

THÉORIE DE L'ÉCONOMIE

HOMÉOSTATIQUE

Cadre de référence méthodologique et conceptuel pour une viabilité
macroéconomique dans un monde biophysiquement fini

Working Paper — Version 1.0 — Avril 2026

Version de travail soumise à discussion scientifique

Benjamin Albouy -Ex naturae¹

Résumé (FR)

Ce working paper développe le cadre analytique de l'Économie Homéostatique (EH), une proposition théorique visant à **traiter la viabilité macroéconomique à long terme comme un problème structurellement distinct de l'optimisation**. Le cadre repose sur cinq axiomes fondateurs (finitude biophysique et non-substituabilité, primauté des trajectoires, nécessité d'une médiation macroéconomique, performativité des dispositifs de mesure, rôle structurant de la monnaie) et trois hypothèses testables (mesurabilité des indicateurs exo-économiques, efficacité régulatrice des boucles de rétroaction monétaires, compatibilité socio-politique minimale). L'architecture distingue une exo-économie biophysique (EXEC) et une endo-économie socio-économique (ENEC), couplées par un indicateur synthétique — l'Indicateur d'Équilibre Dynamique (IED) — qui conditionne directement quatre mécanismes monétaires : la monnaie ex naturae (création), l'écodotation (distribution), les Projets Régénératifs (circulation) et la fonte (destruction). Le working paper propose un cadre de formalisation des propriétés dynamiques attendues, formule des conjectures structurelles explicites, explicite les conditions institutionnelles de gouvernance et les limites

¹ L'auteur remercie Stéphane Hairy, et les membres de l'ONG Ex naturae, avec qui le cadre conceptuel de l'Économie Homéostatique a été co-élaboré, pour les échanges intellectuels fondateurs dont ce working paper est issu.

méthodologiques, et présente un programme de trente-et-un problèmes de recherche ouverts organisés en sept catégories.

Mots-clés : économie homéostatique, viabilité macroéconomique, couplage biophysique, monnaie ex naturae, indicateur d'équilibre dynamique, soutenabilité forte, boucles de rétroaction, zone de viabilité

Classification JEL : B41 · E40 · E50 · Q01 · Q57

Abstract (EN)

This working paper develops the analytical framework of Homeostatic Economics (HE), a theoretical proposal addressing long-term macroeconomic viability as a problem structurally distinct from optimization. The framework rests on five founding axioms (biophysical finitude and non-substitutability, primacy of trajectories, necessity of macroeconomic mediation, performativity of measurement devices, structural role of money) and three testable hypotheses (measurability of exo-economic indicators, regulatory effectiveness of monetary feedback loops, minimal socio-political compatibility). The architecture distinguishes a biophysical exo-economy (EXEC) from a socio-economic endo-economy (ENEC), coupled through a synthetic indicator — the Dynamic Equilibrium Indicator (IED) — which directly conditions four monetary mechanisms: ex naturae money (creation), ecodotation (distribution), Regenerative Projects (circulation), and demurrage (destruction). The working paper proposes a formalization framework for the expected dynamic properties, states explicit structural conjectures, specifies institutional governance conditions and methodological limits, and presents a research agenda of thirty-one open problems organized into seven categories.

Keywords: homeostatic economics, macroeconomic viability, biophysical coupling, ex naturae money, dynamic equilibrium indicator, strong sustainability, feedback loops, viability zone.

Liste des figures

N° WP	Titre	Section	Description
Figure 1	Schéma d'interdépendance des axiomes de l'Économie Homéostatique.	Section 2	Illustration des relations structurantes entre les cinq axiomes (A1–A5)
Figure 2	Architecture logique du cadre : distinction entre axiomes et hypothèses.	Section 2	Architecture logique du cadre : distinction entre axiomes et hypothèses. Le schéma distingue deux niveaux conceptuels. Les axiomes (A1–A5) et les hypothèses structurantes (H1–H3).
Figure 3	Cartographie des tensions internes et limites conditionnelles de l'axiomatique EH.	Section 2	Zones principales de tension identifiées explicitation et traitement comme objets de recherche ouverts.
Figure 4	Schéma EH — homéostasie (plancher/plafond)	Section 3	Corridor de viabilité entre plancher social et plafond environnemental avec boucles de rétroaction stabilisatrices
Figure 5	Représentation synthétique des flux entre les grandes sphères biophysiques	Section 3	Flux biophysiques entre sphères naturelles et anthroposphère, flux entrants/sortants, boucles de rétroaction
Figure 6	Interaction des indicateurs avec l'endo-économie	Section 3	Rôle régulateur des trois indicateurs (IBD, IEE, IRNR) sur les règles de création, distribution et destruction monétaires
Figure 7	Deux mécanismes de création monétaire	Section 4	Articulation écodotation (création primaire) / Projets Régénératifs (création secondaire), tous deux soumis à la fonte
Figure 8	Processus de mise en place d'un PR	Section 4	Étapes de soumission, certification, réalisation, validation et remémoration conditionnelle

Figure 9	Mécanisme de prêt-crédit comparé à l'EH	Section 4	Circuit comparatif entre crédit bancaire conventionnel et création monétaire dans l'EH
Figure 10	Monnaie fondante dans le temps	Section 4	Propriété caractéristique de la monnaie fondante : forte progression initiale du solde, suivie d'une stabilisation progressive autour d'un plateau.
Figure 11	Équilibre statique vs régime de viabilité dynamique	Section 5	Distinction entre point d'équilibre fixe (optimisation) et zone de viabilité homéostatique (intervalle résilient)
Figure 12	Corridor de viabilité, noyau de viabilité et régimes de trajectoire dans l'espace (M, IED).	Section 5	Représentation schématique du corridor de viabilité K, du noyau de viabilité Viab(K), de la zone de sécurité Z_sat et des régimes de trajectoire.
Figure 13	interaction des trois indicateurs exo-économiques (IBD, IEE, IRNR) avec l'IED	Section 6	Structuration du signal, l'IED illustre l'interdépendance systémiques entre biodiversité, empreinte écologique et consommation de ressources non renouvelables.

Table des matières

Résumé (FR)	1
Abstract (EN)	2
Liste des figures	3
1 — Introduction : le problème de la viabilité macroéconomique	7
1.1 Un problème mal posé : l'environnement comme contrainte périphérique.....	7
2 — Fondements axiomatiques de l'Économie Homéostatique	13
2.1 — La nécessité d'une axiomatique explicite.....	13
2.2 — Les cinq axiomes fondateurs : formulation, portée et conséquences architecturales...14	
2.3 — La distinction axiomes / hypothèses : nature et enjeu.....	23
2.4 — Tensions internes et limites de l'axiomatique.....	25
3 — Architecture analytique de l'Économie Homéostatique	28
3.1 — Motivation : la distinction exo-économie / endo-économie comme nécessité analytique.....	28
3.2 — Description fonctionnelle : l'exo-économie, l'endo-économie et le corridor de viabilité. 29	
3.3 — Interactions systémiques : le couplage comme mécanisme d'autorégulation.....	32
3.4 — Implications comportementales et limites de l'architecture.....	35
4 — Mécanismes monétaires de l'Économie Homéostatique	37
4.1 — Monnaie ex naturae : architecture monétaire de base.....	37
4.2 — Création primaire : l'écodotation.....	40
4.3 — Création secondaire : les Projets Régénératifs (PR).....	43
4.4 — Destruction et fonte.....	46
5 — Propriétés dynamiques du système	49
5.1 — Motivation : pourquoi l'équilibre ne peut être un point fixe.....	49
5.2 — Description : régimes de trajectoire, paramètres sensibles et statut des formalisations. 50	
5.3 — Interactions : comment les mécanismes monétaires produisent ou perturbent les propriétés dynamiques.....	54
5.4 — Implications : irréversibilités possibles et insuffisance analytique de l'absence d'un modèle complet.....	56
5.5 — Formalisation du système dynamique : cadre de viabilité et conjectures structurelles... 58	
6 — L'Indicateur d'Équilibre Dynamique (IED) : construction et rôle systémique	79
6.1 — Motivation : corriger la cécité structurelle des indicateurs dominants.....	79
6.2 — Description fonctionnelle : construction de l'IED.....	80
6.3 — Interactions systémiques : le rôle de l'IED dans l'architecture EH.....	84
6.4 — Implications comportementales et limites de l'IED.....	85
6.5 — Traitement analytique du risque de manipulation indicielle : conditions	

d'incitation-compatibilité de l'IED.....	87
7 — Implications institutionnelles et de gouvernance.....	93
7.1 — Questions institutionnelles posées par les mécanismes : mesure, indexation, fonte....	94
7.2 — Architecture de gouvernance monétaire : questions ouvertes sur les options, la légitimité et la résilience.....	95
7.3 — Statut de la décentralisation et de la participation.....	96
7.4 — Zones d'incertitude : capture, performativité, articulation avec les institutions existantes.....	96
8 — Limites méthodologiques.....	98
8.1 — Ce qui n'est pas formalisé.....	98
8.2 — Ce qui reste hypothétique : fragilités de H1, H2, H3.....	99
8.3 — Ce qui nécessite une validation empirique.....	101
8.4 — Les cinq conditions d'invalidation du cadre.....	102
9 — Problèmes de recherche ouverts.....	103
9.1 — Problèmes théoriques.....	105
9.2 — Problèmes empiriques.....	106
9.3 — Problèmes mathématiques.....	108
9.4 — Problèmes institutionnels.....	109
9.5 — Problèmes de modélisation et de simulation.....	110
9.6 — Formalisation dynamique.....	112
9.7 — Gouvernance des indicateurs.....	114
Section 10 — Conclusion : de l'optimisation à la viabilité.....	115
10.1 — Le déplacement théorique central.....	115
10.2 — Ce que l'EH établit et ce qu'elle laisse ouvert.....	116
10.3 — Ouverture scientifique.....	117
Métadonnées finales.....	118
Dimensions du système.....	120
Variables du système.....	120
Fonctions du cadre dynamique.....	121
Paramètres institutionnels.....	121
Ensembles et seuils de viabilité.....	121
Annexe B — Notions de base de la théorie de la viabilité et des systèmes dynamiques utilisées dans ce document.....	123
1. Systèmes dynamiques et espace d'état.....	123
2. Ensemble de contraintes et viabilité.....	124
3. Noyau de viabilité.....	124
4. Rétroaction et régulation.....	125
5. Oscillations et régimes dynamiques.....	126
6. Homéostasie.....	126
7. Références principales.....	127

1 — Introduction : le problème de la viabilité macroéconomique

1.1 Un problème mal posé : l'environnement comme contrainte périphérique

Les systèmes économiques contemporains sont construits autour d'une grammaire analytique centrée sur l'optimisation : maximisation de la production, de l'utilité ou de la richesse ; minimisation des coûts ; allocation efficiente des ressources sous contraintes (Robbins, 1932 ; Samuelson, 1947)². Dans ce cadre, la question écologique apparaît systématiquement comme un problème de second ordre — une externalité à internaliser par des mécanismes de prix (Pigou, 1920 ; Coase, 1960)³, un paramètre à corriger à la marge, une limite à repousser par l'innovation technologique. L'environnement y est traité comme un contexte externe au système économique (Georgescu-Roegen, 1971 ; Daly, 1996)⁴, susceptible de subir des ajustements correctifs sans que la structure fondamentale des mécanismes de coordination soit remise en question.

Cette architecture analytique repose sur une hypothèse implicite : la finitude biophysique constitue une contrainte de second ordre, dont les effets peuvent être gérés par des ajustements microéconomiques, des marchés de droits à polluer ou des politiques de croissance verte (Nordhaus, 2013 ; Raworth, 2017)⁵. Or, les dynamiques observées révèlent l'insuffisance structurelle de cette hypothèse. L'accumulation des pressions biophysiques — déplétion des ressources non renouvelables, dégradation des écosystèmes, effondrement de la biodiversité, déstabilisation des cycles biogéochimiques (Rockström et al., 2009 ; Steffen et al., 2015)⁶ — ne peut être interprétée comme un ensemble de dysfonctionnements isolés et corrigibles à la

² Robbins, L. (1932). *An essay on the nature and significance of economic science*. Macmillan. ; Samuelson, P. A. (1947). *Foundations of economic analysis*. Harvard University Press.

³ Pigou, A. C. (1920). *The economics of welfare*. Macmillan. ; Coase, R. H. (1960). The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, 3, 1–44.

⁴ Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press. ; Daly, H. E. (1996). *Beyond growth: The economics of sustainable development*. Beacon Press.

⁵ Nordhaus, W. D. (2013). *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*. Yale University Press. ; Raworth, K. (2017). *Doughnut economics: Seven ways to think like a 21st-century economist*. Chelsea Green Publishing.

⁶ Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a> ; Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., ... Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

marge. Elle manifeste un désajustement plus profond entre l'architecture des systèmes économiques et les conditions d'habitabilité de la planète.

1.2 La lacune fondamentale : l'absence de couplage structurel

Le problème central que l'Économie Homéostatique (EH) identifie n'est pas l'insuffisance des politiques environnementales ni le manque d'instruments de régulation. Il est d'ordre architectural. Les économies contemporaines fonctionnent comme des systèmes dont la dynamique interne — monétaire, financière, productive — est structurellement dissociée des contraintes biophysiques qui définissent pourtant le domaine d'existence de toute activité économique durable (Meadows et al., 1972 ; Rockström et al., 2009)⁷. Cette dissociation est endogène : elle n'est pas le résultat d'imperfections de marché corrigibles, mais la conséquence logique d'une architecture dans laquelle les règles de création monétaire, d'allocation des investissements et de mesure de la performance sont organisées autour de la croissance matérielle continue, sans mécanismes de rétroaction reliant en continu l'état du système biophysique et le fonctionnement économique (Hirsch, 1976 ; Jackson, 2009)⁸.

Les approches existantes répondent à cette lacune par deux voies principales. La première consiste à intégrer les contraintes écologiques sous la forme d'optimisations sous contrainte : maximisation du bien-être sous plafonds d'émissions, arbitrages entre croissance et dommages environnementaux, correction des prix par des taxes ou des marchés de droits (Nordhaus, 1992 ; 2018)⁹. La seconde consiste à traiter les dimensions écologiques comme des externalités périphériques, corrigibles ex post sans restructuration des mécanismes centraux de coordination. Ces deux approches partagent une même limite fondamentale : elles supposent que l'économie peut être analysée comme un système autonome, et que les corrections biophysiques peuvent y être appliquées à la marge sans reconfigurer la logique d'ensemble. L'EH pose que cette hypothèse est analytiquement insuffisante dès lors que les contraintes

⁷ Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. New York: Universe Books. ; Rockström, J., et al. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475.

⁸ Hirsch, F. (1976). *Social Limits to Growth*. Cambridge, MA: Harvard University Press. ; Jackson, T. (2009). *Prosperity without Growth: Economics for a Finite Planet*. London: Earthscan.

⁹ Nordhaus, W. D. (1992). An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, 258(5086), 1315–1319. ; Nordhaus, W. D. (2018). Climate change: The ultimate challenge for economics. *American Economic Review*, 108(6), 1517–1566.

biophysiques pertinentes sont non substituables, potentiellement irréversibles (Neumayer, 2003)¹⁰, susceptibles d'engendrer des basculements systémiques à l'échelle planétaire et actives à des échelles temporelles et spatiales qui excèdent celles des ajustements microéconomiques (Holling, 2001 ; Sterman, 2002)¹¹. Cette perspective s'inscrit dans le prolongement des travaux de Georgescu-Roegen (1971), qui a montré que les processus économiques sont irréductiblement inscrits dans les lois thermodynamiques et soumis à des irréversibilités entropiques incompatibles avec une représentation purement circulaire ou substituable de la production¹².

1.3 Le déplacement conceptuel de l'EH : de l'optimisation à la viabilité

L'Économie Homéostatique propose un déplacement conceptuel : substituer à la question de l'optimisation sous contrainte celle de la viabilité dynamique. La viabilité est définie comme la capacité d'un système socio-économique à demeurer fonctionnel dans le temps long, en maintenant simultanément des conditions sociales minimales, une compatibilité avec des contraintes écologiques structurantes, et une cohérence macroéconomique interne. Le domaine d'existence du système économique est ainsi borné par un plancher social et un plafond environnemental (Raworth, 2017 ; Rockström et al., 2009)¹³ : la question analytique centrale n'est plus celle d'un optimum à atteindre, mais celle d'un corridor à maintenir.

Quelles stratégies économiques permettraient d'assurer, pour les générations présentes et futures, une prospérité humaine compatible avec l'équilibre biophysique de la planète ?

¹⁰ Neumayer, E. (2003). *Weak versus strong sustainability: Exploring the limits of two opposing paradigms*. Cheltenham: Edward Elgar.

¹¹ Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4(5), 390–405. ; Sterman, J. D. (2002). All models are wrong: Reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, 18(4), 501–531.

¹² Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

¹³ Raworth, K. (2017). *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*. London: Random House. ; Rockström, J., et al. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475.

Ce déplacement entraîne deux conséquences architecturales immédiates. Premièrement, la soutenabilité ne peut plus être reléguée à un registre correctif externe : elle devient un déterminant structurel du pilotage macroéconomique, intégré au cœur des mécanismes de coordination et non ajouté après coup. Deuxièmement, la stabilité du système ne peut plus reposer principalement sur des régulations discrétionnaires et ponctuelles : elle doit être recherchée par une architecture de boucles de rétroaction capables de relier en continu l'état du système biophysique et les dynamiques économiques. L'EH s'inscrit ainsi dans une logique systémique inspirée des sciences du vivant et de la théorie des systèmes complexes : à l'image des organismes biologiques qui maintiennent leur homéostasie par des rétroactions négatives stabilisatrices (Cannon, 1932 ; Wiener, 1948)¹⁴, une économie viable requiert des mécanismes d'autorégulation conçus pour corriger les déviations sans interventions discrétionnaires permanentes.

L'architecture proposée repose sur un principe de couplage structurel entre deux sphères analytiquement distinctes (Maturana & Varela, 1980)¹⁵. D'une part, une sphère biophysique englobante — l'exo-économie (EXEC) — qui représente les flux de ressources, les pressions sur les écosystèmes et l'état des milieux naturels. D'autre part, une sphère socio-économique — l'endo-économie (ENEC) — qui organise les transactions, les flux monétaires et les décisions des agents. Ce couplage n'est pas un instrument de correction marginale : il constitue la structure de rétroaction par laquelle les contraintes biophysiques influencent directement les règles monétaires et macroéconomiques. La distinction et l'articulation de ces deux domaines font l'objet d'un développement complet en Section 3.

Au cœur de ce couplage se trouve une architecture monétaire spécifique. L'EH introduit une monnaie dite *ex naturae* — émise sans contrepartie de dette et indexée sur l'état biophysique — assortie d'un mécanisme structurel de destruction progressive (la fonte) et de deux canaux de création distincts. Ces mécanismes constituent l'opérateur central du couplage : ils traduisent l'état du système biophysique en règles de création, de distribution et de destruction monétaires, organisant ainsi la rétroaction macroéconomique. Leur description détaillée est présentée en Section 4. Le pilotage de l'ensemble repose sur un Indicateur d'Équilibre Dynamique (IED), construit à partir de trois indicateurs exo-économiques agrégés par moyenne

¹⁴ Cannon, W. B. (1932). *The Wisdom of the Body*. New York: W.W. Norton. ; Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge, MA: MIT Press.

¹⁵ Maturana, H. R., & Varela, F. J. (1980). *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. Dordrecht: Reidel.

géométrique¹⁶. Cet indicateur constitue une représentation opératoire du couplage entre dynamiques biophysiques et dynamiques économiques, dont le rôle systémique et les propriétés de construction sont explicités en Section 6.

Enfin, l'équilibre vers lequel le système tend n'est pas un point fixe stationnaire, mais une zone de viabilité mobile à caractère oscillatoire — une zone de viabilité au voisinage de laquelle les trajectoires peuvent demeurer confinées sous certaines conditions portant sur la dynamique biophysique et sur la fonction de couplage Φ . Le terme « attracteur » est ici utilisé dans un sens métaphorique inspiré des systèmes biologiques, et ne renvoie pas nécessairement à un attracteur au sens strict de la théorie des systèmes dynamiques. La zone de viabilité mobile existe tant que les fluctuations restent contenues dans le corridor défini par le plancher social et le plafond environnemental. Cette propriété dynamique, et les régimes qui en découlent, sont analysés en Section 5.

Dans ce document, l'expression **zone de viabilité mobile** est un terme interprétatif désignant le comportement des trajectoires au voisinage de la zone de sécurité Z_{sat} , sous l'effet de la régulation ; il ne correspond pas à un ensemble mathématique supplémentaire (cf. §5.5). En première approximation, il décrit le fait que les trajectoires évoluent sans violer les contraintes du corridor K au sens de la théorie de la viabilité¹⁷ (Aubin, 1991 ; De Lara & Doyen, 2008 ; Martinet, 2012). L'extension rigoureuse au cas d'un tube de viabilité dépendant de l'état — $K(t)$ — est identifiée comme problème ouvert P-F5. Le qualificatif **oscillatoire** décrit la dynamique des trajectoires à l'intérieur de cette zone, tandis que l'expression **zone homéostatique** renvoie au régime de fonctionnement dans lequel ces oscillations restent compatibles avec les contraintes biophysiques du corridor écologique. La régulation introduit enfin un **mécanisme correcteur dont la propriété d'attractivité est conjecturée (C4)** : tant que les contraintes biophysiques le permettent, la règle de régulation tend à ramener les trajectoires vers l'intérieur de cette zone.

1.4 Objectif et organisation du présent working paper

¹⁶ OECD. (2008). *Handbook on constructing composite indicators*. OECD Publishing.

¹⁷ Aubin, J.-P. (1991). *Viability theory*. Birkhäuser ; De Lara, M., & Doyen, L. (2008). *Sustainable Management of Natural Resources: Mathematical Models and Methods*. Springer. ; Martinet, V. (2012). *Economic Theory and Sustainable Development: What Can We Preserve for Future Generations?* Routledge.

Ce working paper expose l'architecture complète de l'Économie Homéostatique de manière autonome, citable et versionnable. Afin de rendre le cadre accessible à la communauté scientifique, il peut être lu indépendamment des travaux préparatoires antérieurs dont il est issu. Ce document doit être analysé comme une grammaire théorique et une cartographie de problèmes, non comme un article de validation empirique achevé. Il explicite un cadre conceptuel structurant et formel partiellement spécifié, destiné à orienter des contributions disciplinaires multiples — mathématiques, économiques, institutionnelles et empiriques — dans une logique de science ouverte, de discussion réfutable (Popper, 1959)¹⁸ : ses mécanismes, ses propriétés et ses implications sont exposés avec leurs conditions de validité, leurs limites méthodologiques et les questions qu'ils laissent ouvertes (Lakatos, 1978)¹⁹. [Un programme de recherche](#) complémentaire est proposé en appui.

Le document est organisé en dix sections. La Section 2 explicite les fondements axiomatiques du cadre et la distinction entre axiomes posés et hypothèses testables (Friedman, 1953)²⁰. La Section 3 développe l'architecture analytique exo-économie / endo-économie et le principe de couplage structurel. La Section 4 décrit les mécanismes monétaires : monnaie ex naturae (création), écodotation (distribution), projets régénératifs (circulation), fonte et destruction. Dans cette architecture, les mécanismes monétaires ne constituent pas seulement des instruments de politique économique mais des règles institutionnelles structurantes qui façonnent la dynamique du système, rapprochant le problème traité d'un problème de conception de mécanismes dynamiques sous contraintes biophysiques. La Section 5 précise les propriétés dynamiques et les régimes de viabilité. La Section 6 détaille la construction et le rôle de l'IED. La Section 7 explicite les implications institutionnelles et de gouvernance. Les Sections 8 et 9 formalisent, sans minimisation, les limites méthodologiques et les problèmes de recherche ouverts. La Section 10 conclut en situant le déplacement théorique opéré : d'une logique d'optimisation vers une logique de viabilité dynamique.

Le cadre EH prend pour question directrice celle des stratégies économiques compatibles avec une prospérité humaine durable dans les limites biophysiques de la planète. Il n'y répond pas par la proposition d'un modèle économique achevé, mais par l'identification des propriétés

¹⁸ Popper, K. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. London: Routledge.

¹⁹ Lakatos, I. (1978). *The Methodology of Scientific Research Programmes*. Cambridge: Cambridge University Press.

²⁰ Friedman, M. (1953). The methodology of positive economics. In *Essays in Positive Economics*. Chicago: University of Chicago Press.

institutionnelles et dynamiques qu'un tel système devrait satisfaire pour que le noyau de viabilité associé au corridor biophysique et social soit non vide.

Axiomes et Hypothèses de l'Économie Homéostatique - Tableau

Axiomes	Hypothèses
A1 — Finitude non substituable	H1 — Indicateurs mesurables et robustes
A2 — Primauté des trajectoires	H2 — Rétroactions monétaires stabilisatrices
A3 — Médiation macro nécessaire	H3 — Applicabilité institutionnelle durable
A4 — Mesures performatives	
A5 — Monnaie structurante	

Tableau 1 — Synthèse des axiomes et hypothèses de l'Économie Homéostatique.

Les axiomes (A1–A5) définissent les conditions de possibilité du cadre et ne sont pas falsifiables au sens strict ; les hypothèses (H1–H3) prolongent l'architecture dans un registre testable et susceptible d'invalidation empirique.

2 — Fondements axiomatiques de l'Économie Homéostatique

2.1 — La nécessité d'une axiomatique explicite

L'Économie Homéostatique repose sur une démarche scientifique dont l'un des traits distinctifs est l'explicitation de ses propres présupposés fondamentaux. Toute théorie économique mobilise des postulats, mais ceux-ci demeurent fréquemment implicites, incorporés dans les outils analytiques ou dans les hypothèses de comportement sans être soumis à discussion directe (Lawson, 2003 ; Keen, 2011)²¹. Ce choix de l'implicite présente une apparence de solidité — ce qui n'est pas questionné ne peut être contesté — mais il rend le cadre imperméable à la critique structurée et entrave la clarification des désaccords théoriques.

L'EH fait le choix inverse : énoncer explicitement les axiomes à partir desquels son architecture est construite. Ces axiomes sont désignés comme *faibles* : ils ne revendiquent ni universalité ni nécessité absolue (Lakatos, 1978). Ils ne prétendent pas décrire le réel tel qu'il est observé empiriquement, ni fournir des résultats démontrables en eux-mêmes. Leur fonction est de définir les *conditions de possibilité* du raisonnement homéostatique — les principes à partir desquels les concepts, les mécanismes et les hypothèses du cadre peuvent être construits, discutés et mis à l'épreuve. Refuser un ou plusieurs de ces axiomes ne revient pas à invalider l'économie en général, mais à se situer en dehors du périmètre conceptuel spécifique de l'EH (Kuhn, 1962)²². C'est précisément cet espace de contestation délimité qui rend la démarche scientifiquement féconde : la communauté de recherche peut identifier clairement les points d'adhésion, de désaccord ou de déplacement possibles, et la critique peut porter sur des objets précis plutôt que sur des présupposés non formulés.

2.2 — Les cinq axiomes fondateurs : formulation, portée et conséquences architecturales

²¹ Lawson, T. (2003). *Reorienting Economics*. London: Routledge. Keen, S. (2011). *Debunking Economics* (Rev. ed.). London: Zed Books.

²² Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.

Axiome A1 — Finitude biophysique et non-substituabilité des fonctions du vivant

Le premier problème analytique que l'EH doit résoudre est celui du périmètre de validité des contraintes biophysiques. Les cadres dominants traitent les limites écologiques comme des externalités — des perturbations externes corrigibles par des ajustements de prix ou des innovations technologiques — ou comme des ressources substituables par d'autres formes de capital. Cette hypothèse de substituabilité généralisée est précisément ce que A1 exclut : *les systèmes socio-économiques humains sont inscrits dans un environnement biophysique fini, dont certaines fonctions critiques constituent des conditions de possibilité de l'activité économique elle-même et ne peuvent être substituées de manière intégrale (Neumayer, 2003 ; Daly, 1996)²³ par des dispositifs techniques, économiques ou institutionnels. La contrainte biophysique n'est pas conçue comme un coût à internaliser ou un objectif parmi d'autres, mais comme une borne structurelle (Georgescu-Roegen, 1971)²⁴ à l'intérieur de laquelle doivent s'inscrire les dynamiques économiques. Cet axiome fonde la nécessité de représenter explicitement l'état du système biophysique et justifie l'introduction d'une exo-économie mesurée, distincte mais couplée à l'endo-économie.*

A1 ne constitue pas une proposition empirique démontrée mais un choix de cadrage ontologique : il formalise l'hypothèse qu'en situation d'incertitude profonde sur les interdépendances du vivant, la substituabilité intégrale des fonctions critiques ne peut être présumée. Refuser A1 revient à adopter un autre périmètre analytique, sans invalider l'économie en général mais en modifiant le domaine de pertinence du cadre EH. Le contenu opérationnel des fonctions dites « critiques » demeure révisable à mesure que les connaissances scientifiques évoluent.

A1 s'articule directement avec A3 et A5 : en posant la non-substituabilité, il fonde la nécessité d'une médiation macroéconomique explicite (A3) qui ne peut opérer sans un vecteur systémique (A5). Il s'oppose logiquement aux cadres qui postulent un découplage absolu ou une compensation intégrale entre capitaux. Sa conséquence architecturale directe est la nécessité de

²³ Neumayer, E. (2003). *Weak versus strong sustainability: Exploring the limits of two opposing paradigms*. Edward Elgar. ;

²⁴ Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press.

représenter l'exo-économie (EXEC) comme un sous-système distinct, mesurable et régulateur — développée en Section 3.

Axiome A2 — Primauté des trajectoires et non-neutralité de l'inaction

La deuxième difficulté analytique concerne la temporalité. Les approches statiques cherchent un équilibre à atteindre ou à restaurer après perturbation ; elles traitent l'absence de changement comme une option neutre. A2 rompt avec cette convention : *la viabilité d'un système socio-économique ne peut être évaluée à partir d'états statiques ou de configurations ponctuelles, mais doit être appréhendée à travers l'analyse de ses trajectoires dynamiques dans le temps. L'absence de transformation structurelle ne constitue pas une situation neutre : elle correspond à la poursuite de trajectoires héritées dont les dynamiques cumulatives (Meadows et al., 1972)²⁵ peuvent devenir incompatibles avec les conditions d'habitabilité et de résilience de long terme. Cet axiome justifie le recours à des notions d'équilibre dynamique, de corridor de viabilité, de noyau de viabilité et de régimes de trajectoire, en substitution à une conception statique de l'équilibre.*

A2 renforce A1 : la finitude biophysique n'est pas un état statique mais une dynamique cumulative. Il prépare A3 en justifiant que des mécanismes de rétroaction continus — et non des corrections ponctuelles — sont nécessaires. Sa conséquence architecturale est le passage d'une logique de point d'équilibre à une logique de corridor maintenu dans le temps : un régime de trajectoires oscillatoires maintenues au voisinage de la zone de sécurité Z_{sat} à l'intérieur du corridor borné par le plancher social et le plafond environnemental. Les propriétés dynamiques qui en découlent sont développées en Section 5. La distinction EXEC/ENEC issue conjointement de A1 et A2 est développée en Section 3.

Note de cadrage terminologique. L'EXEC (exo-économie) désigne le système biophysique englobant dont $S(t)$ décrit l'état — ses composantes représentent les dimensions mesurées par IBD, IEE et IRNR. L'ENEC (endo-économie) désigne le système socio-économique dont $M(t)$ décrit la variable agrégée centrale. Le couplage structurel entre ces deux systèmes — par lequel l'état de l'EXEC conditionne les règles monétaires de l'ENEC — constitue l'objet analytique

²⁵ Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books.

central du cadre EH. Cette terminologie est maintenue de manière constante dans l'ensemble du document.

Axiome A3 — Nécessité d'une médiation macroéconomique des contraintes biophysiques

Le troisième problème est celui de l'échelle. Les contraintes biophysiques pertinentes pour la viabilité — irréversibilités, seuils, cycles globaux — opèrent à des échelles spatiales et temporelles qui excèdent celles des décisions individuelles. La somme de comportements individuels responsables ne suffit pas à garantir la compatibilité collective avec ces contraintes (Keynes, 1936)²⁶. A3 pose ce problème en termes de médiation nécessaire : *la prise en compte effective des contraintes biophysiques dans l'organisation des activités économiques ne peut être assurée par la seule agrégation des décisions décentralisées des agents. Elle nécessite une médiation explicite à l'échelle macroéconomique, capable de traduire l'état du système biophysique en règles de coordination structurant les trajectoires économiques collectives. Les contraintes biophysiques pertinentes pour la viabilité de long terme se manifestent à des échelles qui excèdent celles des décisions individuelles ou sectorielles ; leur intégration ne peut donc être réduite à des mécanismes microéconomiques d'ajustement.*

A3 dépend de A1 (il y aurait peu à médier si les contraintes étaient substituables) et prépare A5 (la médiation macroéconomique trouve dans la monnaie son vecteur opérationnel). Sa conséquence architecturale directe est la nécessité de règles de coordination indexées sur l'état biophysique — opérées via le couplage entre indicateurs exo-économiques et mécanismes monétaires, objet central des Sections 4 et 6.

Axiome A4 — Caractère construit, partiel et performatif des dispositifs de mesure

La médiation macroéconomique posée par A3 repose sur des indicateurs. A4 pose que ces indicateurs ne sont pas des instruments neutres : *toute médiation macroéconomique des contraintes biophysiques repose sur des dispositifs de mesure construits, nécessairement partiels et dotés d'une performativité qui influence les trajectoires économiques qu'ils contribuent à orienter. Les indicateurs ne constituent pas de simples instruments d'observation du réel, mais des éléments*

²⁶ Keynes, J. M. (1936). *The General Theory of Employment, Interest and Money*. Macmillan.

actifs du cadre de coordination macroéconomique (Callon, 1998 ; Espeland & Sauder, 2007)²⁷. Cette performativité n'est ni un biais accidentel ni un effet secondaire indésirable, mais une propriété structurelle des indicateurs dès lors qu'ils sont intégrés au cœur des mécanismes de coordination. Cet axiome fonde la nécessité de concevoir des dispositifs de mesure révisables, transparents et compatibles avec l'incertitude inhérente aux systèmes biophysiques complexes.

A4 entretient une relation de tension productive avec A3 : la médiation macroéconomique est nécessaire (A3), mais ses vecteurs informationnels sont intrinsèquement faillibles et performatifs (A4). Cette tension ne conduit pas à l'impasse mais impose des contraintes de conception : les indicateurs doivent être révisables, gouvernés et transparents. A4 conditionne directement la construction et la gouvernance de l'IED développées en Section 6, et il constitue le socle analytique de la problématique de la performativité des indicateurs abordée dans les Sections 8 et 9.

Axiome A5 — Rôle structurant de la monnaie dans les trajectoires macroéconomiques

Le cinquième axiome clôt et couronne les quatre précédents en identifiant le vecteur opérationnel de la médiation macroéconomique : *dans une économie monétaire de production, la monnaie ne constitue pas un simple instrument de facilitation des échanges ni un voile neutre (Keynes, 1936 ; Schumpeter, 1911)²⁸. Elle est un dispositif institutionnel structurant dont les modalités de création, de circulation, d'allocation et de destruction influencent directement les trajectoires macroéconomiques (Ingham, 2004 ; Polanyi, 1944 ; Keen, 2011, Minsky, 1986,)²⁹. Dans le cadre de l'EH, le rôle structurant de la monnaie est indissociable de sa capacité à transmettre des signaux systémiques à l'ensemble de l'endo-économie : le couplage entre indicateurs exo-économiques et règles monétaires permet d'orienter les trajectoires macroéconomiques sans recourir à des prescriptions sectorielles directes, tout en conservant une cohérence d'ensemble.*

²⁷ Callon, M. (1998). *The Laws of the Markets*. Blackwell. ; Espeland, W. N., & Sauder, M. (2007). Rankings and reactivity. *American Journal of Sociology*, 113(1), 1–40.

²⁸ Keynes, J. M. (1936). *The General Theory of Employment, Interest and Money*. Macmillan. ; Schumpeter, J. A. (1911). *The Theory of Economic Development*. Harvard University Press (1934 ed.).

²⁹ Ingham, G. (2004). *The nature of money*. Polity Press. ; Polanyi, K. (1944). *The great transformation*. Beacon Press. ; Keen, S. (2011). *Debunking economics*. Zed Books. ; Minsky, H. P. (1986). *Stabilizing an unstable economy*. Yale University Press.

A5 opérationnalise A3 : si la médiation macroéconomique est nécessaire, la monnaie en est le levier le plus systémique, car elle conditionne l'accès à l'ensemble des ressources et oriente l'ensemble des comportements sans prescription sectorielle directe. A5 dépend de A4 : si la monnaie est un dispositif structurant, ses règles de création et de destruction sont elles-mêmes des instruments performatifs dont les effets doivent être anticipés et gouvernés. La conséquence architecturale directe de A5 est l'ensemble de l'architecture monétaire *ex naturae* — écodotation, fonte, projets régénératifs — développée en Section 4.

Interdépendance des axiomes de l'Économie Homéostatique - Tableau

Axiome	Dépend de (prérequis logique explicitement énoncé)	Renforce / prolonge	Prépare / rend opérateur	Tension structurante explicitée	Conséquence explicite si refusé
A1 — Finitude biophysique & non-substituabilité	<i>(non indiqué comme dépendant d'un autre axiome)</i>	<i>(renforcé par A2)</i>	S'articule directement avec A3 et A5 : fonde la nécessité de la médiation (A3) et requiert un vecteur systémique (A5).	<i>(pas de tension formulée "avec" un autre axiome ici)</i>	Refuser A1 rend la distinction exo/endo inutile.
A2 — Primauté des trajectoires & non-neutralité de l'inaction	<i>(non indiqué comme dépendant d'un autre axiome)</i>	Renforce A1 (la finitude est dynamique cumulative).	Prépare A3 (nécessité de rétroactions continues plutôt que corrections ponctuelles).	<i>(pas de tension formulée "avec" un autre axiome ici)</i>	Refuser A2 ramène à une logique d'ajustements marginaux.
A3 — Médiation macroéconomique nécessaire des contraintes biophysiques	Dépend de A1 (s'il y avait substituabilité, il y aurait peu à médier).	<i>(préparé par A2 ; A5 l'opérationnalise)</i>	Prépare A5 (la médiation trouve dans la monnaie son vecteur opérationnel).	Tension productive avec A4 : médiation nécessaire (A3) mais vecteurs informationnels	<i>Refuser A3 revient à supposer que l'agrégation spontanée des comportements individuels suffit à assurer la</i>

				faillibles/perfor matifs (A4).	<i>compatibilité biophysique collective.</i>
A4 — Dispositifs de mesure construits, partiels, performatifs	<i>(non indiqué comme dépendant d'un autre axiome)</i>	<i>(encadre/contr aint la médiation A3)</i>	Conditionne directement la construction et la gouvernance de l'IED (et la problématique de performativité traitée ensuite).	Tension productive avec A3 (nécessité de médiation vs faillibilité/perfo rmance des indicateurs).	<i>(pas de conséquence de refus formulée dans le passage "si refusé...")</i>
A5 — Rôle structurant de la monnaie dans les trajectoires	Dépend de A4 (règles monétaires elles-mêmes performatives , à anticiper/gou verner).	<i>(fondé/préparé par A1 et A3 ; "clôt et couronne" l'ensemble)</i>	Opérationnalis e A3 (la monnaie est le levier systémique de la médiation macro).	<i>(tension "A3-A5-H3" mentionnée comme limite, mais ce n'est plus une relation axiome-axiome ; c'est une articulation avec hypothèse institutionnelle)</i>	Refuser A5 vide l'architecture monétaire de sa justification fonctionnelle. Refuser A4 revient à neutraliser la question de la performativité des indicateurs et à affaiblir la justification réflexive de l'IED.

**Tableau 2 — Interdépendance des axiomes de l'Économie Homéostatique
(analyse axiome par axiome).**

Le tableau synthétise les relations logiques explicites entre les cinq axiomes fondateurs (A1–A5). Il montre que ces axiomes ne forment pas une juxtaposition indépendante de postulats, mais une chaîne de cohérence interne : la finitude biophysique (A1), renforcée par la primauté des trajectoires (A2), appelle une médiation macroéconomique explicite (A3). Cette médiation doit être conçue en

tenant compte du caractère construit et performatif des dispositifs de mesure (A4), avant de trouver son vecteur opérationnel dans le rôle structurant de la monnaie (A5). Le tableau clarifie ainsi les dépendances, tensions et conséquences de refus qui conditionnent la cohérence systémique du cadre EH.

Interdépendance des axiomes de l'Économie Homéostatique - Diagramme

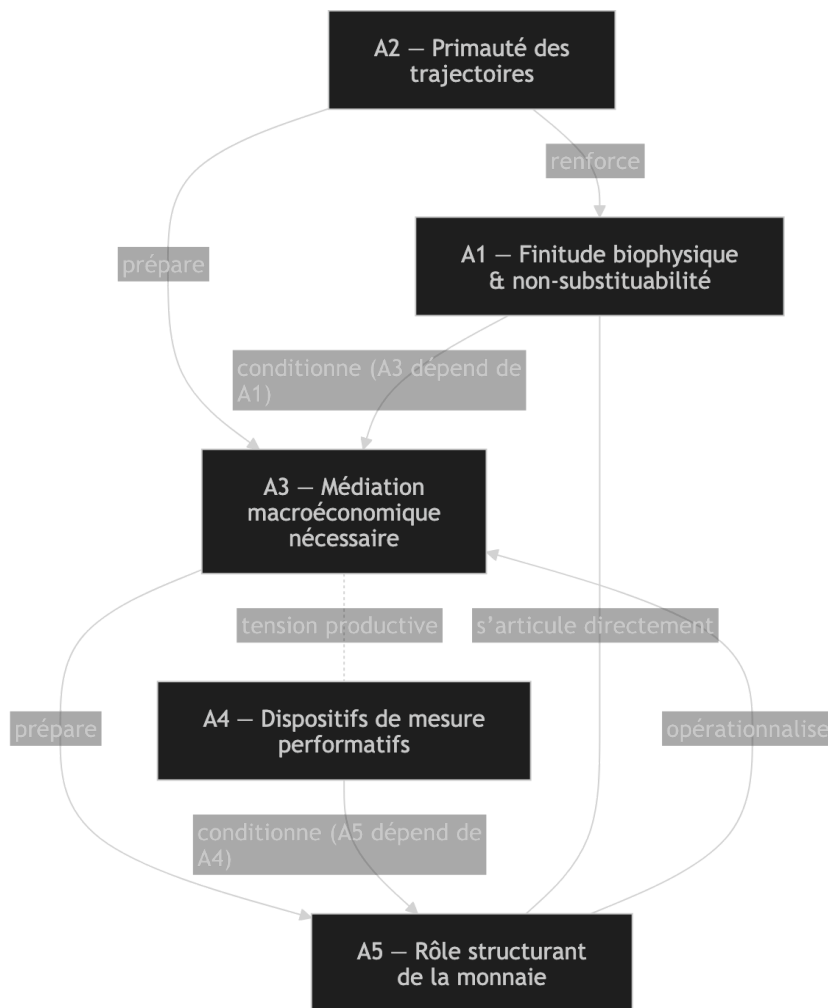


Figure 1 — Schéma d'interdépendance des axiomes de l'Économie Homéostatique. Le diagramme représente les relations structurantes entre les cinq axiomes (A1–A5). Les flèches pleines indiquent des relations de dépendance logique ou de préparation

architecturale : A3 dépend de A1 ; A5 dépend de A4 ; A2 prépare A3 ; A3 prépare A5 ; A5 opérationnalise A3. Les flèches bidirectionnelles pleines signalent une articulation directe (A1 avec A5), tandis que les traits pointillés représentent une tension productive (A3 avec A4), exprimant la nécessité de médiation macroéconomique par des indicateurs dont le caractère construit et performatif impose une vigilance institutionnelle. L'ensemble du schéma montre que l'architecture monétaire (A5) ne constitue pas un ajout périphérique mais le point d'opérationnalisation d'une chaîne logique partant de la finitude biophysique (A1), renforcée par la primauté des trajectoires (A2), médiée à l'échelle macroéconomique (A3), et encadrée par la nature performative des dispositifs de mesure (A4).

2.3 — La distinction axiomes / hypothèses : nature et enjeu

La rigueur scientifique du cadre repose sur une distinction constitutive entre ce qui est *posé* et ce qui est *testé*. Les axiomes définissent les conditions de possibilité du cadre : ils ne sont ni démontrables à l'intérieur du système, ni falsifiables empiriquement au sens strict (Popper, 1934/1959). Les hypothèses, en revanche, portent sur des propriétés observables ou analysables du cadre lui-même, en particulier sur la faisabilité et l'efficacité de ses mécanismes dans des conditions réelles. Elles sont testables et susceptibles d'être invalidées. Cette distinction interdit deux confusions symétriques : traiter les axiomes comme des hypothèses revient à vouloir les tester empiriquement, ce qui est hors de portée ; traiter les hypothèses comme des axiomes revient à les soustraire à la discussion, ce qui compromet la réfutabilité du cadre.

L'EH formule trois hypothèses structurantes. La première, **H1 — Mesurabilité et comparabilité des indicateurs exo-économiques**, affirme que les dimensions exo-économiques clés peuvent être représentées par des indicateurs normalisés suffisamment robustes pour entrer dans des règles de pilotage. L'ensemble de l'architecture monétaire de l'EH est explicitement conditionnel à cette hypothèse : si les indicateurs exo-économiques ne satisfont pas aux exigences minimales de robustesse, de comparabilité et de résistance à la manipulation stratégique, le couplage EXEC/ENEC perd sa cohérence fonctionnelle (OECD, 2008

; Espeland & Sauder, 2007)³⁰. H1 constitue donc une condition structurelle de validité du cadre, non un résultat présupposé. Elle est directement dépendante de A4 : si les dispositifs de mesure sont construits et performatifs, l'hypothèse qu'ils puissent néanmoins fournir un signal suffisamment stable et robuste pour ancrer des règles monétaires reste à démontrer. Sa zone de fragilité porte sur la qualité des données, la stabilité des protocoles dans le temps et la résistance des indicateurs à la manipulation stratégique. La deuxième, **H2 — Efficacité régulatrice des boucles de rétroaction monétaires**, affirme que l'indexation des règles monétaires sur des indicateurs exo-économiques crée des boucles de rétroaction capables de stabiliser le système. Elle articule A3 (médiation nécessaire) et A5 (monnaie comme vecteur) en posant que leur conjonction produit effectivement les effets stabilisateurs attendus. Cette stabilisation n'est pas postulée comme automatique : elle dépend de paramètres dynamiques — délais de mesure, taux de fonte, sensibilité de l'IED — susceptibles d'engendrer des régimes oscillatoires ou instables au-delà de certains seuils (Meadows et al., 1972 ; Forrester, 1961)³¹. H2 doit donc être comprise comme une hypothèse de travail conditionnelle, dont les versions formalisées prennent la forme de conjectures mathématiques explicitement testables. Elle est falsifiable par l'observation de dynamiques d'instabilité ou d'effets pervers non anticipés — délais de rétroaction excessifs, oscillations amplificatrices, comportements d'évitement généralisés. La troisième, **H3 — Compatibilité socio-politique minimale**, affirme qu'un régime de règles stables comprenant des mécanismes de fonte et des indexations est institutionnellement applicable sur un horizon long. Elle est directement liée à A2 : l'inaction ou la résistance institutionnelle n'est pas une option neutre — elle engage le système sur des trajectoires héritées. Mais l'architecture biophysiquement compatible n'est pas pour autant politiquement stable : H3 reconnaît que la compatibilité analytique et la viabilité institutionnelle sont deux propriétés distinctes. Sa zone de fragilité porte sur la légitimité des règles, la gestion des conflits distributifs induits par les ajustements et les stratégies de contournement. Les implications institutionnelles de H3 sont développées en Section 7.

³⁰ OECD. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Publishing. ; Espeland, W. N., & Sauder, M. (2007). Rankings and reactivity. *American Journal of Sociology*, 113(1), 1–40.

³¹ Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.

Distinction entre axiomes et hypothèses.

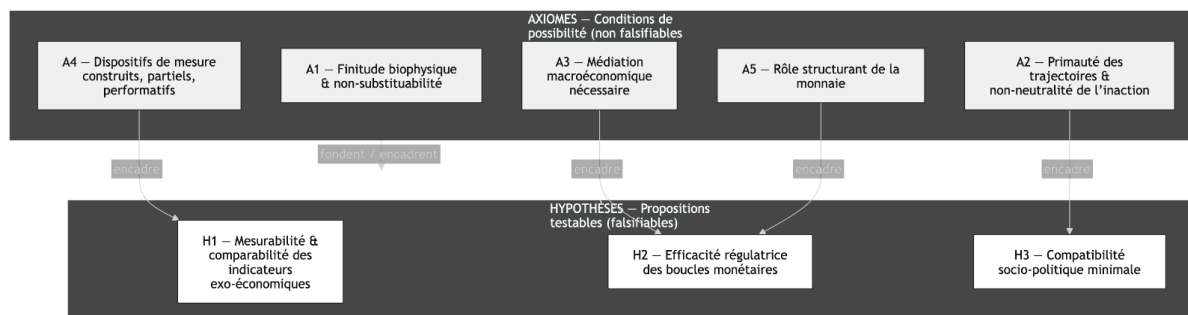


Figure 2 — Architecture logique du cadre : distinction entre axiomes et hypothèses. Le schéma distingue deux niveaux conceptuels. Les axiomes (A1–A5) définissent les conditions de possibilité du cadre et ne sont ni démontrables à l'intérieur du système ni falsifiables empiriquement au sens strict. Les hypothèses structurantes (H1–H3) portent sur des propriétés testables du cadre : robustesse des indicateurs exo-économiques (H1), efficacité stabilisatrice des boucles monétaires (H2) et compatibilité institutionnelle minimale du régime de règles (H3). Les flèches indiquent les liens d'encadrement : chaque hypothèse prolonge l'architecture axiomatique dans un registre falsifiable, sans rétroaction logique vers les axiomes.

2.4 — Tensions internes et limites de l'axiomatique

L'axiomatique de l'EH n'est pas exempte de tensions internes que la rigueur scientifique impose d'exposer sans minimisation.

La première tension traverse A4 et l'architecture de l'IED. A4 pose que les indicateurs sont construits, partiels et performatifs : lorsqu'ils sont intégrés au cœur des mécanismes monétaires, ils co-produisent la réalité qu'ils prétendent mesurer. Or l'IED est précisément conçu pour opérer comme régulateur macroéconomique. Cette conjonction soulève une

question non résolue : si la masse monétaire est indexée sur l'IED et que l'IED est sensible aux comportements que la masse monétaire induit, le couplage peut générer des boucles de rétroaction dont la dynamique n'est pas nécessairement stabilisatrice. Des agents qui anticipent les effets de l'IED sur leurs dotations monétaires peuvent modifier leurs comportements déclarés ou leurs pratiques de manière à optimiser leur position indicielle plutôt qu'à améliorer l'état effectif du système biophysique. A4 fonde cette vigilance mais ne la résout pas : il impose de concevoir des dispositifs de gouvernance révisables et des mécanismes d'audit, sans garantir leur suffisance. Refuser A4 reviendrait à supposer que les dispositifs de mesure peuvent être traités comme des instruments neutres, ce qui affaiblirait directement la problématique de performativité des indicateurs et viderait de sa portée critique une part centrale de l'architecture EH.

La deuxième tension lie A3, A5 et H3. A3 et A5 fondent conjointement la centralité de la monnaie comme médiation macroéconomique nécessaire. Mais cette architecture suppose l'existence d'institutions capables de définir, d'appliquer et de maintenir dans le temps des règles monétaires couplées à des indicateurs biophysiques. Cette capacité institutionnelle n'est pas un axiome : elle constitue le contenu de H3 (North, 1990)³². Il en résulte que l'architecture théorique de l'EH est cohérente à condition que ses hypothèses institutionnelles soient satisfaites — ce qui constitue une limite externe non garantie par le cadre lui-même. L'EH ne peut ni présupposer cette capacité ni s'en dispenser : elle la pose comme hypothèse testable et comme objet de recherche ouvert.

La troisième tension porte sur le statut "faible" des axiomes lui-même. Si chaque axiome est refusable sans invalider l'économie en général, il devient nécessaire d'identifier précisément ce que le refus de chaque axiome implique pour la cohérence du reste du cadre. Refuser A1 (substituabilité généralisée) rend la distinction exo/endo inutile ; refuser A2 (neutralité de l'inaction) ramène à une logique d'ajustements marginaux ; refuser A5 (non-neutralité de la monnaie) vide l'architecture monétaire de sa justification fonctionnelle. Ces axiomes sont donc faibles au sens de non-universels, mais ils sont forts au sens de mutuellement dépendants : leur cohérence interne est une condition nécessaire de la validité du cadre (Hilbert, 1902)³³.

³² North, D. C. (1990). *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge University Press.

³³ Hilbert, D. (1902). *The Foundations of Geometry*. Open Court.

Cartographie des tensions internes et limites conditionnelles de

l'axiomatique EH.

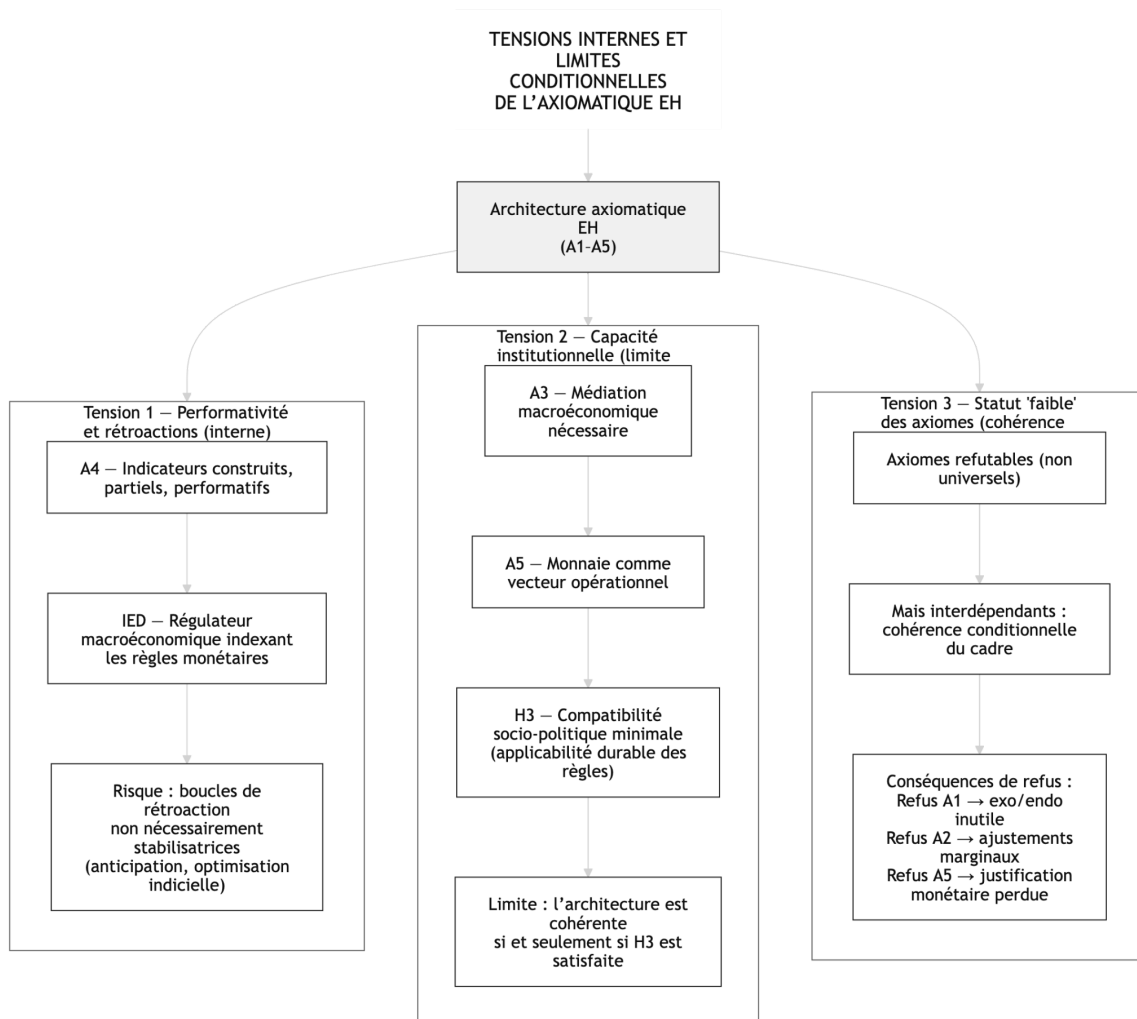


Figure 3 — Cartographie des tensions internes et limites conditionnelles de l'axiomatique EH. Le schéma représente les trois zones principales de tension identifiées au sein du cadre. La première tension est performative : l'intégration d'un indicateur construit et partiel (A4) au cœur des mécanismes monétaires via l'IED peut générer des rétroactions dont la dynamique n'est pas nécessairement stabilisatrice. La seconde tension est institutionnelle : la centralité de la monnaie comme médiation macroéconomique (A3 et A5) suppose des capacités institutionnelles stables dont l'existence relève d'une hypothèse (H3), constituant ainsi une limite externe non garantie par l'axiomatique. La troisième tension est structurale : le caractère "faible" des axiomes implique que chacun peut être refusé sans

invalider l'économie en général, mais au prix d'une perte de cohérence interne du cadre EH. L'ensemble du schéma montre que la robustesse du cadre ne repose pas sur l'absence de tensions, mais sur leur explicitation et leur traitement comme objets de recherche ouverts.

3 — Architecture analytique de l'Économie Homéostatique

3.1 — Motivation : la distinction exo-économie / endo-économie comme nécessité analytique

La lacune diagnostiquée en Section 1 — la dissociation structurelle endogène entre dynamique économique interne et contraintes biophysiques — ne peut être corrigée par un instrument correctif ajouté à la périphérie d'un cadre inchangé. Elle requiert une recomposition de l'architecture analytique elle-même. C'est ce que rend nécessaire la combinaison des axiomes A1 et A2, établis en Section 2. A1 pose que certaines fonctions biophysiques sont des conditions de possibilité non substituables de l'activité économique : elles ne peuvent être reléguées à un poste d'externalité corrigible par des prix. A2 pose que la viabilité est une propriété de trajectoire : l'absence de transformation structurelle reconduisant les dynamiques héritées n'est pas une option neutre mais un choix de trajectoire qui peut devenir incompatible avec les conditions d'habitabilité. La conjonction de ces deux axiomes impose une conséquence architecturale minimale : représenter explicitement et distinctement le système biophysique au sein duquel s'inscrit l'activité économique, et organiser entre ces deux représentations un couplage structurel — non une simple correction ex post.

Cette distinction vise à traiter de manière systémique ce que l'économie conventionnelle cantonne au registre des externalités ou du capital naturel. Dans les approches standard, l'environnement est un "dehors" que l'on cherche à internaliser après coup. Dans l'EH, l'activité économique humaine est inscrite par construction dans un système biophysique englobant dont elle dépend structurellement, et avec lequel elle forme un ensemble couplé. La distinction exo/endo ne sépare pas deux entités indépendantes : elle identifie deux niveaux d'analyse au sein d'un même système, dont l'articulation explicite est la condition de toute représentation cohérente de la viabilité de long terme.

3.2 — Description fonctionnelle : l'exo-économie, l'endo-économie et le corridor de viabilité

L'exo-économie : le sous-système moteur

L'exo-économie (EXEC) désigne la sphère biophysique englobante dans laquelle s'inscrit toute activité économique humaine. Elle comprend les stocks naturels de ressources renouvelables et non renouvelables, les flux entrants de ressources caractérisés par leur renouvelabilité, leur criticité et leur disponibilité, les flux sortants issus de l'activité humaine — pollutions, pressions sur les écosystèmes, fragmentation des habitats —, l'état qualitatif des écosystèmes, et les stocks anthropogéniques accumulés. Dans les régimes extractivistes contemporains, la richesse repose sur des captations unilatérales de matière et d'énergie sans réciprocité écologique, conduisant à une incapacité structurelle à maintenir un état d'équilibre entre les sociétés humaines et leur environnement. L'EH rompt avec ce schéma en traitant l'exo-économie non comme un simple extérieur à internaliser, mais comme le sous-système moteur dont dépend structurellement la possibilité même de l'endo-économie. Même si la production est classiquement décrite comme le résultat de la combinaison du travail et du capital, elle demeure impossible sans environnement adéquat et sans gestion équilibrée des ressources.

L'exo-économie est opérationnalisée analytiquement par trois indicateurs structurants : un indicateur des ressources non renouvelables (IRNR), mesurant les flux entrants et leur soutenabilité ; un indicateur d'empreinte écologique (IEE), mesurant les pressions exercées sur les ressources renouvelables et les milieux ; un indicateur de biodiversité (IBD), mesurant l'état qualitatif des écosystèmes et leurs capacités de résilience. Ces trois indicateurs constituent le canal principal de couplage entre l'exo-économie et l'endo-économie : leur construction, leur normalisation et leur agrégation dans l'Indicateur d'Équilibre Dynamique (IED) sont développées en Section 6.

L'endo-économie : la sphère de médiation monétaire

L'endo-économie (ENEC) désigne la sphère socio-économique des interactions et transactions internes au système économique : ménages, entreprises, territoires, États, institutions financières et leurs dynamiques de production, d'échange, de répartition, d'investissement et de

gestion monétaire. Une propriété fondamentale de l'endo-économie humaine réside dans sa capacité à convertir des flux de matière, d'énergie et de travail issus de l'exo-économie en valeurs monétaires. L'accès à la monnaie conditionne la mobilisation des ressources et leur transformation : c'est le médium par lequel les pressions sur l'exo-économie s'exercent. Dans les régimes économiques contemporains, cette médiation monétaire opère de manière largement autonome par rapport à l'état effectif des écosystèmes. Dans l'EH, au contraire, les règles monétaires internes à l'endo-économie sont explicitement corrélées à l'état de l'exo-économie : la quantité de monnaie émise, distribuée et détruite dépend des indicateurs EXEC. Ce couplage constitue le cœur de l'architecture.

Le corridor de viabilité

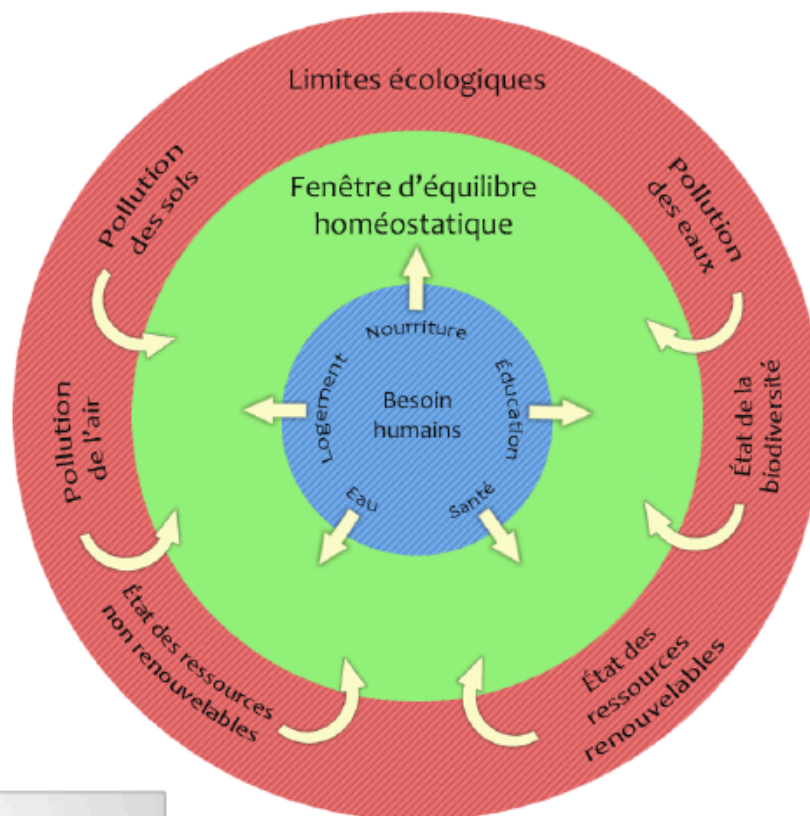
L'architecture de l'EH est structurée par un corridor défini par deux bornes non négociables. Le plancher social détermine les conditions minimales d'existence et de cohésion sociale auxquelles chaque individu peut prétendre : accès à l'alimentation, à l'eau, aux soins, au logement, à l'éducation et à un revenu suffisant. Il constitue la borne inférieure en deçà de laquelle les conditions de vie humaine sont compromises. Le plafond environnemental représente les limites écologiques soutenables par les écosystèmes et par les ressources disponibles. Il constitue la borne supérieure au-delà de laquelle l'activité économique dégrade irréversiblement les conditions de sa propre viabilité. Le plafond environnemental du corridor K est conceptuellement proche du cadre des limites planétaires proposé par Rockström et al. (2009) et précisé par Steffen et al. (2015), qui identifie plusieurs seuils biophysiques globaux dont le franchissement compromet la stabilité du système Terre.³⁴ Cette notion de plafond environnemental est également cohérente avec les travaux sur la résilience des systèmes socio-écologiques, qui mettent en évidence l'existence de seuils critiques et de changements de régime lorsque certaines pressions dépassent la capacité d'adaptation des écosystèmes (Holling, 1973 ; Gunderson & Holling, 2002 ; Folke et al., 2010).³⁵ La structure « plancher social / plafond environnemental » présente également une parenté avec le cadre du Doughnut Economics


³⁴ Rockström, J. et al. (2009). *A safe operating space for humanity*. Nature. ; Rockström, J. et al. (2009). *Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity*. Ecology and Society. ; Steffen, W. et al. (2015). *Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet*. Science.

³⁵ Holling, C. S. (1973). *Resilience and stability of ecological systems*. Annual Review of Ecology and Systematics. ; Gunderson, L. H., & Holling, C. S. (2002). *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Island Press. ; Folke, C. et al. (2010). *Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability*. Ecology and Society.

proposé par Raworth (2017), qui définit un espace sûr et juste pour l'humanité. Toutefois, là où le Doughnut constitue principalement un cadre descriptif et normatif,³⁶ l'Économie Homéostatique vise à proposer une architecture institutionnelle dynamique permettant de maintenir les trajectoires économiques à l'intérieur de cet espace de soutenabilité.

Entre ces deux bornes s'étend la zone homéostatique : la fenêtre au sein de laquelle les processus économiques peuvent satisfaire les besoins humains tout en restant compatibles avec les contraintes biophysiques. La sortie durable de cette zone — par excès (dépassement du plafond) ou par défaut (chute en dessous du plancher) — correspond à des configurations de non-viabilité susceptibles d'engager des irréversibilités.



 Mécanismes régulateurs de l'EH corrigeant les déviations hors équilibre (Indicateurs, dividende, PCED, etc...)

³⁶ Raworth, K. (2017). *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*. Chelsea Green Publishing. ; Raworth, K. (2012). *A safe and just space for humanity: Can we live within the doughnut?* Oxfam.

Couplage entre l'exo-économie et l'endo-économie

Figure 4 — Schéma EH inspiré de l'homéostasie. Le système économique est représenté entre deux bornes : la zone bleue inférieure désigne les situations où les besoins humains fondamentaux ne sont pas assurés (sous le plancher social) ; la zone rouge supérieure désigne les situations de dépassement des limites écologiques (au-dessus du plafond environnemental). La zone verte centrale constitue la zone homéostatique, dans laquelle les mécanismes régulateurs de l'EH maintiennent la trajectoire par correction des déviations. Les flèches symbolisent les boucles de rétroaction négatives ramenant le système vers cette zone d'équilibre dynamique.

3.3 — Interactions systémiques : le couplage comme mécanisme d'autorégulation

De la dissociation au couplage conditionnel

Le principe central de l'architecture est le suivant : dans l'EH, les indicateurs de l'exo-économie (EXEC) conditionnent directement les règles de création, de distribution et de destruction monétaires au sein de l'endo-économie. Le programme EH s'inscrit dans le champ plus large de la macroéconomie écologique, qui cherche à articuler dynamiques macroéconomiques et contraintes biophysiques. Plusieurs approches ont exploré cette articulation, notamment les modèles stock-flux cohérents intégrant l'environnement (Dafermos, Nikolaidi & Galanis, 2017)³⁷, les travaux sur la prospérité sans croissance (Jackson, 2009 ; Victor, 2008)³⁸, ainsi que différentes tentatives d'intégration explicite des contraintes biophysiques dans les cadres macroéconomiques. L'originalité du cadre EH réside dans l'introduction d'un mécanisme institutionnel de couplage monétaire biophysiquement indexé, formalisé à travers l'Indicateur

³⁷ Dafermos, Y., Nikolaidi, M., & Galanis, G. (2017). *A stock-flow-fund ecological macroeconomic model*. Ecological Economics.

³⁸ Jackson, T. (2009). *Prosperity without growth: Economics for a finite planet*. Earthscan. ; Victor, P. A. (2008). *Managing without growth: Slower by design, not disaster*. Edward Elgar Publishing.

d'Équilibre Dynamique (IED). Cette approche rejoint la littérature sur la résilience des systèmes socio-écologiques, qui analyse les dynamiques couplées entre sociétés humaines et systèmes écologiques en termes de bassins d'attraction, de cycles adaptatifs et de transformations systémiques (Gunderson & Holling, 2002 ; Walker et al., 2004 ; Folke et al., 2010)³⁹. Lorsque les indicateurs signalent une dégradation biophysique, les règles monétaires se resserrent ; lorsqu'ils signalent une amélioration, une marge supplémentaire de création monétaire devient disponible. Ce couplage n'est pas une intervention discrétionnaire décidée cas par cas : il est structurel, inscrit dans l'architecture même des règles monétaires. C'est lui qui garantit que les dynamiques de l'endo-économie ne peuvent, à terme, s'affranchir durablement des contraintes de l'exo-économie.

Ce couplage conditionnel réduit structurellement le besoin de régulations sectorielles directes. Dans les systèmes actuels, la compatibilité entre activité économique et contraintes biophysiques doit être obtenue par une multitude d'interventions spécifiques — taxes, normes, subventions, marchés de droits — qui s'ajoutent à un mécanisme de coordination dont la logique fondamentale reste orientée vers l'expansion. Dans l'EH, le mécanisme de coordination lui-même intègre les contraintes biophysiques par construction : les agents qui respectent les règles monétaires respectent indirectement les bornes du corridor, sans qu'il soit nécessaire de prescrire chaque comportement sectoriel.

³⁹ Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4). ; Gunderson, L. H., & Holling, C. S. (2002). *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Island Press. ; Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2). ;

Représentation synthétique des flux entre les grandes sphères biophysiques

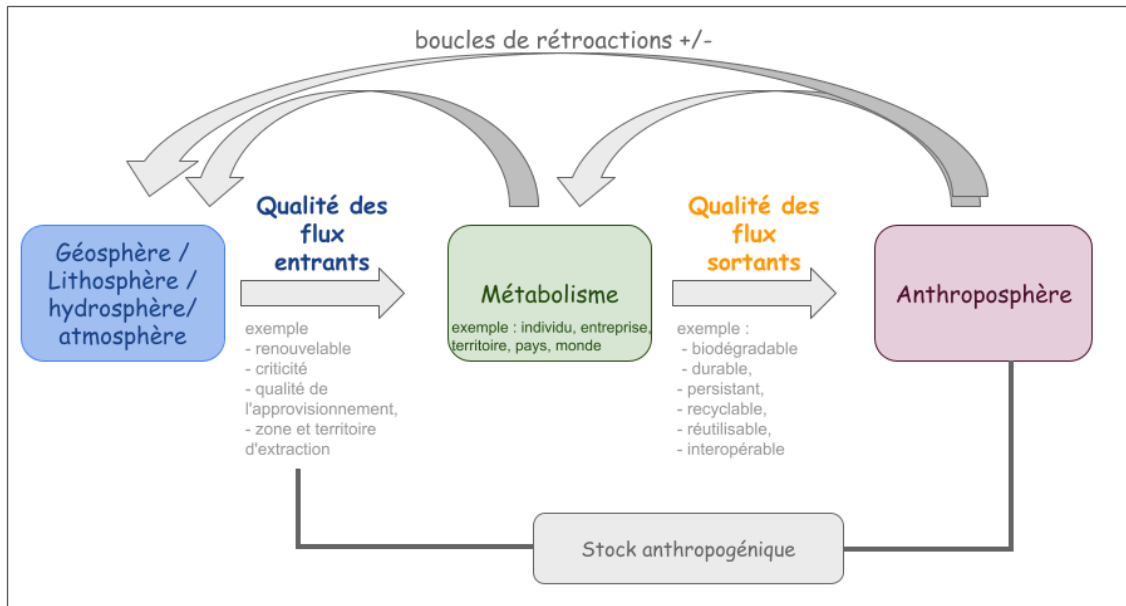


Figure 5 — Représentation des flux entre les grandes sphères biophysiques (géosphère, lithosphère, hydrosphère, atmosphère) et l'anthroposphère. Les flux entrants sont caractérisés par leur renouvelabilité, leur criticité et leur qualité d'approvisionnement. Ils alimentent le métabolisme socio-économique. Les flux sortants (pollutions, déchets, émissions) sont caractérisés par leur biodégradabilité, persistance et recyclabilité. Les boucles de rétroaction (+/-) représentent les mécanismes d'amplification et de stabilisation par lesquels les deux sphères s'influencent mutuellement.

Rétroactions négatives vs rétroactions positives

L'EH s'inscrit en opposition structurelle aux dynamiques de rétroaction positive qui caractérisent les économies contemporaines. Dans un régime à rétroactions positives, la croissance de la production amplifie l'extraction des ressources, qui amplifie la croissance monétaire, qui amplifie à son tour la production — jusqu'au dépassement des seuils

biophysiques. Ces rétroactions sont intrinsèquement déstabilisatrices : elles renforcent les déséquilibres au lieu de les corriger.

L'EH substitue à cette logique un régime à rétroactions négatives stabilisatrices, analogue aux mécanismes d'homéostasie observés dans les systèmes vivants. Une dégradation des indicateurs EXEC déclenche une contraction de la création monétaire, ce qui réduit les incitations à la surextraction ; une amélioration des indicateurs ouvre une marge de création supplémentaire, ce qui récompense les comportements régénératifs. Ces boucles correctrices orientent le système vers la zone homéostatique plutôt qu'elles n'amplifient les déviations. La réversibilité — propriété par laquelle le système peut revenir dans la zone de viabilité après une perturbation, plutôt qu'à maintenir une valeur constante — est une caractéristique recherchée de ce régime de rétroactions.

Interaction des trois indicateurs exo-économiques

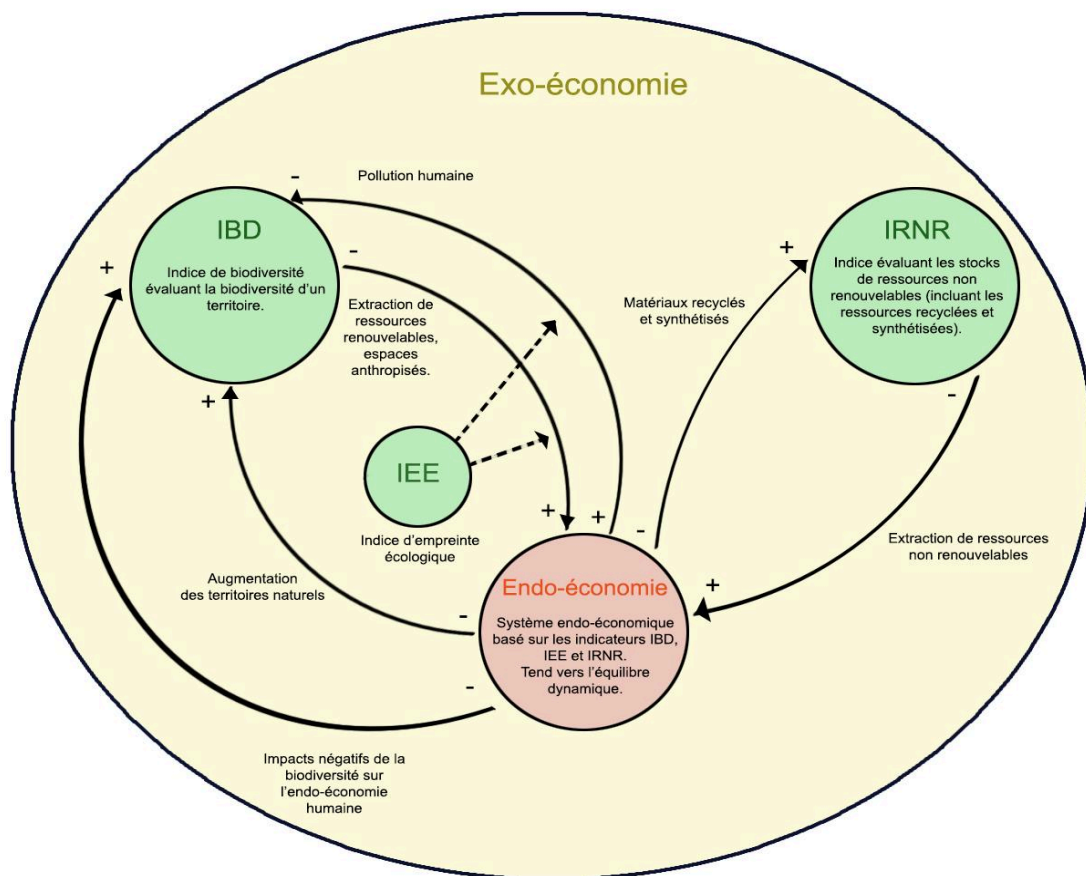


Figure 6 — *interaction des trois indicateurs exo-économiques (IBD, IEE, IRNR) avec l'endo-économie. Dans une économie homéostatique, ces indicateurs jouent le rôle de mécanisme régulateur en informant directement les règles de création, de distribution et de destruction monétaires. Ils contribuent à stabiliser le système dans une zone où les besoins humains sont satisfaits tout en respectant les limites écologiques. Les renvois entre les indicateurs illustrent les interdépendances systémiques entre biodiversité, empreinte écologique et consommation de ressources non renouvelables.*

3.4 — Implications comportementales et limites de l'architecture

Ce que l'architecture induit

Le couplage structurel EXEC/ENEC introduit un changement de logique incitative pour l'ensemble des agents économiques. Dans un régime standard, l'incitation fondamentale est l'accroissement de la valeur monétaire disponible indépendamment de l'impact biophysique. Dans l'EH, l'accès à la monnaie est conditionné par l'état des indicateurs biophysiques : les activités qui contribuent à dégrader l'exo-économie favorisent un régime de création monétaire plus contraint ; les activités qui contribuent à l'améliorer accèdent à des marges supplémentaires via les projets régénératifs, dont l'architecture est développée en Section 4 et participe à un régime de création monétaire plus important. Cette réorientation incitative ne requiert pas que les agents changent leurs valeurs ou leurs préférences : elle modifie les conditions de leur intérêt économique immédiat (Bowles, 2008)⁴⁰.

⁴⁰ Bowles, S. (2008). Policies designed for self-interested citizens may undermine “the moral sentiments”: Evidence from economic experiments. *Science*, 320(5883), 1605–1609.

Ce que l'architecture ne fait pas

L'architecture analytique de l'EH ne prescrit pas de comportements sectoriels spécifiques. Elle ne définit pas ex ante le niveau optimal des indicateurs, ni le niveau souhaitable de croissance ou de décroissance de l'endo-économie. Elle ne garantit pas non plus que le plancher social sera atteint ou maintenu : cela dépend des paramètres de distribution de l'écodotation et des décisions de gouvernance, qui relèvent de la Section 7. Enfin, elle ne détermine pas unilatéralement la forme institutionnelle dans laquelle le couplage sera opéré. L'architecture produit des conditions analytiques de viabilité, non des prescriptions normatives.

La limite structurelle de A4

L'architecture repose sur des indicateurs construits et performatifs (A4). Cette propriété, identifiée en Section 2, constitue ici une limite opérationnelle : si les indicateurs EXEC co-produisent la réalité qu'ils mesurent, le couplage peut générer des boucles de rétroaction dont la dynamique n'est pas nécessairement stabilisatrice. Les agents qui anticipent les effets des indicateurs sur leurs dotations monétaires peuvent adapter leurs comportements déclarés pour optimiser leur position indiciaire plutôt que l'état effectif du système biophysique (Goodhart, 1975 ; Espeland & Sauder, 2007)⁴¹. Cette limite ne remet pas en cause la logique d'ensemble de l'architecture, mais elle impose des exigences de conception des indicateurs — révisabilité, transparence, gouvernance rigoureuse — dont la faisabilité constitue l'objet de l'hypothèse H1. La construction détaillée de l'IED et les questions de gouvernance associées sont développées en Section 6 et Section 7 respectivement.

Les propriétés dynamiques du corridor, les régimes de trajectoire possibles et les paramètres sensibles du système sont analysés en Section 5.

⁴¹ Goodhart, C. A. E. (1975). Problems of monetary management: The UK experience. In *Papers in Monetary Economics* (Vol. 1). Reserve Bank of Australia. ; Espeland, W. N., & Sauder, M. (2007). Rankings and reactivity: How public measures recreate social worlds. *American Journal of Sociology*, 113(1), 1–40.

4 — Mécanismes monétaires de l'Économie Homéostatique

L'architecture monétaire de l'EH est le cœur opérationnel du couplage entre exo-économie et endo-économie décrit en Section 3. Ce n'est pas un instrument sectoriel de financement vert : c'est un dispositif macroéconomique complet dont la création, la distribution, la circulation et la destruction sont intégralement indexées sur des contraintes biophysiques explicites. Cette section décrit les quatre mécanismes qui composent cette architecture — la monnaie *ex naturae* comme socle, l'écodotation comme création primaire, les projets régénératifs comme création secondaire, et la fonte comme destruction structurelle. Les propriétés dynamiques collectives de ces mécanismes font l'objet de la Section 5 ; la construction de l'IED qui les conditionne est développée en Section 6 ; la gouvernance institutionnelle requise pour leur fonctionnement est traitée en Section 7.

4.1 — Monnaie *ex naturae* : architecture monétaire de base

Motivation

Le système monétaire contemporain repose sur une création monétaire par la dette bancaire. Toute unité monétaire émise suppose un emprunteur solvable, un taux d'intérêt, et une contrainte de remboursement qui impose mécaniquement une expansion future de la production pour que les dettes puissent être honorées. Cette structure couple la création monétaire à une logique d'expansion matérielle continue. Elle rend structurellement difficile toute trajectoire de stabilisation ou de décroissance volontaire des flux physiques, même lorsque cette trajectoire serait biophysiquement compatible avec la viabilité. La Section 1 a identifié cette dissociation comme une lacune architecturale fondamentale, et l'axiome A5 a établi que la monnaie est un dispositif structurant dont les modalités de création influencent directement les trajectoires macroéconomiques. Il devient donc nécessaire de concevoir une architecture monétaire dont la contrainte ne porte pas sur la solvabilité des agents mais sur la capacité du système Terre à supporter une activité économique supplémentaire.

Description fonctionnelle

La monnaie *ex naturae* est une architecture monétaire complète dans laquelle la monnaie est émise sans contrepartie directe de dette, en analogie avec ce qu’offre la nature (Huber, 2017)⁴². Sa création, sa circulation et sa destruction sont indexées sur des contraintes biophysiques explicites. Cela implique l’absence de création monétaire endogène par le crédit bancaire. Les opérations de prêt mobilisent uniquement de la monnaie préexistante. Cette propriété résulte du choix institutionnel de l’architecture proposée et ne constitue pas une description du système monétaire contemporain. La monnaie *ex naturae* n’est pas une “monnaie verte” sectorielle : dans le cadre du présent modèle, la monnaie *ex naturae* est traitée comme le régime monétaire exclusif de la zone économique concernée. Ce présupposé constitue une hypothèse simplificatrice adoptée à des fins analytiques. En l’état actuel du cadre théorique, les propriétés dynamiques du couplage EXEC/ENEC — et en particulier les conjectures C1 à C4 — sont formulées sous l’hypothèse d’un régime monétaire unique. Le modèle ne dispose pas encore des instruments formels nécessaires pour traiter les situations de coexistence, de coopération ou de concurrence entre la monnaie *ex naturae* et d’autres régimes monétaires ou d’autres formes de valeur d’échange. L’extension du cadre à un environnement monétaire pluriel — incluant notamment les risques d’arbitrage entre zones, les stratégies de substitution et les dynamiques de concurrence monétaire — constitue un objet de recherche ouvert, identifié au sein du programme (Section 9). La propriété limitante de la monnaie *ex naturae* n’est pas la solvabilité de l’emprunteur, mais la capacité du système Terre à supporter une activité économique supplémentaire sans dégradation de ses équilibres fondamentaux. Cette inversion du principe de limitation constitue un déplacement conceptuel majeur : la contrainte est relocalisée de la sphère financière vers la sphère biophysique. Une dégradation des indicateurs EXEC réduit mécaniquement la masse monétaire disponible ; une amélioration l’élargit. La contrainte est donc co-évolutive avec les choix collectifs inscrits dans le temps long, sans être postulée comme fixe ou exogène.

Ce déplacement est directement fondé sur A5 (rôle structurant de la monnaie) et sur A4 (caractère construit et performatif des dispositifs de mesure, établis en Section 2) : la monnaie *ex naturae* tire ses propriétés contraignantes des indicateurs biophysiques qui la conditionnent, et dont la robustesse conditionne en retour la cohérence du couplage. Une limite fondamentale

⁴² Huber, J. (2017). *Sovereign Money: Beyond Reserve Banking*. Palgrave Macmillan.

est ici présente : la contrainte biophysique ne peut opérer que si les indicateurs qui la mesurent sont suffisamment robustes et résistants à la manipulation — ce que pose H1 comme hypothèse testable, non comme axiome.

Interactions systémiques

La monnaie *ex naturae* opère comme le vecteur central du couplage conditionnel décrit en Section 3. Elle traduit l'état de l'exo-économie en signal monétaire pour l'ensemble de l'endo-économie, sans prescription sectorielle directe. Sa création est déclenchée par les indicateurs EXEC via l'IED ; sa circulation est réglée par un double mécanisme de fonte monétaire ; son orientation est modulée par les projets régénératifs. L'architecture *ex naturae* n'est donc pas un mécanisme isolé : elle forme un système dont les trois composantes (écodotation, PR, fonte) sont mutuellement dépendantes et articulées autour d'un même signal biophysique.

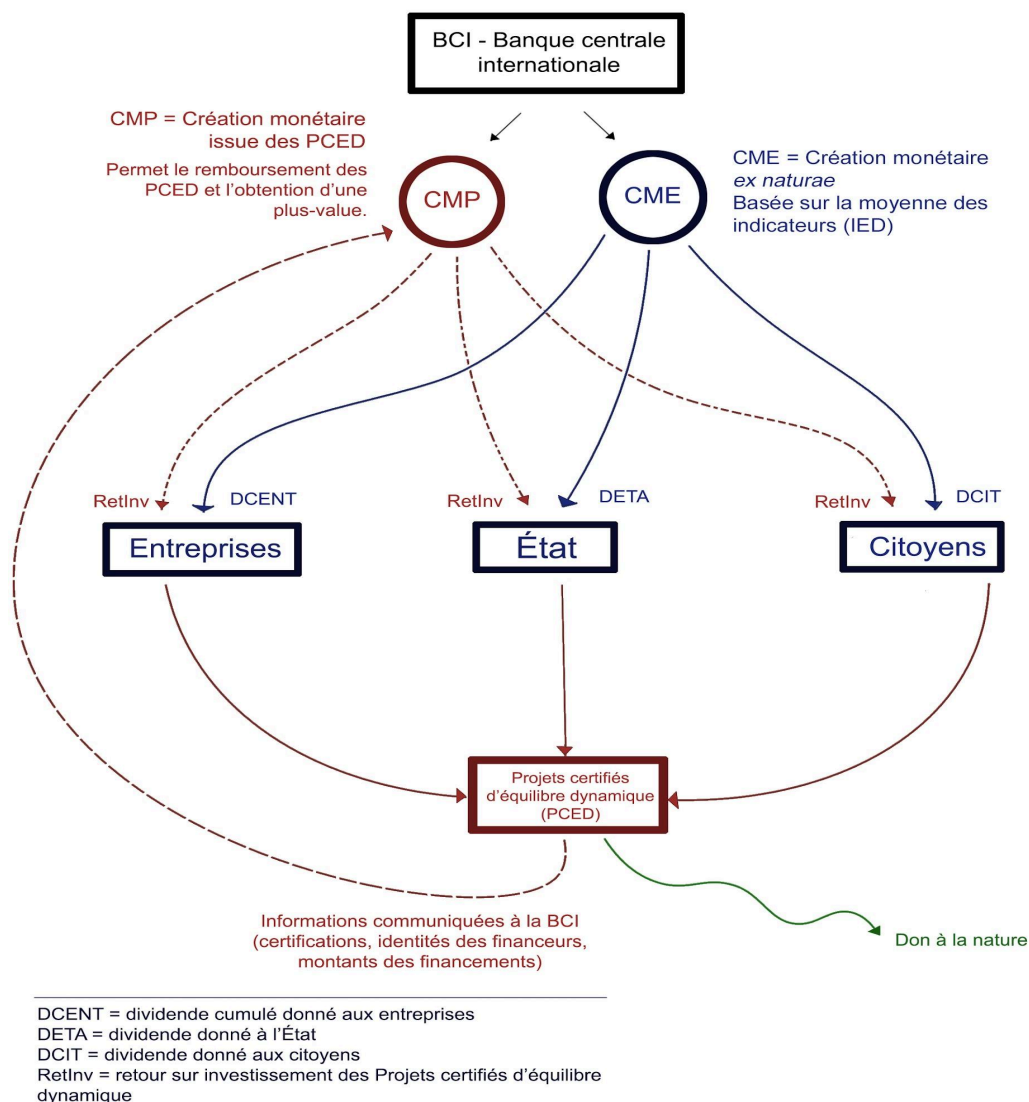


Figure 7 — Articulation entre écodotation (création primaire) et projets régénératifs (création secondaire) dans l'architecture monétaire de l'EH. La masse monétaire totale d'une zone économique résulte de deux flux distincts : la création primaire indexée sur l'IED et distribuée périodiquement aux trois catégories d'agents, et la création secondaire déclenchée *ex post* par la validation de projets régénératifs. Ces deux mécanismes sont complémentaires et tous deux soumis à la destruction progressive par la fonte.

Implications comportementales et limites

L'introduction d'une monnaie *ex naturae* modifie en profondeur les arbitrages fondamentaux. Dans un régime de monnaie-dette, l'incitation structurelle est à la croissance des flux de revenus pour assurer le service de la dette. Dans un régime *ex naturae*, cette incitation disparaît : les agents ne doivent plus rembourser, mais l'accès à la monnaie décroît si leur activité collective dégrade les indicateurs biophysiques. La limite principale tient à la confiance institutionnelle requise pour qu'une monnaie émise sans contrepartie de dette soit acceptée comme moyen de paiement et unité de compte stable (Ingham, 2004)⁴³. Cette question de légitimité relève de H3 et des conditions institutionnelles développées en Section 7.

4.2 — Création primaire : l'écodotation

Motivation

Une fois posé le principe d'une monnaie émise sans contrepartie de dette, se pose la question de sa distribution. Comment distribuer une masse monétaire dont le volume est conditionné par l'état biophysique, sans reproduire des mécanismes d'allocation qui maximiseraient les inégalités ou stimuleraient la compétition pour l'accès aux ressources ? L'écodotation répond à cette question en instaurant une distribution primaire périodique, algorithmiquement définie, répartie entre trois catégories d'agents — État, citoyens, entreprises — selon des formules indexées sur l'IED. Elle opère comme un transfert systémique de la capacité de soutenabilité du système Terre vers les agents économiques, analogue à une part de la capacité biologique de la planète.

Description fonctionnelle

Les valeurs numériques mentionnées dans ce document (par exemple le niveau d'écodotation annuelle ou les paramètres de fonte monétaire) doivent être interprétées comme des ordres de grandeur exploratoires destinés à illustrer le fonctionnement du mécanisme proposé. Elles constituent un point de départ pour la modélisation et l'analyse de sensibilité, et non une

⁴³ Ingham, G. (2004). *The Nature of Money*. Polity Press.

calibration normative définitive. Leur détermination empirique relève d'un programme de recherche ultérieur, fondé sur l'analyse macroéconomique, les conditions institutionnelles et les contraintes biophysiques propres à chaque contexte.

L'écodotation est la masse monétaire générée à intervalles déterminés et distribuée selon trois canaux distincts, tous dépendants des indicateurs EXEC via l'IED.

Le terme « écodotation » ne doit pas être confondu avec les dispositifs existants de revenu de base ou de dividende écologique. Contrairement au revenu de base, qui constitue généralement un transfert monétaire universel financé par l'impôt ou par redistribution budgétaire, l'écodotation correspond ici à un mécanisme de création monétaire primaire indexé sur l'état biophysique du système. Elle se distingue également des propositions de dividende écologique ou de dividende carbone, qui reposent sur la redistribution de rentes environnementales spécifiques. Dans l'architecture de l'Économie Homéostatique, l'écodotation constitue un mécanisme macroéconomique de régulation systémique reliant les indicateurs biophysiques (EXEC) aux flux monétaires de l'endo-économie.

Canal État (DETA). Le terme "État" est ici fonctionnel : il désigne l'ensemble des institutions publiques assurant la gestion du bien commun, à tous les échelons de gouvernance. L'État reçoit une dotation destinée à assurer les fonctions collectives nécessaires au maintien des conditions de soutenabilité — services publics, infrastructures, protection des écosystèmes, redistribution. La formule générale est : $DETA = IED \times \beta_{pub} \times c$, où β_{pub} représente un paramètre de base exprimant le niveau de provision publique par citoyen compatible avec le plancher social retenu. Dans la présente version exploratoire (V1.0), β_{pub} est calibré provisoirement par la valeur 22 000 €, correspondant à la moyenne des dépenses publiques par habitant observées dans les dix pays européens à plus forte dépense publique. Cette valeur n'a pas de statut théorique définitif : elle constitue un point de calibration initial susceptible de variation et d'étude de sensibilité. Et c désigne le nombre de citoyens. La dotation publique croît donc mécaniquement avec la population et l'état écologique mesuré, sans dépendre de l'endettement souverain ni des conditions des marchés financiers. Le cadre EH ne propose pas, à ce stade, de mécanisme explicite de détermination du niveau général des prix. Les montants d'écodotation sont exprimés en unités monétaires nominales ; la relation entre masse monétaire, production réelle et niveau des prix reste à formaliser dans des travaux ultérieurs. Dans les formules de distribution présentées ci-dessous, l'IED apparaît explicitement car ces expressions

correspondent aux règles institutionnelles de calcul des écodotations. Dans la formalisation dynamique du système, ces flux sont représentés par $e(t)$, dont l'intensité est modulée par le coefficient $u(t)=\Phi(\text{IED}(S(t)))$

Dans la configuration minimale du système, β_{pub} est fixé à 1, de sorte que la totalité de la dotation publique DETA est déterminée par l'indicateur IED et le nombre de citoyens c .

Les flux DCIT et DENT constituent des canaux de distribution distincts et ne dépendent pas du paramètre β_{pub} .

DTETA étant toutes les écodotations perçues par les États d'une même zone économique.

Canal citoyens (DCIT). Les citoyens reçoivent une dotation individuelle reconductible, conçue comme une allocation de base assurant un accès minimal et continu à l'espace économique. La dotation totale des citoyens d'un État est égale à DETA ($\text{DTCIT} = \text{DETA}$), et la dotation individuelle est : $\text{DCIT} = \text{DETA} / c$. Chaque citoyen reçoit ainsi une part égale de la dotation collective, dont le niveau varie en fonction de l'état bioéconomique global de la zone, traduisant une évolution collective des capacités économiques plutôt qu'une distribution fondée sur des performances individuelles. Ce mécanisme desserre le lien structurel entre revenu monétaire et expansion continue des volumes de consommation.

Canal entreprises (DENT). Les entreprises reçoivent une dotation destinée à assurer leur capacité opérationnelle, condition nécessaire au fonctionnement du métabolisme socio-économique. La formule est : $\text{DENT} = \text{IED} \times P$, où P représente la production de l'entreprise mesurée par ses charges d'exploitation lissées sur les trois dernières années (hors impôts, assurances, produits financiers et distribution de bénéfices). Cette dotation n'est pas adossée au profit mais indexée sur des critères de soutenabilité, réduisant la dépendance structurelle au capital financier. Cette relation ne signifie pas que la production future dépend uniquement de l'écodotation : les entreprises disposent également d'autres sources de financement, notamment les profits réinvestis. Elle est conçue pour rendre possible l'émergence de modèles productifs compatibles avec les limites planétaires.

La masse monétaire globale d'une zone économique est la somme des trois dotations : $\text{DG} = \text{DTETA} + \text{DTCIT} + \text{DTENT}$. Elle constitue une masse monétaire brute, déterminée par les

conditions écologiques et institutionnelles du territoire, évolutive et indépendante de toute cible de valeur prédéfinie.

Interactions avec l'IED

L'IED opère comme régulateur global du mécanisme primaire. Il garantit que l'ensemble des écodotations — publiques, citoyennes et productives — évoluent conjointement en fonction de l'état écologique, sans qu'un agent ou un sous-ensemble d'agents puisse dissocier durablement sa trajectoire monétaire de celle du système. La régulation est de nature strictement systémique : elle ne repose ni sur le contrôle des usages individuels, ni sur des dispositifs d'audit individualisés, mais sur l'ajustement automatique des flux de création et de distribution. Les trajectoires économiques incompatibles avec la soutenabilité cessent progressivement d'être avantageuses en termes d'accès à la monnaie, sans intervention discrétionnaire. Cette propriété d'autorégulation — dont l'efficacité effective relève de l'hypothèse H2 — est directement liée au principe du couplage conditionnel établi en Section 3.

Implications comportementales

L'écodotation introduit un changement radical de la logique de revenu : pour l'État, les citoyens et les entreprises, l'accès à la monnaie n'est plus conditionné par la croissance ni par l'endettement, mais par l'état collectif du système biophysique. Cette structure incite à préserver les indicateurs EXEC non comme un objectif moral mais comme une condition d'intérêt économique direct. Elle soulève cependant une question non résolue : si les formules de calcul sont publiques et les indicateurs connus, les agents peuvent être incités à optimiser leur position indicielle — à influencer la mesure plutôt qu'à modifier leur impact réel. C'est la tension A4/IED identifiée en Section 2, qui conditionne directement la gouvernance des indicateurs traitée en Section 6.

4.3 — Création secondaire : les Projets Régénératifs (PR)

Motivation

L'écodotation distribue la monnaie selon l'état biophysique courant mais n'oriente pas activement les flux monétaires existants vers des activités régénératives. Or, le système économique actuel rend structurellement non finançables les projets à bénéfice écologique non marchand : un projet de reforestation, de dépollution ou de restauration de zones humides produit une valeur systémique que les mécanismes de marché ne peuvent valoriser. Dans un régime de monnaie-dette, ces projets sont à perte par construction. L'EH introduit un second mécanisme de création monétaire pour rendre ces projets économiquement viables : **les projets régénératifs (PR)**.

Logique fonctionnelle et conditions d'activation

Les PR constituent une émission monétaire conditionnelle, activée ex post par la réalisation effective de projets orientés vers l'amélioration des indicateurs exo-économiques. Ils représentent la seule modalité d'investissement exemptée de fonte monétaire dans l'EH — non comme avantage financier, mais comme correction structurelle d'une asymétrie : la valeur écologique produite n'étant pas capturable par le marché, son financement requiert une architecture monétaire spécifique.

La procédure d'activation est explicitement séquencée. Un dossier de projet est soumis à un organe certifiant, comprenant description, déroulement, objectifs écologiques, durée, coût et sources de financement. Si le projet est certifié, il peut recevoir des investissements. Pendant la phase de réalisation, la monnaie circule dans l'économie réelle et demeure soumise à la fonte chez les agents qui la reçoivent. À l'issue du projet, et sous réserve de validation des résultats écologiques par l'organe de contrôle, l'investisseur est remboursé intégralement de son capital, augmenté d'une plus-value — la remémoration — créée ex post. Cette plus-value est strictement proportionnelle au capital investi et conditionnée à la réalisation effective du projet.

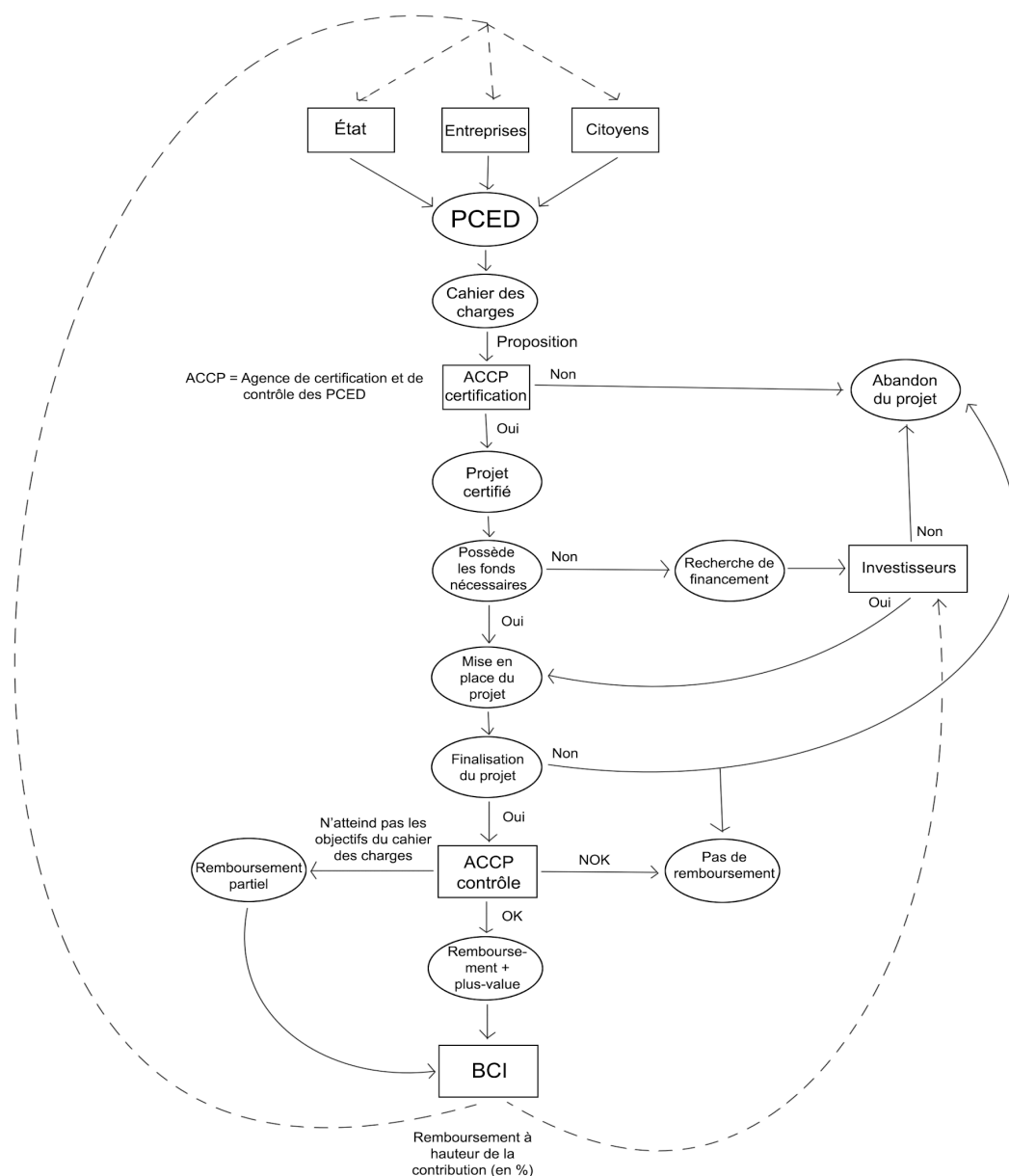


Figure 8 — *Processus de mise en place d'un projet régénératif (PR). Le schéma détaille les étapes séquentielles : soumission du dossier, certification, financement, réalisation avec contrôles intermédiaires, validation finale et remboursement avec remémoration. L'absence de finalisation entraîne le retrait de la certification et l'absence de remémoration. Les projets partiellement réalisés font l'objet d'un remboursement au prorata des travaux validés, sans plus-value.*

Quatre catégories de PR sont définies, chacune associée à un taux de remémoration différencié selon la nature et l'intensité des bénéfices écologiques attendus. Les PR de catégorie A — projets

d'accroissement de la biodiversité — bénéficient du taux le plus élevé, à 4 % du montant investi. Les PR de catégorie B — dépollution ou réduction des émissions de polluants — sont rémunérés à 3 %. Les PR de catégorie C — diminution de l'empreinte écologique globale — à 2 %. Les PR de catégorie D — réduction de la consommation de ressources non renouvelables — à 1 %. Ces taux constituent des hypothèses de travail destinées à être testées, ajustées et adaptées dans le cadre d'analyses empiriques ultérieures ; ils ne sont pas des rendements financiers mais un paramétrage exploratoire d'orientation de l'investissement.

Interactions avec la création primaire et l'IED

Les PR n'agissent pas directement sur le volume initial de création monétaire (objet de l'écodotation), mais sur l'orientation des flux monétaires existants. Dans la formalisation dynamique du cadre, $R(t)$ désigne le flux net de création monétaire associé au mécanisme de remémoration des projets régénératifs. Il ne correspond pas au volume total d'investissement mobilisé pour ces projets, qui est financé par la mobilisation de monnaie préexistante. Leur réalisation effective améliore les indicateurs EXEC, ce qui augmente mécaniquement l'IED et donc la masse monétaire disponible lors des périodes suivantes via la création primaire. Les deux mécanismes sont donc complémentaires et mutuellement renforçants : l'écodotation crée la monnaie selon l'état biophysique courant ; les PR améliorent cet état et élargissent ainsi les capacités de création future.

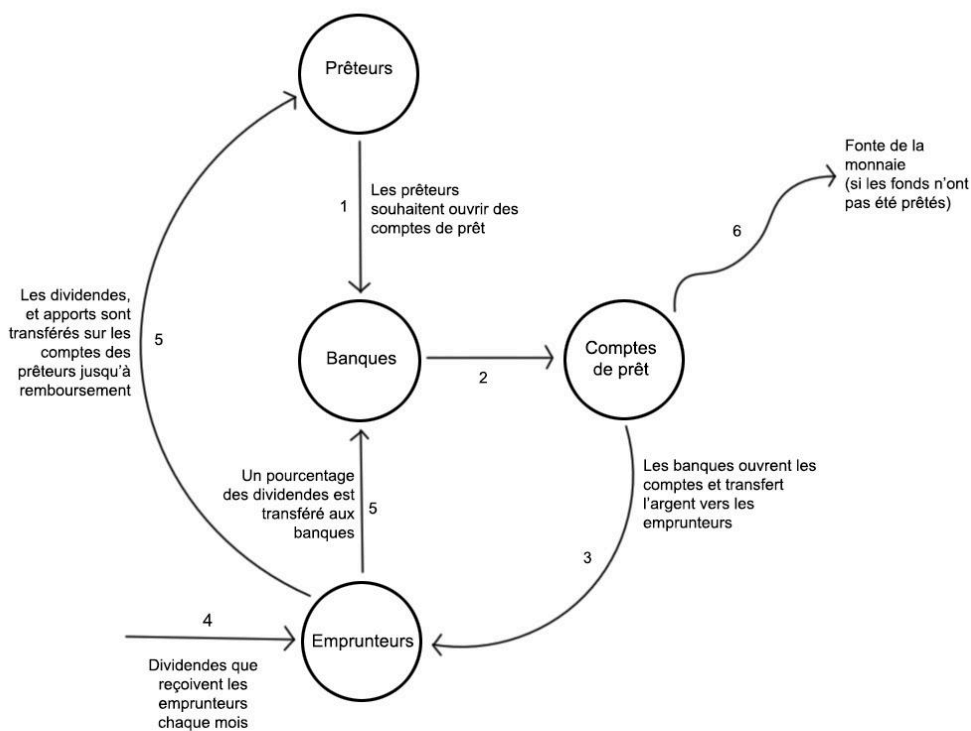


Figure 9 — Mécanisme de prêt-crédit et comparaison avec la logique de création monétaire dans l'EH. Dans le système bancaire conventionnel, le prêt crée de la monnaie nouvelle dont le remboursement impose une expansion matérielle. Dans l'EH, le prêt mobilise de la monnaie existante sans création supplémentaire, et les PR constituent le seul mécanisme de création secondaire — strictement conditionné à la validation de résultats écologiques mesurables.

Implications et risques

Les PR modifient les arbitrages d'allocation des stocks monétaires en présence de fonte. Dans un régime monétaire fondant, conserver une épargne passive expose à une destruction progressive. Investir dans un PR — le seul actif exempté de fonte — devient relativement plus attractif que la rétention passive. Ce mécanisme oriente structurellement l'épargne vers des projets à contribution écologique différenciée. Le risque principal est celui de la manipulation indicielle : des projets pourraient être conçus pour maximiser la mémorisation sans amélioration réelle des indicateurs. La résistance à ce risque dépend de la robustesse de la procédure de

certification, de l'indépendance de l'organe de contrôle, et de la qualité de la mesure des impacts — soit précisément les conditions institutionnelles de H3, développées en Section 7.

4.4 — Destruction et fonte

Motivation

La monnaie *ex naturae* est émise sans contrepartie de dette. Elle n'est donc pas automatiquement détruite par le remboursement d'un crédit, comme dans le système contemporain. Sans mécanisme explicite de destruction, la masse monétaire tendrait à s'accumuler indéfiniment, générant des déséquilibres macroéconomiques persistants — non par inflation mécanique, mais par l'absence de régulation endogène des stocks monétaires dans le temps. Par ailleurs, l'accumulation illimitée de stocks monétaires entretiendrait la thésaurisation, réduirait la vitesse de circulation, et neutraliserait les incitations à l'investissement régénératif. L'EH exige donc un mécanisme de destruction structurel et régulier : ce mécanisme est la fonte.

Description fonctionnelle

La fonte est un double mécanisme structurel de destruction monétaire progressive appliqué aux stocks monétaires selon un taux temporel explicite et stable. Dans l'architecture EH, la fonte comporte deux composantes complémentaires : une composante appliquée aux encaisses monétaires détenues sur les comptes des agents (Gesell, 1916)⁴⁴, et une composante appliquée aux transactions monétaire.

Dans l'analyse dynamique du système, ces deux composantes peuvent être représentées par deux paramètres distincts. On note λ_{\square} le taux de fonte appliqué aux stocks monétaires (encaisses détenues) et λ_{\square} le taux appliqué aux flux de transactions monétaires. La première agit comme un mécanisme de dissipation des réserves monétaires dans le temps, tandis que la seconde agit comme un coût structurel de circulation monétaire. L'architecture EH n'impose pas, a priori, la relation entre ces deux paramètres : leurs formalisations dynamiques complètes constituent un objet de recherche ouvert (Section 9).

⁴⁴ Gesell, S. (1916). *Die natürliche Wirtschaftsordnung durch Freiland und Freigeld*. Berlin: Selbstverlag.

Cette double structure vise à décourager simultanément la thésaurisation et certaines formes de circulation monétaire ordinaire, tout en orientant les encaisses vers les Projets Régénératifs (PR). Les montants affectés aux PR sont exemptés de fonte tant qu'ils restent immobilisés dans le projet ; ils redeviennent soumis au régime général lors des transactions de biens et services effectivement réalisées. Elle reproduit dans la sphère monétaire une forme d'entropie simulée, cohérente avec les dynamiques du monde matériel : tout comme les objets physiques se dégradent dans le temps, les stocks monétaires se réduisent progressivement, indépendamment des usages qui en sont faits. Cette analogie est toutefois de nature heuristique : contrairement à la dégradation thermodynamique des systèmes physiques, la fonte monétaire constitue un mécanisme institutionnel volontaire, réversible et paramétrable.

A la différence d'une dépréciation par inflation — qui résulte d'une perte de confiance ou d'un déséquilibre entre offre et demande de monnaie —, la fonte est une règle institutionnelle délibérée, symétrique et prévisible. Elle est appliquée aussi bien à l'épargne qu'aux transactions, ce qui distingue l'EH des expériences historiques de monnaie fondante appliquée uniquement aux stocks d'épargne. Cette double application réduit le désavantage de l'épargne par rapport à la consommation, sans pour autant maximiser la vitesse au point de stimuler la surconsommation.

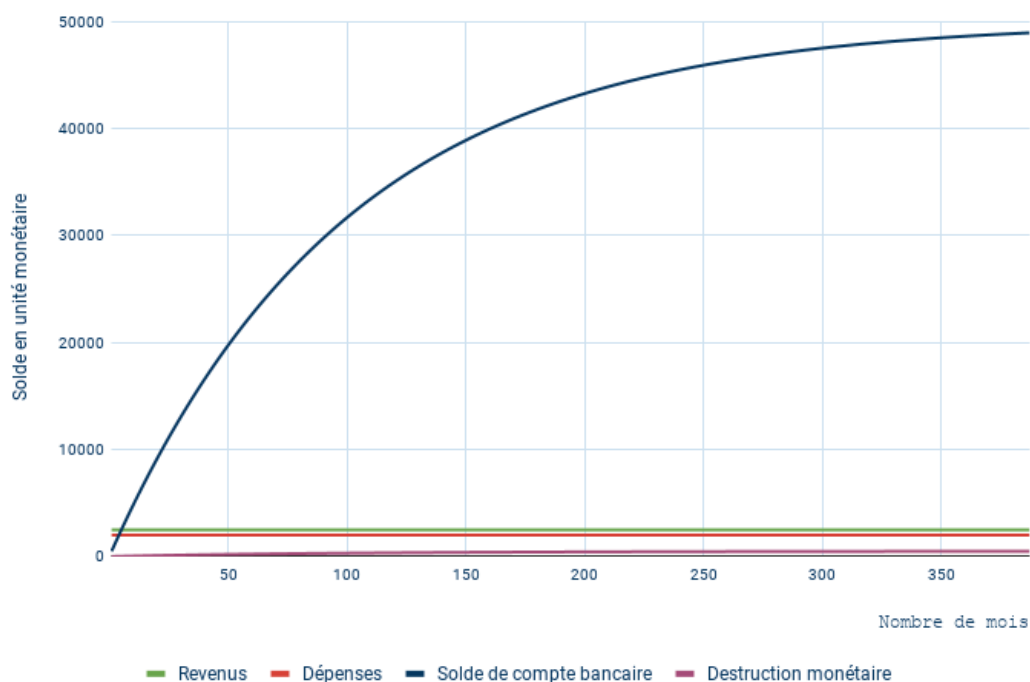


Figure 10 — Comportement d'une monnaie fondante dans le temps. Les conditions illustrées sont les suivantes : taux de fonte fixe de 1 % par mois, revenu mensuel fixe de 2 500 unités, dépense mensuelle fixe de 2 000 unités. La courbe montre une forte progression initiale du solde, suivie d'une stabilisation progressive autour d'un plateau. Ce plafonnement est une propriété caractéristique de la monnaie fondante : à moyen et long terme, le solde tend vers l'équilibre entre entrées et destructions, sans accumulation indéfinie.

La stagnation du solde survient lorsque, sur une période donnée, les revenus sont exactement égaux à la somme des dépenses et de la monnaie détruite par la fonte. Ce fonctionnement s'applique à l'échelle d'un agent individuel et, par agrégation, à l'ensemble d'une zone économique : lorsque la monnaie distribuée égale la masse détruite par la fonte, la masse monétaire totale se stabilise. Cette propriété d'équilibre dynamique de la masse monétaire est une condition analytique — elle ne garantit pas l'acceptabilité sociale de l'équilibre atteint, dont les caractéristiques dépendent des paramètres de calibrage.

Interactions avec le cycle monétaire complet

La fonte est la clé de voûte de la cohérence temporelle de l'architecture monétaire. Elle complète le cycle en assurant que la masse monétaire ne croît pas indéfiniment en dépit de créations périodiques répétées. Elle interagit avec les deux mécanismes de création de manière asymétrique : elle s'applique à toute la monnaie en circulation (soumise à l'écodotation), mais est suspendue pour les stocks affectés aux PR, créant ainsi un différentiel incitatif structurel en faveur de l'investissement régénératif. Elle n'est pas un instrument discrétionnaire de pilotage conjoncturel : c'est son existence permanente et stable, non la variation de son taux, qui constitue la rétroaction négative fondamentale du système. À chaque nouvelle période, la monnaie créée s'ajoute à la monnaie encore présente dans le circuit, diminuée de la fonte accumulée, produisant une masse monétaire en valeur constante compatible avec les limites écologiques définies par l'IED.

Un phénomène de surconsommation qui dégrade les indicateurs EXEC se traduit, via l'IED, par une diminution de la masse monétaire créée à la période suivante. Il s'agit d'une boucle de rétroaction négative qui limite structurellement la surconsommation sans intervention normative directe. À l'inverse, une sous-consommation relative des ressources améliore les indicateurs et augmente la capacité monétaire future de la zone (volume potentiel de création monétaire déterminé par la règle institutionnelle), renforçant sa capacité d'action.

Implications comportementales et limites techniques

La fonte reconfigure en profondeur les comportements rationnels attendus des agents. Dans un régime de monnaie fondante, l'accumulation passive de stocks monétaires est pénalisée : les réserves non mobilisées se réduisent progressivement. Cette configuration incite structurellement à mobiliser la monnaie — que ce soit en consommation, en production, ou en investissement régénératif. Elle rend l'enrichissement infini impossible par la seule accumulation de stocks, sans pour autant supprimer la possibilité d'une prospérité durable fondée sur la maîtrise des flux.

La limite technique principale concerne le support de la fonte. Son application automatique et régulière suppose des architectures de paiement permettant d'inscrire la destruction monétaire dans la structure même de l'unité monétaire — et non comme une décision administrative ex

post. Les choix techniques associés (support numérique, architecture de paiement, traçabilité, gouvernance) sont des questions ouvertes qui conditionnent la faisabilité opérationnelle du mécanisme, sans relever du cadre analytique central de l'EH. Ils constituent des objets de recherche distincts, signalés comme tels en Section 9.

5 — Propriétés dynamiques du système

Repère conceptuel — trois régimes dynamiques

Dans le cadre EH, trois régimes de trajectoires peuvent être distingués :

1. Trajectoires non viables : le système quitte le corridor K .
2. Trajectoires viables non homéostatiques : le système reste dans K sans converger vers la zone homéostatique.
3. Trajectoires homéostatiques : le système converge vers une zone de viabilité mobile (dont le caractère attractif relève de la conjecture C4) Z_{sat} .

La formalisation présentée dans cette section vise à identifier les conditions dynamiques permettant l'existence et la stabilité de ce troisième régime.

5.1 — Motivation : pourquoi l'équilibre ne peut être un point fixe

Les cadres d'optimisation standard conçoivent l'équilibre économique comme un état vers lequel le système converge et qu'il maintient en l'absence de perturbation. Cette conception implique une notion de stabilité définie par le retour à une valeur-cible précise — un niveau de prix, un taux de croissance, un ratio dette/PIB. L'Économie Homéostatique rejette cette conception pour deux raisons directement issues des axiomes établis en Section 2.

Premièrement, A2 pose que la viabilité est une propriété de trajectoire : elle ne peut pas être évaluée à partir d'états statiques ou de configurations ponctuelles. Un système qui atteint un "optimum" à un instant donné peut néanmoins emprunter, à partir de ce point, une trajectoire conduisant à des irréversibilités biophysiques — si les dynamiques cumulatives de ses flux ne sont pas contenues dans des bornes compatibles avec la zone de viabilité. L'équilibre qui importe n'est pas l'état instantané mais la stabilité de la trajectoire dans le temps.

Deuxièmement, A3 pose que la médiation macroéconomique des contraintes biophysiques doit opérer à l'échelle des dynamiques systémiques, non des configurations ponctuelles. Un système biophysique vivant — écosystème, cycle du carbone, réseau trophique — n'atteint jamais un état strictement stationnaire : il oscille en permanence autour d'un régime de viabilité, absorbant des perturbations internes et exogènes sans franchir les seuils qui compromettraient son fonctionnement. L'EH transpose cette logique au plan macroéconomique : la stabilité recherchée n'est pas une invariance, mais une résilience ondulatoire — la capacité du système à maintenir des oscillations contenues dans la zone homéostatique définie par le plancher social et le plafond environnemental.

La définition de l'équilibre comme zone de viabilité mobile oscillatoire — et non comme point fixe — est donc une conséquence architecturale directe du cadre axiomatique. Elle déplace la question analytique centrale : non plus "quelle est la valeur optimale à atteindre ?" mais "quels sont les régimes de trajectoire compatibles avec un maintien durable dans la zone de viabilité ?"

5.2 — Description : régimes de trajectoire, paramètres sensibles et statut des formalisations

La zone de viabilité comme régime dynamique confiné

L'équilibre dynamique de l'EH est formalisé comme une zone de viabilité : au voisinage de laquelle les trajectoires du système peuvent demeurer confinées, sous certaines conditions portant sur la dynamique biophysique et sur la fonction de couplage Φ . Une zone dans laquelle des fluctuations de l'IED sont admissibles tant qu'elles restent d'amplitude limitée et s'inscrivent

dans des dynamiques progressives (Prigogine, 1977)⁴⁵. Ce qui importe n'est pas la valeur absolue de l'IED à un instant donné, mais l'absence de variations significatives et prolongées de sa trajectoire dans le temps.

Cette propriété peut être formulée de manière plus rigoureuse en termes de stabilité de trajectoire. On dira que le système est en régime homéostatique si l'indicateur d'équilibre dynamique reste confiné dans un voisinage borné d'une valeur de référence IED_{ref} . Formellement, il existe $\varepsilon > 0$ et un temps T tels que :

$$|IED(t) - IED_{ref}| < \varepsilon \text{ pour tout } t \geq T.$$

Concrètement, deux zones économiques dont les IED respectifs se stabilisent durablement autour de 0,8 et 1,2 peuvent toutes deux être en situation d'équilibre homéostatique, dès lors que ces niveaux demeurent stables eu égard à leurs contextes écologiques, économiques et géographiques. L'équilibre ne se définit ni par un seuil universel ni par un optimum unique : il se caractérise par la stabilité relative de la trajectoire, condition de l'existence d'une zone tampon fonctionnelle nécessaire au maintien du système dans sa viabilité.

Les bornes de cette zone ne sont pas permanentes. Elles se déplacent dans le temps en fonction de l'état du système Terre, de l'évolution des connaissances scientifiques, de la découverte de nouveaux gisements, des innovations technologiques et des évolutions démographiques. Cette plasticité est une condition nécessaire : un cadre dont les bornes seraient fixées une fois pour toutes ne pourrait s'adapter aux modifications progressives du système biophysique englobant.

⁴⁵ Meadows, D. H. (2008). *Thinking in systems*. Chelsea Green.; Bertalanffy, L. von. (1968). *General system theory*. George Braziller. ; Prigogine, I., & Stengers, I. (1977). *La nouvelle alliance*. Gallimard.

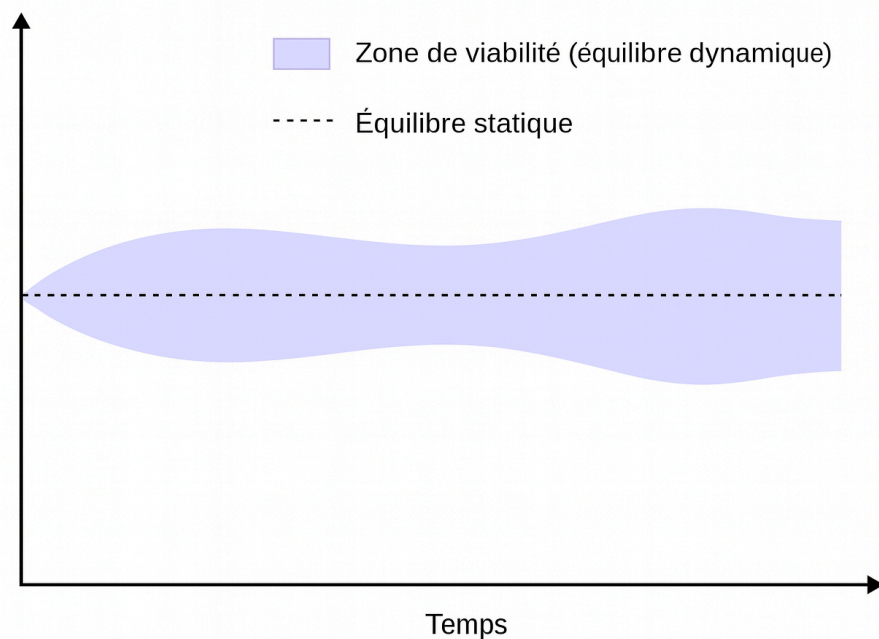


Figure 11 — Distinction entre équilibre statique et zone de viabilité dynamique. La ligne pointillée symbolise l'équilibre statique d'un modèle d'optimisation classique : une valeur-cible unique vers laquelle le système converge. La bande représente la zone de viabilité homéostatique : un intervalle de fluctuation dans lequel le système économique demeure fonctionnel et résilient, en absorbant les perturbations et en s'ajustant continuellement. L'économie homéostatique privilégie un équilibre vivant, adaptatif et réversible plutôt qu'un état figé.

Trois régimes de trajectoire

L'EH identifie analytiquement trois régimes de trajectoire possibles pour un système économique.

Le premier est le régime homéostatique : la trajectoire de l'IED oscille dans la zone tampon, absorbant les perturbations modérées par les boucles de rétroaction monétaires. Les déviations sont corrigées par les mécanismes décrits en Section 4 — contraction ou expansion de la création monétaire, effet incitatif de la fonte, fléchage des investissements vers les PR — sans que le système ne sorte durablement du corridor. Ce régime correspond à la viabilité dynamique recherchée.

Le second est le régime de déviation corrigible : la trajectoire s'écarte de la zone tampon de manière significative mais temporaire. Les mécanismes de rétroaction restent capables de corriger la déviation et de ramener le système dans sa zone de viabilité, mais avec un délai de rétroaction et un coût d'ajustement potentiellement élevés. La réversibilité — propriété par laquelle le système peut revenir dans la zone de viabilité après une perturbation — est encore possible.

Le troisième est le régime de non-viabilité : la trajectoire sort durablement du corridor, atteignant des états dont les irréversibilités compromettent le retour à la zone homéostatique. Ce régime peut résulter soit d'un franchissement du plafond environnemental — dégradation irréversible d'écosystèmes critiques, épuisement de stocks non renouvelables au-delà des seuils de régénération — soit d'une chute en dessous du plancher social, produisant des désintégrations institutionnelles et sociales qui rendent le pilotage des indicateurs EXEC impossible. Dans ce régime, les mécanismes homéostatiques perdent leur pertinence analytique : les conditions de validité du cadre (H1, H2, H3) ne sont plus satisfaites.

Paramètres sensibles

Trois paramètres commandent les propriétés dynamiques du système et déterminent le régime dans lequel il se trouve.

Le premier est la trajectoire de l'IED — le paramètre central du couplage. C'est lui qui conditionne les volumes de création monétaire et qui signale la position du système par rapport à la zone de viabilité. Sa construction à partir des trois indicateurs exo-économiques IBD, IEE, IRNR est développée en Section 6.

Le deuxième est le taux de fonte. Il détermine la vitesse à laquelle la masse monétaire se contracte en l'absence de nouvelles dotations. Un taux trop faible affaiblit l'effet incitatif vers les PR et laisse s'accumuler des stocks monétaires déconnectés de la contrainte biophysique ; un taux trop élevé génère une anxiété de liquidité, incite à des dépenses précipitées et peut accentuer l'instabilité plutôt que la corriger.

Le troisième est le délai de rétroaction entre les dégradations biophysiques effectives et leur traduction dans les indicateurs EXEC, puis dans les règles de création monétaire. Ce délai est structurellement non nul : les phénomènes écologiques s'étalent dans le temps, leur mesure

nécessite des protocoles qui introduisent eux-mêmes des décalages, et la transmission du signal monétaire aux comportements des agents prend du temps. Plus le délai est long par rapport à la vitesse des dégradations, plus le risque de franchir un seuil irréversible avant que la correction ne produise ses effets est élevé.

Statut des formalisations mathématiques

L'EH ne dispose pas à ce stade d'un modèle dynamique complet formalisé. Les propriétés décrites — zone de viabilité mobile (dont le caractère attractif relève de la conjecture C4), régimes de trajectoire, délais de rétroaction, seuils irréversibles — sont des hypothèses de structure déduites de la cohérence interne du cadre et des analogies avec les systèmes vivants. Leur formalisation mathématique rigoureuse — dans le cadre de la théorie de la viabilité (Aubin, 1991)⁴⁶ par exemple, de la dynamique des systèmes ou de la modélisation par agents — constitue un programme de recherche ouvert, identifié en Section 9. Les paramètres numériques (taux de fonte, coefficients d'écodotation) ont statut exploratoire et requièrent une calibration empirique que le cadre théorique ne peut fournir lui-même.

5.3 — Interactions : comment les mécanismes monétaires produisent ou perturbent les propriétés dynamiques

Les quatre mécanismes décrits en Section 4 s'articulent aux propriétés dynamiques de manière différenciée.

L'écodotation est le mécanisme qui conditionne le volume absolu de capacité monétaire disponible à chaque période. Lorsque l'IED progresse, la dotation s'élargit, autorisant une augmentation de l'activité économique — mais potentiellement une pression accrue sur les indicateurs EXEC lors de la période suivante. Lorsque l'IED se dégrade, la dotation se contracte, réduisant mécaniquement la capacité d'action économique. Cette dynamique d'aller-retour est le cœur du régime homéostatique : l'activité économique est bornée par l'état biophysique, qui

⁴⁶ Aubin, J.-P. (1991). *Viability Theory*. Boston: Birkhäuser.

est lui-même influencé par l'activité économique, formant une boucle de rétroaction négative. Elle n'est cependant ni instantanée ni nécessairement stabilisatrice: avec des délais de rétroaction suffisamment longs, la boucle peut produire des oscillations dont l'amplitude croît plutôt qu'elle ne converge.

La fonte contribue à la stabilité dynamique de manière structurelle, indépendamment des variations de l'IED. En retirant périodiquement de la monnaie du circuit, elle prévient l'accumulation de stocks monétaires qui se déconnecteraient de la contrainte biophysique et alimenteraient des dynamiques de surconsommation autoentretenu. Elle réduit aussi la sensibilité du système aux chocs positifs d'écodotation : une période de forte amélioration de l'IED, qui déclencherait une dotation élevée, est partiellement absorbée par la fonte en cours, limitant l'amplification procyclique. En revanche, si le taux de fonte est mal calibré — trop élevé — il peut comprimer excessivement la capacité monétaire disponible et déprimer l'activité économique sous le plancher social, produisant une déviation vers le bas du corridor.

Les Projets Régénératifs jouent un rôle dynamique de second ordre mais stratégique : en améliorant directement les indicateurs EXEC, ils agissent sur la variable-signal — l'IED — et déclenchent une augmentation des écodotations futures. Cette rétroaction est positive au sens dynamique (elle amplifie une tendance favorable) mais écologiquement souhaitée : c'est l'un des mécanismes par lesquels le système peut enclencher des trajectoires d'amélioration durable de l'état biophysique plutôt que de simplement maintenir un équilibre existant. Son risque dynamique propre est le délai entre l'investissement (immédiat) et l'amélioration effective de l'indicateur (différée selon la nature du projet), ce qui peut créer des anticipations non satisfaites à court terme.

L'interaction entre ces trois mécanismes détermine le régime effectif du système. En configuration nominale, la boucle écodotation-IED-écodotation est stabilisée par la fonte et enrichie par les PR. En configuration dégradée — délais longs, taux de fonte mal calibré, PR insuffisants ou mal certifiés — les propriétés stabilisatrices s'affaiblissent et le système peut s'engager dans des trajectoires divergentes.

5.4 — Implications : irréversibilités possibles et insuffisance analytique de l'absence d'un modèle complet

Irréversibilités possibles

L'EH identifie deux familles d'irréversibilités susceptibles d'engager le système dans un régime de non-viabilité.

La première famille est **d'ordre biophysique** : franchissement de seuils écologiques au-delà desquels les dynamiques de dégradation deviennent autoentretenu — effondrement de la biodiversité, basculement de régime climatique, épuisement d'aquifères fossiles. Dans ces configurations, la dégradation de l'IED ne reflète plus une déviation corrigible mais un basculement de l'exo-économie vers un régime d'état inférieur. Les mécanismes monétaires peuvent rétroagir mais ne peuvent pas reconstituer ce que les processus biophysiques ont irréversiblement perdu.

La seconde famille est **d'ordre institutionnel et social** : déstabilisation des dispositifs de mesure et de gouvernance, effondrement de la légitimité des règles monétaires, conflits distributifs rendant les ajustements politiquement impossibles. Dans ces configurations, le couplage EXEC/ENEC se rompt non par défaillance biophysique mais par défaillance institutionnelle — renvoyant directement à la condition posée par l'hypothèse H3. Un régime de règles monétaires biophysiquement cohérent peut devenir socialement insoutenable si les perdants immédiats des ajustements ne sont pas compensés ou si la légitimité des indicateurs EXEC est contestée de manière durable.

Insuffisance analytique de l'absence d'un modèle dynamique complet

L'absence d'un modèle dynamique formalisé constitue une limite structurelle majeure du cadre à son stade actuel. Elle produit quatre conséquences analytiques directes.

Premièrement, les conditions précises de stabilité du régime homéostatique ne peuvent être déterminées analytiquement : il n'est pas possible d'identifier a priori les plages de paramètres (taux de fonte, délais de rétroaction, intensité du couplage IED/écodotation) garantissant que le système reste dans la zone de viabilité plutôt qu'il n'en diverge.

Deuxièmement, la sensibilité du système aux chocs exogènes — perturbations climatiques, crises géopolitiques, innovations disruptives — ne peut être évaluée sans modèle dynamique. La résilience ondulatoire revendiquée reste une propriété qualitative non quantifiée.

Troisièmement, le risque d'oscillations instables induites par les délais de rétroaction — bien documenté dans les systèmes de régulation avec retard — ne peut être évalué ni prévenu sans modélisation explicite de ces délais.

Quatrièmement, la calibration des paramètres (taux de fonte, coefficients d'écodotation) est laissée à des expérimentations et simulations futures, sans que le cadre théorique puisse définir des plages de robustesse a priori.

Ces insuffisances ne remettent pas en cause la logique d'ensemble du cadre : elles définissent le programme de recherche nécessaire à son développement, dont les contours sont précisés en Section 9. La trajectoire de l'IED — paramètre sensible central de ces propriétés dynamiques — sera construite et analysée en Section 6.

5.5 — Formalisation du système dynamique : cadre de viabilité et conjectures structurelles

Motivation

La Section 5.4 a explicitement identifié l'absence d'un modèle dynamique formalisé comme une limite structurelle majeure du cadre à son stade actuel. La présente section franchit un premier pas en direction d'une formalisation : elle traduit les propriétés qualitatives décrites dans les sections précédentes en un cadre mathématique précis, emprunté à la théorie de la viabilité (Aubin, 1991)⁴⁷, et formule les conjectures structurelles que cette formalisation rend désormais testables. Elle ne fournit pas de démonstrations : elle produit un langage mathématique rigoureux permettant de poser correctement les problèmes identifiés comme ouverts en Section 9.

Le formalisme présenté dans cette section vise à établir le cadre analytique minimal du système EH. Plusieurs éléments — dont la structure précise de la dynamique biophysique F , la formalisation des délais de rétroaction entre dégradation biophysique et correction monétaire, et la modélisation comportementale des agents — constituent des chantiers centraux du programme de recherche et ne sont pas entièrement spécifiés à ce stade. En particulier, les délais ne sont pas un paramètre secondaire du mécanisme EH : ils sont constitutifs de la boucle de rétroaction, et leur formalisation (passage d'une approximation EDO à un système à retard DDE) conditionne directement la validité des conjectures de stabilité C2 et C4.

Conventions de statut épistémique de cette section. Afin de prévenir toute ambiguïté, les objets introduits dans cette section relèvent de cinq registres distincts, signalés dans le texte :

— *Défini* : objet posé par construction (espace d'état $x = (S, M)$, ensemble de contraintes K , contrôle u , IED).

⁴⁷ Aubin, J.-P. (1991). *Viability theory*. Birkhäuser.

— *Supposé* : hypothèse de travail adoptée sans démonstration (régularité R1–R3, non-dégénérescence du couplage $u \rightarrow \dot{S}$, structure produit $K = K_S \times K_M$, feedback pur sans mémoire).

— *Conjecturé* : propriété formulée comme objectif de preuve dans le programme P-F1 (conjectures C1 à C4).

— *Théorème importé* : résultat démontré dans la littérature (théorème de Nagumo, théorème de viabilité d'Aubin).

— *Problème ouvert* : question dont la résolution est identifiée comme objectif du programme de recherche (P-F1 à P-F5).

Cette classification est maintenue dans l'ensemble de la section. Le statut précis des conjectures C1–C4 est explicité en préambule de la sous-section « Conjectures structurelles » ci-dessous.

Le choix de la théorie de la viabilité n'est pas arbitraire. Elle a précisément été développée pour traiter des systèmes dynamiques soumis à une contrainte de rester dans un ensemble fermé de contraintes K , et pour caractériser le sous-ensemble de K — le noyau de viabilité $\text{Viab}(K)$ — depuis lequel cette contrainte peut être respectée sous l'action de mécanismes de contrôle. C'est exactement le problème de l'EH : maintenir la trajectoire macroéconomique à l'intérieur du corridor délimité par le plancher social et le plafond environnemental, par des rétroactions monétaires. Une condition de possibilité de ce programme est la non-dégénérescence du couplage $u \rightarrow \dot{S}$: si le contrôle monétaire scalaire u n'a aucun effet directionnel sur la composante biophysique F , la viabilité de $S(t)$ devient autonome et le couplage perd sa portée formelle. Cette condition structurelle est explicitée et discutée ci-dessous (Note sur la dimension du problème de contrôle).

Remarque méthodologique — inversion du problème classique de viabilité. Le cadre EH mobilise la théorie de la viabilité dans une logique qui en inverse le problème classique. Dans l'application standard, la dynamique F du système est donnée et l'on cherche à caractériser le noyau de viabilité $\text{Viab}(K)$ associé à un ensemble de contraintes K . Dans le cadre EH, la dynamique biophysique F n'est pas spécifiée : le problème est de déterminer les classes de dynamiques F et de fonctions de couplage Φ pour lesquelles $\text{Viab}(K)$ est non vide. L'EH ne pose

donc pas un problème d'analyse — « étant donné F , que peut-on maintenir dans K ? » — mais un problème de conception — « quelles propriétés F et Φ doivent-elles satisfaire pour que la viabilité soit structurellement possible ? ». Cette inversion est cohérente avec le statut programmatique du document : il ne s'agit pas de démontrer la viabilité d'un système donné, mais d'identifier les conditions sous lesquelles une architecture institutionnelle de régulation monétaire peut, en principe, garantir la non-vacuité du noyau de viabilité. La résolution de ce problème inversé constitue l'objet central de P-F1 (Section 9.6).

Représentation du système comme système dynamique contrôlé

Vecteur d'état

L'état du système à l'instant t est représenté par le couple :

$$x(t) = (S(t), M(t)) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+$$

où :

- Le vecteur d'état biophysique $S(t)$ est défini comme le triplet des trois indicateurs exo-économiques fondamentaux :

$$S(t) = (IBD(t), IEE(t), IRNR(t)) \in [0, 2]^3$$

Les trois composantes de S sont des indicateurs normalisés sur l'intervalle $[0,2]$. L'espace d'état biophysique pertinent est donc le domaine compact $[0,2]^3$. La dynamique biophysique F est supposée préserver l'invariance de ce domaine normalisé.

L'Indicateur d'Équilibre Dynamique est défini comme leur moyenne géométrique de l'état de la biodiversité, de la pollution et des ressources non renouvelables.

$$IED(S) = (IBD \cdot IEE \cdot IRNR)^{1/3}.$$

$M(t) \in \mathbb{R}_+$ est la masse monétaire totale en circulation dans l'endo-économie (ENEC).

Note sur la structure du vecteur d'état. Le niveau d'activité économique agrégée $Y(t)$ est une variable pertinente pour la contrainte de plancher social. Cependant, sa dynamique $\dot{Y}(t)$ n'est pas spécifiée dans cette version du cadre. L'inclure dans le vecteur d'état sans lui associer d'équation constituerait une incohérence formelle. Y est donc traité comme une variable dépendante définie par une relation algébrique $Y = \psi(S, M)$, dont la forme précise est un objet du programme de recherche (P-F1, Section 9). L'extension du vecteur d'état à (S, M, Y) avec une équation $\dot{Y} = h(S, M, Y)$ explicite constitue une étape ultérieure de formalisation. L'extension à un vecteur d'état incluant explicitement Y constitue une extension naturelle du programme de recherche. Dans la hiérarchie des développements théoriques présentée en Section 9, l'introduction explicite d'un vecteur d'état élargi $(*S*, *M*, *Y*)$ est identifiée comme une extension de court terme du cadre formel.

Dynamique du système

Le système évolue selon deux composantes de statuts distincts : $\dot{M}(t) = e(t) + R(t) - \lambda \cdot M(t)$ (composante monétaire — spécifiée). $\dot{S}(t) = F(S(t), u(t))$ (dynamique biophysique — non spécifiée objet de P-F1) On note par abréviation $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$ le système joint, avec $f = (F, f_M)$, avec $x = (S, M)$, on définit explicitement $f(x, u) = (F(S, u), f_M(S, M, u))$, sous réserve que F satisfasse les conditions R1–R3.

Remarque de cadre : Les conditions de régularité R1–R3 portent principalement sur la composante biophysique F . Les résultats de viabilité mentionnés dans ce document doivent donc être interprétés comme conditionnels à la future spécification de la dynamique biophysique F . À ce stade, ils définissent principalement des contraintes formelles auxquelles toute spécification admissible de F devra satisfaire.

La composante monétaire $f_M(S, M, u) = e(t) + R(t) - \lambda M$ est affine en M , continue en (S, M) et donc localement Lipschitz⁴⁸ pour tout $\lambda > 0$; elle satisfait automatiquement les conditions R1 et R2.

⁴⁸ Hirsch, M. W., Smale, S., & Devaney, R. L. (2013). *Differential equations, dynamical systems, and an introduction to chaos* (3rd ed.). Academic Press.

La vérification des hypothèses de viabilité porte donc essentiellement sur les propriétés structurelles de F .

où $u(t) \in \mathcal{U}$ est la variable de contrôle — la règle monétaire — déterminée, dans l'EH, par la valeur courante de l'IED :

$$u(t) = \Phi(\text{IED}(S(t)))$$

Les formules institutionnelles d'écodotation (par exemple $\text{DETA} = \text{IED} \cdot \beta \cdot \text{pub} \cdot c$) définissent un flux de référence $e_{\text{base}}(S)$. Dans la dynamique du système, ce flux est modulé par le coefficient de régulation monétaire $u(t)$, défini ci-dessus, de sorte que la création primaire effective s'écrit :

$$e(t) = u(t)e_{\text{base}}(S(t)).$$

La fonction Φ représente l'architecture de couplage : elle traduit l'état biophysique S en signal monétaire u , qui conditionne à son tour les écodotations. L'IED joue donc le rôle mathématique d'une fonction de couplage entre la dynamique biophysique et la dynamique monétaire.

La variable de contrôle $u(t)$ agit comme un coefficient de modulation de l'écodotation. Elle détermine le flux de création primaire $e(t)$, qui conditionne à son tour le niveau d'investissement dans les Projets Régénératifs et donc la dynamique de création secondaire $R(t)$. La variable u agit donc indirectement sur la circulation monétaire via le canal de l'écodotation. Le taux de fonte λ constitue en revanche un paramètre institutionnel fixé ex ante et tenu constant dans la dynamique.

La variable $u(t)$ est un coefficient scalaire de modulation du régime monétaire. Elle est déterminée par la fonction de couplage définie précédemment, reliant l'indicateur $\text{IED}(S(t))$ au signal monétaire $u(t)$.

où $\text{IED}(S(t))$ représente la valeur de l'indicateur d'équilibre dynamique calculé à partir de l'état biophysique $S(t)$ et Φ est la fonction de transformation reliant cet indicateur au signal monétaire.

La valeur : $u(t) = 1$ correspond au régime monétaire neutre, dans lequel la capacité de création monétaire demeure inchangée par rapport à la situation de référence. Par convention de

normalisation, on suppose que $\Phi(1) = 1$, de sorte que la valeur IED = 1 correspond au régime monétaire neutre. Cette condition fixe l'échelle du couplage sans contraindre la forme fonctionnelle de Φ , qui demeure un objet du programme P-F1.

Lorsque : $u(t) > 1$ le système entre dans un régime d'expansion de la capacité de création monétaire.

À l'inverse, lorsque : $u(t) < 1$ le système se trouve dans un régime de contraction de la capacité de création monétaire.

Ainsi, $u(t)$ agit comme un coefficient de modulation macroéconomique, traduisant l'état de l'exo-économie en ajustement du régime monétaire.

Note sur la dimension du problème de contrôle. Le contrôle $u(t)$ est un scalaire agissant sur un système d'état de dimension $n+1$ (avec $n \geq 3$). Dans la présente version, on considère $n = 3$ correspondant aux trois composantes écologiques $S = (IBD, IEE, IRNR)$. L'écriture générale en dimension n vise une extension potentielle du cadre à un vecteur d'état écologique de dimension supérieure. La capacité d'un contrôle de dimension 1 à maintenir simultanément les deux contraintes de $K - g_{env}$ et g_{social} — dépend de la structure de F et de f_M . La question de la commandabilité partielle ou totale du système sous contrôle scalaire constitue un aspect technique (P-F1 non résolu). Elle présuppose que le couplage $u \rightarrow \dot{S}$ soit non dégénéré — c'est-à-dire que u ait un effet directionnel non nul sur au moins une composante de F . La non-dégénérescence et la commandabilité dimensionnelle sont deux conditions distinctes, logiquement ordonnées : la première est nécessaire pour que la seconde ait un sens.

Propriétés minimales de Φ . On suppose au minimum que $\Phi : [0, 2] \rightarrow \mathcal{U}$ est continue et croissante. Les conditions aux bornes $u_{\min} = \Phi(0)$ et $u_{\max} = \Phi(2)$ bornent l'ensemble des contrôles admissibles. Les classes de fonctions Φ pour lesquelles le noyau de viabilité est non vide constituent un objet central de P-F1.

L'IED est défini sur l'intervalle normalisé $[0,2]$. La valeur IED = 1 correspond au seuil de soutenabilité biophysique du système ; les valeurs inférieures indiquent une dégradation des conditions écologiques ou sociales, tandis que les valeurs supérieures traduisent une situation

de régénération ou d'excédent écologique. La borne supérieure 2 constitue une convention de normalisation destinée à maintenir l'indicateur dans un domaine borné pour les besoins de la fonction de régulation Φ .

L'ensemble des contrôles admissibles est supposé être un intervalle borné

$$U = [0, u_{max}] \subset \mathbb{R}_+$$

La fonction de couplage vérifie deux conditions de normalisation : (i) $\Phi(1) = 1$, de sorte que IED = 1 correspond au régime monétaire neutre ; (ii) $\Phi(0) = 0$, de sorte qu'un effondrement biophysique complet entraîne l'extinction de la création monétaire. La première condition fixe l'échelle du couplage ; la seconde traduit une propriété structurelle du système.

Cette propriété implique que l'état IED = 0 constitue un état absorbant du système : lorsque l'indicateur biophysique atteint zéro, la règle de contrôle impose $u = 0$, ce qui annule les flux de création monétaire et conduit à une dynamique purement dissipative $\dot{M} = -\lambda M$. La masse monétaire converge alors asymptotiquement vers zéro.

Cet état correspond à une situation de non-viabilité globale : aucune trajectoire issue d'un voisinage de $S = 0$ ne peut satisfaire durablement les contraintes de K .

Conditions de régularité requises sur f (prérequis technique). L'application de la théorie de la viabilité (Aubin, 1991 ; Aubin, Bayen & Saint-Pierre, 2011 ; De Lara & Doyen, 2008)⁴⁹ à ce système contrôlé suppose que la fonction dynamique f satisfait des conditions minimales de régularité sans lesquelles les théorèmes de caractérisation du noyau de viabilité (non-vacuité, semi-continuité) ne sont pas applicables. Ces conditions, qui constituent des prérequis techniques du programme P-F1 (Section 9.6), sont les suivantes :

(R1) **Continuité :** $X = [0, 2]^3 \times \mathbb{R}_+$, $f: X \times U \rightarrow \mathbb{R}^4$ est continue en $(x, u) \in X \times U$.

⁴⁹ Aubin, J.-P., Bayen, A.M. & Saint-Pierre, P. (2011). *Viability Theory: New Directions*. Springer. De Lara, M., & Doyen, L. (2008). *Sustainable management of natural resources: Mathematical models and methods*. Springer. ; Aubin, J.-P., Aubin-Frankowski, P.-C., & Lozève, V. (2024). Reintroducing time, money and constraints: Viability to bridge the economic and monetary theories. *International Game Theory Review*, 26(2), 2440001.

$$\text{Ici } x = (S, M) \in X, \quad S \in [0, 2]^3, \quad M \in R_+.$$

Dans ce travail, on se restreint au cas $n = 3$ correspondant aux trois composantes de l'état biophysique $S = (\text{IBD}, \text{IEE}, \text{IRNR})$. L'écriture en dimension $n \geq 3$ est conservée afin de souligner que le cadre formel peut être étendu sans modification structurelle.

(R2) **Condition de Lipschitz locale** : pour tout compact $C \subset [0, 2]^3 \times R_+$, il existe $L_c > 0$ tel que $\|f(x, u) - f(x', u)\| \leq L_c \|x - x'\|$ pour tout $x, x' \in C$ et tout $u \in U$.

Cette condition garantit l'existence et l'unicité locale des trajectoires.

(R3) **Compacité et convexité des images** : pour tout $x \in [0, 2]^3 \times R_+$,

$$f(x, U) = \{f(x, u) \mid u \in U\}$$

est compact et convexe. Cette condition — dite de marchabilité — est nécessaire à l'application du théorème fondamental de viabilité d'Aubin, qui établit l'équivalence entre l'existence du noyau de viabilité et la condition de tangentialité aux frontières de K .

Le domaine biophysique pertinent du système est le compact $[0, 2]^3$, correspondant à la normalisation des trois indicateurs écologiques. Les conditions de régularité sont formulées sur ce domaine effectif, supposé invariant sous la dynamique biophysique F .

En V1.0, la fonction f n'étant pas spécifiée, ces conditions ne peuvent être vérifiées. Toute spécification future de f dans le cadre de P-F1 devra établir explicitement que (R1)–(R3) sont satisfaites. Si la convexité (R3) ne peut être obtenue pour la classe de fonctions de couplage Φ considérée, des résultats alternatifs de viabilité sous hypothèses affaiblies (semi-continuité supérieure de la correspondance $x \mapsto f(x, \mathcal{U})$) devront être mobilisés.

Note sur la portée des conditions R1–R3. Les conditions de régularité R1–R3 sont des prérequis techniques : elles garantissent l'applicabilité des théorèmes de viabilité mais ne portent pas sur la structure du couplage entre u et \dot{S} . En particulier, elles n'impliquent pas que la variable de contrôle u exerce un effet directionnel non dégénéré sur la

composante biophysique F . Or, si la projection de $f(x, U)$ sur \mathbb{R}^n_S est réduite à un singleton pour tout $x \in K$, alors u n'agit que sur \dot{M} et le problème de viabilité sur la composante biophysique devient autonome — la règle Φ est formellement sans effet sur S . La non-dégénérescence de ce couplage — c'est-à-dire l'existence d'au moins un $x \in K$ pour lequel la projection de $f(x, U)$ sur \mathbb{R}^n_S n'est pas un singleton — est une hypothèse structurelle de non-trivialité dont la vérification relève de la spécification de F dans le cadre de P-F1.

Interprétation de la monotonie de Φ . La croissance de Φ signifie qu'un IED élevé — traduisant un bon état biophysique — autorise un contrôle monétaire u plus élevé, c'est-à-dire une capacité de création monétaire accrue (écodotations plus généreuses, seuils d'activation des Projets Régénératifs élargis). Inversement, une dégradation de l'IED contracte u et réduit la création monétaire. La variable de contrôle u agit donc simultanément comme accélérateur (IED élevé) et comme frein (IED bas) : c'est cette double action qui donne au couplage Φ sa fonction régulatrice.

Note sur le choix du feedback sans mémoire. La formulation $u(t) = \Phi(\text{IED}(S(t)))$ définit un contrôle en boucle fermée sans mémoire : la règle monétaire ne dépend que de l'état biophysique courant, sans prise en compte de l'historique des trajectoires passées. Ce choix d'architecture est cohérent avec le principe de simplicité régulatrice de l'EH — le signal monétaire ne dépend que de l'état observable présent, sans estimation rétrospective ni anticipation — et il facilite la transparence institutionnelle du couplage (Section 7).

Il constitue néanmoins une restriction formelle forte. Dans la théorie de la viabilité, le théorème fondamental d'Aubin (1991) établit l'existence d'une régulation viable sous la forme d'une correspondance de rétroaction $x \mapsto U(x) \subset \mathcal{U}$, qui peut en principe dépendre de l'état courant *et* de l'histoire de la trajectoire. Le noyau de viabilité sous feedback pur — où le contrôle est une fonction déterministe $u = \Phi(x)$ — peut être strictement plus petit que le noyau sous contrôle général. En d'autres termes, il peut exister des états initiaux depuis lesquels une stratégie adaptative avec mémoire maintient le système dans K , mais aucun feedback sans mémoire ne le peut.

Pour le cadre de l'économie homéostatique, cette restriction signifie que les résultats de P-F1 obtenus sous l'hypothèse de feedback pur fournissent une borne inférieure du noyau de viabilité. Si $\text{Viab}(K)$ est non vide sous feedback pur, il est *a fortiori* non vide sous contrôle général — mais la réciproque est fautive. La question de savoir si l'écart entre les deux noyaux est significatif pour des classes de fonctions f réalistes constitue un aspect technique du programme P-F1 dont la résolution conditionne l'évaluation de la robustesse du choix architectural.

Note sur le statut institutionnel de Φ . Dans la présente version, Φ est une règle de rétroaction stationnaire — elle est calibrée *a priori* et demeure invariante au cours du temps. Le problème P-F1 consiste à caractériser les classes de règles Φ admissibles, non à optimiser une trajectoire de contrôle. Cette distinction est fondamentale : Φ n'est pas un instrument de pilotage discrétionnaire révisé à chaque période, mais une règle institutionnelle inscrite dans l'architecture monétaire, analogue à une règle constitutionnelle ou à un taux directeur structurel. Une fois calibrée, elle s'applique automatiquement à tout état biophysique $S(t)$ observé, quelle que soit la trajectoire passée du système. La calibration de Φ — c'est-à-dire le choix de sa forme fonctionnelle et de ses paramètres — est un acte institutionnel préalable ; son application est ensuite entièrement mécanique.

Dynamique de la masse monétaire

La fonte introduit un terme de dissipation dans la dynamique de M . En notation continue, l'équation de la masse monétaire s'écrit :

$$M'(t) = e(t) + R(t) - \lambda \cdot M(t) \quad (1)$$

L'équation (1) correspond à la composante monétaire du système dynamique global. On peut l'écrire sous la forme fonctionnelle :

$$M'(t) = f_M(S(t), M(t), u(t), I(t - \tau PR)) \quad (2)$$

où f_M est définie par :

$$f_M(S, M, u, I\tau) = e(S, u) + \psi(I\tau, S) - \lambda M \quad (3)$$

où : $I\tau = I(t - \tau PR)$.

Remarque de cadre : Lorsque le retard institutionnel est négligé dans l'approximation EDO utilisée dans cette section, on pose formellement $I\tau \approx I(t)$, ce qui ramène la fonction f_M à une dépendance effective en (S, M, u) .

Note sur l'asymétrie formelle du système dynamique. L'équation de $M(t)$ est entièrement spécifiée. La dynamique de $S(t)$ — notée $\dot{S} = F(S, u)$ — n'est pas spécifiée à ce stade : F constitue la dynamique biophysique inconnue (dont l'identification est l'objet de P-F1).

Le système dynamique,

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (4)$$

avec $x = (S, M)$ et

$$f(x, u) = (F(S, u), f_M(S, M, u)).$$

doit donc être interprété comme un **système partiellement spécifié**, dans lequel seule la composante monétaire est explicitement paramétrée.

où $S \in [0, 2]^3$ et $M \in \mathbb{R}_+$.

La dynamique biophysique F dépend de l'état écologique S et du signal de régulation u . Elle ne dépend pas directement de la variable monétaire M : la médiation entre les deux sous-systèmes est assurée par la règle de contrôle

$$u(t) = \Phi(IED(S(t))).$$

Le couplage biophysique-monnaire du système s'effectue ainsi par l'intermédiaire du signal de régulation u , qui agit comme variable de contrôle commune aux deux dynamiques.

où :

- $e(t)$ désigne le flux de création primaire par écodotation (monnaie créée par unité de temps). Dans la formalisation dynamique, ce flux est déterminé par le coefficient de modulation monétaire $u(t)$ issu du couplage biophysique :

$$e(t) = u(t) e_{base}(S(t)).$$

On suppose que la fonction $e_{base}(S)$ est continue et localement lipschitzienne sur son domaine, ce qui est compatible avec sa construction à partir des règles institutionnelles d'écodotation. Cette hypothèse garantit que la composante monétaire f_M satisfait les conditions de régularité R1–R2.

Le terme $e_{base}(S)$ représente le flux de création primaire de référence déterminé par les règles institutionnelles d'écodotation, compte tenu des paramètres de distribution (formules DETA, DCIT, DENT de la Section 4.2). Il représente un débit instantané d'injection monétaire indépendamment de la représentation du stock monétaire.

La variable de contrôle $u(t) = \Phi(\text{IED}(S(t)))$ agit comme un coefficient scalaire de modulation du régime monétaire, permettant d'augmenter ou de réduire la création primaire effective en fonction de l'état biophysique du système.

Dans la dynamique du système, l'IED n'agit pas directement sur les flux monétaires : il agit uniquement par l'intermédiaire de la fonction de couplage Φ qui détermine le coefficient de modulation $u(t)$. Les flux de création primaire $e(t)$ dépendent ensuite de $u(t)$.

Formulation de référence (sans retard)

Dans la formulation principale du système dynamique, on considère l'approximation sans retard ($\tau_{PR} \approx 0$), ce qui permet d'exprimer la dynamique monétaire sous forme d'équation différentielle ordinaire :

$$M(t) = f_M(S(t), M(t), u(t)).$$

- $R(t)$ désigne le flux de création secondaire par Projets Régénératifs, activé avec délai τ_{PR} par rapport à l'investissement initial et non le flux total d'investissement mobilisé pour ces projets. La création monétaire secondaire n'est pas instantanée : elle dépend des investissements passés dans les projets régénératifs.

Remarque de cadre : L'écriture du système sous forme d'équations différentielles ordinaires constitue ici une approximation de premier ordre destinée à exposer la structure générale du mécanisme monétaire.

La prise en compte explicite du délai institutionnel τ_{PR} conduit formellement à un système à retard. On introduit donc un délai $\tau_{PR} > 0$ et on écrit formellement :

$$R(t) = \psi(I(t - \tau_{PR}), S(t)),$$

où $I(t)$ désigne le flux d'investissement dans les projets régénératifs et ψ une fonction de transformation reliant ces investissements à la création monétaire secondaire. Dans cette version du cadre, ψ n'est pas spécifiée explicitement ; on suppose seulement qu'elle est continue sur son domaine et bornée sur les compacts pertinents.

Extension avec retard (dynamique à mémoire)

Lorsque le retard institutionnel est explicitement pris en compte, la dynamique monétaire dépend du flux d'investissement passé $I(t - \tau_{PR})$ et s'écrit :

$$M(t) = f_M(S(t), M(t), u(t), I(t - \tau_{PR})).$$

Remarque méthodologique — retard institutionnel.

La présence du terme $I(t - \tau_{PR})$ introduit un retard τ_{PR} dans la dynamique monétaire. Lorsque $\tau_{PR} > 0$, le système relève formellement d'une **équation différentielle à retard** (delay differential equation, DDE). Dans ce cas, l'analyse de viabilité doit être formulée dans un espace fonctionnel de trajectoires, par exemple $C([- \tau_{PR}, 0], \mathbb{R}^{n+1})$ où n désigne la dimension du vecteur écologique

S ; selon les extensions de la théorie de la viabilité aux systèmes à retard (Aubin & Haddad, 2002)⁵⁰.

Dans le présent working paper, les conditions de régularité R1–R3 et les conjectures C1–C4 sont formulées dans le cadre standard des équations différentielles ordinaires (EDO), orrespondant à l'approximation sans retard ($\tau_{PR} \approx 0$), afin de poser le cadre général du programme de recherche. L'extension rigoureuse du formalisme au cas des systèmes à retard constitue un problème ouvert du programme **P-F1**.

- $\lambda \cdot M(t)$ est le terme de destruction par fonte, avec $\lambda > 0$ taux de fonte.

Statut du paramètre λ . Le taux de fonte λ est un **paramètre normatif du régime monétaire**, choisi ex ante par calibration analytique et institutionnelle (section 9.6 P-F1). Une fois fixé, il est **tenu constant sur l'horizon de viabilité** et n'est pas ajusté dynamiquement par la règle de contrôle Φ . Cette propriété de Φ — stationnaire et calibrée a priori — est parallèle au statut de λ : les deux constituent des paramètres institutionnels fixes, dont la détermination relève de P-F1 et non d'une optimisation dynamique en cours de trajectoire.

Note sur la fonte. Dans l'équation dynamique présentée ici, le terme de dissipation $-\lambda M(t)$ représente uniquement la composante de fonte appliquée aux encaisses monétaires (λs). L'intégration formelle d'une composante transactionnelle (λt) proportionnelle au flux de transactions $T(t)$, constitue une extension possible du cadre et un objet de recherche ouvert. (Section 9). Il en est de même pour la vélocité de circulation de la monnaie qui n'est pas modélisée explicitement dans le cadre actuel. L'analyse repose implicitement sur l'hypothèse d'une vélocité suffisamment stable à l'échelle considérée

Cette équation admet un état à équilibre mobile M^* tel que $\dot{M} = 0$. En notant e^* et R^* les valeurs des flux de création évaluées à cet équilibre mobile :

⁵⁰ Aubin, J.-P., & Haddad, G. (2002). Viability theory in the presence of delays. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 40(5), 1415–1436. [oi.org/10.1137/S0363012999355969](https://doi.org/10.1137/S0363012999355969)

$$M^* = (e^* + R^*) / \lambda$$

e^* et R^* dépendent eux-mêmes de S^* et donc de l'IED à l'équilibre : le niveau stationnaire de masse monétaire est endogène à l'état biophysique du système.

Note sur le caractère dynamique de l'état à équilibre mobile et des bornes de K . L'équation $\dot{M} = 0$ définit un équilibre mobile instantané, non un équilibre fixe. En rendant explicite la dépendance de e^* et R^* à l'état biophysique courant, on obtient :

$$M^*(t) = (e^*(S(t)) + R^*(S(t))) / \lambda$$

Cette écriture révèle que $M^*(t)$ est lui-même une trajectoire dans le temps : à mesure que $S(t)$ évolue sous l'effet des dynamiques biophysiques et des pressions économiques, la valeur stationnaire se déplace. Le système ne converge pas vers un point fixe — il suit un état-cible mouvant, co-évoluant avec l'exo-économie. Du point de vue des systèmes dynamiques, ce type de configuration peut être rapproché de la notion de variété lente (slow manifold) dans les systèmes lents-rapides, où une dynamique rapide converge vers une variété d'équilibre évoluant lentement dans le temps. La validité de cette approximation repose généralement sur une séparation d'échelles temporelles entre la dynamique d'ajustement et l'évolution de la trajectoire cible (Fenichel, 1979 ; Kuehn, 2015)⁵¹.

De façon symétrique, les deux bornes du corridor sont elles-mêmes des fonctions du temps :

⁵¹ Fenichel, N. (1979). Geometric singular perturbation theory for ordinary differential equations. *Journal of Differential Equations*, 31(1), 53–98. [doi.org/10.1016/0022-0396\(79\)90152-9](https://doi.org/10.1016/0022-0396(79)90152-9) ; Kuehn, C. (2015). *Multiple Time Scale Dynamics*. Springer.

- **IED_min(t)** évolue avec l'état du système Terre, les connaissances scientifiques disponibles et les seuils écologiques révisés — $g_{env}(S(t)) \geq 0$ est une contrainte mobile ;
- **M_min(t)** évolue avec les besoins sociaux minimaux reconnus à chaque époque : structures démographiques, standards de santé, infrastructures collectives disponibles — $g_{social}(M, t) \geq 0$ est également une contrainte mobile.

L'ensemble de contraintes K est donc lui-même une trajectoire : $K = K(S(t), t)$.

Remarque de cadre : Dans la suite du texte, K désigne par convention la coupe instantanée de cet ensemble de contraintes à un instant t donné. La dépendance temporelle explicite $K(t)$ est utilisée lorsque la nature mouvante du corridor est discutée.

Les conjectures C1–C4 sont formulées pour un ensemble K fixé (coupe instantanée à t donné). Leur extension au cas d'un ensemble de contraintes explicitement dépendant du temps $K(t)$ relève d'un problème de viabilité avec cible mouvante, identifié comme P-F5.

La représentation dans l'espace (M, IED) doit être lue comme une coupe à t fixé. Ce qui est stable dans le régime homéostatique n'est pas une valeur ou une zone fixe, mais la propriété structurelle de maintien de la trajectoire $M(t)$ à l'intérieur d'un corridor dont les bornes bougent — ce que la théorie de la viabilité désigne comme un problème de *viabilité avec cible mouvante*. L'extension du problème de viabilité à ce cas constitue l'objet de P-F5 (Section 9.6).

Cette propriété est cohérente avec la définition de la zone homéostatique comme **zone de viabilité** (Section 5.2) : ce qui est stable, ce n'est pas une valeur de M , mais le maintien de la trajectoire $M(t)$ au voisinage de $M^*(t)$ à l'intérieur du corridor $K(S(t), t)$.

Remarque de cadre : À ce stade du programme de recherche, Z_{sat} doit être compris comme un sous-ensemble interne de K définissant une région de sécurité dynamique. Les propriétés d'invariance ou

d'attractivité éventuellement associées à cet ensemble relèvent de conjectures qui devront être établies une fois la dynamique F spécifiée.

Note sur le statut de la contrainte de plancher social. La formulation $g_{\text{social}}(M) \geq 0$, où M est la masse monétaire agrégée, constitue une simplification de premier ordre. La satisfaction effective des besoins minimaux ne dépend pas de M seul mais de la concordance des comportements d'échange, de production et de distribution opérés par les agents au moyen de M . Une masse monétaire agrégée suffisante est une condition nécessaire mais non suffisante : elle doit être couplée à une structure d'allocation — les écodotations (DETA, DCIT, DENT) — qui garantit une distribution minimale aux trois catégories d'agents. En V1.0, cette structure d'allocation est décrite en Section 4.2 mais n'est pas intégrée dans la contrainte formelle. L'extension à $g_{\text{social}}(Y, M, d) \geq 0$ — où Y est le niveau d'activité et d un vecteur de distribution — constitue un objet du programme P-F1.

Condition de séparation d'échelles temporelles. L'interprétation de $M^*(t)$ comme état-cible mouvant suivi par $M(t)$ repose sur une hypothèse implicite de séparation d'échelles temporelles : la dynamique monétaire — dont le temps caractéristique de convergence est de l'ordre de $1/\lambda$ — doit être significativement plus rapide que la dynamique biophysique $S(t)$ qui déplace la cible. Formellement, la condition suffisante est que la vitesse de déplacement de la cible reste faible devant le taux de rappel :

$$|dM^*/dt| \ll \lambda \cdot |M(t) - M^*(t)|$$

Lorsque cette condition est satisfaite, $M(t)$ reste au voisinage de $M^*(t)$ et l'approximation quasi-stationnaire est valide.

Or la dynamique de $S(t)$ est structurellement asymétrique : l'amélioration biophysique est typiquement lente — la régénération des écosystèmes, la reconstitution de la biodiversité et la réduction des pressions cumulées opèrent sur des échelles temporelles longues (décennies)

(Holling, 1973; Jones & Schmitz, 2009; Poorter et al., 2016)⁵². En revanche, la dégradation peut être brutale : un effondrement écologique, un franchissement de seuil climatique ou un choc d'extraction massif déplace $S(t)$ — et donc $M^*(t)$ — à une vitesse qui peut excéder la capacité de convergence du système monétaire. Dans ce régime asymétrique, la condition de séparation d'échelles est satisfaite à la hausse (améliorations lentes) mais peut être violée à la baisse (dégradations rapides).

Cette asymétrie a une conséquence dynamique directe : lors d'un choc négatif sur $S(t)$, la cible $M^*(t)$ chute brusquement tandis que $M(t)$, contrainte par son inertie (la fonte retire $\lambda \cdot M$ par unité de temps, pas davantage), ne peut la suivre instantanément. Le système se retrouve temporairement en situation de *surplus monétaire transitoire* — la masse en circulation excède la capacité biophysique — avant que la fonte et la contraction des écodotations ne ramènent progressivement $M(t)$ vers la nouvelle cible. Pendant cette phase, la pression économique excédentaire peut aggraver la dégradation de $S(t)$, créant un risque de spirale descendante.

La formalisation de cette condition et l'identification des seuils de vitesse de dégradation au-delà desquels l'approximation quasi-stationnaire perd sa validité constituent un aspect technique du programme P-F1 (Section 9.6). Elles sont étroitement liées à la Conjecture (C2) (instabilité par délai) et à la Condition d'invalidation 5 (Section 8.4), qui identifie précisément le cas où la vitesse d'irréversibilité biophysique dépasse la vitesse de correction monétaire.

Définition formelle du corridor de viabilité

L'ensemble de viabilité K est défini comme le sous-ensemble de $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+$, compatible avec le maintien simultané du plancher social et du plafond environnemental. Conformément à la convention uniforme de la théorie de la viabilité (Aubin, 1991), les contraintes sont exprimées sous la forme $g_i \geq 0$, de sorte que l'intérieur de K correspond au domaine où toutes les contraintes sont strictement satisfaites :

⁵² Holling, C. S. (1973). *Resilience and stability of ecological systems*. Annual Review of Ecology and Systematics, 4, 1–23. ; Jones, H. P., & Schmitz, O. J. (2009). *Rapid recovery of damaged ecosystems*. PLoS ONE, 4(5), e5653. ; Jones, H. P., & Schmitz, O. J. (2009). *Rapid recovery of damaged ecosystems*. PLoS ONE, 4(5), e5653. ; Poorter, L., et al. (2016). *Biomass resilience of Neotropical secondary forests*. Nature, 530(7589), 211–214.

$$K = \{ x = (S, M) \mid g_{env}(S) \geq 0 \text{ et } g_{social}(M) \geq 0 \}$$

où :

- $g_{env}(S) \geq 0$ est la **contrainte de plafond environnemental** : elle exprime l'exigence que l'IED reste au-dessus du seuil critique ($IED \geq IED_{min}$) et qu'aucun seuil écologique irréversible ne soit franchi. Concrètement, si la condition biophysique brute est formulée comme une pression à ne pas dépasser — par exemple une empreinte $P(S) \leq P_{max}$ —, on pose $g_{env}(S) = P_{max} - P(S)$, de sorte que $g_{env} \geq 0$ équivaut au respect de la contrainte ; L'ensemble de viabilité K est défini comme l'intersection d'un nombre fini de contraintes :

$$K = \{ (S, M) \mid g_{env}(S) \geq 0 \text{ et } g_{social}(M) \geq 0 \} \quad (5)$$

Cette définition implique que K possède une structure produit :

$$K = K_S \times K_M$$

avec

$$K_S = \{ S \mid g_{env}(S) \geq 0 \}$$

$$K_M = \{ M \mid g_{social}(M) \geq 0 \}.$$

Dans cette formulation, les contraintes environnementales portent uniquement sur l'état biophysique S (pressions écologiques, état des ressources, etc.), tandis que les contraintes sociales portent sur les variables économiques telles que la masse monétaire M.

La condition $IED \geq IED_{min}$ correspond à une contrainte supplémentaire sur l'état biophysique, définie par :

$$g_{IED}(S) = IED(S) - IED_{min} \geq 0.$$

- $g_{social}(M) \geq 0$ est la **contrainte de plancher social** : elle exige que la masse monétaire soit suffisante pour assurer la couverture des besoins minimaux. Lorsque la dynamique de $Y(t)$ sera explicitée, cette contrainte sera étendue à $g_{social}(Y, M) \geq 0$.

Note sur le statut de la contrainte g_{env} . La contrainte $g_{env}(S) \geq 0$ dépend de $S(t)$, dont la dynamique F n'est pas spécifiée. K est donc défini indépendamment de F , comme un ensemble de contraintes sur l'espace d'état — ce qui est légitime. Mais le problème de viabilité $Viab(K)$ ne peut être posé correctement que lorsque F est au moins caractérisée qualitativement (domaine, continuité, bornes). K est un ensemble bien défini ; $Viab(K)$ est un objet dont l'existence est conjecturée sous condition sur F .

Hiérarchie des ensembles du cadre formel. Les ensembles mobilisés dans cette section s'organisent selon la hiérarchie d'inclusion suivante, dont chaque niveau a une fonction mathématique distincte :

Ensemble	Fonction	Statut
$K = K_S \times K_M$	Ensemble de contraintes admissibles (corridor)	Défini
$Viab(K)$	Noyau de viabilité : sous-ensemble de K depuis lequel la viabilité est possible	Existence conjecturée (C1)
$Z_{sat} \subset Viab(K)$	Zone de sécurité dynamique : sous-ensemble de K à marges positives sur les contraintes	Défini géométriquement ; propriétés dynamiques conjecturées (C4a, C4b)

La « zone de viabilité mobile » est un terme interprétatif désignant le comportement des trajectoires au voisinage de Z_{sat} ; il ne correspond pas à un ensemble mathématique supplémentaire. Le terme « zone homéostatique » désigne le régime de fonctionnement dans lequel les trajectoires restent confinées dans Z_{sat} ; c'est une propriété dynamique conjecturée, non une propriété géométrique acquise.

Le **noyau de viabilité** $\text{Viab}(K)$ est le sous-ensemble de K depuis lequel il existe au moins une trajectoire gouvernée par $\dot{x} = f(x, u)$, $u \in \mathcal{U}$, qui reste dans K pour tout $t \geq 0$. Si $\text{Viab}(K)$ est non vide, la viabilité est possible depuis tout état initial appartenant à $\text{Viab}(K)$. Si $\text{Viab}(K)$ est vide, aucune règle monétaire ne peut garantir le maintien dans K à long terme depuis quelque état initial que ce soit.

Dans la version V1.0, la fonction dynamique complète $f(x, u)$ n'est pas spécifiée. La question de recherche fondamentale est alors :

Pour quelles classes de fonctions de couplage Φ et quelles valeurs du taux de fonte λ le noyau de viabilité $\text{Viab}(K)$ est-il non vide ? Quelles sont ses propriétés géométriques ?

Conjectures structurelles

Les conjectures C1 à C4 doivent être comprises comme des gabarits de théorèmes conditionnels. Elles sont formulées sous l'hypothèse implicite que la dynamique biophysique F satisfait les conditions de régularité R1–R3 établies ci-dessus, et que le contrôle u exerce un effet non dégénéré sur la composante biophysique $\dot{S} = F(S, u)$. En l'absence de cette vérification, elles ont le statut de conjectures conditionnelles : leur démonstration ou réfutation est subordonnée à la spécification de F dans le cadre de P-F1.

Conjecture (C1) — Existence conditionnelle du noyau de viabilité. Il existe une plage $\lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, dépendant des paramètres biophysiques de la zone, pour laquelle $\text{Viab}(K)$ est non vide. En dehors de cette plage, soit M^* est insuffisant pour maintenir le plancher social ($\lambda > \lambda_{\max}$). Pour $\lambda < \lambda_{\min}$, la fonte insuffisante produit une masse monétaire M^* élevée qui, via le couplage biophysique, peut déclencher une dégradation de S et une instabilité oscillatoire rendant $\text{Viab}(K)$ vide (violation de g_{env}). Pour λ très faible, la relation quasi-statique $M^*(t) \approx (e(t) + R(t)) / \lambda$ implique mécaniquement un niveau de masse monétaire élevé à flux donnés. Dans le système couplé EH, cette hausse peut toutefois déclencher une dégradation de S , donc une baisse de $\text{IED}(S)$ et, via $u(t) = \Phi(\text{IED}(S(t)))$, une réduction de $e(t)$ et indirectement de $R(t)$. La question pertinente est donc de déterminer pour $\lambda > 0$, l'existence (ou non) d'un **régime couplé stable et viable** : selon les propriétés de F et de Φ , la rétroaction peut stabiliser le système, ou au contraire induire des dépassements/oscillations pouvant violer g_{env} .

L'équation monétaire isolée est une EDO linéaire stable pour tout $\lambda > 0$, le terme $-\lambda M$ assurant une convergence exponentielle vers $M^* = (e + R)/\lambda$.

Pour l'EDO isolée $\dot{M} = (e + R) - \lambda M$ à flux constants, la linéarisation autour de M^* donne $d\dot{M}/dt = -\lambda(M - M^*)$, dont la solution est $M(t) - M^* = (M(0) - M^*) \cdot \exp(-\lambda t)$. Cette condition est locale dans le temps : elle peut être satisfaite sur certains intervalles et violée sur d'autres, notamment lors de chocs biophysiques rapides. Le mode propre unique est $-\lambda < 0$: la convergence est exponentielle avec un temps caractéristique $\tau_M = 1/\lambda$. Ce résultat, bien que trivial pour l'EDO isolée, constitue le socle sur lequel repose l'analyse de la séparation d'échelles temporelles.

Conjecture (C2) — Instabilité oscillatoire par délai. En présence d'un délai $\tau > 0$ entre la dégradation biophysique effective et son intégration dans le signal IED, la dynamique peut exhiber des oscillations dont l'amplitude croît avec τ . Il existe un délai critique τ^* au-delà duquel le régime homéostatique devient instable.

Ce résultat est analogue aux conditions classiques de stabilité des équations différentielles à retard (DDEs) établies par Hale & Verduyn Lunel (1993)⁵³ ; voir également Erneux (2009)⁵⁴ pour une présentation orientée applications : pour un système linéarisé $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bx(t - \tau)$, les seuils sont déterminés par $\det(sI - A - Be^{-s\tau}) = 0$. Le critère de Nyquist (1932)⁵⁵ est invoqué ici comme analogie fréquentielle dans le domaine linéaire.

Remarque de cadre — statut formel de C2. Contrairement aux conjectures C1, C3 et C4, qui sont formulées dans le cadre EDO retenu pour la présente version ($\tau_{PR} \approx 0$), la conjecture C2 porte intrinsèquement sur un système à retard : elle n'a de contenu que si $\tau > 0$. Sa formalisation rigoureuse requiert l'extension du système au cadre des équations différentielles à retard (cf. remarque méthodologique sur le retard institutionnel,

⁵³ Hale, J. K., & Verduyn Lunel, S. M. (1993). *Introduction to functional differential equations*. Springer.

⁵⁴ Erneux, T. (2009). *Applied Delay Differential Equations*. Springer.

⁵⁵ Nyquist, H. (1932). Regeneration theory. *Bell System Technical Journal*, 11(1), 126–147. doi:[10.1002/j.1538-7305.1932.tb02344.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1932.tb02344.x)

ci-dessus). Elle est incluse ici à titre programmatique, comme indication de la direction de recherche associée à P-F2.

Propriété analytique C3 — Sensibilité de la moyenne géométrique. La propriété suivante découle directement des propriétés différentielles de la moyenne géométrique sur \mathbb{R}^3_+ et ne dépend d'aucune hypothèse sur la dynamique du système. La structure de moyenne géométrique engendre une hypersensibilité absolue dans les régimes de faible valeur d'un composant. Pour :

$$IED = (IBD \cdot IEE \cdot IRNR)^{1/3}$$

la sensibilité absolue vérifie :

$$\partial IED / \partial IBD = (1/3) \cdot IED / IBD \rightarrow +\infty \text{ lorsque } IBD \rightarrow 0$$

Cette propriété découle directement des propriétés de la moyenne géométrique : pour tout $\varepsilon > 0$ il existe $\delta > 0$ tel que $IBD < \delta$ implique $IED < \varepsilon$, indépendamment des valeurs des autres composantes.

Une perturbation de faible amplitude de IBD, lorsque celui-ci est proche de zéro, peut suffire à faire franchir à l'IED le seuil IED_{\min} — sans signal d'alerte proportionnel dans les dynamiques précédentes du corridor.

Le risque n'est pas une discontinuité de la fonction IED, qui est analytiquement continue et différentiable sur \mathbb{R}^3_+ , mais une **non-proportionnalité entre la cause et l'effet** dans ce régime : la réactivité absolue s'emballe au voisinage de zéro, rendant le contrôle correctif potentiellement trop tardif.

Cette propriété est purement analytique et concerne l'opérateur d'agrégation lui-même ; elle ne préjuge pas de la pertinence de la moyenne géométrique comme représentation du couplage biophysique dans le système EH.

Précision : sensibilité absolue vs. sensibilité relative. La divergence identifiée concerne la *sensibilité absolue* $\partial IED / \partial IBD$. La *sensibilité relative* (élasticité), définie par $\partial \ln(IED) / \partial \ln(IBD) = 1/3$, est en revanche constante et bornée, quel que soit le niveau de

IBD. Cette distinction est importante pour l'interprétation : la moyenne géométrique ne crée pas de biais relatif entre les trois composantes — chacune contribue avec une élasticité identique de 1/3 à l'IED. C'est en termes absolus que la réactivité diverge au voisinage de zéro : une variation de ε de IBD produit une variation de l'IED d'ordre $(1/3) \cdot \varepsilon \cdot \text{IED} / \text{IBD}$, qui tend vers l'infini quand $\text{IBD} \rightarrow 0^+$. Le risque d'effondrement discontinu identifié par cette propriété analytique est donc un phénomène de régime extrême, absent des situations où les trois indicateurs restent dans des plages modérées.

Conjecture (C4) — Attractivité de la zone homéostatique sous Projets Régénératifs suffisants.

Dans la théorie de la viabilité, les ensembles associés à un système dynamique s'organisent généralement selon une relation d'inclusion entre l'ensemble des contraintes admissibles K et son noyau de viabilité $\text{Viab}(K)$. Dans le cadre du modèle étudié ici, on introduit en outre un sous-ensemble Z_{sat} correspondant à la zone homéostatique, de sorte que les ensembles considérés vérifient la hiérarchie suivante :

$$Z_{\text{sat}} \subset \text{Viab}(K) \subset K$$

L'introduction de l'ensemble Z_{sat} permet ainsi de distinguer, au sein du corridor de viabilité, une zone de fonctionnement plus exigeante correspondant à un régime homéostatique du système. Cette distinction n'est pas standard dans la théorie de la viabilité, mais constitue ici un dispositif conceptuel destiné à représenter la différence entre simple maintien dans le corridor de viabilité et fonctionnement durablement compatible avec les objectifs socio-écologiques du modèle.

où K représente l'ensemble des contraintes admissibles, $\text{Viab}(K)$ le noyau de viabilité associé à la dynamique du système, et Z_{sat} un sous-ensemble strict de K caractérisé par des marges supplémentaires sur les contraintes biophysiques et sociales, indépendamment des propriétés dynamiques du système.

$$Z_{sat} = \{ (S, M) \in K \mid g_{env}(S) \geq \varepsilon_{env} \text{ et } g_{social}(M) \geq \varepsilon_{social} \} \quad (6)$$

où :

$$\varepsilon_{env} > 0, \varepsilon_{social} > 0$$

représentent des marges de sécurité environnementale et sociale définissant une zone interne au corridor de viabilité.

Cette définition implique que K possède une structure produit :

$$K = K_S \times K_M$$

avec :

$$K_S = \{ S \mid g_{env}(S) \geq 0 \}$$

$$K_M = \{ M \mid g_{social}(M) \geq 0 \}$$

Cette propriété simplifie l'analyse de la condition de tangentialité de Nagumo, le cône tangent à un produit d'ensembles étant le produit des cônes tangents correspondants.

Intuitivement, Z_{sat} représente une zone de sécurité à l'intérieur du corridor de viabilité K : les états qui s'y trouvent respectent les contraintes de K avec une marge positive.

Remarque sous hypothèse simplificatrice. Dans le cas d'un ensemble de contraintes K fixé (coupe instantanée, cf. Remarque de cadre), si l'invariance positive de K est vérifiée, alors le noyau de viabilité coïncide avec K . Cette propriété ne s'étend pas directement au cas $K(t)$ dépendant de l'état, dont le traitement relève de P-F5.

Les deux propriétés suivantes sont formulées séparément, car elles concernent des objets mathématiques distincts et reposent sur des conditions hypothétiques de nature différente. Elles sont toutes deux conditionnelles à la spécification de F dans le cadre de P-F1, et présupposent que F satisfait les conditions de régularité R1–R3.

Rappel — Théorème fondamental de viabilité (Aubin, 1991).

Sous les conditions de régularité R1-R3, si la condition de tangentialité de Nagumo⁵⁶ est satisfaite sur la frontière ∂K — c'est-à-dire si $f(x, U) \cap T_K(x) \neq \emptyset$ pour tout $x \in \partial K$ — alors K est un ensemble viable pour la dynamique contrôlée : pour tout état initial $x_0 \in K$, il existe au moins une trajectoire admissible qui reste dans K pour tout $t \geq 0$. Ce résultat est un théorème, pas une conjecture. Il constitue une propriété de bord : il dépend exclusivement de la structure du champ dynamique au voisinage de la frontière ∂K , indépendamment du comportement détaillé des trajectoires à l'intérieur du corridor.

Il doit être distingué de l'invariance positive forte, qui exigerait la condition plus restrictive $f(x, U) \subset T_K(x)$ pour tout $x \in \partial K$ — c'est-à-dire que toute dynamique admissible reste tangentielle au corridor sur sa frontière. La viabilité au sens d'Aubin demande l'existence d'au moins un contrôle admissible par état de frontière, pas que tous le soient.

Conjecture (C4a) — La condition de Nagumo est satisfaite pour des dynamiques biophysiques réalistes. Le paramètre R_{seuil} désigne un seuil minimal de flux de Projets Régénératifs, dont la caractérisation précise en fonction de ψ , des investissements $I(t)$ et de l'état $S(t)$ relève du programme P-F4. Sous condition $R(t) > R_{\text{seuil}}$, on conjecture que pour des classes pertinentes de dynamiques biophysiques F satisfaisant R1-R3, la condition de tangentialité de Nagumo est satisfaite sur les deux composantes de la frontière de K (frontière environnementale et frontière sociale). Ce qui est conjecturé n'est pas le théorème d'Aubin lui-même, mais la satisfaction de sa condition préalable pour des F réalistes. Dans le cadre du programme EH, la difficulté ne réside pas dans le résultat abstrait, mais dans la caractérisation de classes de dynamiques biophysiques F satisfaisant effectivement cette condition. La vérification formelle est identifiée comme un aspect du problème **P-F4** (Section 9)

⁵⁶ La condition de tangentialité est due, pour les EDO sans contrôle, à Nagumo, M. (1942). Über die Lage der Integralkurven gewöhnlicher Differentialgleichungen. Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan, 24, 551-559. Son extension aux systèmes contrôlés dans le cadre de la théorie de la viabilité est établie dans Aubin, J.-P. (1991). Viability Theory. Birkhäuser; Théorème 3.3.2 ; voir également Aubin, J.-P., Bayen, A.M. & Saint-Pierre, P. (2011). Viability Theory: New Directions. Springer, Chapitre 5.

Conjecture (C4b) — Stabilité de Lyapunov⁵⁷ de Z_{sat} .

Indépendamment de C4a, on conjecture que la zone homéostatique $Z_{sat} \subset K$ est Lyapunov-stable : pour tout voisinage V de Z_{sat} , il existe un voisinage $W \subset V$ tel que toute trajectoire initiée dans W reste dans V pour tout $t \geq 0$. Cette propriété concerne le comportement intérieur du corridor, au voisinage de la zone de viabilité mobile, indépendamment des propriétés de ∂K .

Cette fonction est proposée comme *ansatz* pour une fonction de Lyapunov, dans un contexte où la cible (S^*, M^*) est elle-même dynamique. La vérification de la condition de décroissance nécessite donc de prendre en compte les termes liés à la dérivée de la cible ($dS^*/dt, dM^*/dt$), et relève d'une extension des méthodes classiques de Lyapunov au cas des systèmes à cible mouvante.

La zone homéostatique $Z_{sat} \subset K$ est définie comme un sous-ensemble strict de l'ensemble de viabilité K , caractérisé par des contraintes plus restrictives sur l'état biophysique et social du système. Elle correspond à une région de l'espace d'état définie par des marges positives sur les contraintes biophysiques et sociales du corridor de viabilité K . Les propriétés dynamiques associées à cette région — notamment la possibilité que les trajectoires du système y restent confinées et oscillent autour de la trajectoire cible $M^*(t)$ — relèvent des conjectures C4a et C4b.

Soit $Z_{sat}(t) \subset K$ un ensemble compact dépendant du temps. Z_{sat} est un ensemble viable attractif si :

(i) $Z_{sat}(t)$ est positivement invariant pour la dynamique contrôlée — c'est-à-dire que pour tout $x(0) \in Z_{sat}(0)$, il existe un contrôle admissible tel que $x(t) \in Z_{sat}(t)$ pour tout $t \geq 0$;

(ii) pour tout x_0 dans un voisinage V de $Z_{sat}(0)$, il existe un contrôle admissible tel que $d(x(t), Z_{sat}(t)) \rightarrow 0$ lorsque $t \rightarrow +\infty$. Un *ansatz* pour une fonction de Lyapunov permettant d'analyser cette stabilité locale peut être introduit sous la forme.

$$V(S, M) = \alpha \| S - S^* \|^2 + \beta (M - M^*)^2$$

⁵⁷ Lyapunov, A. M. (1892). *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya* [The general problem of the stability of motion]. Kharkov: Kharkov Mathematical Society.

où S^* et M^* désignent l'état biophysique et monétaire associé à la trajectoire cible du système. Cette fonction mesure l'écart quadratique de l'état courant à la trajectoire homéostatique et constitue une base naturelle pour l'étude de la stabilité locale de Z_{sat} .

Le statut de V est celui d'une forme quadratique proposée comme point de départ d'analyse ; elle ne constitue une fonction de Lyapunov au sens technique que si $dV/dt < 0$ le long des trajectoires du système.

La vérification formelle des conditions de décroissance de V le long des trajectoires du système dépend toutefois de la spécification explicite de la dynamique biophysique F et relève donc du programme **P-F4**.

Les conjectures **C4a** et **C4b** sont formellement indépendantes : la première concerne les propriétés de bord du corridor écologique K (condition de confinement), tandis que la seconde concerne le comportement dynamique au voisinage de la zone homéostatique située à l'intérieur du corridor. Leur conjonction signifie que le système reste dans K et ne dérive pas durablement loin de cette zone de fonctionnement.

C4(ii) — Attractivité asymptotique. Les trajectoires initiées à l'extérieur de K mais dans un voisinage suffisant — le bassin d'attraction — vérifient $d(x(t), K) \rightarrow 0$ lorsque $t \rightarrow +\infty$. Formellement :

$$\text{Attr}(K) = \{ x_0 \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}_+ \setminus K \mid \exists u(\cdot) \in \mathcal{U} \text{ tel que } d(x(t), K) \rightarrow 0 \}$$

Cette notion d'attractivité asymptotique est distincte de la viabilité au sens strict : les trajectoires considérées peuvent violer les contraintes de K pendant la phase de convergence, et la définition ne suppose pas que ces contraintes soient satisfaites hors de K .

Elle doit être distinguée du bassin de capture $\text{Capt}(K)$, qui impose l'atteinte de K en temps fini, ainsi que du bassin de capture sous contrainte $\text{Capt}_L(K) \subset \text{Capt}(K)$, dans lequel la trajectoire de retour doit satisfaire un ensemble de contraintes intermédiaires $L \supseteq K$.

La spécification de L et la caractérisation de $\text{Capt}_L(K)$ constituent un aspect du programme P-F4, dépendant notamment de la nature des irréversibilités biophysiques considérées (Section 5.4).

La question de savoir si cette convergence est atteinte en temps fini — propriété strictement plus forte, qui impliquerait une réintégration effective de K et non un simple rapprochement asymptotique — constitue une conjecture subordonnée ouverte, conditionnée à la spécification de F .

Condition d'invalidation de C4(ii). Cette propriété d'attraction asymptotique présuppose que la condition de séparation d'échelles temporelles établie en §5.5 est satisfaite : Cette propriété suppose une séparation d'échelles temporelles entre les dynamiques du système : la dynamique monétaire doit être significativement plus rapide que la dynamique biophysique qui déplace la cible $M^*(t)$. Le cadre EH peut ainsi être interprété comme un système dynamique couplé à deux échelles de temps, dans lequel une régulation monétaire rapide agit sur une dynamique biophysique lente. En régime de dégradation rapide de $S(t)$ — franchissement de seuil écologique, choc d'extraction massif —, la cible $M^*(t)$ se déplace plus vite que $M(t)$ ne peut la suivre par la seule fonte. Dans ce régime, C4(ii) peut être violée : le surplus monétaire transitoire aggrave la dégradation de $S(t)$, et le bassin d'attraction $\text{Attr}(K)$ se contracte ou disparaît. C4(ii) est donc une conjecture valide sous régime lent de dégradation biophysique, et conditionnelle sous régime de choc. Ce cas d'invalidation est directement articulé avec la Conjecture (C2) (instabilité par délai) et la Condition d'invalidation 5 (Section 8.4).

En deçà de R_{seuil} , la zone homéostatique perd son caractère attracteur, C4a et C4b cessent d'être vérifiables, et le corridor K n'est plus positivement invariant. La démonstration formelle de C4a et C4b, la détermination de R_{seuil} , et la caractérisation des régimes d'invalidation de C4(ii) sont identifiées comme problème ouvert P-F4 (Section 9).

Statut de ces conjectures et implications pour le programme de recherche

Ces quatre conjectures ne sont pas démontrées dans ce working paper. Elles sont formulées comme propositions formelles testables — ce qui constitue en soi une avancée structurelle par rapport au stade purement qualitatif de la Section 5.2 : là où une propriété qualitative ne peut

qu'être illustrée, une conjecture formelle peut être confirmée, infirmée ou précisée par des méthodes standard.

Leur démonstration ou réfutation est accessible par plusieurs voies complémentaires : modèles à équations différentielles ordinaires ou à retard pour C1 et C2 ; modèles agent-based avec couplage biophysique explicite pour C3 et C4 ; modèles stock-flux cohérents (SFC) écologiques du type Godley & Lavoie (2007)⁵⁸ et Bovari, Giraud & McIsaac (2018)⁵⁹ pour une validation macroéconomique intégrée. Ces voies sont identifiées comme problèmes ouverts P-F1 à P-F4 dans la Section 9.

La valeur immédiate de cette formalisation est double. D'une part, elle traduit des propriétés qualitatives en conditions mathématiques précises et identifiables, ce qui permet de cibler les travaux de modélisation nécessaires. D'autre part, elle établit que le cadre EH est formellement compatible avec un corpus mathématique existant — la théorie de la viabilité — dont les résultats peuvent être mobilisés directement, sans construction mathématique *ex nihilo*.

⁵⁸ Godley, W., & Lavoie, M. (2007). *Monetary economics: An integrated approach to credit, money, income, production and wealth*. Palgrave Macmillan.

⁵⁹ Bovari, E., Giraud, G., & McIsaac, F. (2018). Coping with collapse: A stock-flow consistent monetary macroeconomic model with climate damage. *Ecological Economics*, 147, 383–398 doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.01.034

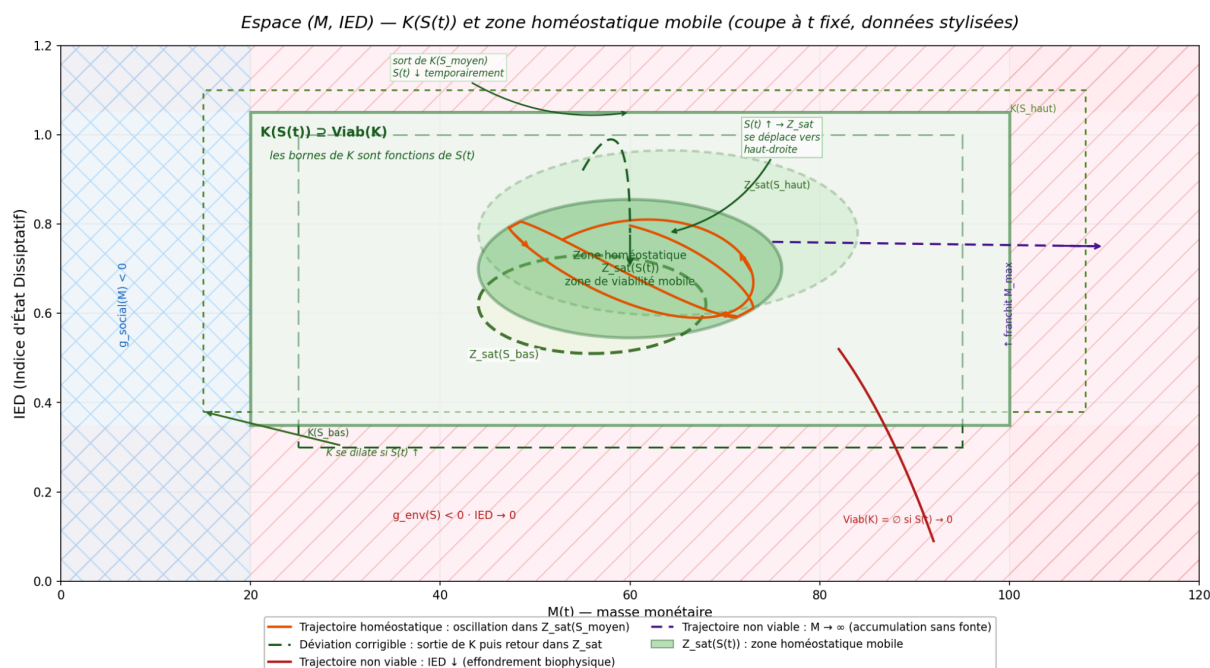


Figure 12 — Représentation schématique du corridor de viabilité K , du noyau de viabilité $Viab(K)$ et des régimes de trajectoire dans l'espace d'état simplifié (M, IED) . L'axe horizontal représente la masse monétaire totale en circulation $M(t)$; l'axe vertical l'Indicateur d'Équilibre Dynamique IED . La figure distingue le corridor admissible, le noyau de viabilité et la zone de sécurité Z_{sat} , au voisinage de laquelle certaines trajectoires peuvent demeurer sous l'effet de la régulation. Les zones hachurées représentent des régions de non-viabilité. Les trajectoires illustrées montrent, à titre stylisé, un régime homéostatique, une déviation corrigible et deux régimes non viables. Les valeurs numériques et les tracés sont uniquement illustratifs et ne constituent pas une calibration empirique du cadre. Dans cette version, la figure est lue comme une représentation simplifiée ; l'extension à un corridor dépendant de l'état relève du problème ouvert P-F5.

6 — L'Indicateur d'Équilibre Dynamique (IED) : construction et rôle systémique

6.1 — Motivation : corriger la cécité structurelle des indicateurs dominants

Les systèmes économiques contemporains produisent une abondance d'indicateurs de performance — PIB, taux de croissance, inflation, chômage — dont la limite commune est de ne pas rendre visibles les liens matériels entre activité économique et état effectif du système biophysique (Stiglitz, Sen, & Fitoussi, 2009)⁶⁰. Ces indicateurs ne décrivent pas la réalité des flux de matière et d'énergie, des pressions exercées sur les écosystèmes, ni de l'état des ressources ; ils contribuent structurellement à une forme de cécité vis-à-vis des contraintes qui conditionnent pourtant la possibilité même de l'activité économique à long terme. L'axiome A4, établi en Section 2, en tire la conséquence: les indicateurs ne sont pas de simples instruments d'observation neutre — ils orientent, transforment, et contribuent à produire la réalité qu'ils prétendent décrire. L'absence d'indicateurs biophysiques dans le cœur du pilotage macroéconomique n'est donc pas une lacune technique corrigible à la marge : c'est un choix architectural qui reconduisait une dissociation structurelle entre dynamiques économiques et contraintes biophysiques — la lacune exactement identifiée en Section 1.

L'Économie Homéostatique réintroduit les indicateurs biophysiques au centre du pilotage macroéconomique. L'Indicateur d'Équilibre Dynamique (IED) est l'outil par lequel cette réintégration est opérée : il ne mesure pas une performance environnementale relative, il ne compare pas des pays entre eux, et il ne prescrit pas de comportements sectoriels. Il situe le système socio-économique par rapport à une zone de viabilité dynamique — le corridor établi en Section 3 — et conditionne directement les règles de création monétaire décrites en Section 4. C'est le signal de couplage entre l'EXEC et l'ENEC, le vecteur par lequel l'état biophysique influence les trajectoires économiques sans prescription directe.

⁶⁰ Stiglitz, J. E., Sen, A., & Fitoussi, J.-P. (2009). *Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress*. Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress

6.2 — Description fonctionnelle : construction de l'IED

Les trois indicateurs composants

L'IED est construit à partir de trois indicateurs exo-économiques qui couvrent ensemble les trois dimensions fondamentales du métabolisme biophysique d'une zone économique : les flux entrants de ressources non renouvelables, les flux sortants de pressions sur les écosystèmes, et l'état qualitatif du système vivant. Chacun remplit une fonction analytique distincte et non substituable.

L'Indicateur des Ressources Non Renouvelables (IRNR) mesure la consommation de ressources non renouvelables d'une zone économique, en intégrant aussi bien les usages directs que les dynamiques de recyclage et de synthèse de ressources substitutives. Il répond à l'incapacité des systèmes actuels à relier explicitement l'activité économique au rythme de déplétion des stocks non renouvelables. Concrètement, l'IRNR peut être défini, ressource par ressource, à partir d'une quantité soutenable consommée par personne et par an, calculée au regard des stocks mondiaux disponibles sur un horizon temporel prédéterminé. La consommation totale d'une zone est rapportée à sa population et comparée à ces seuils de soutenabilité. Il s'appuie sur les travaux d'analyse des flux de matières (Material Flow Analysis) mobilisés par Eurostat et l'OCDE pour la comptabilité environnementale (Eurostat, 2018)⁶¹, mais s'en distingue par sa finalité : l'IRNR n'est pas un outil descriptif mais un paramètre régulateur destiné à conditionner la création monétaire. L'analogie la plus proche dans les approches existantes est l'empreinte matière (RMC) (Wiedmann et al., 2015)⁶², mais l'IRNR intègre explicitement les dynamiques de recyclage et de substitution pour saisir les marges de manœuvre d'une gestion plus circulaire des stocks.

L'Indicateur d'Empreinte Écologique (IEE) mesure les pressions exercées par les activités humaines sur l'environnement et sur les ressources renouvelables — les flux sortants du métabolisme socio-économique. Il répond au constat que de nombreuses dégradations sont

⁶¹ Eurostat. (2018). *Economy-wide material flow accounts: Handbook*. Publications Office of the European Union.

⁶² Wiedmann, T. O., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S., West, J., & Kanemoto, K. (2015). The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(20), 6271–6276.

externalisées ou déportées hors du champ des indicateurs usuels. L'IEE agrège les différentes formes de pollution (chimique, atmosphérique, hydrique), la consommation de ressources renouvelables rapportée à leurs taux de renouvellement, et le degré d'anthropisation et de fragmentation des territoires. Un point critique de conception concerne l'intégration systématique des flux commerciaux : les importations doivent être comptabilisées pour éviter les phénomènes de pollution déportée — produire dans des pays tiers des biens fortement impactants pour préserver ses propres indicateurs — et les exportations de pollutions doivent également être intégrées, afin de ne pas dissocier artificiellement les bénéfices économiques des coûts écologiques. L'analogie existant la plus proche est l'empreinte écologique du Global Footprint Network, dont l'IEE cherche à préciser et élargir plusieurs dimensions (Wackernagel & Rees, 1996)⁶³.

L'Indicateur de Biodiversité (IBD) est un indicateur d'état qui vise à mesurer la biodiversité d'un territoire en termes de diversité spécifique, génétique et écosystémique. Il représente la dimension la plus intégrative des trois : là où l'IRNR mesure les flux entrants et l'IEE les pressions sortantes, l'IBD observe le résultat effectif de l'ensemble des dynamiques sur l'état du système vivant. Il répond au constat que les systèmes économiques actuels prennent rarement en compte la qualité des milieux vivants, alors même qu'elle conditionne directement la résilience des sociétés humaines. L'IBD vise à identifier, pour chaque territoire, un niveau de biodiversité souhaitable, puis à évaluer la distance qui sépare la situation observée de cet état de référence. Il oriente les trajectoires vers une aggradation des milieux — restauration et enrichissement des fonctions naturelles — ou, à défaut, leur entretien au point de stabilisation au-delà duquel l'énergie et la matière servent principalement à maintenir un état d'équilibre dynamique. L'IBD peut intégrer des données sur la santé des écosystèmes (état des biomes, connectivité des habitats, abondance d'espèces clés) et sur la santé humaine en tant que composante des systèmes vivants. L'analogie existant la plus proche est l'Indice Planète Vivante (IPV) (WWF, 2020)⁶⁴, dont l'IBD se distingue par sa focalisation sur des échelles nationales et régionales permettant de définir des seuils de biodiversité adaptés à chaque territoire.

⁶³ Wackernagel, M., & Rees, W. E. (1996). *Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth*. New Society Publishers.

⁶⁴ WWF. (2020). *Living Planet Report 2020: Bending the Curve of Biodiversity Loss*.

La normalisation sur l'échelle 0–2

Les trois indicateurs sont normalisés sur une échelle commune allant de 0 à 2. La valeur 0 correspond à la situation la plus dégradée envisageable — effondrement écologique, surexploitation extrême, pression maximale. La valeur 2 correspond à une situation théorique de qualité écologique très élevée et de faible pression anthropique. La valeur 1 représente un point de référence théorique autour duquel se situe une zone d'équilibre possible.

En deçà de 1, les indicateurs signalent que la zone économique surexploite les ressources, dégrade son environnement, et ne permet pas une régénération suffisante des écosystèmes. Au-delà de 1, la zone se trouve dans une situation de pression relativement faible — interprétable selon les contextes comme une sous-exploitation ou comme une réserve de capacité écologique. Cette normalisation commune est une condition nécessaire de l'agrégation : elle permet à des dimensions hétérogènes — mesurées en unités incomparables — de contribuer à un signal synthétique unique sur une base dimensionnelle commune (Nardo et al., 2008)⁶⁵.

La moyenne géométrique et sa justification

L'IED est construit à partir des trois indicateurs normalisés par moyenne géométrique :

$$\text{IED} = (\text{IBD} \times \text{IEE} \times \text{IRNR})^{1/3}$$

Le choix de la moyenne géométrique répond à une exigence analytique fondamentale : éviter qu'une très bonne performance sur un indicateur puisse compenser une dégradation importante sur un autre (UNDP, 2010)⁶⁶. Autrement dit, un système ne peut pas être considéré comme soutenable si l'un de ses piliers écologiques est très dégradé, même si les deux autres sont proches de l'optimum. La moyenne géométrique est sensible aux valeurs basses : si l'un des trois indicateurs s'approche de zéro, l'IED se dégrade fortement quel que soit le niveau des deux autres. Cette propriété reflète l'intuition centrale de la soutenabilité forte posée par A1 : les fonctions biophysiques critiques sont non substituables entre elles. Une empreinte écologique

⁶⁵ Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., & Giovannini, E. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD Publishing.

⁶⁶ United Nations Development Programme. (2010). *Human Development Report 2010: The real wealth of nations: Pathways to human development*. UNDP.

acceptable ne compense pas un effondrement de la biodiversité ; une biodiversité riche ne compense pas l'épuisement des ressources non renouvelables.

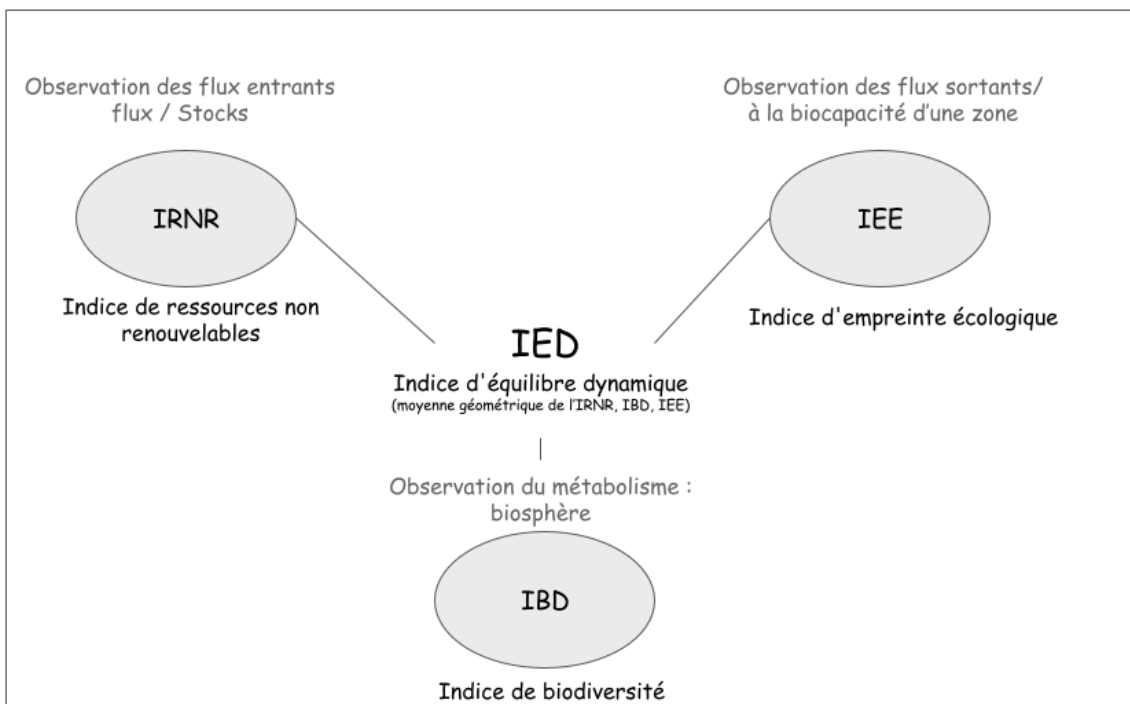


Figure 13 — interaction des trois indicateurs exo-économiques (IBD, IEE, IRNR) avec l'IED. Dans une économie homéostatique, ces indicateurs jouent le rôle de mécanisme régulateur : ils informent directement les règles de création, de distribution et de destruction monétaires, contribuant à stabiliser le système dans une zone où les besoins humains sont satisfaits tout en respectant les limites écologiques. A travers la structuration du signal, l'IED illustre l'interdépendance systémiques entre biodiversité, empreinte écologique et consommation de ressources non renouvelables.

6.3 — Interactions systémiques : le rôle de l'IED dans l'architecture EH

L'IED comme variable de régulation, non comme indicateur de performance

L'IED n'est pas un indicateur de performance environnementale relative, ni un instrument de classement ou de benchmarking entre territoires. Il fonctionne comme une variable de régulation qui couple l'endo-économie aux dynamiques de l'exo-économie biophysique. Cette distinction est capitale : un indicateur de performance vise à classer, comparer et motiver par la réputation ou la compétition. Une variable de régulation vise à structurer des mécanismes de rétroaction automatiques entre l'état d'un système et les règles qui gouvernent son fonctionnement. L'IED appartient à la seconde catégorie.

Concrètement, la variation de l'IED d'une période à l'autre conditionne, à valeur comparable, la quantité de monnaie nouvellement créée pour une zone économique donnée. Si les indicateurs agrégés diminuent, la masse monétaire nouvellement créée se réduit ; si les indicateurs agrégés augmentent, la masse monétaire nouvellement créée progresse. Ce mécanisme constitue la boucle de rétroaction centrale de l'EH. Une intensification de l'activité économique tend à accroître les pressions sur les ressources et les écosystèmes, ce qui se traduit par une détérioration progressive de l'IED, ce qui induit — avec un décalage temporel correspondant aux rythmes de mesure et de décision — une réduction de la capacité de création monétaire à la période suivante. Inversement, des trajectoires d'amélioration de la biodiversité, de réduction de l'empreinte écologique ou d'usage plus parcimonieux des ressources non renouvelables se reflètent par une progression de l'IED, autorisant une augmentation des dotations futures.

L'IED conditionne simultanément les trois formules d'écodotation décrites en Section 4 — $DETA = IED \times 22\,000 \times c$, $DCIT = DETA/c$, $DENT = IED \times P$ — ainsi que la référence à partir de laquelle les taux de remémoration des Projets Régénératifs produisent leurs effets de rétroaction positive sur la capacité monétaire future. Ce couplage garantit que l'ensemble des écodotations évoluent conjointement en fonction de l'état écologique global : aucun agent ne peut durablement dissocier sa trajectoire monétaire de celle du système dans son ensemble.

La performativité de l'IED et ses implications de conception

A4 impose de reconnaître que l'IED n'est pas un miroir objectif de l'état biophysique mais un dispositif institutionnel doté d'une performativité. Les indicateurs ne se contentent pas de mesurer : ils orientent, transforment, et contribuent à produire la réalité qu'ils décrivent. Lorsque la création monétaire est indexée sur l'IED, les agents qui anticipent les effets de cet indicateur sur leurs dotations peuvent adapter leurs comportements déclarés ou leurs pratiques pour optimiser leur position indicielle plutôt que l'état effectif du système biophysique. Ce risque — analogue aux phénomènes de “teaching to the test” ou de “Goodhart's Law” — est structurellement inhérent à tout indicateur régulateur (Campbell, 1979; Koretz, 2017)⁶⁷.

L'EH ne cherche pas à éliminer ce facteur humain, mais à l'intégrer explicitement dans la conception du système. La performativité de l'IED n'est pas pensée comme un artefact à supprimer, mais comme un levier d'orientation collective dont l'efficacité dépend de la transparence des méthodes de mesure, de la pluralité des sources de données, et de la capacité institutionnelle à réviser, corriger et débattre les indicateurs mobilisés. Cela suppose une veille méthodologique permanente : la construction, la sélection et l'amélioration continue des indicateurs doivent être pensées comme un processus réflexif et participatif, articulant des critères scientifiques de robustesse, des enjeux politiques de gouvernance, et des exigences éthiques liées à la soutenabilité forte et à la transparence. L'établissement de la situation environnementale de référence, sa révision et son amélioration continue, doivent être conçus comme des processus dynamiques.

6.4 — Implications comportementales et limites de l'IED

Ce que l'IED produit comme comportements

L'indexation de la capacité monétaire collective sur l'IED déplace la rationalité économique des agents de manière systémique. Dans un régime monétaire couplé à l'IED, les activités qui

⁶⁷ Campbell, D. T. (1979). Assessing the impact of planned social change. *Evaluation and Program Planning*, 2(1), 67–90. ; Koretz, D. (2017). *The testing charade: Pretending to make schools better*. University of Chicago Press.

dégradent les indicateurs EXEC contribuent à contracter la capacité monétaire future de l'ensemble de la zone : la surconsommation des ressources ou la dégradation des milieux se traduit, avec un délai, par un appauvrissement collectif. Inversement, les activités qui améliorent l'état de l'EXEC — et notamment les Projets Régénératifs de catégorie A (biodiversité, +4%) — contribuent à élargir la capacité monétaire future. Ce dispositif n'implique aucune prescription sectorielle : les agents conservent la liberté de leurs choix productifs et de consommation, mais les conséquences collectives de ces choix sur l'IED se répercutent sur la capacité monétaire de tous. La régulation opère par la structure des incitations globales, non par le contrôle des décisions individuelles.

Limites structurelles de l'IED au stade actuel du cadre

L'IED présente quatre limites structurelles qu'il est nécessaire d'identifier sans minimisation.

Premièrement, les trois indicateurs composants — IBD, IEE, IRNR — ne disposent pas encore des protocoles de mesure standardisés et robustes nécessaires pour entrer dans des règles de pilotage à l'échelle nationale ou internationale. Cette limite constitue le contenu de l'hypothèse H1 : la mesurabilité et la comparabilité des indicateurs exo-économiques sont des conditions testables et potentiellement falsifiables, non des acquis garantis.

Deuxièmement, la moyenne géométrique, bien que justifiée par la propriété de non-substituabilité, produit des effets de seuil non linéaires : une dégradation rapide de l'un des composants peut effondrer l'IED de manière discontinue, déclenchant une contraction brutale des dotations monétaires. La dynamique de ce type de choc sur la stabilité du régime homéostatique n'a pas encore été formalisée, ce qui constitue l'un des problèmes ouverts identifiés en Section 9.

Troisièmement, l'agrégation en une valeur unique peut masquer le franchissement de seuils critiques locaux ou sectoriels. Un IED global stable ou en légère progression peut dissimuler une dégradation irréversible d'un écosystème particulier ou l'épuisement d'une ressource spécifique. La granularité de l'information perdue dans l'agrégation est une limite structurelle de tout indicateur synthétique, aggravée ici par le fait que l'IED conditionne directement les règles monétaires.

Quatrièmement, le système de pondération implicite entre les trois composants — inhérent au choix de la moyenne géométrique non pondérée — est un choix analytique discutable. Des pondérations différenciées selon l'état du territoire ou les menaces biophysiques prioritaires pourraient être défendues. Le cadre actuel ne justifie pas la pondération égale de manière empirique : c'est une hypothèse de travail exploratoire à tester.

Ces limites ne compromettent pas la logique d'ensemble mais définissent le périmètre de validation empirique et de développement théorique nécessaires, dont les contours sont précisés en Section 9. La gouvernance de l'IED — qui construit les indicateurs, qui valide les protocoles, qui révisé les pondérations, qui arbitre les controverses scientifiques — constitue l'un des objets centraux de la Section 7.

6.5 — Traitement analytique du risque de manipulation indicielle : conditions d'incitation-compatibilité de l'IED

Motivation

La Section 6.4 a identifié la performativité de l'IED comme une limite structurelle : dès lors que la création monétaire est indexée sur l'IED, les agents ont intérêt à optimiser leur position indicielle plutôt que l'état biophysique effectif. Ce risque — qualitativement assimilé à la loi de Goodhart — a été reconnu sans être traité analytiquement. La présente section franchit ce pas.

La loi de Goodhart (1975) énonce que dès qu'une mesure devient une cible de contrôle, elle cesse d'être une bonne mesure : les agents optimisent la variable observée sans modifier nécessairement la réalité qu'elle était censée capter.⁶⁸ Appliquée à l'IED, elle se formule ainsi : si les agents anticipent que déclarer ou produire un état biophysique amélioré $\tilde{S} > S^*$ leur procure une dotation monétaire supplémentaire, ils ont intérêt à maximiser \tilde{S} indépendamment de l'état réel S^* . Le biais de manipulation $e = \tilde{S} - S^*$ constitue dès lors une variable stratégique rationnelle.

⁶⁸Goodhart, C. A. E. (1975). Problems of monetary management: The U.K. experience. *Papers in Monetary Economics*, 1, 1-20. Reserve Bank of Australia.

La question n'est pas de savoir si ce risque existe — il existe structurellement pour tout indicateur régulateur — mais d'identifier les conditions de conception de l'IED qui le rendent économiquement irrationnel ou techniquement impossible. Ce traitement relève de la **théorie des mécanismes** (*mechanism design*)⁶⁹, la branche de la théorie des jeux qui analyse comment concevoir des règles telles que les agents, en poursuivant leur intérêt individuel, produisent collectivement le résultat souhaité.(Hurwicz, 1972; Maskin, 1999; Myerson, 1981)⁷⁰

Formalisation du problème de manipulation

Structure du jeu. On considère un jeu à deux niveaux :

- **L'autorité de gouvernance** (principal G) cherche à mesurer l'état biophysique réel $S \in \mathbb{R}^{n*}$ de la zone et à l'utiliser comme variable de couplage pour déterminer la création monétaire via l'IED (Ross, 1973)⁷¹.
- **Les agents économiques** (ensemble A) observent partiellement S^* et ont la capacité d'influencer la mesure déclarée ou observable \tilde{S} , soit en modifiant leurs déclarations, soit en adaptant leurs comportements à la périphérie des indicateurs sans modifier leur impact biophysique réel.

Le biais de manipulation est défini comme $e = \tilde{S} - S \in \mathbb{R}^{n*}$, avec $e \geq 0$ pour un biais favorable (surestimation de l'état biophysique). Le gain monétaire espéré pour un agent i d'un biais e_i est

$$G_i(e_i) = \partial \text{DETA} / \partial \text{IED} \cdot \partial \text{IED} / \partial \tilde{S} \cdot e_i = g \cdot e_i$$

où g est la sensibilité marginale de la dotation monétaire à une amélioration unitaire des indicateurs. G_i est croissant et linéaire en e_i pour de petites déviations.

⁶⁹ Myerson, R. B. (1979). Incentive compatibility and the bargaining problem. *Econometrica*, 47(1), 61–73. <https://doi.org/10.2307/1912346> ; Hurwicz, L. (1972). On informationally decentralized systems. In C. B. McGuire & R. Radner (Eds.), *Decision and organization* (pp. 297–336). North-Holland.

⁷⁰ Hurwicz, L. (1972). On informationally decentralized systems. In C. B. McGuire & R. Radner (Eds.), *Decision and organization*. North-Holland ; Maskin, E. (1999). Nash equilibrium and welfare optimality. *Review of Economic Studies*, 66(1), 23–38. ; Myerson, R. B. (1981). Optimal auction design. *Mathematics of Operations Research*, 6(1), 58–73.

⁷¹ Ross, S. A. (1973). The economic theory of agency: The principal's problem. *The American Economic Review*, 63(2), 134–139.

Le coût de manipulation $C_i(e_i)$ dépend de la structure de l'IED : c'est le coût que l'agent i doit supporter pour produire un biais e_i — coût de falsification de données, coût de comportements de "façade" écologique sans impact réel, risque de sanction en cas de détection.

Condition d'incitation-compatibilité. L'IED est dit **incitation-compatible** si, pour tout agent et tout biais strictement positif, le coût de manipulation est supérieur au gain espéré :

$$\forall i \forall e_i > 0 : C_i(e_i) > G_i(e_i)$$

Cette condition garantit que la stratégie rationnelle dominante est la révélation véridique ($e_i^* = 0$), c'est-à-dire que les agents n'ont pas d'intérêt à optimiser leur position indicielle plutôt que leur impact biophysique réel.

Architecture d'un IED incitation-compatible : deux piliers complémentaires

L'analyse de la condition d'incitation-compatibilité suggère que la robustesse de l'IED repose sur une architecture à deux piliers structurellement distincts, selon la nature des composantes mesurées.

Pilier 1 — Mesures physiquement objectivées (fraction α de l'IED)

Une première catégorie de composantes de l'IED peut être mesurée par des sources indépendantes des comportements déclaratifs des agents : données satellitaires (couvert forestier, albédo, occupation des sols), relevés atmosphériques en continu (concentrations de CO_2 , NO_2 , méthane), séquençages génomiques de biodiversité, capteurs hydrographiques. Pour ces composantes, le coût de manipulation est structurellement très élevé — voire techniquement infini pour un agent individuel : aucun acteur ne peut modifier la réflectance d'un territoire observé par satellite, ni l'empreinte génomique des écosystèmes mesurée par métabarcoding.

Pour la fraction α de l'IED reposant sur ces mesures, la condition d'incitation-compatibilité est automatiquement satisfaite : $C_i(e_i) \rightarrow \infty$ pour $e_i > 0$, ce qui rend $e_i^* = 0$ la seule stratégie réalisable. La robustesse de l'IED croît donc monotonement avec α .

Pilier 2 — Composantes déclaratives sous audit stochastique (fraction $\beta = 1 - \alpha$)

La seconde catégorie comprend les composantes qui nécessitent des déclarations d'agents — usages de ressources, volumes d'émissions, pratiques de gestion des milieux — pour lesquelles la vérification directe par observation indépendante n'est pas techniquement disponible ou économiquement réalisable à grande échelle.

Pour ces composantes, la condition d'incitation-compatibilité ne peut être assurée par la structure des mesures mais peut être restaurée par un **mécanisme d'audit aléatoire avec pénalité convexe**, dont le fondement théorique est établi par Becker et Stigler (1974)⁷². Si la probabilité d'audit est $p \in (0, 1)$ et la pénalité en cas de détection d'un biais e_i est $\pi(e_i)$ avec π convexe et $\pi'(0) > 0$, alors le coût espéré de manipulation pour un agent rationnel est :

$$C_i^{\text{stoch}}(e_i) = p \cdot \pi(e_i)$$

La condition d'incitation-compatibilité devient :

$$p \cdot \pi'(0) > g$$

c'est-à-dire que le produit de la probabilité d'audit par la pénalité marginale doit excéder le gain marginal de manipulation. Cette condition peut être satisfaite même avec une probabilité d'audit faible, à condition que la pénalité π soit suffisamment convexe — c'est-à-dire que les manipulations importantes soient disproportionnellement sanctionnées par rapport aux petites déviations.

Implication de conception. La robustesse du couplage IED-monnaie dépend donc d'un paramètre de conception mesurable et ajustable :

$$\rho = \min\left(1, \alpha + (1 - \alpha) \frac{p \pi'(0)}{g}\right)$$

La fonction $\min(1, \cdot)$ garantit que ρ demeure dans l'intervalle $[0, 1]$, ce qui permet de l'interpréter comme un **degré normalisé d'incitation-compatibilité**. Le paramètre $\rho \in [0, 1]$ mesure la capacité de l'IED à aligner les incitations individuelles avec l'objectif collectif de soutenabilité. Il est défini sur l'espace des paramètres institutionnels (α, p, π, g) , qui décrivent respectivement

⁷² Becker, G. S., & Stigler, G. J. (1974). Law enforcement, malfeasance, and compensation of enforcers. *The Journal of Legal Studies*, 3(1), 1-18. <https://doi.org/10.1086/467507>

la part de mesures objectivées dans l'indicateur, la probabilité d'audit, la fonction de sanction associée à une manipulation et le gain attendu d'une manipulation.

ρ ne constitue donc pas un paramètre structurel du système économique lui-même, mais une propriété émergente de l'architecture institutionnelle du dispositif de mesure et de contrôle associé à l'IED.

Un IED robuste correspond à une valeur élevée de ρ . Celle-ci peut être obtenue soit en augmentant α (part de mesures objectivées), soit en renforçant le mécanisme d'audit (via p ou π). Ces deux leviers sont indépendants et complémentaires.

Trois propriétés architecturales supplémentaires

L'analyse mécanisme-design suggère trois propriétés additionnelles que la conception de l'IED doit intégrer pour renforcer son incitation-compatibilité structurelle.

Propriété P1 — Agrégation multiéchelle comme frein à la manipulation locale. L'IED agrège des indicateurs mesurés à des échelles différentes — nationale, régionale, écosystémique. Un agent individuel ne peut manipuler que la fraction de l'IED correspondant à sa propre zone d'influence. L'impact d'un biais local sur l'IED global est donc atténué par la structure d'agrégation elle-même. Cette propriété est une forme de robustesse par dilution : plus l'agrégation est large, plus le rapport entre le coût de manipulation et le gain obtenu est défavorable pour l'agent.

Propriété P2 — Révision périodique des pondérations comme mécanisme anti-évitement. Si les pondérations de l'IED sont connues à l'avance et stables indéfiniment, les agents peuvent concentrer leurs efforts de manipulation sur les composantes les plus sensibles et les plus accessibles. Une révision périodique et partiellement imprévisible des pondérations — fondée sur des critères scientifiques transparents mais non totalement préannoncés — réduit la capacité des agents à optimiser stratégiquement leur position indiciaire de manière durable. Cette propriété impose en contrepartie des exigences de gouvernance scientifique rigoureuse, traitées en Section 7.

Propriété P3 — Délai de mesure comme coût d'opportunité. La mesure des indicateurs biophysiques n'est pas instantanée : les protocoles de collecte, de validation et d'agrégation introduisent un délai τ_{mesure} . Un agent qui cherche à produire un biais e_i doit le maintenir pendant la durée τ_{mesure} pour qu'il soit capté par l'indicateur. Ce délai constitue un coût d'opportunité temporel : l'agent immobilise des ressources dans des comportements de façade pendant toute la durée de la mesure, sans certitude que la manipulation sera effectivement reflétée dans l'indicateur agrégé. Ce coût temporel peut être rendu explicite dans la formulation de C_i .

Reformulation de l'hypothèse H1 à la lumière de ce traitement

L'hypothèse H1, formulée en Section 2 comme portant sur la *mesurabilité et la comparabilité des indicateurs exo-économiques*, peut être reformulée de manière plus précise à la lumière de cette analyse :

H1 (version raffinée) : Il existe une architecture de mesure de l'IED telle que le degré d'incitation-compatibilité ρ est suffisamment élevé — c'est-à-dire que la fraction α de mesures objectivées est dominante, et que le mécanisme d'audit pour la fraction β satisfait $p \cdot \pi'(0) > g$ — pour que la stratégie de révélation véridique constitue un équilibre dominant pour les agents économiques.

H1 n'est plus seulement une question de robustesse métrologique, mais une condition de design institutionnel : elle porte sur la combinaison de technologies de mesure indépendante, de mécanismes d'audit et de structures d'agrégation qui rendent la manipulation indiciaire irrationnelle ou techniquement hors de portée.

La vérification empirique de H1 dans cette version raffinée constitue un programme de recherche distinct, articulant économie des incitations, métrologie environnementale et analyse institutionnelle. Elle est identifiée comme problème ouvert P-G1 dans la Section 9.

Limite résiduelle : le risque systémique de coordination des manipulations

Le traitement précédent suppose que les agents manipulent l'IED de manière indépendante. Il existe cependant un scénario plus difficile à traiter analytiquement : celui d'une **coordination entre agents** pour produire collectivement un biais systémique $e_{collectif}$, non détectable par les mécanismes d'audit individuels. Dans ce scénario, aucun agent individuel ne dépasse le seuil d'audit, mais la somme des comportements produit une surestimation systématique de l'état biophysique à l'échelle de la zone.

Ce risque — analogue aux phénomènes de "greenwashing systémique" ou de manipulation collective de benchmarks financiers — ne peut être traité par les seuls mécanismes d'incitation individuelle. Il requiert des mécanismes de vérification à l'échelle systémique : contrôles croisés entre indicateurs (une amélioration cohérente de l'IBD doit être accompagnée d'une réduction de l'IEE et de l'IRNR compatibles), détection statistique des anomalies dans les distributions d'indicateurs, et comparaison avec des mesures indépendantes agrégées au niveau international.

Cette limite constitue la frontière analytique actuelle du traitement du problème de Goodhart dans le cadre EH. Sa résolution complète dépasse le périmètre du présent working paper et est identifiée comme problème ouvert P-G2 dans la Section 9.

7 — Implications institutionnelles et de gouvernance

Les analyses conduites dans les sections précédentes permettent d'identifier un ensemble de questions institutionnelles que le cadre EH rend désormais explicitement traitables. Cette section ne formule pas de prescriptions : elle n'identifie ni d'architecture réglementaire clé en main, ni de dispositif monétaire prêt à être déployé. Elle cartographie les **conditions à explorer** — c'est-à-dire les exigences que les mécanismes décrits en Section 4 posent implicitement, et dont la viabilité constitue un programme de recherche à part entière, non un acquis du cadre. La distinction est épistémologique : identifier une condition nécessaire à la cohérence interne d'un

mécanisme est différent de prescrire les institutions qui pourraient la satisfaire (Weber, 1922/1978)⁷³. Les sections 7.1 à 7.4 opèrent dans ce premier registre.

7.1 — Questions institutionnelles posées par les mécanismes : mesure, indexation, fonte

Les mécanismes décrits en Section 4 — écodotation, Projets Régénératifs, fonte — soulèvent des questions institutionnelles précises. L'identification de ces questions ne présuppose pas les formes institutionnelles qui pourraient y répondre : elle délimite ce que le cadre exige analytiquement, laissant ouverte la question de savoir si, et par quels dispositifs, ces exigences peuvent être satisfaites dans des contextes institutionnels existants ou à construire.

L'écodotation requiert, en premier lieu, un dispositif permanent et robuste de mesure des trois indicateurs composants de l'IED : IBD, IEE et IRNR. Comme l'a mis en évidence §6.4, ces indicateurs n'ont pas encore de protocoles de mesure standardisés et comparables à l'échelle des zones économiques concernées. La condition institutionnelle minimale n'est donc pas seulement politique — elle est scientifique et infrastructurelle : des réseaux de collecte, des protocoles de validation, des instances de certification scientifique indépendantes sont nécessaires pour que l'indexation de la création monétaire sur l'IED soit opérante plutôt que nominale. H1, posée en Section 2 comme hypothèse testable, formule exactement cette condition : la mesurabilité et la comparabilité des indicateurs exo-économiques sont des prérequis à la viabilité du couplage, non des acquis garantis.

L'indexation elle-même — le fait que les formules $DETA = IED \times 22\,000 \times c$, $DCIT = DETA/c$ et $DENT = IED \times P$ traduisent automatiquement l'état de l'IED en masses monétaires distribuées — exige la stabilité et la prévisibilité des règles d'application. Cette stabilité n'est pas triviale : elle suppose que les agents puissent anticiper les conséquences monétaires de l'état biophysique, condition nécessaire à toute modification durable de leurs comportements d'investissement et de consommation. Une règle d'indexation fréquemment révisée ou discrétionnairement

⁷³ Weber, M. (1978). *Economy and society: An outline of interpretive sociology* (G. Roth & C. Wittich, Eds.). University of California Press. (Original work published 1922)

suspendue perd sa fonction régulatrice et se rapproche d'une taxe négociée cas par cas, avec des effets comportementaux radicalement différents (Kydland & Prescott, 1977)⁷⁴.

La fonte, troisième mécanisme, pose des exigences supplémentaires. Son application suppose à la fois un taux explicite, stable, connu à l'avance, et un dispositif technique permettant son application uniforme à l'ensemble des stocks et des flux monétaires d'une zone. La différence avec l'inflation est, ici encore, institutionnelle : la fonte est une règle délibérée, transparente, non le produit d'une perte de confiance diffuse ou d'une réorganisation économique. Cette transparence est une condition de légitimité — les agents doivent comprendre le mécanisme et sa finalité pour y adapter leurs comportements de manière cohérente. Une fonte opaque ou mal comprise produirait des comportements d'évitement dont l'effet systémique annulerait la stabilisation attendue.

7.2 — Architecture de gouvernance monétaire : questions ouvertes sur les options, la légitimité et la résilience

La question de l'architecture de gouvernance — quelle institution émet, contrôle, ajuste — ne reçoit pas de réponse dans le cadre de l'EH, qui ne tranche pas entre les architectures possibles. Plusieurs architectures sont envisageables : une autorité monétaire spécialisée à l'échelle de la zone EH, analogue fonctionnellement à une banque centrale mais dont le mandat est indexé sur les indicateurs biophysiques plutôt que sur la stabilité des prix ; un consortium d'autorités monétaires nationales opérant sous protocoles communs ; ou une architecture d'institutions multilatérales existantes réorientées par traité. Chacune présente des compromis distincts entre légitimité démocratique, résilience institutionnelle et capacité technique.

Deux critères transversaux conditionnent cependant la viabilité de toute architecture choisie. Le premier est l'indépendance vis-à-vis des intérêts qui bénéficieraient d'une déformation des indicateurs EXEC en leur faveur : la gouvernance monétaire de l'EH doit être structurellement protégée contre les pressions des agents qui ont intérêt à surestimer l'état biophysique pour maintenir ou augmenter leurs dotations. Le second est la résilience face aux chocs politiques et

⁷⁴ Kydland, F. E., & Prescott, E. C. (1977). Rules rather than discretion: The inconsistency of optimal plans. *Journal of Political Economy*, 85(3), 473–491. <https://doi.org/10.1086/260580>

aux alternances de gouvernements : une architecture dont la légitimité repose sur une majorité politique ponctuelle est fragile dans la durée. H3, posée en Section 2, formalise précisément cette exigence : la compatibilité socio-politique d'un régime stable de règles monétaires couplées aux indicateurs biophysiques, maintenu sur un horizon long, est une condition testable — non un acquis de cohérence théorique.

7.3 — Statut de la décentralisation et de la participation

L'EH n'implique pas une centralisation intégrale de la gouvernance économique. Les agents — citoyens, entreprises, collectivités territoriales — conservent une large liberté dans leurs décisions productives et de consommation. Ce que le cadre modifie, c'est la structure des incitations globales : les conséquences collectives des comportements individuels sur l'IED se répercutent sur la capacité monétaire de tous, sans prescription sectorielle directe.

Cette architecture incitative produit une forme de participation diffuse mais effective : chaque amélioration vérifiée des indicateurs EXEC contribue à augmenter les dotations futures de l'ensemble de la zone. Les Projets Régénératifs (PR) constituent le mécanisme par lequel cette participation peut prendre une forme active et certifiée — des entreprises, des collectivités, des consortiums d'acteurs investissent dans des projets dont les bénéfices écologiques mesurés se traduisent en création monétaire supplémentaire. Leur certification, rappelée en §6.4, doit être opérée par des organismes indépendants selon des cahiers des charges stricts — condition nécessaire pour que la participation régénérative ne devienne pas un canal d'optimisation indicielle.

La décentralisation de la participation soulève cependant une question de coordination : si de nombreux acteurs investissent simultanément dans des PR d'une même catégorie, l'effet sur l'IED peut être non linéaire et produire des dynamiques d'agrégation dont les effets sur les dotations ne sont pas anticipables sans modélisation explicite. Ce point constitue l'une des limites techniques non résolues que la Section 8 formalisera.

7.4 — Zones d'incertitude : capture, performativité, articulation avec les institutions existantes

Trois zones d'incertitude structurelle méritent d'être identifiées sans minimisation.

La première est le **risque de capture** : toute architecture institutionnelle chargée de mesurer l'IED ou de certifier les PR est exposée aux tentatives des agents d'influencer en leur faveur les critères, les méthodes ou les procédures de validation (Stigler, 1971⁷⁵). La performativité de l'IED, analysée en §6.3, rend ce risque particulièrement aigu : puisque l'état de l'indicateur conditionne la masse monétaire distribuée, les enjeux de sa construction sont considérables. L'EH ne prétend pas éliminer ce risque — elle l'intègre en posant la transparence des méthodes, la pluralité des sources de données et la révisabilité institutionnalisée comme conditions fonctionnelles minimales de résistance. Mais la robustesse effective de ces dispositifs contre des stratégies de capture sophistiquées reste à éprouver empiriquement.

La deuxième est l'**articulation avec les institutions existantes** : systèmes bancaires nationaux, régimes de propriété, droits budgétaires des États, architectures fiscales, marchés financiers internationaux. La mise en place d'un régime de monnaie *ex natura* dans une zone où coexistent des institutions héritées de l'architecture monétaire actuelle ne constitue pas un remplacement instantané mais une superposition dont les tensions et les modalités de transition restent à concevoir. Cette phase de superposition institutionnelle pourrait produire des formes transitoires d'instabilité systémique — arbitrages entre zones monétaires, stratégies d'évitement, désajustements de liquidité et comportements spéculatifs — dont l'ampleur dépendrait fortement des modalités concrètes de transition. Le risque d'instabilité transitoire — achats massifs de ressources stratégiques, volatilité des indicateurs de richesse, arbitrages entre zones EH et zones extérieures — est réel et documenté dans la littérature sur les transitions de régimes économiques, sans que le cadre dispose à ce stade d'un dispositif de gestion de ces tensions.

La troisième est la **performativité non désirée de la gouvernance elle-même** : les règles institutionnelles qui encadrent la mesure, la certification et la distribution peuvent produire des effets comportementaux non anticipés dès lors qu'elles sont connues à l'avance. Des agents rationnels anticipent les règles et optimisent leurs comportements en conséquence — ce qui est précisément l'objectif de la réorientation des incitations — mais peuvent aussi découvrir des stratégies d'optimisation compatibles avec les règles formelles tout en contournant leurs intentions substantielles. Cette tension entre règle formelle et intention substantielle est

⁷⁵ Stigler, G. J. (1971). The theory of economic regulation. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 2(1), 3–21. <https://doi.org/10.2307/3003160>

irréductible dans tout dispositif institutionnel ; la reconnaître est une condition de la conception d'institutions robustes plutôt qu'une objection à leur pertinence.

Ces trois zones d'incertitude — capture, articulation transitoire, performativité non désirée — seront formalisées comme limites méthodologiques en Section 8 et comme axes du programme de recherche en Section 9.

8 — Limites méthodologiques

8.1 — Ce qui n'est pas formalisé

Plusieurs composantes centrales de l'EH reposent sur des propriétés décrites en termes qualitatifs ou structurels sans que leur formalisation mathématique ait été conduite. Ces lacunes ne sont pas des oublis corrigeables à la marge : elles délimitent la frontière effective entre ce que le cadre établit et ce qu'il postule.

L'absence la plus conséquente est celle d'un **modèle dynamique complet** du couplage EXEC/ENEC. La Section 5 a posé l'existence d'une zone de viabilité mobile, de trois régimes de trajectoire (homéostatique, déviation corrigeable, non-viabilité) et de paramètres sensibles (IED, fonte, délais de rétroaction) — mais sans formalisation au sens d'un système d'équations différentielles, d'un modèle en dynamique des systèmes ou d'une spécification agent-based vérifiable. Les propriétés oscillatoires revendiquées sont des hypothèses structurelles déduites par analogie avec les systèmes vivants (Section 5 §5.1), non des résultats formellement démontrés. L'absence de ce modèle rend impossible la détermination analytique des conditions

de stabilité du régime homéostatique, l'évaluation de la sensibilité aux chocs exogènes et l'identification des plages de paramètres garantissant le maintien dans la zone de viabilité.

La formule de l'IED (Section 6 §6.2) — $IED = (IBD \times IEE \times IRNR)^{(1/3)}$ — est posée sans que les **effets de seuil non linéaires** de la moyenne géométrique aient été formalisés. Lorsque l'un des trois indicateurs composants se dégrade rapidement, l'IED peut s'effondrer de manière discontinue, déclenchant une contraction brutale des écodotations. La dynamique de ce type de choc sur l'ensemble du régime monétaire n'est pas modélisée. De même, la **perte d'information par agrégation** — l'IED global peut progresser ou stagner tout en masquant le franchissement d'un seuil critique local ou sectoriel — n'a pas reçu de traitement analytique permettant d'évaluer à quel point cet angle mort est dangereux pour le pilotage.

Enfin, les **modalités de transition** depuis une architecture monétaire conventionnelle vers un régime de monnaie ex naturae (Section 4 §4.1) ne sont pas formalisées. La coexistence d'institutions héritées — systèmes bancaires, marchés financiers, régimes de propriété — avec les mécanismes EH produit des interactions dont l'amplitude et les effets de déstabilisation potentiels restent sans modélisation dédiée (Section 7 §7.4).

Une **difficulté méthodologique** supplémentaire tient au fait que certaines conditions d'invalidation du cadre ne peuvent être testées qu'à travers un déploiement institutionnel partiel ou expérimental des mécanismes qu'il décrit. Cette asymétrie n'abolit pas la falsifiabilité formelle du programme, mais elle en limite la falsifiabilité pratique à court terme : certaines objections ne peuvent être tranchées qu'au prix d'une mise à l'épreuve institutionnelle elle-même dépendante d'hypothèses préalables de faisabilité.

8.2 — Ce qui reste hypothétique : fragilités de H1, H2, H3

Les trois hypothèses structurantes du cadre (Section 2 §2.3) constituent des conditions de validité testables. Leurs zones de fragilité méritent d'être exposées sans atténuation.

H1 — Mesurabilité et comparabilité des indicateurs exo-économiques suppose que les dimensions biophysiques clés peuvent être représentées par des indicateurs normalisés suffisamment robustes pour entrer dans des règles de pilotage macroéconomique. Cette

hypothèse est fragilisée sur trois fronts : l'absence actuelle de protocoles standardisés et comparables à l'échelle nationale pour l'IBD et l'IEE (Section 6 §6.4) ; la sensibilité des indicateurs aux choix méthodologiques, aux conventions de comptabilité environnementale et aux biais de collecte ; et le risque de manipulation stratégique des mesures par les agents dont les dotations en dépendent — risque identifié par la performativité de l'IED (Section 6 §6.3). Si H1 ne peut être satisfaite, l'IED perd sa fonction régulatrice et l'ensemble des mécanismes monétaires qui en dépendent (Section 4) perdent leur base opératoire.

H2 — Efficacité régulatrice des boucles de rétroaction monétaires suppose que l'indexation des règles monétaires sur l'IED produit des boucles de rétroaction stabilisatrices plutôt que divergentes. Cette hypothèse est fragilisée par trois mécanismes documentés dans la littérature sur les systèmes de régulation à délai : premièrement, les délais de rétroaction entre dégradation biophysique effective et signal IED (mesure, traitement, transmission) peuvent, au-delà d'un seuil relatif à la vitesse de dégradation, produire des oscillations d'amplitude croissante plutôt que convergente — un résultat classique de la théorie du contrôle (Section 5 §5.2) ; deuxièmement, si le taux de fonte est mal calibré dans un sens ou dans l'autre, les effets peuvent être déstabilisateurs plutôt que stabilisateurs (Section 5 §5.2) ; troisièmement, les comportements d'anticipation des agents peuvent produire des dynamiques procycliques contrecarrant les effets de rétroaction négatifs recherchés. Si H2 est falsifiée, les mécanismes monétaires amplifient l'instabilité au lieu de la corriger.

H3 — Compatibilité socio-politique minimale suppose qu'un régime de règles incluant fonte et indexation biophysique est institutionnellement applicable sur un horizon long. Cette hypothèse est fragilisée par la profondeur des transformations distributives qu'implique l'EH : réduction des marges d'extraction pour les acteurs dont le modèle économique repose sur l'exploitation intensive des ressources ; érosion des stocks accumulés par la fonte ; reconfiguration des modèles productifs dans des délais qui peuvent créer des perdants à court terme sans dispositifs de compensation adéquats (Section 7 §7.3). La compatibilité biophysique d'un régime de pilotage n'implique ni son acceptabilité politique ni sa stabilité historique.

8.3 — Ce qui nécessite une validation empirique

Plusieurs paramètres et relations causales du cadre ont un statut exploratoire que leur usage dans des formules de pilotage ne doit pas occulter.

Le **taux de fonte** n'est pas déterminable a priori par le cadre théorique (Section 4 §4.4 et Section 7 §7.1). Trop faible, il ne produit pas les effets de découragement de la thésaurisation et de stabilisation des soldes qui lui sont attribués, ni de contrainte au raisonnement suffisante sur la mobilisation des flux et peut précipiter des dépenses déstabilisatrices. Trop élevé, il comprime la liquidité, génère de l'anxiété de détention et de consommation ou des stratégies d'évitement. La plage de taux produisant les effets attendus sans effets pervers nécessite une expérimentation progressive avec évaluation continue — non une déduction théorique.

Les **coefficients d'écodotation** — notamment le coefficient c dans $DETA = IED \times 22\,000 \times c$ — ont un statut exploratoire analogue (Section 4 §4.2). La valeur de 22 000 (en euros par point d'IED) et les paramètres de distribution entre agents ($DCIT = DETA/c$, $DENT = IED \times P$) sont des hypothèses numériques requérant une calibration empirique que le cadre ne peut fournir lui-même.

La **résistance effective du dispositif de certification des PR à la labellisation stratégique** (Section 4 §4.3 et Section 7 §7.2) n'est pas vérifiable sans expérimentation institutionnelle. La condition formelle — indépendance de l'organisme, conditionnalité de la remémoration, vérification in situ — est nécessaire mais peut s'avérer insuffisante face à des stratégies de contournement sophistiquées.

La **pondération égale** des trois indicateurs dans la moyenne géométrique (Section 6 §6.2) est un choix analytique sans justification empirique démontrée. Des pondérations différenciées selon l'état du territoire ou les menaces biophysiques prioritaires seraient défendables et pourraient produire des effets de régulation significativement différents.

Enfin, les **effets comportementaux** de l'indexation de la création monétaire sur l'IED — notamment la manière dont les agents s'approprient les nouveaux signaux monétaires, modifient leurs attitudes face à l'épargne et à l'investissement, et transforment leurs

dynamiques de statut (Section 7 §7.3) — constituent un programme de recherche empirique et psychosociologique qui reste entier (Kahneman & Tversky (1979)⁷⁶.

8.4 — Les cinq conditions d'invalidation du cadre

Ces conditions sont formulées positivement : leur réalisation falsifie le cadre de manière structurelle, non partielle.

Condition 1 — Infalsifiabilité pratique de H1 : si les indicateurs IBD, IEE et IRNR s'avèrent impossibles à standardiser et à comparer de manière suffisamment robuste à l'échelle des zones économiques concernées — en raison de l'hétérogénéité des contextes biophysiques, des biais de collecte irréductibles ou de la manipulation stratégique systématique — l'IED ne peut pas fonctionner comme variable de régulation. Le couplage EXEC/ENEC devient nominal et l'ensemble de l'architecture monétaire perd sa base opératoire.

Condition 2 — Production d'instabilité par H2 : si les boucles de rétroaction monétaires, au lieu de stabiliser le système dans la zone de viabilité, produisent des oscillations d'amplitude croissante menant au régime de non-viabilité — en raison de délais irréductibles, d'une mauvaise calibration de la fonte ou de comportements d'anticipation procycliques — le mécanisme central de l'EH crée plus d'instabilité qu'il n'en réduit. Le cadre serait alors contre-productif par rapport à ses propres objectifs.

Condition 3 — Effondrement de H3 par conflits distributifs : si les transformations distributives induites par l'EH — pertes à court terme pour les acteurs d'industries extractives, érosion des stocks et dynamique des mobilisations de flux par la fonte, reconfiguration des modèles productifs — génèrent des conflits politiques d'une intensité dépassant la capacité des institutions à les absorber, le régime de règles devient instable avant d'avoir pu produire ses effets biophysiques. La cohérence théorique du cadre ne garantit pas sa viabilité institutionnelle dans le temps.

Condition 4 — Capture systématique des dispositifs de mesure : si les institutions chargées de mesurer l'IED et de certifier les PR sont systématiquement capturées par les agents ayant intérêt à déformer les indicateurs en leur faveur — malgré les dispositifs de transparence et de

⁷⁶ Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47(2), 263-291. <https://doi.org/10.2307/1914185>

pluralité des sources — la performativité de l'IED se retourne contre l'objectif de couplage biophysique. L'indicateur cesse de mesurer l'état de l'exo-économie pour mesurer la capacité des agents à influencer sa mesure.

Condition 5 — Vitesse d'irréversibilité biophysique supérieure à la vitesse de correction monétaire : si les dégradations biophysiques se produisent à une vitesse dépassant structurellement la capacité du signal IED à se dégrader, de la correction monétaire à se produire, et des comportements à se modifier — en raison de délais de rétroaction cumulatifs — des seuils d'irréversibilité écologique peuvent être franchis avant que les mécanismes homéostatiques aient pu opérer. Dans ce cas, le régime de viabilité dynamique décrit en Section 5 cesse d'être accessible quelle que soit la qualité du pilotage monétaire.

Tableau — Statut épistémique des objets formels du cadre EH

Objet formel	Statut épistémique
Axiomes A1-A5	Postulats conceptuels définissant le cadre ontologique et analytique du système
Hypothèses H1-H3	Hypothèses empiriquement testables relatives aux propriétés observables du système
Propriété C3	Propriété analytique démontrable résultant de la structure mathématique de l'IED
Conjectures C1, C2, C4	Conjectures conditionnelles portant sur les propriétés dynamiques du système
Problèmes P-F1 à P-F5	Problèmes ouverts de formalisation mathématique
Problèmes empiriques E1-E6	Problèmes de validation empirique et de calibration institutionnelle

9 — Problèmes de recherche ouverts

Le programme de recherche identifie en outre deux chantiers transversaux — V7 (gouvernance des communs et des institutions) et V8 (effets systémiques et limites du cadre) — dont les contenus correspondants sont distribués dans le présent document entre les catégories I1–I5 pour V7, et les Sections 8 et 10 pour V8. Ces chantiers ne reçoivent pas ici de traitement supplémentaire : ils constituent des entrées de lecture transversales dans ce qui précède, non des problèmes distincts des trente-et-un qui suivent.

La catégorisation retenue — théoriques, empiriques, mathématiques, institutionnels, modélisation et simulation — est de nature **épistémologique** : elle organise les problèmes selon le type de travail scientifique qu'ils appellent. Elle diffère de l'organisation **thématique** du programme de recherche associé à l'EH, qui structure les mêmes questions par chantiers et verrous disciplinaires. Les deux logiques sont complémentaires : la première oriente le chercheur selon le registre de sa contribution, la seconde selon l'objet qu'il choisit d'investiguer. Le tableau suivant en établit la correspondance :

Catégorie (WP)	Chantiers / Verrous associés (Programme de recherche)
Théoriques (T1–T4)	V1 (mesure), V3 (IED), V6 (simulation — statut épistémologique)
Empiriques (E1–E6)	V1 (mesure), V2 (performativité), V4 (couplage monétaire)
Mathématiques (M1–M5)	V3 (IED — propriétés dynamiques), V4 (couplage — rétroactions)
Gouvernance des indicateurs (P-G1–G2)	V2 (performativité), V7 (gouvernance, institutions)

Institutionnels (I1–I5) V5 (trajectoires et transition), V7 (gouvernance, communs, institutions)

Modélisation et simulation (S1–S4) V6 (simulation et dynamiques émergentes)

Formalisation dynamique (P-F1–F5) V4 (couplage — rétroactions), V5 (trajectoires et transition), V6 (simulation) |

Le programme de recherche identifie en outre deux chantiers transversaux — **V7** (gouvernance des communs et des institutions) et **V8** (effets systémiques et limites du cadre) — dont les contenus correspondants sont distribués dans le présent document entre les catégories I1–I5 pour V7, et les Sections 8 et 10 pour V8. Ces chantiers ne reçoivent pas ici de traitement supplémentaire : ils constituent des entrées de lecture transversales dans ce qui précède, non des problèmes distincts qui suivent.

Structure logique du programme de recherche

Les trente-et-un problèmes identifiés ne sont pas indépendants : ils présentent une structure de dépendance logique.

Le problème P-F1 — existence du noyau de viabilité — constitue le préalable conceptuel du programme. Si $Viab(K)$ est vide pour toute classe raisonnable de dynamiques F et de fonctions de couplage Φ , l'architecture EH perd sa cohérence formelle.

Les autres problèmes de formalisation dynamique (P-F2 à P-F5) explorent différentes propriétés du système conditionnellement à l'existence d'un tel noyau.

À titre indicatif, le programme peut être structuré selon trois horizons temporels de recherche :

Horizon temporel

Priorités de recherche

Court terme P-F1 — Existence et caractérisation du noyau de viabilité ; P-F2 — Délai critique et instabilité oscillatoire

Moyen terme P-F3 — Effondrement non linéaire et détection anticipée ; P-F4 — Conditions d'attractivité de la zone homéostatique ; E1-E3 — Tests empiriques et calibration initiale

Long terme P-F5 — Viabilité avec ensemble de contraintes mobile ; intégration dans des modèles macroéconomiques stock-flux cohérents (SFC)

9.1 — Problèmes théoriques

T1 — Portée et limites de l'analogie homéostatique. L'EH transpose à l'économie les notions de régulation biologique — homéostasie, zone de viabilité mobile, régime de trajectoire — sans que les conditions de validité et les limites de cette transposition aient été explicitées. Jusqu'où l'analogie entre systèmes vivants et systèmes socio-économiques est-elle analytiquement légitime ? À quel point les propriétés des systèmes homéostatiques biologiques (plasticité des bornes, résilience ondulatoire) sont-elles transposables à des systèmes institutionnels portés par des acteurs rationnels capables d'anticiper les règles et de modifier leur comportement en conséquence ? (Section 5 §5.1 ; Section 2 §2.1)

T2 — Statut de la non-substituabilité comme axiome fondateur. L'axiome A1 pose la non-substituabilité des fonctions biophysiques critiques comme borne structurelle. Cette position correspond à la soutenabilité forte. Mais la frontière entre fonctions substituables et

fonctions irremplaçables n'est pas stable dans le temps : elle évolue avec les connaissances scientifiques, les innovations technologiques et la modification des écosystèmes eux-mêmes. La question de savoir comment réviser dynamiquement le contenu opérationnel d'A1 sans déstabiliser l'architecture qu'il fonde reste entièrement ouverte. (Section 2 §2.2)

T3 — Cohérence entre A1 et le choix de la moyenne géométrique. La justification de la moyenne géométrique dans la formule de l'IED repose sur la propriété de non-substituabilité : une très bonne performance sur un indicateur ne peut pas compenser la dégradation d'un autre. Mais la moyenne géométrique pondérée également n'est pas la seule formalisation possible de cette intuition — d'autres agrégateurs (minimum, norme de Leontiev, fonctions CES à faible substituabilité) pourraient être défendus avec des fondements théoriques distincts. La question de savoir quelle classe de fonctions d'agrégation est cohérente avec A1 n'a pas reçu de réponse formelle. (Section 6 §6.2 ; Section 2 §2.2)

T4 — Statut épistémologique du cadre face à ses propres conditions d'invalidation. Les cinq conditions d'invalidation formalisées en Section 8 §8.4 posent une question de méthode : dans quelle mesure chacune de ces conditions est-elle empiriquement testable sans que soit d'abord conduite une expérimentation à une échelle suffisante ? Si les conditions ne sont pas testables indépendamment du déploiement institutionnel, le cadre risque de se trouver dans une position d'indécidabilité empirique préalable. Une stratégie de recherche possible consiste à tester certaines composantes du cadre à travers des dispositifs expérimentaux à petite échelle (simulations, expérimentations territoriales ou laboratoires économiques) permettant d'évaluer partiellement les mécanismes de régulation avant tout déploiement institutionnel complet. Ce problème épistémologique reçoit dans le présent document un premier traitement méthodologique, mais reste ouvert quant à ses implications pour la stratégie de recherche et d'expérimentation.. (Section 8 §8.4)

9.2 — Problèmes empiriques

E1 — Calibration du taux de fonte. Le cadre EH comporte deux composantes de fonte : une appliquée aux stocks monétaires ($\lambda \square$) et une appliquée aux flux de transactions ($\lambda \square$). Quelle combinaison de ces paramètres produit simultanément : un découragement de la thésaurisation,

une orientation des encaisses vers les PR, un maintien d'une liquidité suffisante du système, et une stabilisation dynamique de la masse monétaire ? Cette plage de paramètres ne peut être déduite théoriquement et requiert une expérimentation progressive avec évaluation comportementale à plusieurs échelles. (Section 4 §4.4 ; Section 7 §7.1 ; Section 8 §8.3)

E2 — Calibration des coefficients d'écodotation. Les valeurs numériques utilisées dans les formules $DETA = IED \times 22\ 000 \times c$ et $DENT = IED \times P$ ont un statut exploratoire. Sur quelle base empirique doit-on déterminer la valeur de référence (22 000 €/point d'IED) et le coefficient de distribution entre agents ? Les critères permettant de distinguer une valeur sous-stimulante d'une valeur inflationniste dans ce régime monétaire spécifique restent à établir. (Section 4 §4.2 ; Section 8 §8.3)

E3 — Effets comportementaux réels de l'indexation monétaire sur l'IED. Comment les ménages, les entreprises et les collectivités publiques s'approprient-ils effectivement les signaux monétaires produits par le couplage IED/écodotation ? Modifient-ils leurs comportements d'investissement et de consommation dans le sens attendu ? Des résistances psychologiques, des biais cognitifs ou des normes sociales établies contrecarrent-elles les effets d'incitation prévus ? Cette question relève d'une recherche psychosociologique spécifique qui reste entière et pourrait être abordée par des dispositifs expérimentaux combinant économie comportementale de laboratoire, enquêtes longitudinales et expérimentations territoriales à petite échelle.. (Section 7 §7.3 ; Section 8 §8.3)

E4 — Pondération optimale des composantes de l'IED. La pondération égale des trois indicateurs dans la moyenne géométrique constitue une hypothèse par défaut analytiquement défendable — elle évite d'introduire des hiérarchies sans base empirique et pénalise structurellement les déséquilibres extrêmes entre composantes. Elle n'est cependant pas neutre. Trois tensions la fragilisent : la criticité biophysique n'est pas équivalente entre dimensions ni stable dans le temps (Rockström et al., 2009 ; Steffen et al., 2015) ; la robustesse des données disponibles est asymétrique entre IRNR, IEE et IBD, accordant implicitement à l'IBD un poids de régulation que sa mesure ne justifie pas encore pleinement ; enfin, toute différenciation explicite des poids crée une incitation à la capture réglementaire par les acteurs dont les activités dégradent préférentiellement certaines composantes. *Sous quelles conditions la pondération égale constitue-t-elle une règle robuste de second rang face à l'incertitude informationnelle et au*

risque de capture, par rapport à une pondération différenciée théoriquement plus précise mais institutionnellement plus vulnérable ? (Section 6 §6.2 ; Section 7 §7.2 ; Section 8 §8.1)

E5 — Résistance effective du dispositif de certification des PR à la labellisation stratégique. Le triptyque institutionnel — indépendance de l'organisme certificateur, conditionnalité de la remémoration, vérification in situ — est-il suffisant pour résister à des stratégies de contournement sophistiquées dans des environnements institutionnels diversifiés ? La réponse requiert une analyse comparative de dispositifs de certification dans d'autres domaines (certification environnementale, normes ISR) et, ultimement, une expérimentation dédiée. (Section 4 §4.3 ; Section 7 §7.2 ; Section 8 §8.3)

E6 — Validation de H2 en conditions réelles. Les boucles de rétroaction monétaires produisent-elles effectivement une stabilisation dans la zone de viabilité, ou génèrent-elles des oscillations divergentes en conditions de délais de rétroaction empiriquement mesurés ? Cette question ne peut être résolue par raisonnement analytique seul : elle requiert soit des données issues d'expérimentations à échelle réduite, soit des simulations numériques robustement calibrées sur des données écologiques et économiques réelles. (Section 2 §2.3 ; Section 5 §5.2 ; Section 8 §8.2)

9.3 — Problèmes mathématiques

M1 — Formalisation du modèle dynamique complet du couplage EXEC/ENEC. Les propriétés oscillatoires du régime homéostatique, les trois régimes de trajectoire et les conditions de passage entre eux ont été décrits qualitativement (Section 5) mais non formalisés. La question ouverte est celle de la classe de modèles (équations différentielles, dynamique des systèmes, modèles agents) la mieux adaptée pour représenter le couplage EXEC/ENEC avec délais de rétroaction, non-linéarités et plasticité des bornes de viabilité. (Section 5 §5.2 ; Section 8 §8.1)

M2 — Analyse de stabilité du couplage IED/écodotation sous délais de rétroaction variables. Pour quelles plages de délais de rétroaction — entre dégradation biophysique effective, signal IED, contraction monétaire et modification des comportements — le régime

homéostatique reste-t-il stable ? Cette question relève de la théorie du contrôle avec délai et n'a pas été traitée formellement dans le cadre actuel. (Section 5 §5.2 ; Section 8 §8.1 et §8.2)

M3 — Effets de seuil non linéaires de la moyenne géométrique sur le régime monétaire.

Lorsque l'un des trois composants de l'IED se dégrade rapidement, la contraction de l'IED est non linéaire et peut devenir discontinue. Comment cette discontinuité se propage-t-elle sur les formules d'écodotation ? Quelles sont les conditions sous lesquelles une dégradation rapide d'un seul indicateur peut déclencher une contraction monétaire brutale susceptible d'elle-même précipiter le système vers le régime de non-viabilité ? (Section 6 §6.2 et §6.4 ; Section 8 §8.1)

M4 — Formalisation de la perte d'information par agrégation dans l'IED.

Dans quelles conditions un IED global stable ou en progression peut-il masquer le franchissement d'un seuil critique local ou sectoriel ? Existe-t-il une borne analytique sur la divergence entre le signal global et les états locaux ? Cette question conditionne la possibilité de concevoir des dispositifs complémentaires d'alerte sectorielle sans abandonner le signal synthétique. (Section 6 §6.4 ; Section 8 §8.1)

M5 — Modélisation des effets d'agrégation des Projets Régénératifs sur l'IED.

Lorsque de nombreux acteurs investissent simultanément dans des PR d'une même catégorie dans une zone donnée, les effets sur l'IED peuvent être non linéaires et produire des dynamiques dont le résultat sur les dotations futures n'est pas simplement la somme des effets individuels. La modélisation de cette agrégation est absente du cadre actuel. (Section 7 §7.3)

9.4 — Problèmes institutionnels

I1 — Architecture de gouvernance de la mesure résistant à la capture.

Quelle architecture institutionnelle — combinaison d'agences indépendantes, de protocoles ouverts, de mécanismes d'audit croisé et de dispositifs de signalement — offre la meilleure résistance aux tentatives de capture des dispositifs de mesure de l'IED et de certification des PR dans des environnements politiques et économiques divers ? La réponse requiert une analyse comparative d'architectures de gouvernance dans des domaines présentant des risques de capture analogues. (Section 6 §6.3 ; Section 7 §7.4 ; Section 8 §8.4)

I2 — Conception des modalités de transition depuis l'architecture monétaire conventionnelle. Comment articuler, pendant une période de transition, les institutions héritées de l'architecture monétaire existante — systèmes bancaires, marchés financiers, régimes de propriété, droits budgétaires — avec les mécanismes EH ? Et avec quel degré et intensité opérer une transition de régime monétaire : existe-t-il des situations de coexistence, de coopération ou de concurrence entre la monnaie ex naturae et d'autres régimes monétaires ou d'autres formes de valeur d'échange ? Quels risques de déstabilisation transitoire (achats massifs de ressources stratégiques, arbitrages entre zones EH et zones extérieures, expatriation fiscale) peuvent être anticipés et gérés par quels dispositifs ? Cette question reste sans réponse dans le cadre actuel. (Section 7 §7.4 ; Section 8 §8.1)

I3 — Dispositifs de compensation des perdants à court terme de la transition. Les acteurs dont le modèle économique repose sur l'exploitation intensive des ressources, et qui subiraient des pertes immédiates lors de la mise en place des mécanismes EH, constituent une condition de fragilité de H3. Le cadre intègre toutefois des mécanismes susceptibles d'absorber partiellement ces pertes — notamment via les écodotations et l'orientation des Projets de Régénération (PR), qui ouvrent un nouvel espace d'investissement et de valorisation. Cependant, les modalités institutionnelles concrètes de reconversion sectorielle, d'accompagnement des travailleurs et de stabilisation socio-politique sur la phase transitoire sont encore à identifier. (Section 7 §7.4 ; Section 8 §8.2)

I4 — Gouvernance internationale des préjudices biophysiques transfrontaliers. Les zones EH sont exposées à des dégradations de leurs indicateurs EXEC induites par des activités situées dans des zones n'ayant pas adopté le cadre. Quelles formes de reconnaissance juridique internationale, de mécanismes de réparation et de coordination multilatérale permettraient de traiter ces préjudices transfrontaliers de manière cohérente avec les principes de l'EH ? Le droit international actuel ne dispose pas de cadre adapté. (Section 7 §7.4)

I5 — Critères de révision de la pondération des indicateurs dans l'IED. La pondération égale des trois composants de l'IED est un choix analytique sans justification empirique démontrée. Quelles institutions, selon quels critères scientifiques et selon quelles procédures délibératives, seraient légitimes à réviser ces pondérations en réponse à des évolutions du contexte biophysique, des controverses scientifiques ou des déséquilibres détectés dans le signal agrégé ? (Section 6 §6.4 ; Section 8 §8.3)

9.5 — Problèmes de modélisation et de simulation

Cette catégorie est analytiquement distincte des problèmes mathématiques (§9.3). Les problèmes M1–M5 portent sur la formalisation et les propriétés des objets théoriques — classe de modèles, stabilité, effets de seuil, agrégation. Les problèmes S1–S4 portent sur le **statut épistémologique et les conditions de validité** de la simulation comme outil d'exploration du cadre : ils concernent les choix d'architecture de l'environnement simulé, les critères permettant de distinguer une exploration rigoureuse d'une démonstration ad hoc, et les comportements qui peuvent émerger de la confrontation du cadre à des agents adaptatifs.

S1 — Choix et justification de l'environnement simulé. Le cadre EH met en jeu des interactions entre flux biophysiques, indicateurs exo-économiques, règles monétaires et comportements d'agents — interactions caractérisées par des délais, des non-linéarités et des rétroactions systémiques. Quel niveau de représentation est nécessaire pour tester les hypothèses structurantes du cadre sans introduire de simplifications qui les neutralisent ? Comment arbitrer entre des modèles volontairement réduits, destinés à isoler un mécanisme particulier, et des environnements plus riches permettant d'explorer des interactions multiples ? Sur quels critères peut-on justifier ce choix d'architecture sans le confondre avec un biais en faveur d'un résultat attendu ? (Section 5 §5.4 ; Section 8 §8.1 ; Programme de recherche — Chantier III.6, Verrou V6)

S2 — Critères de validité et de robustesse des résultats de simulation. Les résultats issus d'un environnement simulé dépendent des hypothèses formulées, des paramètres retenus et des règles de comportement des agents. Quels critères permettent d'évaluer la pertinence scientifique d'un résultat de simulation dans ce cadre : reproductibilité, sensibilité aux paramètres, robustesse aux choix d'architecture, capacité à invalider une hypothèse explicitement formulée ? Comment distinguer l'exploration théorique légitime de l'ajustement opportuniste — c'est-à-dire la construction d'un modèle calibré pour reproduire un résultat attendu plutôt que conçu pour mettre à l'épreuve une hypothèse réfutable ? (Section 8 §8.2 — H2 ; Section 9 M1–M2)

S3 — Comportements émergents et stratégies de contournement non anticipées. Dans un environnement simulé où les règles monétaires sont explicitement couplées à l'IED, quelles formes de comportements collectifs non anticipés peuvent émerger de l'interaction d'agents adaptatifs ? En particulier : des stratégies d'optimisation indicielle (améliorer le signal sans améliorer la réalité biophysique sous-jacente), des dynamiques de coordination spontanée autour des Projets Régénératifs, des effets de seuil comportementaux liés à la fonte, ou des verrouillages sur des configurations sous-optimales stables ? Ces émergences sont distinctes des effets comportementaux empiriques traités en E3 : elles relèvent de la dynamique interne d'un environnement simulé et de ses propriétés propres, non de l'observation de comportements réels. (Section 6 §6.3 — performativité ; Section 7 §7.4 — performativité non désirée ; Programme de recherche — Chantier III.6)

S4 — Articulation entre modèles simplifiés et environnements simulés complexes. Le programme de recherche associé à l'EH préconise un usage progressif de la simulation : depuis des modèles volontairement réduits visant à isoler une relation causale, jusqu'à des environnements plus riches permettant d'explorer des effets systémiques. Comment organiser cette progression sans que les résultats obtenus dans les modèles simplifiés ne soient invalidés par les interactions supplémentaires introduites dans les modèles complexes, et sans que la complexité croissante ne rende les résultats opaques ou non discutables ? Quelle forme d'accumulation cumulative des résultats de simulation est possible dans ce cadre, et à quelles conditions des résultats partiels peuvent-ils être intégrés à un corpus cohérent ? (Section 5 §5.4 ; Section 8 §8.1 — absence de modèle dynamique complet)

9.6 — Formalisation dynamique

Les problèmes regroupés dans cette section concernent la formalisation complète du système différentiel couplé EXEC/ENEC, dont les propriétés dynamiques n'ont été décrites en Section 5 que de manière qualitative et conjecturale. Ils visent à expliciter les conditions d'existence, de stabilité et de viabilité de la zone homéostatique définie en Section 3.

P-F1 — Existence et caractérisation du noyau de viabilité

La viabilité du cadre EH repose sur l'existence d'un domaine d'états à partir duquel le système peut être maintenu indéfiniment à l'intérieur du corridor biophysique et social. En l'absence d'un tel domaine, la règle monétaire couplée aux indicateurs ne pourrait produire qu'un ralentissement transitoire sans garantir une soutenabilité structurelle.

La question formelle est donc la suivante : pour quelles classes de fonctions de couplage Φ entre l'IED et les mécanismes monétaires, et pour quelles plages des paramètres de fonte $(\lambda_{\square}, \lambda_{\square}) \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, le noyau de viabilité $\text{Viab}(K)$ associé au système dynamique est-il non vide ?

Dans le cadre EH, la dynamique biophysique F n'étant pas spécifiée a priori, ce problème doit être compris comme un **problème inversé de viabilité** : il s'agit d'identifier les classes de dynamiques F compatibles avec l'existence d'un noyau de viabilité non vide, ainsi que les fonctions de couplage Φ et les paramètres de fonte λ permettant de maintenir le système dans cet ensemble.

Autrement dit, la question est de déterminer s'il existe un ensemble invariant d'états initiaux à partir desquels une trajectoire admissible peut être maintenue dans le corridor sans franchissement durable du plancher social ni du plafond environnemental.

Positionnement dans la littérature. P-F1 se situe à l'intersection de trois corpus qui ne se recoupent pas à ce jour : (1) la théorie de la viabilité appliquée à l'écologie et aux ressources naturelles (De Lara & Doyen, 2008 ; Martinet, 2012) ; (2) la théorie de la viabilité appliquée aux systèmes monétaires et financiers (Aubin et al., 2024)⁷⁷ ; (3) la macroéconomie écologique post-keynésienne traitant des limites planétaires (Dafermos, Nikolaidi & Galanis, 2017 ; Victor, 2008). Aucun travail existant ne traite conjointement la viabilité formelle d'un système couplé biophysique/monétaire avec architecture de rétroaction endogène. C'est précisément cet objet que constitue P-F1.

⁷⁷ Aubin, J.-P., Aubin-Frankowski, P.-C., & Lozève, V. (2024). Reintroducing time, money and constraints: Viability to bridge the economic and monetary theories. *International Game Theory Review*, 26(2), 2440001. Note : Aubin, J.-P., Aubin-Frankowski, P.-C., & Lozève, V. (2024) proposent un modèle économique viabiliste intégrant création monétaire dynamique et contraintes budgétaires, sans recours à l'optimisation ni aux équilibres statiques. Ce travail constitue, à ce jour, la seule application de la théorie de la viabilité à un système couplant dynamique économique et création monétaire — mais sans contraintes biophysiques

La résolution de ce problème requiert une formalisation complète du système différentiel couplé et l'application des outils de théorie de la viabilité évoqués en Section 5.5 (Conjecture (C1)).

La question de la co-détermination de K_M et f_M — c'est-à-dire la possibilité que les bornes du domaine de viabilité monétaire soient elles-mêmes endogènes à la dynamique monétaire — n'est pas traitée dans la présente version. Elle constitue une extension de P-F1 dans laquelle K_M et f_M seraient déterminés simultanément par un problème à point fixe.

P-F2 — Délai critique et instabilité oscillatoire

Le couplage EXEC/ENEC repose sur des indicateurs mesurés avec retard. Ce délai — lié à la collecte, à la consolidation et à la publication des données — peut modifier la nature des rétroactions. Une rétroaction négative stabilisatrice peut devenir oscillatoire, voire amplificatrice, si le retard dépasse un certain seuil. Il est conjecturé qu'il existe un délai critique τ^* au-delà duquel le régime homéostatique devient instable. La détermination analytique de τ^* en fonction des paramètres du système — notamment les composantes de fonte (λ_{\square} , λ_{\square}) sensibilité de l'IED à ses composantes, délais de mesure — constitue un problème relevant de la théorie du contrôle avec retard. La résolution de ce problème permettrait de préciser les conditions sous lesquelles l'hypothèse H2 conserve sa validité dynamique (Section 5.5 — Conjecture (C2) ; Section 9 M2).

P-F3 — Effondrement non linéaire et détection anticipée

La structure de moyenne géométrique retenue pour l'IED implique une sensibilité non linéaire aux composantes les plus dégradées. Lorsque l'un des indicateurs tend vers zéro, la dérivée partielle correspondante diverge, ce qui peut produire une contraction brutale de la masse monétaire. Cette propriété renforce la cohérence biophysique du dispositif, mais elle introduit un risque d'ajustement discontinu. Le problème ouvert consiste à déterminer comment concevoir un dispositif d'alerte précoce capable de détecter l'approche d'un effondrement quasi-discontinu avant que la contraction monétaire induite ne précipite le système vers un régime de non-viabilité. Il s'agit notamment d'identifier des signaux d'approche de seuil et d'évaluer la pertinence éventuelle de mécanismes d'amortissement compatibles avec l'architecture générale (Section 5.5 — propriété analytique C3 ; Section 9 M3).

P-F4 — Conditions d'attractivité de la zone homéostatique

La zone homéostatique est décrite en Section 5 comme une zone de viabilité mobile (dont le caractère attractif relève de la conjecture C4) plutôt qu'un point fixe. Cette propriété suppose l'existence d'un flux minimal de Projets Régénératifs capable d'entretenir la dynamique de correction. La question ouverte porte sur la valeur seuil R_{seuil} du flux de PR en dessous de laquelle la zone homéostatique perd son caractère attracteur au sens de Lyapunov. La détermination de cette condition de seuil permettrait d'identifier le volume minimal de régénération nécessaire à la résilience systémique et de préciser les paramètres de calibration institutionnelle associés au déploiement des PR (Section 5.5 — Conjecture (C4) ; Section 9 E1-E2).

P-F5 — Viabilité avec ensemble de contraintes mobile

La formalisation standard de la théorie de la viabilité suppose un ensemble de contraintes K fixe. Or le cadre EH implique que les deux bornes du corridor sont elles-mêmes des fonctions du temps : la borne environnementale évolue avec l'état du système Terre et la révision des connaissances scientifiques sur les seuils écologiques critiques, tandis que la borne sociale évolue avec les besoins minimaux reconnus à chaque époque — structures démographiques, standards de santé, infrastructures collectives disponibles. K est donc un corridor dont les parois bougent, et non un ensemble fixe dans lequel des trajectoires seraient contenues. Le problème ouvert consiste à étendre les conditions d'existence du noyau de viabilité au cas où K est lui-même une trajectoire, et à identifier les conditions sur la vitesse de déplacement des bornes compatibles avec la capacité de correction des mécanismes monétaires. En particulier : une dégradation trop rapide des bornes — effondrement écologique brutal ou transformation sociale discontinue — peut-elle rendre le problème de viabilité structurellement insoluble indépendamment de la qualité du pilotage ? Ce problème est formellement distinct de P-F1 et constitue une extension nécessaire du programme de formalisation dynamique, dont la résolution mobilise les outils de la théorie de la viabilité avec cible mouvante. Les résultats d'extension de la théorie de la viabilité aux cibles mouvantes, développés notamment dans Aubin, Bayen & Saint-Pierre (2011), fournissent le cadre technique de ce programme : ils établissent les conditions de semi-continuité et de vitesse de déplacement des bornes sous lesquelles le noyau de viabilité reste non vide. (Note dynamique, Section 5.5).

9.7 — Gouvernance des indicateurs

Les problèmes regroupés dans cette section concernent la robustesse stratégique et institutionnelle des dispositifs de mesure qui conditionnent le couplage monétaire. Ils prolongent directement les limites méthodologiques exposées en Section 8 et les tensions associées à l'axiome A4.

La présente analyse est conduite dans un cadre institutionnel donné afin d'examiner la cohérence interne du mécanisme proposé. L'articulation de ce dispositif avec l'architecture monétaire internationale, ainsi que les conditions de coordination entre juridictions monétaires distinctes, constituent une question ouverte qui dépasse le périmètre du présent travail et relève du programme de recherche. De même, le périmètre écologique du modèle repose ici sur un ensemble limité d'indicateurs exo-économiques agrégés dans l'IED. L'identification, la robustesse et la représentation adéquate des dynamiques biophysiques constituent également un chantier scientifique à part entière du programme de recherche.

P-G1 — Vérification empirique de l'incitation-compatibilité de l'IED

La version raffinée de H1 (Section 6.5) introduit une condition d'incitation-compatibilité selon laquelle la révélation véridique des données doit constituer un équilibre dominant pour les agents concernés. Cette condition s'exprime à travers un paramètre $\rho = \alpha + (1-\alpha) \cdot [p \cdot \pi'(0)/g]$, dont la valeur doit être suffisamment élevée pour décourager la manipulation stratégique. La vérification empirique de cette condition constitue un programme de recherche distinct des problèmes purement mathématiques du système dynamique. Elle requiert une articulation entre métrologie environnementale, théorie des incitations et analyse institutionnelle comparée, afin d'évaluer si une architecture de mesure concrète peut effectivement produire l'équilibre comportemental requis (Section 6.5 — H1 raffinée).

P-G2 — Traitement du risque systémique de coordination des manipulations

Les mécanismes d'audit individuels décrits en Section 6.5 permettent de détecter des manipulations isolées, mais ils ne garantissent pas la détection d'une coordination collective produisant un biais systémique e_collectif. Un tel biais compromettrait la validité du signal transmis au système monétaire et affaiblirait le couplage EXEC/ENEC. Le problème ouvert consiste à déterminer quels dispositifs de vérification à l'échelle systémique — contrôles croisés entre indicateurs, détection statistique d'anomalies, comparaison avec des mesures indépendantes internationales — peuvent traiter ce risque sans compromettre la gouvernabilité du système ni introduire une complexité institutionnelle excessive (Section 6.5 — Limite résiduelle ; Section 9 I1).

Section 10 — Conclusion : de l'optimisation à la viabilité

La contribution du cadre EH n'est pas de fournir un modèle économique achevé, mais de transformer la question de la soutenabilité macroéconomique en problème scientifique de conception de systèmes dynamiques viables.

Le document propose ainsi une architecture conceptuelle permettant d'identifier les propriétés institutionnelles susceptibles de rendre possible la viabilité macroéconomique dans un monde biophysiquement fini.

10.1 — Le déplacement théorique central

La question posée en Section 1 était précise : pourquoi la viabilité à long terme d'un système économique dans un monde biophysiquement fini constitue-t-elle un problème structurellement distinct de celui de l'optimisation ? La réponse que ce working paper a

construite n'est pas d'abord empirique — elle est architecturale. L'optimisation suppose un état cible défini, une métrique permettant de le mesurer, et une logique d'ajustement convergeant vers ce point. La viabilité dynamique suppose autre chose : une zone de trajectoires compatibles avec la reproduction du système, des mécanismes de rétroaction capables de maintenir le système dans cette zone, et une conception de l'équilibre comme propriété de trajectoire plutôt que comme état convergent. Ce ne sont pas deux approches du même problème — ce sont deux formulations d'objets analytiques distincts.

L'axiome A2, établi en Section 2, tire la conséquence de ce déplacement : la viabilité ne peut pas être évaluée à partir de configurations ponctuelles. Ce qui importe n'est pas la valeur de l'IED à un instant donné, mais l'absence de variations significatives et prolongées de sa trajectoire — et, derrière ce signal, l'état effectif des écosystèmes, des ressources non renouvelables et de la biodiversité qui conditionnent la possibilité même de l'activité économique. A3 en tire une seconde conséquence : cette traduction de l'état biophysique en règles de coordination ne peut être assurée par l'agrégation spontanée des décisions décentralisées. Elle requiert une médiation macroéconomique explicite — celle que les mécanismes monétaires décrits en Section 4 tentent d'opérer : écodotation indexée sur l'IED, Projets Régénératifs conditionnels, fonte structurelle de la masse monétaire.

Ce déplacement change architecturalement la nature du signal central de pilotage. Dans un cadre d'optimisation, le signal est un prix relatif, un taux, un objectif sectoriel. Dans le cadre EH, le signal est l'IED — une variable de régulation synthétique qui situe le système par rapport à son corridor de viabilité et conditionne automatiquement la capacité monétaire collective, sans prescription des comportements individuels. La régulation opère par la structure des incitations globales, non par le contrôle des décisions sectorielles. C'est ce que A5 formalise : la monnaie est un dispositif institutionnel structurant, non un voile neutre.

10.2 — Ce que l'EH établit et ce qu'elle laisse ouvert

Ce working paper a conduit un programme analytique précis. Il a établi les fondements axiomatiques du cadre et la distinction entre axiomes et hypothèses testables (Section 2). Il a formalisé l'architecture analytique EXEC/ENEC et le corridor de viabilité (Section 3). Il a décrit les quatre mécanismes monétaires dans leur fonctionnement et leurs interactions systémiques (Section 4). Il a posé les propriétés dynamiques attendues du régime et les trois régimes de

trajectoire possibles (Section 5). Il a construit la logique de l'IED, sa formule, sa normalisation et ses implications comportementales (Section 6). Il a identifié les conditions institutionnelles minimales de viabilité du dispositif (Section 7).

Ce programme a également — délibérément — tracé ses propres limites. La Section 8 a formalisé sans minimisation quatre registres de lacunes : ce qui n'est pas encore formalisé (l'absence d'un modèle dynamique complet est la plus conséquente), ce qui reste hypothétique (les fragilités de H1, H2, H3), ce qui requiert une validation empirique (taux de fonte, coefficients d'écodotation, effets comportementaux, résistance des PR à la labellisation stratégique), et les cinq conditions d'invalidation du cadre. La Section 9 a organisé trente-et-un problèmes de recherche ouverts en sept catégories, chacun renvoyant à sa section d'origine.

Cette honnêteté n'est pas une concession : elle est une condition de la crédibilité scientifique du cadre. Un programme théorique qui identifie précisément ses propres conditions d'invalidation est un programme falsifiable — c'est-à-dire un programme scientifique. Un cadre qui prétendrait résoudre les questions qu'il ouvre serait, en revanche, imperméable à la critique et donc sans valeur heuristique. L'EH assume de se présenter comme un cadre théorique offert à la discussion, à la critique et à la reprise, non comme une doctrine achevée.

10.3 — Ouverture scientifique

Les trente-et-un problèmes recensés en Section 9 définissent un programme de recherche dont les axes prioritaires sont les suivants, formulés comme questions, non comme réponses attendues.

Sur le plan mathématique : quelle classe de modèles dynamiques — équations différentielles avec délais, dynamique des systèmes, modèles agents — est la mieux adaptée pour formaliser le couplage EXEC/ENEC avec non-linéarités et plasticité des bornes ? Pour quelles plages de délais de rétroaction le régime homéostatique reste-t-il stable ?

Sur le plan empirique : quelle expérimentation à échelle réduite permettrait de tester H2 — l'efficacité régulatrice des boucles de rétroaction monétaires — sans les conditions de déploiement complet que H3 conditionne elle-même ? Quels dispositifs de collecte de données biophysiques comparables à l'échelle nationale sont nécessaires pour que H1 soit satisfaite ?

Sur le plan institutionnel : quelle architecture de gouvernance de la mesure offre la meilleure résistance à la capture dans des environnements politiques diversifiés ? Quels dispositifs de compensation des perdants à court terme de la transition sont nécessaires pour maintenir la compatibilité socio-politique du régime sur un horizon suffisamment long ?

Ces questions ne peuvent pas être résolues par un seul cadre disciplinaire. Elles appellent une co-construction interdisciplinaire associant économistes, écologues, physiciens, sociologues, mathématiciens et praticiens institutionnels. L'économie homéostatique fournit, à ce stade, une grammaire systémique commune — fondée sur les notions de flux, de boucles de rétroaction, d'équilibre dynamique et de couplage exo-/endo-économique — susceptible de fédérer ces approches sans en nier les spécificités. Ce qu'elle n'est pas encore, c'est un programme empiriquement validé. C'est précisément l'objet du travail scientifique qu'elle appelle.

Déclaration de transparence

Ce working paper est une recherche indépendante conduite sans financement institutionnel, public ou privé. L'auteur déclare l'absence de tout conflit d'intérêt financier ou institutionnel en lien avec les propositions développées dans ce document. Le présent working paper constitue une formalisation analytique autonome, dérivée d'un ouvrage de synthèse préalable (*Économie Homéostatique — Synthèse V2*, Benjamin Albouy, Ex naturae, 2025, non publié) dont il extrait, restructure et développe le cadre conceptuel selon les standards d'un document académique soumis à discussion scientifique. Les figures reproduites dans ce texte sont adaptées de cet ouvrage source et demeurent sous la responsabilité de l'auteur. Ce working paper est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Métadonnées finales

Titre : L'Économie Homéostatique : cadre théorique pour une viabilité macroéconomique dans un monde biophysiquement fini

Version : 1.0 - Mars 2026

Statut : Working Paper · Version de travail soumise à discussion scientifique

Basé sur : Synthèse Économie homéostatique V2

Classification JEL : B41 · E40 · E50 · Q01 · Q57

Mots-clés (FR) : économie homéostatique, viabilité macroéconomique, couplage biophysique, monnaie ex naturae, indicateur d'équilibre dynamique, soutenabilité forte, boucles de rétroaction, zone de viabilité, écodotation, fonte monétaire, projets régénératifs

Keywords (EN) : homeostatic economics, macroeconomic viability, biophysical coupling, ex naturae money, dynamic equilibrium indicator, strong sustainability, feedback loops, viability zone, ecodotation, monetary demurrage, regenerative projects

Annexe A — Repère du cadre formel

Afin de faciliter la lecture interdisciplinaire, les tableaux suivants rassemblent les principales notations mobilisées dans les différentes sections. Ces notations n'ont pas vocation à constituer un formalisme exhaustif mais servent de repères pour les lecteurs souhaitant suivre la formalisation du cadre proposé.

Dimensions du système

Terme	Dimension
zone de viabilité mobile	terme interprétatif désignant le comportement des trajectoires au voisinage de Z_{sat} (voir §5.5)
oscillatoire	dynamique locale de trajectoire
homéostatique	régime de fonctionnement visé dans lequel les trajectoires demeurent au voisinage de Z_{sat} sous l'effet de la régulation
attractif	mécanisme de régulation (propriété dynamique conjecturée du mécanisme de régulation)

Variables du système

Symbole	Signification
S(t)	état du sous-système biophysique (composante écologique de l'espace d'état)
M(t)	masse monétaire totale effectivement en circulation
P	niveau d'activité économique d'une entreprise (approximation par ses charges d'exploitation lissées)

Fonctions du cadre dynamique

Symbole	Signification
IED(S)	indicateur d'équilibre dynamique calculé à partir de l'état du système biophysique
F(S,u)	dynamique biophysique du système
f_M(S,M,u)	dynamique monétaire
Φ	fonction de couplage entre indicateur écologique et règle monétaire
e_base(S)	flux monétaire de référence
ψ	fonction auxiliaire du cadre institutionnel

Paramètres institutionnels

Symbole	Signification
β_pub	part de la dotation transitant par le canal public
c	population
ρ	indice d'incitation-compatibilité
λ_□	taux de fonte appliqué aux stocks monétaires
λ_□	taux de fonte appliqué aux flux/ transactions monétaires

Ensembles et seuils de viabilité

Symbole	Signification
----------------	----------------------

Viab(K)	noyau de viabilité associé à l'ensemble K
zone de viabilité mobile	terme interprétatif : comportement oscillatoire des trajectoires au voisinage de Z_{sat}
IED_min	limite inférieure du corridor écologique

Paramètres temporels

Symbole	Signification
τ	délai de réaction institutionnelle
τ^*	seuil critique de délai générant des oscillations

Annexe B — Notions de base de la théorie de la viabilité et des systèmes dynamiques utilisées dans ce document

Cette annexe rappelle brièvement certaines notions issues de la théorie des systèmes dynamiques, de la théorie de la viabilité et de la cybernétique qui sont mobilisées dans le présent document. Les notions évoquées incluent notamment le noyau de viabilité, les conditions d'invariance d'un ensemble de contraintes, ainsi que certains mécanismes dynamiques classiques tels que les oscillations induites par des rétroactions retardées. Elles ne visent pas l'exhaustivité, mais fournissent les définitions minimales nécessaires à la compréhension des propriétés dynamiques évoquées dans les Sections 5 et 9.

Un **système dynamique** décrit l'évolution dans le temps d'un ensemble de variables caractérisant l'état d'un système.

Dans sa forme générale, un système dynamique continu peut être représenté par une équation différentielle :

$$S'(t) = F(S(t), u(t))$$

où :

- $S(t)$ représente l'état du système à l'instant t
- F décrit la dynamique du système
- $u(t)$ représente une variable de contrôle ou de régulation.

L'ensemble des valeurs possibles de S constitue l'**espace d'état** du système. Les trajectoires décrivent l'évolution de cet état au cours du temps.

Dans le cadre de l'Économie Homéostatique, l'état $S(t)$ représente l'état du sous-système biophysique (composante écologique de l'espace d'état) et inclut notamment des variables biophysiques agrégées telles que l'état de la biodiversité, l'empreinte écologique et la consommation de ressources non renouvelables.

2. Ensemble de contraintes et viabilité

La **théorie de la viabilité**, développée notamment par Jean-Pierre Aubin, étudie les conditions permettant à un système dynamique de rester durablement à l'intérieur d'un ensemble de contraintes.

On note généralement :

$$S(t) \in K$$

où K représente l'ensemble des états admissibles du système.

Dans ce document, l'ensemble K correspond au **corridor de viabilité socio-écologique**, défini par :

- un **plancher social**, représentant les conditions minimales de bien-être et de cohésion sociale ;
- un **plafond environnemental**, représentant les limites biophysiques du système terrestre.

Une trajectoire est dite **viable** si elle reste dans cet ensemble pour tout horizon temporel considéré.

3. Noyau de viabilité

Le **noyau de viabilité** noté $Viab(K)$ est le sous-ensemble des états initiaux appartenant à l'ensemble de contraintes K à partir desquels il existe au moins une trajectoire du système, associée à un contrôle admissible, qui peut rester dans cet ensemble pour tout temps futur.

Formellement :

$$Viab(K) = \{x_0 \in K \mid \exists u(\cdot) \text{ tel que } x(t) \in K \forall t \geq 0\}$$

où

$$x = (S, M)$$

Dans le cadre de l'Économie Homéostatique, la zone de fonctionnement du système est analysée relativement à cet ensemble de contraintes.

Condition d'invariance et condition de Nagumo

Dans l'analyse des systèmes dynamiques contraints, une question centrale consiste à déterminer si un ensemble de contraintes K peut être **invariant** pour la dynamique du système, c'est-à-dire s'il existe des trajectoires qui peuvent rester dans cet ensemble pour tout temps futur. La théorie de la viabilité fournit une condition classique permettant de caractériser cette propriété au voisinage de la frontière de K : la **condition de Nagumo**.

Intuitivement, cette condition stipule que lorsque la trajectoire atteint la frontière de l'ensemble admissible, la dynamique du système ne doit pas orienter l'état vers l'extérieur de cet ensemble. Autrement dit, le champ de vecteurs du système doit rester orienté vers l'intérieur de K ou être tangent à sa frontière. Si cette condition est satisfaite, l'ensemble de contraintes peut être localement invariant pour la dynamique considérée, ce qui signifie qu'il existe des trajectoires admissibles capables d'y demeurer durablement sous un contrôle approprié.

Dans le cadre de l'Économie Homéostatique, cette intuition signifie que lorsque le système économique s'approche des limites du corridor de viabilité — par exemple lorsque les pressions environnementales se rapprochent du seuil critique — les mécanismes de régulation doivent orienter la dynamique du système de manière à maintenir l'état à l'intérieur de l'espace admissible. La condition de Nagumo constitue ainsi un outil conceptuel important pour analyser la possibilité d'une trajectoire macroéconomique durable dans un espace de contraintes biophysiques (Aubin, 1991).

4. Rétroaction et régulation

Un système dynamique peut être **régulé par rétroaction** lorsque la règle de contrôle dépend de l'état du système.

On parle alors de **contrôle en boucle fermée** :

$$u(t) = \Phi(IED(S(t))) \quad (7)$$

Dans l'Économie Homéostatique, la règle de régulation monétaire dépend de l'état biophysique du système, mesuré par l'Indicateur d'Équilibre Dynamique (IED). La fonction de couplage Φ traduit ainsi l'état écologique du système en règles de création et de destruction monétaires.

5. Oscillations et régimes dynamiques

Dans certains systèmes dynamiques, la trajectoire ne converge pas vers un état stationnaire mais peut osciller autour d'une zone d'équilibre ou d'un corridor admissible. On parle alors de **régime oscillatoire**, caractérisé par des fluctuations récurrentes de l'état du système autour d'un domaine stable. Ces oscillations peuvent résulter de mécanismes de rétroaction interne, notamment lorsque les processus de correction agissent avec un délai par rapport aux perturbations du système. Les délais dans les boucles de régulation constituent en effet une source classique d'instabilité oscillatoire dans de nombreux systèmes physiques, biologiques et économiques.

Dans le cadre de l'Économie Homéostatique, ces dynamiques peuvent correspondre à une **zone de viabilité oscillatoire**, dans laquelle les variables macroéconomiques et biophysiques fluctuent autour d'un corridor de viabilité sans en sortir. Cette zone correspond à une région de trajectoires située à l'intérieur du noyau de viabilité $Viab(K)$, lui-même inclus dans l'ensemble de contraintes K , dans laquelle la dynamique du système demeure compatible avec les limites admissibles malgré la présence d'oscillations.

Tant que les oscillations restent confinées à l'intérieur de l'ensemble de contraintes admissible K , le système demeure viable, même si son état ne converge pas vers un point fixe. Cette situation correspond à une forme dynamique d'équilibre compatible avec les mécanismes de régulation du système.

6. Homéostasie

Le concept d'**homéostasie**, introduit par Walter Bradford Cannon, désigne la capacité d'un système à maintenir certaines variables dans un intervalle compatible avec son fonctionnement malgré les perturbations.

Dans le cadre de l'Économie Homéostatique, la notion d'homéostasie est utilisée pour décrire un régime dynamique dans lequel les fluctuations du système restent compatibles avec les contraintes biophysiques et sociales du corridor de viabilité.

7. Références principales

- Jean-Pierre Aubin, J.-P. (1991). *Viability Theory*. Birkhäuser.
- Norbert Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press.
- Walter Bradford Cannon, W. B. (1932). *The Wisdom of the Body*. Norton.
- De Lara, M., & Doyen, L. (2008). *Sustainable Management of Natural Resources: Mathematical Models and Methods*. Springer.