment de défiance généralisée.

C'est précisément ici que les instruments examinés dans la section 2.1 introduisent une rupture potentielle d'une portée considérable. Un *smart contract** de financement conditionnel qui déclenche automatiquement le versement d'une subvention lorsqu'un seuil de séquestration carbone vérifié *on-chain** est atteint, ou alors qui bloque ce versement dans le cas contraire, n'est pas un dispositif de suivi de moyens : c'est un dispositif de certification de résultat, exécuté sans délibération humaine et inscrit de façon immuable dans un registre public décentralisé.

Si un tel mécanisme devait être reconnu par un juge ou un régulateur comme constitutif d'un engagement de résultat, par exemple dans le cadre d'un contrat d'obligation verte tokenisée ou d'un instrument de type Alpha Bond, la responsabilité de l'émetteur en cas d'écart entre la métrique *on-chain** et l'impact réel serait d'une nature juridiquement distincte de celle qui découle d'un rapport de durabilité déclaratif.

Cette évolution reste à jour fictive, puisqu'aucune juridiction ne reconnaît aujourd'hui explicitement le résultat d'un *smart contract** comme constitutif d'une obligation de résultat au sens du droit civil ou commercial. Mais à mesure que les données *on-chain** seront reconnues comme preuves opposables devant les tribunaux, la frontière entre la déclaration et l'engagement juridiquement contraignant pourrait se déplacer. S'il se confirme, il redéfinirait en profondeur la responsabilité civile des entreprises vis-à-vis de leurs engagements extra-financiers, et conférerait aux instruments de preuve cryptographique une portée juridique qui dépasse largement leur seule utilité technique.

2.3.3.1 De la CSRD aux normes régénératives (AFNOR, TNFD)

Pour opérer un passage à l'échelle, les projets de ReFi doivent naviguer au sein d'une double contrainte réglementaire qui articule les exigences de la finance durable et celles de l'économie numérique.

D'une part, les acteurs financiers doivent s'aligner sur l'évolution du reporting extra-financier européen. La directive sur le reporting de durabilité des entreprises (*Corporate Sustainability Reporting Directive* ou CSRD, directive 2022/2464/UE) et le règlement sur la publication d'informations en matière de durabilité dans le secteur des services financiers (*Sustainable Finance Disclosure Regulation* ou SFDR, règlement 2019/2088/UE) imposent une transparence rigoureuse fondée sur le principe de double matérialité : les entreprises sont tenues de rendre compte non seulement de la façon dont les enjeux de durabilité affectent leur rentabilité, mais également des incidences environnementales et sociales que leurs propres activités exercent sur le monde³⁵⁶. D'autre part, l'infrastructure technologique sous-jacente doit se conformer au règlement européen sur les marchés de crypto-actifs (*Markets in Crypto-Assets* ou MiCA, règlement 2023/1114/UE³⁵⁷), entré en application progressive entre juin et décembre 2024, qui encadre les prestataires de services sur crypto-actifs, impose la publication de livres blancs certifiés et garantit la protection des investisseurs³⁵⁸.

Au-delà de la conformité réglementaire, le secteur est exposé au risque de

regen-washing – phénomène par lequel un acteur adopte un récit ou une communication centrée sur la régénération sans transformer la logique extractive de son modèle économique sous-jacent, reproduisant ainsi les dynamiques de *greenwashing* déjà documentées dans la finance durable classique. Pour limiter ce risque et ancrer les pratiques dans des standards vérifiables, deux cadres de référence émergent. À l'échelle internationale, les recommandations de la *Taskforce on Nature-related Financial Disclosures* (TNFD) publiées en septembre 2023 fournissent un cadre stratégique permettant aux organisations d'identifier, d'évaluer et de publier leurs dépendances et impacts sur les écosystèmes naturels, orientant ainsi les flux financiers vers des résultats mesurables pour la nature³⁵⁹. À l'échelle nationale française, l'AFNOR SPEC 2315 « Économie Régénérative », publiée en décembre 2024, propose un référentiel normatif inédit qui structure les pratiques autour d'une triple création de valeur – restauration écologique, amélioration sociale et création de valeur économique ancrée dans les territoires³⁶⁰.

À un stade plus expérimental, **MultiKnip** / PBTokn participe depuis 2024 au *European Blockchain Regulatory Sandbox*, testant la conformité réglementaire des aides publiques tokenisées (*Physical Backed Tokens*) dans le cadre du programme européen de rénovation énergétique – préfigurant une norme possible pour la tokenisation des subventions publiques à impact³⁶¹. Dans le domaine du marché carbone réglementé, **Initiativ/InEx** se positionne explicitement sur l'ETS2, dont l'entrée en vigueur est prévue en 2027 pour le bâtiment et le transport, construisant dès à présent une infrastructure numérique d'accès à la conformité carbone pour des secteurs qui

³⁵⁶ Commission européenne. (2023). *Normes européennes d'information en matière de durabilité (ESRS) – Règlement délégué (UE) 2023/2772*. Journal officiel de l'Union européenne.
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=OJ:L_202302772

³⁵⁷ Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2023). *Règlement 2023/1114/UE sur les marchés de crypto-actifs (MiCA)*. Journal officiel de l'Union européenne.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32023R1114>

³⁵⁸ *Ibid.*

³⁵⁹ TNFD – *Taskforce on Nature-related Financial Disclosures*. (2023). *Recommendations of the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures*.
<https://tnfd.global/recommendations-of-the-tnfd/>

³⁶⁰ AFNOR SPEC 2315
<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/afnor-spec-2315/aspec-economie-regenerative/fa209119/426267>

³⁶¹ PBTokn, 2025,
<https://www.pbtokn.com/multiknip-ebs.html>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

n'avaient jusqu'ici aucune interface directe avec les marchés de quotas.

2.3.3.2 La nécessaire convergence de la TradFi et de DeFi

L'analyse conduite dans cette partie permet d'identifier plusieurs conditions structurelles dont dépend la convergence entre la finance traditionnelle (TradFi*) et les innovations du Web3 dans un cadre régénératif. Ces conditions sont de nature distincte – technique, institutionnelle, temporelle et de gouvernance – et leur réunion simultanée constitue le défi central du passage à l'échelle.

La première condition est la standardisation des protocoles d'échange de données entre systèmes *on-chain** et *off-chain**. La coexistence de multiples registres distribués, de formats de données hétérogènes et de référentiels d'impact non harmonisés empêche aujourd'hui la lisibilité croisée des instruments. Les standards en cours de déploiement – identifiants décentralisés, attestations vérifiables*, vLEI pour les personnes morales, normes ESRS pour le reporting extra-financier, constituent des briques d'infrastructure communes sans lesquelles les flux de capitaux entre les deux univers restent fragmentés et coûteux à opérer.

Des protocoles ont déjà franchi cette étape de convergence technique. **Celo** a achevé sa migration en *Layer 2* Ethereum en 2025, associant une gouvernance DAO incluant Opera, cLabs et des institutions financières traditionnelles à la sécurité cryptographique de l'écosystème Ethereum : la convergence est ici architecturale, non seulement déclarative³⁶². **Morpho**, protocole de prêt DeFi déployant 960 millions de dollars de prêts garantis en partenariat avec Coinbase, intégrant Société Générale Forge pour des *stablecoins* conformes MiCA et faisant l'objet d'une prise de participation d'Apollo Global

Management (droit d'achat de 9 % de l'offre MORPHO), constitue le cas le plus documenté d'utilisation simultanée d'une infrastructure DeFi par des institutions financières parmi les plus régulées au monde³⁶³.

La deuxième condition est la clarté du cadre réglementaire applicable aux instruments hybrides. Si MiCA³⁶⁴ encadre désormais les crypto-actifs en Europe et si la CSRD impose un reporting de durabilité aux entreprises, les instruments situés à l'intersection – actifs réels tokenisés, obligations vertes *on-chain**, structures de finance mixte activées par des smart contracts* – ne bénéficient pas encore d'un traitement juridique unifié. L'incertitude réglementaire constitue un frein direct à l'engagement des investisseurs institutionnels, dont les mandats exigent une sécurité juridique que les protocoles décentralisés ne peuvent pas seuls garantir. La transformation en 2025 de NovaBay Pharmaceuticals en Stablecoin Development Corporation (SDEV), entité cotée levant 134 millions de dollars pour acquérir 9 % des jetons SKY, illustre la dynamique inverse : une entité TradFi réglementée se restructure pour détenir de la gouvernance dans un protocole Web3, signalant que la convergence peut s'opérer depuis les deux directions³⁶⁵.

La troisième condition est l'alignement des horizons temporels. Les projets de restauration écologique et d'impact social opèrent sur des cycles de dix à vingt ans ; les protocoles de finance décentralisée ont jusqu'ici fonctionné sur des cycles de liquidité beaucoup plus courts, souvent inférieurs à un an. Cette asymétrie structurelle dissuade l'engagement de capitaux patients. Les véhicules d'investissement documentés dans ce rapport – fonds de recherche à impact, structures de finance mixte à tranche de première perte – esquissent des réponses à cette tension, mais leur généralisation

³⁶² Celo, 2025, <https://www.notboring.co/p/celo-building-a-regenerative-economy>

³⁶³ Morpho, 2025, <https://morpho.org/blog/morpho-institutional-grade-lending-infrastructure/>

³⁶⁴ Voir *supra*.

³⁶⁵ Sky, 2025, <https://makerdao.com/da/whitepaper/>

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

suppose que les protocoles Web3 développent des mécanismes de blocage de liquidité (*lock-up*) et de gouvernance à long terme compatibles avec les exigences fiduciaires des gestionnaires institutionnels.

La quatrième condition, peut-être la plus exigeante, est celle de la qualité et de l'intégrité des données d'impact. Comme établi dans la section 2.2.1, la crédibilité de tout instrument financier liant rendement et impact repose sur la fiabilité des données à la source, indépendamment de la robustesse du registre qui les enregistre.

Avant que les capitaux institutionnels puissent s'engager sur la base de preuves d'impact *on-chain**, des flux de données validés, des oracles* décentralisés soumis à audit indépendant et des méthodologies de vérification standardisées doivent être déployés à une échelle suffisante pour que les données produites soient opposables à des tiers – régulateurs, auditeurs, porteurs de parts.

La cinquième condition est enfin celle de la gouvernance des systèmes hybrides eux-mêmes. La convergence TradFi*-Web3 ne se réduit pas à une intégration technique : elle suppose de définir qui contrôle les paramètres des protocoles, selon quelles règles de décision, avec quelles responsabilités en cas de défaillance. Les asymétries de gouvernance documentées en 2.2.3 – concentration du pouvoir de vote, apathie des petits détenteurs, risque de capture par les fondateurs – doivent être adressées par des architectures de gouvernance hybrides qui ne reproduisent ni les défauts ploutocratiques des protocoles actuels ni la rigidité bureaucratique des institutions traditionnelles.

Ces cinq conditions ne sont pas séquentielles mais bien interdépendantes.

La standardisation des données n'a de valeur que si le cadre réglementaire en reconnaît la portée juridique ; l'alignement temporel ne se réalise que si la gouvernance protège les engagements de long terme contre les comportements opportunistes à court terme.

C'est leur traitement conjoint, et non l'avancée isolée de chacune, qui déterminera si la convergence entre les deux univers produit un système financier plus robuste pour l'économie régénérative, ou simplement une nouvelle couche de complexité sur des asymétries inchangées.

Conclusion

Ce rapport est parti d'une question posée depuis plus d'un demi-siècle par la finance responsable, que les nouvelles architectures numériques ont reformulée ainsi : **peut-on remplacer la déclaration d'impact par une preuve cryptographique ?** Non plus une certification accordée *a posteriori* par un tiers exposé aux mêmes conflits d'intérêts que l'évalué, mais une trace générée en continu, ancrée dans des données physiques indépendantes du porteur de projet, et inscrite de façon immuable dans un registre public et immuable parce que décentralisé.

La réponse que ce rapport livre est nuancée, mais elle n'est pas indéterminée.

Oui, les Technologies de registre distribué* (DLTs) permettent structurellement de déplacer la frontière entre déclaration et preuve. La combinaison du suivi numérique continu (*dMRV**), des oracles* connectés à des capteurs physiques et d'algorithmes d'apprentissage automatique, produit un flux de données dont la granularité, la continuité et le coût unitaire représentent une rupture réelle par rapport à l'audit périodique.

L'inscription de ces données sur une blockchain publique transforme une mesure en trace inaltérable, vérifiable par tout acteur sans autorisation préalable. Les *Impact Tokens*, les **Hypercerts** et les **Alpha Bonds** esquissent une classe d'instruments financiers dont la valeur est ancrée dans un résultat vérifié plutôt que dans une promesse, inversant la temporalité du financement et modifiant la structure des incitations des porteurs de projets.

Non, cette architecture n'est pas sans conditions ni sans fragilités propres. La qualité de la preuve dépend de la qualité des données à la source, qu'une blockchain ne peut garantir par elle-même.

Les oracles* réintroduisent au cœur du système décentralisé une dépendance à des interfaces externes dont la fiabilité reste le problème central de la finance environnementale numérique.

La loi de Goodhart s'applique aux marchés de l'impact comme à tous les autres et dès lors qu'un indicateur mesurable déclenche automatiquement une récompense financière, les porteurs de projets optimisent cet indicateur, et pas nécessairement le système vivant qu'il était censé représenter.

L'hyper-financiarisation du vivant, les risques risques d'accaparement foncier, le *green grabbing*, et les asymétries de pouvoir que les protocoles décentralisés tendent à reproduire sous de nouvelles formes complètent ce tableau.

Ce que ce rapport aura, espérons-le, contribué à établir est que le débat pertinent n'oppose ni le Web3 à la finance traditionnelle, ni la technologie à la politique, ni les marchés au vivant. Le débat pertinent porte sur l'architecture des incitations – sur la question de savoir si les outils que nous déployons sont conçus de telle sorte que la transparence soit structurelle et non déclarative, que le pouvoir d'allocation soit distribué et non reconcentré, et que la valeur attribuée aux écosystèmes reflète leur réalité physique et non simplement leur liquidité financière.

Il serait toutefois inexact d'interpréter ces tensions comme des frictions transitoires, appelées à se résorber à mesure que les cadres réglementaires mûrissent ou que les protocoles gagnent en maturité technique. L'analyse comparative des stratégies réglementaires adoptées à ce jour (approches observationnelles, régulation par l'enforcement, cadres proactifs de type MiCA, prohibitions) conduit à un constat que le Stanford Cyber Policy Center formule sans ambiguïté. « *Aucune juridiction n'est parvenue à résoudre la tension fondamentale entre des systèmes décentralisés et permissionnés et des cadres juridiques construits autour*

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

d'intermédiaires identifiables et de contrôles centralisés »³⁶⁶. La régulation gravite inévitablement vers les points d'accès accessibles (bourses, prestataires de services, émetteurs de stablecoins*), laissant les protocoles pleinement décentralisés dans une incertitude juridique qui n'est pas provisoire.

Ce n'est pas un déficit d'ambition réglementaire mais une inadéquation structurelle entre des architectures numériques conçues pour opérer sans acteurs centraux identifiables et des droits bâtis autour de l'hypothèse inverse.

Pour la finance à impact, cette inadéquation a une conséquence pratique directe, en ce que les instruments les plus innovants (Impact Tokens, **Hypercerts**, **Alpha Bonds** activés par *smart contracts**) opèrent précisément dans la zone d'incertitude que les cadres juridiques existants ne couvrent pas encore de façon stable. Le passage de la déclaration d'impact à sa preuve cryptographique ne dépend donc pas seulement de la maturité technique des protocoles de DMRV, ni de la disponibilité de capitaux institutionnels : il requiert une gouvernance juridique adaptative, développée dans un cadre de coordination internationale, *« qui ne cherche ni à imposer les paradigmes de la finance traditionnelle aux architectures décentralisées, ni à laisser ces dernières s'autogouverner par la seule logique du code »*³⁶⁷.

La finance régénérative n'est pas une invention du Web3. Elle est portée, depuis des décennies, par des économistes, des biologistes, des comptables, des agronomes et des praticiens du développement qui ont construit, avant que les blockchains publiques n'existent, les cadres théoriques et les instruments de mesure dont les architectures numériques cherchent aujourd'hui à automatiser et à démocratiser l'application.

Ce que le Web3 apporte à ce mouvement n'est pas un « nouveau paradigme » ou une « révolution », mais un ensemble d'outils, puissants car décentralisés et *open source*, imparfaits bien sûr, mais dont la valeur réelle dépendra moins de leurs propriétés cryptographiques que de la rigueur avec laquelle les sociétés qui les déploient choisiront d'en définir la finalité.

³⁶⁶ Sell, F. G. (2026). Balancing Code and Law: Governance and Policy Challenges of Blockchain. Stanford Cyber Policy Center, Program on Governance of Emerging Technologies. Stanford University.

<https://fsi.stanford.edu/publication/balancing-code-and-law-governance-and-policy-challenges-blockchain>

³⁶⁷ *Ibid.*

IAgraphie

Dans le cadre de la publication du présent rapport, nous avons utilisé NotebookLM de Google (noté NB) et Claude de Anthropic (noté CL). NotebookLM est une application web de recherche et de prise de notes développée par Google Labs. Elle utilise l'intelligence artificielle (IA), en particulier Google Gemini, pour aider à interagir avec une sélection de documents, en l'occurrence, la bibliographie, excepté les livres, et les documents payants. Claude et NotebookLM ont été utilisés ainsi :

	OUI	NON	MIXTE* Hybridation
Idéation		X	
Recherche d'informations et synthèse de l'état de l'art. (NB, CL)			X
Rédaction (CL)			X
Reformulation (CL)			X
Correction orthographique et/ou grammaticale (CL)	X		
Résumé et/ou génération de mots clé (CL)	X		

*Mixte désigne un processus hybride impliquant des interactions plus ou moins nombreuses entre l'outil d'intelligence artificielle (IA) et les auteurs, et dont la version finale a systématiquement été éditée, revue et validée par ces derniers.

Une version publique du NotebookLM « Finance responsable et web 3- Rapport 2026, The Blockchain for Good », basée sur les source indiquées en bibliographie, est accessible sur ce lien : <https://notebooklm.google.com/notebook/71e038f3-b61e-4dd8-b01d-a4497d87792b>

Cette mention d'une IAgraphie est inspirée de « Comment indiquer l'usage de l'IA dans une publication scientifique ? Guide « Citer l'IA » (Version 1, octobre 2024) Document de travail préparé par : Ioana Galleron dans le cadre des travaux de l'Axe n°3 du Consortium-HN ARIANE https://shs.hal.science/halshs-04756419v1/file/Guide_citation_IA.pdf »

Bibliographie

- Abid, A., & Farooq, O. (2026). The illusion of the Web3 decentralization. SSRN. [lien](#)
- Acclassato, D.-H. (2008). Les plafonnements de taux d'intérêt en microfinance servent-ils réellement les pauvres et petits opérateurs économiques ? Mondes en développement, 141(1), 93–109. [lien](#)
- AFNOR. (2024, décembre). AFNOR SPEC 2315 : Économie régénérative – Principes et cadre de mise en œuvre. [lien](#)
- Akerlof, G. (1970). The Market for "Lemons" : Quality Uncertainty and the Market Mechanism », Quarterly Journal of Economics, vol. 84, no 3, p. 488-500 [lien](#)
- Algorand Foundation. (2023). How HesabPay became the first and only interoperable digital payments platform in Afghanistan. [lien](#)
- Al-Breiki, H., Rehman, M. H. U., Salah, K., & Svetinovic, D. (2020). Trustworthy blockchain oracles: review, comparison, and open research challenges. IEEE access, 8, 85675-85685. [lien](#)
- Allen, M. C., Lockwood, J. L., Ibanez, R., et al. (2024). eDNA offers opportunities for improved biodiversity monitoring within forest carbon markets. Communications Earth & Environment, 5, 801. [lien](#)
- Alshater, M. M. (2026). Decentralized physical infrastructure networks (DePIN) tokenomics. Frontiers in Blockchain. [lien](#)
- Arbol & Chainlink. (2021). Businesses and farmers can now hedge weather risk through the Arbol platform and Chainlink data. [lien](#)
- BaFin. (2023, 25 septembre). BaFin imposes fine of EUR 19 million on DWS Investment GmbH. [lien](#)
- Ballesteros-Rodríguez, A., De-Lucio, J., & Sicilia, M.-Á. (2024). Tokenized carbon credits in voluntary carbon markets: The case of KlimaDAO. Frontiers in Blockchain, 7, 1474540. [lien](#)
- Bank for International Settlements. (2021). Annual economic report 2021, Chapter III: CBDCs – an opportunity for the monetary system. BIS.[lien](#)
- Bank of America Private Bank. (2024, juin). 2024 Bank of America Private Bank study of wealthy Americans. Bank of America Corporation. [lien](#)
- Banque mondiale – Initiative ID4D. (2021). Identification for Development (ID4D) Global Dataset. [lien](#)
- Banque mondiale & Banque africaine de développement. (2024). Mission 300 : connecter 300 millions de personnes à l'électricité en Afrique subsaharienne d'ici 2030.[lien](#)
- Becquey, P., Boric, N., & Clerc, P. (2021). Définition de la finance à impact. Finance for Tomorrow. [lien](#)
- Bennett, K. (2025a). The ReFi movement in Web3: Implications for the Global Commons. Frontiers in Blockchain, 8, 1564073. [lien](#)
- Bennett, K. (2025b). An evaluation of the regenerative claims of Web3's ReFi movement. Frontiers in Blockchain, 8, 1564083. [lien](#)
- Big Green. (s.d.). Big Green DAO: Decentralized grantmaking for food justice. [lien](#)
- BIS Innovation Hub & HKMA. (2021). Project Genesis: Prototype digital platforms for green bond tokenisation. [lien](#)
- BIS Innovation Hub, HKMA & UN Climate Change Global Innovation Hub. (2022). Project Genesis 2.0. [lien](#)
- Bizkova, T., & Simon, D. (2024). Exploring the Octant ecosystem part 1: Octant's innovative approach to funding public goods through community governance. Crypto Altruists. [lien](#)
- BlockScience & IXO Foundation. (2022). Alpha bonds: Risk-adjusted bonding curves for financing impact. [lien](#)
- Brussa, G., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2023). Life cycle assessment of a floating offshore wind farm in Italy. Sustainable Production and Consumption, 39, 134–144. [lien](#)
- Buterin, V., Hitzig, Z., & Weyl, E. G. (2019). A flexible design for funding public goods. Management Science, 65(11), 5171–5187. [lien](#)
- Caldarelli, G. (2020). Understanding the blockchain oracle problem: A call for action. Information, 11(11), 509. [lien](#)
- Caldarelli, G. (2025). Can artificial intelligence solve the blockchain oracle problem? Frontiers in Blockchain. [lien](#)
- Capgemini Research Institute. (2025). World wealth report 2025 : Sail the great wealth transfer. [lien](#)
- CARBON Copy. (2024). The Impact DePIN Report 2024. [lien](#)
- CARBON Copy. (2024). The State of ReFi Report 2024. [lien](#)
- CARBON Copy. (2025). The State of ReFi Report 2025. [lien](#)

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

- Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., ... Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), 59–67. [lien](#)
- CarbonPlan. (2022). KlimaDAO and BCT response. [lien](#)
- Catalini, C., & Gans, J. S. (2020). Some simple economics of the blockchain. *Communications of the ACM*, 63(7), 80–90. [lien](#)
- Center for a Digital Future. (2024). IXO Protocol. [lien](#)
- Cerulli Associates. (2024). *Cerulli anticipates \$124 trillion in wealth will transfer through 2048*. [lien](#)
- Chainscore Labs. (s.d.). The hidden cost of quadratic voting: Sybil attacks and the Bitcoin case. [lien](#)
- Chaudhari, A., Karde, P., Randad, V., Limbhore, D., & Lonikar, R. (2025). A blockchain-based carbon credit ecosystem. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 13(11), 2450–2456. [lien](#)
- Cheesman, M. (2020). Self-sovereignty for refugees? The contested horizons of digital identity. *Geopolitics*, 27(1), 134–159. [lien](#)
- Chen, Y., & Bellavitis, C. (2020). Blockchain disruption and decentralized finance: The rise of decentralized business models. *Journal of Business Venturing Insights*, 13, e00151. [lien](#)
- Clark, A., Mihailov, A., & Zargham, M. (2024). Complex systems modeling of community inclusion currencies. *Computational Economics*, 64(2), 1259–1294. [lien](#)
- CoinLaw. (2026, 16 mars). Decentralized insurance statistics 2025: Big numbers, bold moves. [lien](#)
- Colón Cruz, M. D. L. M. (2022). Blockchain island: A critical discourse analysis of the colonial construction of a Puerto Rican crypto utopia. *Media@LSE Working Papers*, N°264. London School of Economics and Political Science. [lien](#)
- Commission européenne. (2023). Normes européennes d'information en matière de durabilité (ESRS) – Règlement délégué (UE) 2023/2772. *Journal officiel de l'Union européenne*. [lien](#)
- Convergence. (2023). The State of Blended Finance 2023. [lien](#)
- Dasgupta, P. (2021). The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review. HM Treasury. [lien](#)
- De Filippi, P., Mannan, M., & Reijers, W. (2020). Blockchain as a confidence machine: The problem of trust & challenges of governance. *Technology in Society*, 62, 101284. [lien](#)
- Del Pilar Miranda, D. (2019, 20 février). Disparities in the cost of microcredit in Latin America. *Georgetown Public Policy Review*. [lien](#)
- Douceur, J. R. (2002). The Sybil attack. Dans *Proceedings of the First International Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2002)*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 2429, 251–260. Springer. [lien](#)
- DL Research & DefiLlama. (2025, décembre). State of DeFi 2025. DL News. [lien](#)
- Duley, C., Gambacorta, L., Garratt, R., & Koo Wilkens, P. (2023). The oracle problem and the future of DeFi. *BIS Bulletin*, 76. [lien](#)
- Dumont, J. (2026). Nous sommes vivants – Livre blanc : Ce que la régénération du vivant change pour les décisions d'entreprise. [lien](#)
- Dyson, K., Nicolau, A. P., Tenneson, K., Francesconi, W., Daniels, A., ... Saah, D. (2024). Coupling remote sensing and eDNA to monitor environmental impact: A pilot to quantify the environmental benefits of sustainable agriculture in the Brazilian Amazon. *PLOS ONE*, 19(2), e0289437. [lien](#)
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone.
- Escobar, A. (2018). *Designs for the pluriverse: Radical interdependence, autonomy, and the making of worlds*. Duke University Press. [lien](#)
- Esposito, M., Tse, T., & Goh, D. (2025). Decentralizing governance: Exploring the dynamics and challenges of digital commons and DAOs. *Frontiers in Blockchain*, 8, 1538227. [lien](#)
- EthicHub. (s.d.). Invest with purpose – How it works. [lien](#)
- Etherisc. (2022, 26 mars). Etherisc becomes founding member of Lemonade Crypto Climate Coalition. [lien](#)
- Etherisc. (2023, 29 mars). Etherisc protects another 7,000 Kenyan farmers as part of the Lemonade Crypto Climate Coalition. [lien](#)
- European Commission – Technopolis Group. (2023, décembre). Study on the potential of blockchain technology and distributed ledger technology for EU climate policies. [lien](#)
- Fawcett, A., & Goulard, S. (2024, 11 janvier). How biodiversity credits can finance nature-positive outcomes. *World Economic Forum*. [lien](#)
- Fernando, A. (2017, 10 octobre). Blockchain for schoolteachers and international development. Medium. [lien](#)
- Fischer, J., Farny, S., Abson, D. J., et al. (2024). Mainstreaming regenerative dynamics for sustainability. *Nature Sustainability*. [lien](#)

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

- Fischer, J., Farny, S., & Folke, C. (2025). Resilience and regeneration for a world in crisis. *Ambio*, 55, 24–34. [lien](#)
- Folke, C., Polasky, S., Rockström, J., Galaz, V., Westley, F., Lamont, M., ... Walker, B. H. (2021). Our future in the Anthropocene biosphere. *Ambio*, 50, 834–869. [lien](#)
- Fondation Cardano. (2023). UNDP Tadamon – Case Study. [lien](#)
- Freeman, R. E. (1984). *Strategic management: A stakeholder approach*. Pitman.
- Friedman, M. (1970, 13 septembre). A Friedman doctrine – The social responsibility of business is to increase its profits. *New York Times Magazine*.
- Fullerton, J. (2015). Regenerative capitalism: How universal principles and patterns will shape our new economy. Capital Institute. [lien](#)
- Gibassier, D. (dir.), Antheaume, N., Carn, C., Cordano, E., Faure, E., Gaschignard, L., Hsissou, H., Pernias, M., & Taïbi, S. (2024). *La comptabilité multi-capitaux : le modèle LIFTS*. Presses des Mines. ISBN 978-2-38542-563-2.
- Gilbert, A. (2025, 9 juillet). Is there a future for DAOs? CoinDesk. [lien](#)
- Gitcoin. (2023). Hypercerts for public goods funding. [lien](#)
- GLEIF – Global Legal Entity Identifier Foundation. (2020–2026). The verifiable LEI (vLEI). [lien](#)
- GLEIF. (2025, novembre). GLEIF announces the global vLEI hackathon winners. [lien](#)
- Goodhart, C. (1975). Problems of monetary management: The U.K. experience. Dans *Papers in Monetary Economics* (Vol. 1). Reserve Bank of Australia.
- Grassroots Economics Foundation. (2024). One year of impacts 2024. [lien](#)
- Greenfield, P. (2023, 18 janvier). Revealed: More than 90% of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows. *The Guardian*. [lien](#)
- Groves, T., & Ledyard, J. (1977). Optimal allocation of public goods: A solution to the "free rider" problem. *Econometrica*, 45(4), 783–809. [lien](#)
- Hahn, T., & Tampe, M. (2021). Strategies for regenerative business. *Strategic Organization*, 19(3), 456–477. [lien](#)
- Haupt, R. (2022, 23 février). The promises and pitfalls of regenerative finance: Towards a critical yet constructive dialogue. Curve Labs. [lien](#)
- Helium Foundation. (2025). State of Helium Q4 2025. Messari. [lien](#)
- HiveOnline. (2025, 16 décembre). HiveOnline completes strategic migration to Hedera to scale financial inclusion for 75,000 users. [lien](#)
- Hoque, M. M., Kummer, T.-F., & Yigitbasioglu, O. (2024). How can blockchain-based lending platforms support microcredit activities in developing countries? *Technological Forecasting and Social Change*, 203, 123400. [lien](#)
- Howson, P., Rosales, A., Jutel, O., Gloerich, I., Llorens, M. G., de Vries, A., et al. (2024). Crypto/space: Computational parasitism, virtual land grabs, and the production of Web3 'exit zones'. *Political Geography*, 115, 1–11. [lien](#)
- Hudon, M., & Sandberg, J. (2013). The ethical crisis in microfinance: Issues, findings, and implications. *Business Ethics Quarterly*, 23(4), 561–589. [lien](#)
- Human Tech. (2025). Human Passport x Bitcoin Grants: Defending GG23 with model-based Sybil detection. [lien](#)
- Initiative des droits et ressources (RRI). (2024). État des droits sur le carbone des peuples autochtones, des communautés locales et des peuples afro-descendants dans les terres et forêts des zones tropicales et subtropicales. [lien](#)
- IXO Foundation. (2024). Impact credits. [lien](#)
- IXO Foundation / Chimple. (2022). The journey to build a new tokenised education economy. [lien](#)
- IXO World. (2024, mai). Mission Control : Launching a decentralised digital registry for clean cooking. Impacts Network – IXO Chronicle. [lien](#)
- Jensen, M. C., & Meckling, W. H. (1976). Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure. *Journal of Financial Economics*, 3(4), 305–360.
- Jensen, M. C. (2002). Value maximization, stakeholder theory, and the corporate objective function. *Journal of Applied Corporate Finance*, 14(3), 8–21. [lien](#)
- Jha, R. (2025). Exploring the governance paradox: An analytical framework for decentralized accountability and impact in climate DAOs. *International Journal of Cryptocurrency Research*, 5(1), 25–43. [lien](#)

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

- Kavanagh, D., & Miscione, G. (2015). *Bitcoin and the blockchain: A coup d'état through digital heterotopia?* Communication présentée à la Critical Management Studies Conference, Leicester. SSRN Working Paper. [lien](#)
- König-Sykorova, M., Olsen, N., Grimm, M., Bertello, H., et al. (2026). *State of finance for nature 2026 : Nature in the red – Powering the trillion dollar nature transition economy*. United Nations Environment Programme. [lien](#)
- Knowledge at Wharton. (2012, 18 juillet). The dark side of microfinance: An industry where the poor play 'cameo roles'. University of Pennsylvania. [lien](#)
- Larcker, D., Seru, A., & Tayan, B. (2024). *2024 survey: Investors, retirement savings & ESG*. Stanford Graduate School of Business ; Hoover Institution ; Rock Center for Corporate Governance. [lien](#)
- Latour, B. (1991). *Nous n'avons jamais été modernes : Essai d'anthropologie symétrique*. La Découverte.
- Lemberg-Pedersen, M., & Haioty, E. (2020). Re-assembling the surveillable refugee body in the era of data-craving. *Citizenship Studies*, 24(5), 607–624. [lien](#)
- Lemonade Foundation. (2022). Fighting world hunger with blockchain. [lien](#)
- Mace, G. M., Meyers, B., Alkemade, R., Biggs, R., Chapin, F. S., Cornell, S. E., ... Woodward, G. (2014). Approaches to defining a planetary boundary for biodiversity. *Global Environmental Change*, 28, 289–297. [lien](#)
- Manoylov, M. K. (2024, 24 juillet). AgriDex completes first agricultural RWA trade on Solana. The Block. [lien](#)
- Marshall, C. (2023, 9 novembre). Kenya's Ogiek people being evicted for carbon credits – Lawyers. BBC News. [lien](#)
- Martinez-Alier, J., Munda, G., & O'Neill, J. (1998). Weak comparability of values as a foundation for ecological economics. *Ecological Economics*, 26(3), 277–286. [lien](#)
- Mercy Corps Ventures. (2025). Pilot insights: Unlocking DeFi-powered credit for microentrepreneurs in Colombia. [lien](#)
- Merlo, A. L. C., Mendonça, D. S., Santos, J., et al. (2025). Blockchain for the carbon market: A literature review. *Discover Environment*, 3, 68. [lien](#)
- Mersland, R., & Strøm, R. Ø. (2010). Microfinance mission drift? *World Development*, 38(1), 28–36. [lien](#)
- Molecule. (2025). ValleyDAO x Imperial College London. [lien](#)
- Morgan Stanley Institute for Sustainable Investing. (2025). *Sustainable signals: Individual investors 2025*. Morgan Stanley. [lien](#)
- Moore, J. W. (2000). Sugar and the expansion of the early modern world-economy: Commodity frontiers, ecological transformation, and industrialization. Review (Fernand Braudel Center). [lien](#)
- Moore, J. W. (2015). *Capitalism in the web of life: Ecology and the accumulation of capital*. Verso.
- Musk, K. (2022, juin). Entretien avec CoinDesk. In Kimbal Musk and his Big Green DAO. CoinDesk. [lien](#)
- Musk, K. (2025, octobre). A Big Green bright future. Medium. [lien](#)
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. [lien](#)
- Nations Unies et al. (2012). Cadre central du Système de comptabilité économique et environnementale, 2012 (SEEA). Nations Unies. [lien](#)
- Nations Unies et al. (2021). System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting (SEEA EA). Commission de statistique des Nations Unies, 52e session. [lien](#)
- Neumüller, A. (2023, 26 avril). *Ethereum's climate impact: A contemporary and historical perspective*. Cambridge Centre for Alternative Finance, Cambridge Judge Business School. [lien](#)
- Nothias, T. (2025). An intellectual history of digital colonialism. *Journal of Communication*. [lien](#)
- OCDE. (2018). *Making blended finance work for the Sustainable Development Goals*. Éditions OCDE. [lien](#)
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2019). Règlement (UE) 2019/2088 sur la publication d'informations en matière de durabilité dans le secteur des services financiers (SFDR). [lien](#)
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2020). Règlement (UE) 2020/852 sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables (Taxonomie verte). [lien](#)
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2023). Règlement 2023/1114/UE sur les marchés de crypto-actifs (MiCA). [lien](#)
- Pérez, R. (2005). Quelques réflexions sur le management responsable, le développement durable et la responsabilité sociale de l'entreprise. *La Revue des Sciences de Gestion : Direction et Gestion*. [numéro de volume et pages à compléter] [lien](#)
- Peters, O. (2019). The ergodicity problem in economics. *Nature Physics*, 15(12), 1216–1221. [lien](#)

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

- PIDG / ElectriFI. (2025, 24 février). Scaling access to clean cooking solutions in Zambia. [lien](#)
- Pollination Foundation, cité par BASE – Energy & Finance. (2025). State of the play of biodiversity credits and habitat banks. [lien](#)
- Probst, B. S., Toetzke, M., Kontoleon, A., Díaz Anadón, L., Minx, J. C., Haya, B. K., Schneider, L., Trotter, P. A., West, T. A. P., Gill-Wiehl, A., & Hoffmann, V. H. (2024). Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects. *Nature Communications*, 15, 9562. [lien](#)
- Protocol Labs & Hypercerts Foundation. (2022). Hypercerts: A new primitive for public goods funding. [lien](#)
- Protocol Labs. (2022). Incentivizing impact beyond carbon. [lien](#)
- Rambaud, A., & Richard, J. (2015). The "Triple Depreciation Line" instead of the "Triple Bottom Line": Towards a genuine integrated reporting. *Critical Perspectives on Accounting*, 33, 92–116. [lien](#)
- Ramírez Rocha, A., Cervantes Zepeda, M., & Bernal Ponce, L. A. (2018). Mediation effect of interest rates on MFIs' financial performance. *Contaduría y Administración*, 64(4). [lien](#)
- Rawson, P., & Borreani, L. (2026). *The green crypto handbook: Blockchain for sustainability professionals*. CRC Press.
- Reed Smith LLP. (2024, 4 juillet). ESG ratings – The challenges of comparison and reliability. [lien](#)
- Reinsurance News. (2024, 5 décembre). Arbol parametric insurance pays out \$20m in under 30 days after Milton's landfall. [lien](#)
- Reyazat, F. (2025). The Impact Search Fund: A regenerative finance approach to transforming community-rooted entrepreneurship. Reyazat Institute Papers. [lien](#)
- Richard, J. (1988). Pour un plan comptable moniste français. Actes du neuvième congrès, mai 1988. hal-00823789.
- Rockefeller Foundation, Global Energy Alliance for People and Planet, Clean Cooking Alliance & Energy Corps. (2026, 18 février). Rockefeller Foundation, Global Energy Alliance, Clean Cooking Alliance, Energy Corps to scale modern cooking technologies in Africa. PR Newswire. [lien](#)
- Rocky Mountain Institute. (2023). How to build a trusted voluntary carbon market. RMI. [lien](#)
- Rosenberg, R. (2007). CGAP reflections on the Compartamos initial public offering: A case study on microfinance interest rates and profits. CGAP Focus Note. [lien](#)
- Rosenberg, R., Gaul, S., Ford, W., & Tomilova, O. (2008). Variations in microcredit interest rates. CGAP Brief. [lien](#)
- Ruddick, W. (2023). Commitment pooling. *International Journal of Community Currency Research*, 27. [lien](#)
- Samuelson, P. A. (1954). The pure theory of public expenditure. *Review of Economics and Statistics*, 36(4), 387–389. [lien](#)
- Sanford, C. (2017). *The regenerative business: Redesign work, cultivate human potential, achieve extraordinary outcomes*. Nicholas Brealey Publishing.
- Schneider, L. (2009). Assessing the additionality of CDM projects: Practical experiences and lessons learned. *Climate Policy*, 9(3), 242–254. [lien](#)
- Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). The energy consumption of blockchain technology: Beyond myth. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), 599–608. [lien](#)
- Seidler, P., Kolling, P., & Hampshire, M. (2016). *terraO – Can an augmented forest own and utilise itself?* White paper, Universität der Künste Berlin. [lien](#)
- Sell, F. G. (2026). Balancing code and law: Governance and policy challenges of blockchain. Stanford Cyber Policy Center, Program on Governance of Emerging Technologies. Stanford University. [lien](#)
- Skene, K. R. (2018). Circles, spirals, pyramids and cubes: Why the circular economy cannot work. *Sustainability Science*, 13, 479–492. [lien](#)
- Snapshot Labs, cité dans DAOtimes. (2025). Snapshot DAO tool report for 2025. [lien](#)
- Solana / The Defiant. (2025, 8 septembre). Solana-based AgriDex marks \$9M in stablecoin trades across African markets. The Defiant. [lien](#)
- Stengers, I. (2005). La proposition cosmopolitique. Dans J. Lolive & O. Soubeyran (dir.), *L'émergence des cosmopolitiques* (p. 45–68). La Découverte.
- South Pole, IXO Foundation & Gold Standard. (2018). South Pole, ixo Foundation, Gold Standard develop blockchain app for carbon credits. [lien](#)
- Strathern, M. (1997). 'Improving ratings': Audit in the British University System. *European Review*, 5(3), 305–321. [lien](#)
- Sustainability Atlas. (2026). Trend analysis: Soil carbon MRV & incentives. [lien](#)
- The Nature Conservancy. (2024). TNC View: Biodiversity credits. [lien](#)

| FINANCE RESPONSABLE ET WEB 3

- TNFD – Taskforce on Nature-related Financial Disclosures. (2023). Recommendations of the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures. [lien](#)
- UNICEF Venture Fund. (s.d.). AGUA: Revolutionizing global collaboration for funding transparency. [lien](#)
- Uzsocki, D., & Guerdat, P. (2019). Impact tokens: A blockchain-based solution for impact investing. International Institute for Sustainable Development (IISD). [lien](#)
- Voill, M. (Réalisateur). (2024). Neutralité carbone, le grand mensonge [Film documentaire]. ARTE.tv.
- Wade Smith, A. (2025). *Ecological institutions: Protocols to grow autonomous and convivial ecological actors*. Regen Foundation. [lien](#)
- Wood, G. (2014). Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger. Ethereum Project Yellow Paper. [lien](#)
- World Economic Forum. (2026). 50 investible opportunities for a new nature economy. [lien](#)
- World Economic Forum & Accenture. (2025, mai). Asset tokenization in financial markets: The next generation of value exchange. [lien](#)
- World Wide Web Consortium. (2022, 19 juillet). Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0 – W3C Recommendation. [lien](#)
- World Wide Web Consortium. (2022). Verifiable Credentials Data Model v1.1 – W3C Recommendation. [lien](#)
- Wu, Y., et al. (2026). Environmental DNA (eDNA) technology in biodiversity and ecosystem health research: Advances and prospects. *Ecology and Evolution*, 16, e72891. [lien](#)
- Wunder, S., et al. (2025). Biodiversity credits: An overview of the current state, future opportunities, and potential pitfalls. *Business Strategy and the Environment*. [lien](#)

Finance responsable et Web3

CAHIER N°2 | 2026

7 300 milliards de dollars ont été investis dans des activités nuisibles à la nature en 2023, et 200 milliards dans des solutions qui la préservent. Après un demi-siècle de réformes, le déséquilibre reste entier. Est-ce un problème de risque, que de meilleurs modèles résoudraient ? Ou un problème de confiance, que des preuves pourraient restaurer ?

Qu'est-ce qui distingue une déclaration d'impact d'une preuve inscrite sur une blockchain publique, vérifiable par tous ? La Finance décentralisée (DeFi) s'est-elle emparée de la question de l'impact ? La tokenisation d'un écosystème naturel en fait-elle un bien commun mieux protégé, ou un actif spéculatif d'autant plus exposé ?

Voilà quelques-unes des questions que ce rapport s'attache à poser, et, dans la mesure du possible, à documenter.

**BLOCKCHAIN
FOR
GOOD** 

TheBlockchainforGood.org