



L'économie (synthèse)

Yves Mervin

Cercle Pierre Landais

Association pour le développement local et régional

Institutions et politiques publiques

Site internet : united-citizens.eu (en cours de redéveloppement)

Contact : adlr56@free.fr



L'Union est fondée sur les valeurs de respect de la dignité humaine, de liberté, de démocratie, d'égalité, de l'État de droit, ainsi que de respect des droits de l'homme, y compris des droits des personnes appartenant à des minorités. Ces valeurs sont communes aux États membres dans une société caractérisée par le pluralisme, la non-discrimination, la tolérance, la justice, la solidarité et l'égalité entre les femmes et les hommes.

Article 2 du traité de l'Union européenne (valeurs de l'Union)

Illustration de couverture : photo de Steve Buissinne sur pixabay (www.pixabay.com)

L'auteur a utilisé ChatGPT (modèle GPT-5, OpenAI) pour explorer et structurer certaines idées. Les réponses de l'IA ont été adaptées et intégrées à la réflexion personnelle.

Les données notionnelles simulées, bien qu'elles ne soient pas totalement déconnectées de la réalité, seront à remplacer par des données réelles. Les équations ou les algorithmes esquissés sont fortement susceptibles d'évoluer en passant à des données réelles.

Synthèse

Le modèle physico-économique METSI

Ce document propose un modèle physico-économique de production (METSI : Matière, Énergie, Temps, Surface, Immatériel) visant à relier deux visions longtemps séparées de l'économie :

- la vision monétaire, centrée sur le prix, la finance et la demande,
- la vision physique, issue des sciences de l'ingénieur, fondée sur les intrants réels de production.

Valeur intrinsèque vs valeur extrinsèque

La valeur intrinsèque d'un produit est définie comme la combinaison pondérée de ses intrants METSI. Elle exprime un coût universel, stable et comparable, indépendant des fluctuations de marché.

Le prix de marché exprime au contraire une valeur extrinsèque, soumise à l'offre, à la demande, aux institutions et aux stratégies commerciales.

Leur écart éclaire les phénomènes d'inflation, d'avantage comparatif et de compétitivité.

Originalité

Contrairement aux approches classiques, le capital n'est pas considéré comme un facteur de production donné, mais comme un produit intermédiaire, lui-même composé de METSI, dont l'entretien et le renouvellement relèvent de l'investissement.

Rattachements théoriques

Le modèle s'intègre dans la Théorie générale de Keynes (équilibre entre consommation, investissement, dépenses publiques et commerce extérieur). Il peut être confronté à deux références majeures :

- World3 (MIT, Club de Rome) → modèle de soutenabilité basé sur les flux physiques,
- Growth Lab (Harvard) → modèle de croissance fondé sur la complexité économique et les échanges internationaux.

L'ambition de METSI est d'unifier ces deux perspectives en fournissant une fonction de production physico-économique.

Applications

- Historiques : révolutions industrielles, cycles longs de Kondratiev, rôle de l'innovation.
- Actuelles : inflation, transition énergétique, impact du numérique et de l'IA, efficacité institutionnelle.
- Prospectives : découplage énergie-croissance, limites de ressources, réorganisation territoriale (ville, transport, alimentation).

Horizon

METSI se présente comme un outil canonique pour relire l’histoire économique, analyser les transitions en cours et éclairer les choix stratégiques de demain.

The Physico-Economic Model METSI

This document introduces a physico-economic production model (METSI: Matter, Energy, Time, Surface, Intangible) designed to bridge two long-separated views of the economy:

- the monetary view, focused on price, finance, and demand,
- the physical view, rooted in engineering sciences, centered on real production inputs.

Intrinsic vs Extrinsic Value

The intrinsic value of a product is defined as the weighted combination of its METSI inputs. It reflects a universal, stable, and comparable cost, independent of market fluctuations.

The market price, in contrast, expresses an extrinsic value, driven by supply, demand, institutions, and commercial strategies.

The gap between the two sheds light on inflation, comparative advantage, and competitiveness.

Original Contribution

Unlike classical approaches, capital is not treated as a given factor of production but as an intermediate product, itself composed of METSI, whose renewal and maintenance depend on investment.

Theoretical Anchoring

The model is consistent with Keynes’ General Theory (balance of consumption, investment, public spending, and trade). It can be compared with two major frameworks:

- World3 (MIT, Club of Rome) → sustainability modeling based on physical flows,
- Harvard Growth Lab → growth modeling based on economic complexity and international trade.

METSI’s ambition is to unify these perspectives through a physico-economic production function.

Applications

- Historical: industrial revolutions, long Kondratiev cycles, role of innovation.
- Current: inflation, energy transition, impact of AI and digital technologies, institutional efficiency.
- Prospective: energy-growth decoupling, resource limits, territorial reorganization (urban, transport, food).

Outlook

METSI can serve as a canonical tool to reinterpret economic history, analyze present transitions, and guide future strategic choices.

1. Introduction

1.1. Pourquoi un modèle physico-économique ?

Depuis ses origines, l'économie oscille entre deux visions :

- une approche **monétaire et financière**, qui décrit les échanges par les prix, la monnaie et les marchés,
- une approche **physique**, qui considère les flux réels de matières, d'énergie, de travail humain et de ressources naturelles.

Ces deux visions sont complémentaires, mais souvent disjointes. Les modèles purement financiers peinent à rendre compte des contraintes matérielles et énergétiques du monde réel, tandis que les modèles purement physiques (comme **Limits to Growth**, dit **World3**) peinent à intégrer la complexité monétaire et institutionnelle qui conditionne les décisions économiques.

La nécessité d'un modèle intégrant **à la fois le concret et l'abstrait** s'impose avec acuité face aux défis contemporains :

- transitions énergétiques et matérielles,
- changement climatique,
- transformations technologiques rapides (numérique, IA),
- instabilités monétaires et géopolitiques.

C'est l'ambition du modèle **METSI** (Matière, Énergie, Temps, Surface, Intangible) : proposer une base physico-économique cohérente pour décrire la valeur et la production.

1.2. De la valeur à la valeur intrinsèque

La question de la **valeur** est au cœur de l'économie depuis Ricardo et Marx jusqu'à Keynes et Samuelson. La valeur est souvent approchée par le **prix de marché**, mais ce prix dépend de l'offre et de la demande, donc de conditions contingentes, spéculatives ou institutionnelles.

Nous proposons de distinguer :

- la **valeur extrinsèque** : le prix observé sur le marché,
- la **valeur intrinsèque** : la combinaison mesurable des intrants nécessaires à la production d'un bien ou service.

La valeur intrinsèque repose sur les cinq composantes **METSI** :

- **Matière (M)** : masses de matériaux mobilisés, raffinables par type (fer, cuivre, lithium, etc.),
- **Énergie (E)** : flux d'énergie utilisés,
- **Temps (T)** : temps humain de travail ou de conception,
- **Surface (S)** : empreinte spatiale, foncière, écologique,
- **Intangible (I)** : savoir-faire, information, innovation, capital cognitif.

La valeur d'un produit n'est donc pas uniquement une construction sociale ou financière, mais une combinaison objectivable de ressources physiques et immatérielles.

1.3. Originalité de l'approche

L'approche METSI se distingue par :

- sa **formulation physico-mathématique**, qui relie directement valeur et intrants mesurables,
- son **ouverture macroéconomique**, car elle s'intègre naturellement dans la Théorie générale de Keynes ($Y = C + I + G + (X - M)$),
- son **capteur d'innovation** via la composante **I**, permettant de modéliser l'impact des révolutions technologiques (IA, numérique, biotechnologies).

Ainsi, METSI propose une **valeur universelle (uv)** qui, tout en restant théorique, peut être comparée d'un pays à l'autre, d'une époque à l'autre, et confrontée aux prix de marché.

1.4. Objectifs du document

Ce document a trois objectifs principaux :

- **Présenter le modèle METSI** comme un cadre conceptuel unifié entre physique et économie.
- **Montrer son intégration dans les grandes théories économiques** (Keynes, World3, Growth Lab).
- **Illustrer ses applications concrètes** à divers produits (smartphone, voiture, IA), secteurs (énergie, numérique, agriculture) et territoires (région Bretagne, comparaison internationale).

En filigrane, il s'agit d'explorer une question fondamentale : Peut-on revisiter la notion de valeur et de production à travers une approche physico-économique, pour mieux éclairer les choix de société et de politique publique dans un monde fini ?

2. Valeur et production

2.1. La valeur en économie classique

Depuis Adam Smith, David Ricardo ou Karl Marx, la notion de valeur a fait l'objet de multiples interprétations :

- **valeur-travail** : la valeur provient du travail humain incorporé dans les biens,
- **valeur-utilité** : la valeur est liée à l'utilité perçue par les individus,
- **valeur-prix** : dans la théorie néoclassique, la valeur se réduit au prix de marché issu de l'équilibre offre-demande.

Chacune de ces approches éclaire une facette, mais aucune ne permet de relier systématiquement les contraintes physiques (matières, énergies, temps) aux dynamiques monétaires et institutionnelles.

2.2. La valeur intrinsèque et la valeur extrinsèque

Nous introduisons une distinction clé :

Valeur intrinsèque (V_i) : définie comme la somme pondérée des intrants nécessaires à la production, exprimés dans une unité universelle de valeur (uv).

$$V_i = k_M \times M + k_E \times E + k_T \times T + k_S \times S + k_I \times I$$

où chaque composante est mesurable, et où les coefficients k_j représentent l'intensité de valeur par unité physique.

Valeur extrinsèque (V_e) : le prix observé sur le marché, exprimé dans une monnaie nationale (€, \$, ¥). Il résulte de la confrontation entre offre, demande, politiques monétaires et contextes institutionnels.

La différence entre V_e et V_i peut être interprétée comme :

- une **marge de marché** (facteurs de rareté, marques, spéculation),
- ou une **décorrélacion structurelle** (bulles, distorsions monétaires).

2.3. Valeur ajoutée et PIB

En comptabilité nationale, la **valeur ajoutée (VA)** est définie par :

$$VA = \text{Production} - \text{Consommations intermédiaires}$$

et le **PIB** est la somme des valeurs ajoutées.

La valeur intrinsèque, bien qu'elle ne se confonde pas avec la valeur ajoutée, lui est reliée par une logique similaire :

- toutes deux mesurent un **surplus** généré par transformation,
- toutes deux peuvent être ramenées à des flux de ressources.

Mais alors que la valeur ajoutée est comptable et dépend des prix de marché, la valeur intrinsèque est **physico-économique** et tend à mesurer la « vraie » intensité en ressources.

2.4. Production et facteurs METSI

Dans le modèle METSI, la **production effective $Y(t)$** peut être représentée comme une fonction des intrants :

$$Y(t) = A(t) \times F(M(t), E(t), T(t), S(t), I(t))$$

- M, E, T, S, I : facteurs de production,
- A(t) : facteur d'efficacité globale (institutions, organisation, gestion, infrastructures),
- F : fonction de combinaison (Cobb–Douglas, CES, Leontief selon les cas).

Ainsi, la production n'est plus un simple flux monétaire, mais le résultat de l'utilisation coordonnée des ressources physiques et immatérielles disponibles.

2.5. Capital et investissement

Le **capital** n'est pas ici un facteur de production en soi, mais un **stock de produits METSI** accumulés :

- usines, machines, infrastructures = produits à forte composante matérielle et énergétique,
- logiciels, brevets, modèles = produits à forte composante immatérielle (I).

Ce capital est entretenu et renouvelé par l'**investissement (IK)**, et s'use par la **dépréciation (δK)**.

Dans la perspective keynésienne ($Y = C + I + G + (X - M)$), le METSI permet d'objectiver la part de ces flux en distinguant coûts intrinsèques et valeur extrinsèque.

2.6. Vers une redéfinition de la valeur économique

La proposition centrale est donc :

- la **valeur intrinsèque (V_i)** : mesure physique, stable, universelle,
- la **valeur extrinsèque (V_e)** : mesure monétaire, fluctuante, contingente,

Leur articulation permet d'analyser :

- l'inflation réelle vs monétaire,
- la soutenabilité d'un modèle de production,
- la robustesse ou fragilité d'une trajectoire économique.

En d'autres termes, la valeur n'est plus seulement **ce que coûte** ou **ce que vaut** un produit sur un marché, mais **ce qu'il représente réellement en ressources mobilisées** dans un monde fini.

3. Facteurs de production et fonction METSI

3.1. Héritage des fonctions de production

En économie, une fonction de production relie un certain niveau de production à la combinaison de facteurs mobilisés.

Trois formes classiques sont :

- **Cobb–Douglas**

$$Y = A \times K^\alpha \times L^\beta$$

où K est le capital, L le travail, et A un facteur d'efficacité.

Cette forme met en avant des rendements d'échelle et des élasticités mesurables.

- **Leontief**

$$Y = \min(K / a, L / b)$$

Production contrainte par le facteur le plus rare (absence de substituabilité).

- **CES (Constant Elasticity of Substitution)**

$$Y = A \times (\delta K^{-\rho} + (1-\delta) \times L^{-\rho})^{-1/\rho}$$

Modèle plus général permettant de représenter des degrés variables de substituabilité entre les facteurs.

3.2. Substitution et complémentarité dans METSI

Le modèle METSI élargit les facteurs de production :

$$Y(t) = A(t) \times F(M(t), E(t), T(t), S(t), I(t))$$

- **M (matière)** : intrants matériels, raffinables par type (acier, cuivre, lithium...).
- **E (énergie)** : flux d'énergie utiles, différenciables par source (fossiles, nucléaire, renouvelables).
- **T (temps de travail)** : contribution humaine directe.
- **S (surface)** : occupation spatiale, foncier, artificialisation.
- **I (immatériel)** : savoir-faire, innovation, données, intelligence organisationnelle.

Cas de substitution

- **Énergie ↔ Temps** : automatisation remplaçant du travail humain.
- **Matière ↔ I** : logiciels remplaçant du matériel (ex. optimisation logicielle pour réduire la puissance de calcul nécessaire).

Cas de complémentarité

- **Énergie & Matière** : un moteur électrique nécessite à la fois du cuivre (M) et de l'électricité (E).
- **I & T** : le savoir-faire (I) amplifie la productivité du travail (T).

3.3. Formulations possibles de la fonction METSI

(a) Forme Cobb–Douglas généralisée

$$Y = A \times M^\alpha \times E^\beta \times T^\gamma \times S^\sigma \times I^\iota$$

- simple, claire, calibrable empiriquement,
- suppose substituabilité limitée mais non nulle entre facteurs,
- utile pour analyses macro (croissance, productivité globale).

(b) Forme Leontief-METSI

$$Y = \min (M / a, E / b, T / c, S / d, I / e)$$

- production limitée par le facteur le plus rare,
- utile pour détecter des **impasses technologiques** (ex. manque de lithium dans les batteries).

(c) Forme CES-METSI

$$Y = A \times \left(\sum_{j \in \{M, E, T, S, I\}} \delta_j \times X_j \right)^{-1/\rho}$$

- permet de moduler le degré de substituabilité entre facteurs,
- modèle flexible pour scénarios prospectifs (transition énergétique, automatisation massive).

3.4. L'efficacité globale (A)

Le facteur A(t) regroupe :

- **Efficacité institutionnelle et organisationnelle** (qualité de l'administration, infrastructures, fluidité logistique, sécurité juridique).

- **Efficacité micro-économique** (gestion des entreprises, efficacité managériale, capital social).
- **Facteurs contextuels** (confiance, stabilité politique, système éducatif).

En pratique, A est mesurable indirectement par la productivité globale des facteurs (PGF).

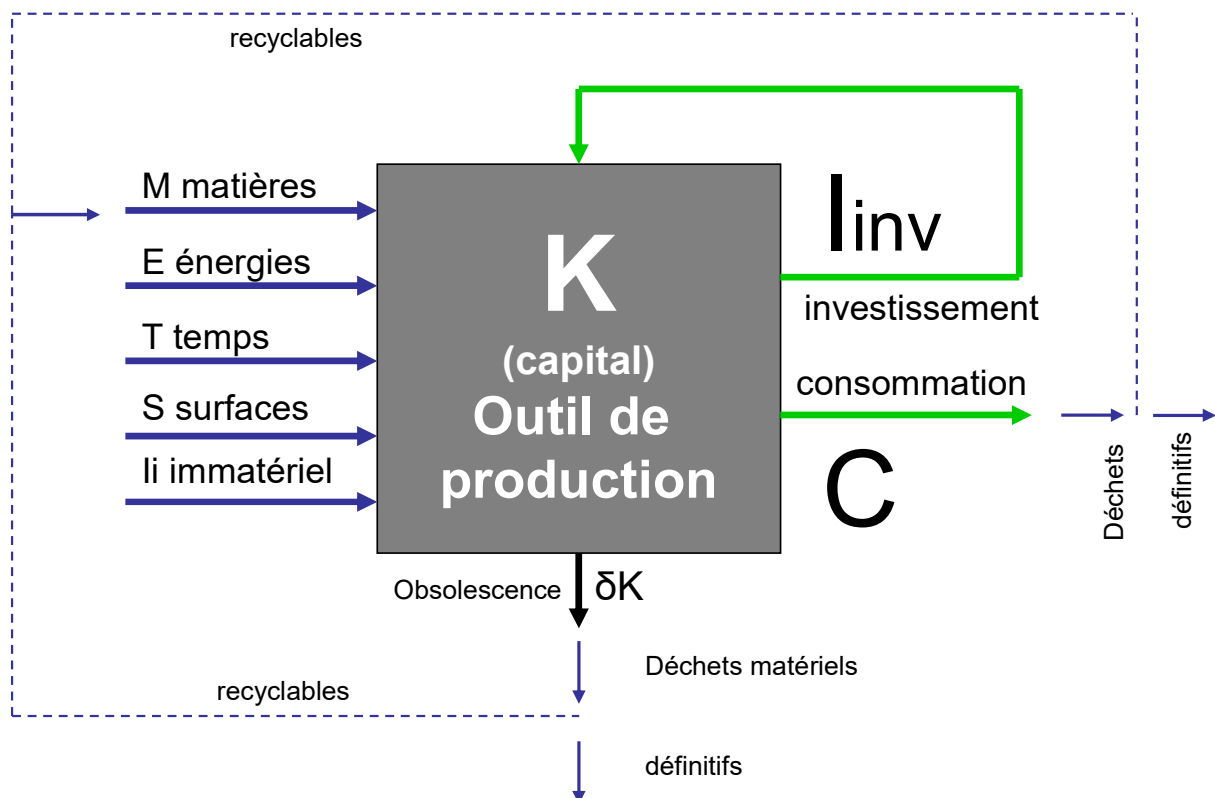
3.5. Capital et amortissement dans METSI

Le capital est conçu comme un stock de produits METSI accumulés.

- **Capital matériel** : machines, bâtiments, réseaux.
- **Capital immatériel** : logiciels, brevets, bases de données.
- **Capital foncier** : terrains, surfaces artificialisées.

Le capital s'accroît par l'investissement (IK) et décroît par la dépréciation (δK).

Le lien avec METSI est direct : chaque produit de capital est une combinaison de M, E, T, S, I.



Une représentation graphique simplifiée du modèle METSI.

4. Applications dynamiques du modèle METSI

Le modèle METSI, en reliant la production économique aux intrants physiques et immatériels, permet de dépasser une photographie instantanée pour analyser l'évolution dans le temps. On peut ainsi identifier des **dynamiques longues** (cycles économiques, transitions

énergétiques), des impasses technologiques, ou encore des **trajectoires alternatives** pour l'avenir.

4.1. Cycles longs et révolutions industrielles

Depuis Kondratiev et Schumpeter, on sait que l'économie ne croît pas de façon linéaire mais par vagues d'innovation et de réorganisation.

Le METSI permet de caractériser ces cycles par la variation relative des composantes :

1^{re} révolution industrielle (vapeur, charbon)

- explosion de E (énergie fossile),
- hausse de M (acier, charbon),
- faible I (innovation technique mais peu d'immatériel).

2^e révolution industrielle (électricité, pétrole, chimie)

- substitution d'E (pétrole ↔ charbon),
- diversification de M (aluminium, cuivre, chimie),
- montée progressive de I (organisation taylorienne, brevets).

* 3^e révolution industrielle (numérique)

- poids croissant de I (logiciels, données, brevets),
- relative stagnation de M et E,
- T (travail) déplacé vers les services.

* 4^e révolution (IA, biotechnologies, énergies propres)

- I devient prédominant,
- dépendance accrue à certains M critiques (terres rares, lithium, cobalt),
- reconfiguration de E (renouvelables ↔ fossiles ↔ nucléaire).

Ainsi, un cycle de Kondratiev peut être représenté comme une séquence où la pondération des facteurs METSI change brutalement.

4.2. Impasses technologiques et substitutions

Le METSI est particulièrement utile pour identifier les **impasses technologiques**.

En effet, si la production est contrainte par un facteur (modèle Leontief-METSI), une impasse apparaît lorsque :

$X_j \rightarrow \text{rareté} \Rightarrow Y$ plafonne malgré l'abondance des autres facteurs.

Exemples :

- **Éolien** : dépend fortement du cuivre et des terres rares (M). Rarement substituables → risque d'impasse.
- **Nucléaire** : forte intensité en E (uranium, infrastructures) mais M et S plus stables → trajectoire robuste si I suit (sûreté, stockage).
- **Numérique/IA** : dépendance à I, mais aussi à E (serveurs, refroidissement). Si la consommation énergétique croît plus vite que l'efficacité des algorithmes, impasse possible.

4.3. Découplage énergie – prospérité

Une question centrale des politiques climatiques est de savoir si la croissance économique peut être « décollée » de la consommation d'énergie.

Dans le cadre METSI :

- **Décollage relatif** : baisse de β (coefficient de E) dans la fonction METSI grâce à des gains d'efficacité et une montée de I.
- **Décollage absolu** : croissance de Y alors que E diminue en valeur absolue — possible uniquement si I croît massivement et compense la baisse de E.

Exemple empirique :

- Pays européens → légère baisse d'E par habitant avec croissance de Y (décollage relatif).
- Monde → pas encore de décollage absolu observé.

4.4. Chocs exogènes et résilience

Le METSI peut intégrer des chocs :

- **Peak oil / peak copper** : chute brutale de la disponibilité de M ou E → contraction immédiate de Y si pas de substitut.
- **Changement climatique** : impact sur S (surfaces agricoles réduites, artificialisation) et sur T (productivité humaine diminuée par vagues de chaleur).
- **Crises institutionnelles** : effondrement du facteur A (efficacité institutionnelle), qui multiplie les inefficacités dans tous les intrants.

Ces chocs peuvent être simulés par une équation différentielle simple :

$$\dot{X}_j = f_j(X_{j,t}) - \delta_j \times X_{jj}$$

où f_j décrit l'accumulation (innovation, extraction, apprentissage), et δ_j la dépréciation (épuisement, obsolescence).

4.5. Applications prospectives

En pratique, le modèle METSI peut éclairer des choix stratégiques :

- **Transition énergétique** : arbitrage entre filières (éolien, solaire, nucléaire, hydrogène).
- **Aménagement urbain** : comparer la valeur intrinsèque de différents modèles urbains (pavillonnaire vs vertical).
- **Politiques industrielles** : repérer les secteurs à forte intensité en I et ceux vulnérables aux pénuries de M.
- **Scénarios globaux** : intégrer METSI dans les modèles SSP du GIEC pour donner une base physique plus transparente aux trajectoires.

Avec cette section, on a désormais la **dynamique du modèle METSI**, sa capacité à identifier des impasses et à éclairer les transitions.

5. Valeur intrinsèque, prix et monnaie

Le modèle METSI définit une **valeur intrinsèque** des produits comme combinaison pondérée de leurs intrants physiques et immatériels. Mais l'économie réelle fonctionne à travers des **prix de marché** et une **monnaie** dont la dynamique reflète à la fois la production et les choix politiques.

5.1. Valeur intrinsèque vs prix de marché

Valeur intrinsèque (Vi) :

$$V_i = k_M \times M + k_E \times E + k_T \times T + k_S \times S + k_I \times I$$

C'est un coût objectif, stable, lié aux intrants.

Prix de marché (P) :

$$P = (1 + f) \times V_i$$

où f capture les marges commerciales, la rareté perçue, les effets de mode, la fiscalité, la spéculation. → Deux biens identiques en V_i peuvent avoir des prix très différents (ex. sac de luxe vs sac fonctionnel).

Valeur ajoutée (VA) :

$$VA = P - CI$$

(où CI = consommations intermédiaires).

→ La VA correspond au surplus généré par l'entreprise, calculé à prix de marché.

Clé : la valeur intrinsèque et la valeur ajoutée ont des logiques parallèles mais non équivalentes.

5.2. Le capital comme outil de production

Dans METSI, le capital **n'est pas un facteur de production** mais un **stock de produits METSI** accumulés dans le temps (machines, infrastructures).

- L'investissement (I_{macro} de Keynes) correspond à l'injection de nouveaux produits METSI dans le stock de capital.
- La dépréciation traduit l'obsolescence technique et physique de ce capital.

Écriture simple :

$$K(t+1) = K(t) + I(t) - \delta K(t)$$

5.3. Lien avec la Théorie générale de Keynes

Keynes :

$$Y = C + I + G + (X - M)$$

Dans METSI :

- **C (consommation)** = produits METSI destinés aux ménages.
- **I (investissement)** = accumulation de produits METSI en capital.

- **G (dépenses publiques)** = injection monétaire permettant la mobilisation de flux METSI (consommation sociale, infrastructures).
- **X - M (commerce extérieur)** = transferts nets de produits METSI entre économies.

La différence : METSI ramène tous ces flux à leur **base physique et immatérielle**, offrant une mesure plus stable que les prix monétaires.

5.4. Monnaie et représentation de la valeur

La monnaie est un **instrument d'échange, de réserve et d'unité de compte**.

Dans METSI, on peut postuler une relation **élégante** :

$$M \approx V$$

où M est la masse monétaire, V la valeur intrinsèque agrégée des biens et services.

L'écart entre M et V produit :

- **Inflation monétaire** si M croît plus vite que V.
- **Déflation** si M croît moins vite que V.

Les banques centrales interviennent via :

- **Masse monétaire (QE, crédit)** → agit sur M.
- **Taux directeur** → agit indirectement sur la transformation de I en K et sur la demande.

5.5. Monnaies multiples et parité de pouvoir d'achat (PPA)

Chaque pays a sa monnaie nationale M_p , reflet partiel et fluctuant de sa valeur intrinsèque V_p . L'économie mondiale est donc :

$$V = \sum_{[p]} V_p, M = \sum_{[p]} M_p$$

La PPA entre deux monnaies peut être estimée en comparant **V_i moyens** des mêmes biens dans deux pays.

Exemple : une voiture de valeur intrinsèque similaire coûte 20 000 € en Allemagne mais 100 000 BRL au Brésil → donne une estimation du taux de change « réel ».

5.6. Enjeux pour la politique économique

- **Relance par la consommation** : injection monétaire (M) sans hausse de V → inflation monétaire.
- **Relance par la production** : hausse de V via augmentation de M, E, T, S, I → croissance réelle.
- **Relance par l'efficacité institutionnelle (A)** : meilleure conversion de METSI en Y, donc hausse de V sans hausse des intrants.

METSI offre ainsi un cadre pour **discriminer les leviers** : agir sur le physique (innovation, ressources), ou sur le monétaire (crédit, taux).

Cette section ancre le METSI dans la **théorie de Keynes** tout en montrant sa **valeur ajoutée** : distinguer l'inflation physique (pénurie d'intrants) et l'inflation monétaire (excès de liquidité).

6. Cas d'application du modèle METSI

Le modèle physico-économique METSI, bien qu'encore conceptuel, peut être appliqué à des exemples concrets. Ces applications montrent :

1. Comment décomposer un produit ou un service en ses composantes **M, E, T, S, I**.
2. Comment comparer plusieurs solutions technologiques ou organisationnelles.
3. Comment relier ces évaluations micro à des enjeux macro (croissance, transitions, politiques publiques).

6.1. Exemple micro : la voiture thermique vs la voiture électrique

Voiture thermique (VT) :

- **M** : forte masse d'acier, d'alliages.
- **E** : consommation d'essence sur la durée de vie (élevée).
- **T** : main d'œuvre de production + maintenance régulière.
- **S** : surfaces pour raffineries, stations-service, routes.
- **I** : savoir-faire mécanique, logiciels embarqués (faibles).

Voiture électrique (VE) :

- **M** : masse moindre en acier, mais batteries riches en Li, Co, Ni, Cu.
- **E** : électricité consommée, dépendante du mix énergétique.
- **T** : production plus automatisée, maintenance plus faible.
- **S** : infrastructures de recharge.
- **I** : forte intensité logicielle (gestion batterie, connectivité, IA de conduite).

Résultat METSI :

- **VT** : M+E dominants, I faible.
- **VE** : M plus critique (métaux rares), E moins émetteur si mix bas carbone, I beaucoup plus élevé.
- **Enjeu stratégique** : dépendance aux métaux critiques → anticipation des « peak copper » ou « peak lithium ».

6.2. Exemple micro : le smartphone

- **M** : quelques centaines de grammes (Cu, Au, terres rares).
- **E** : faible usage direct (recharge), mais fort en production (fabrication des puces).
- **T** : design, assemblage, distribution → délocalisé et automatisé.
- **S** : faible (usines, data centers liés aux services).
- **I** : très élevé → OS, applis, brevets, écosystème numérique.

Résultat METSI : le smartphone est un **produit I-dominant**. Valeur intrinsèque largement portée par le logiciel, l'écosystème, la complexité. Prix de marché fortement supérieur à V_i → reflet des effets de marque et de l'ubiquité.

6.3. Exemple micro : l'IA générative

- **M** : serveurs, data centers.
- **E** : très forte pour l'entraînement, modérée pour l'inférence.
- **T** : ingénieurs, data scientists.
- **S** : surfaces de data centers.
- **I** : gigantesque → modèles, données, algorithmes, brevets.

Résultat METSI :

- Produit quasi « pur I ».
- V_i dominée par $kI \times I$.
- Économie marginale (coût par requête faible) mais valeur extrinsèque élevée → typique d'une rupture technologique.

6.4. Exemple méso : la ville

Comparons trois formes urbaines pour une même population :

- **Ville « haussmannienne moderne »** : Densité forte, M élevé au départ mais amorti, E réduit par compacité, T optimisé, S faible.
- **Ville HLM** : M optimisé, E moyen, T faible, S moyen, I faible.
- **Ville pavillonnaire** : M élevé (béton, routes), E fort (chauffage, transports), S très élevé, I faible.

Résultat METSI :

- La ville compacte (type haussmannienne) minimise E et S → plus résiliente face aux contraintes énergétiques et foncières.
- La ville pavillonnaire maximise la consommation d'espace et d'énergie → modèle peu soutenable.

6.5. Exemple méso : zone commerciale

- **Zone classique dispersée** : M éclaté, E fort (chauffage/clim de chaque bâtiment), S étalé, T moindre, I faible.
- **Zone concentrée (méga-centre)** : M initial élevé mais mutualisé, E optimisé (CVC central), S réduit, I modéré (GTB, automatisation).

Résultat METSI : concentration → économies d'échelle physiques, plus soutenable.

6.6. Exemple macro : politique énergétique régionale (cas Bretagne)

Projet hypothétique : **SMR (réacteur nucléaire de 4e génération) + renouvelables.**

- **M** : construction lourde, alliages spécifiques, combustible.
- **E** : flux continu, bas carbone.
- **T** : ingénieurs, maintenance.

- **S** : emprise réduite par rapport à l'éolien offshore massif.
- **I** : R&D nucléaire, savoir-faire, régulation.

Comparaison METSI avec éolien/solaire massif :

- Nucléaire : M critique mais concentré, S faible, E très stable, I fort.
- Renouvelables : M dépendant (Cu, terres rares), S élevé, E variable, I modéré.

Résultat METSI :

- Les deux filières ont viabilité, mais avec dépendances différentes.
- METSI aide à détecter les **impasses potentielles** (pénuries de matériaux critiques, intermittence énergétique).

6.7. Enjeux stratégiques et cycles longs

En agrégeant ces cas :

- METSI révèle les **profils sectoriels** (M/E-dominant, I-dominant).
- Permet de repérer les **ruptures** (passage d'un cycle de Kondratieff dominé par M/E → vers un cycle dominé par I).
- Permet aussi de tester des **scénarios de soutenabilité** (peak oil, peak copper, saturation territoriale).

Cette section montre que METSI est **opérationnel** sur des exemples concrets et peut être utilisé comme **outil comparatif** pour orienter des choix politiques, technologiques et territoriaux.

7. Cycles économiques, transitions et prospective

Le modèle physico-économique METSI (Matière, Énergie, Temps, Surface, Intangible) fournit un cadre permettant de revisiter les cycles longs de l'économie et de mieux comprendre les dynamiques de transition.

7.1. Les cycles de Kondratieff et leur lecture METSI

Traditionnellement, on distingue plusieurs vagues de Kondratieff ($\approx 40\text{--}60$ ans), chacune portée par une technologie dominante :

1. **Première révolution industrielle (1780–1840)** : charbon, machines à vapeur → dominance **E** et **M** (**fer, charbon**).
2. **Deuxième (1840–1900)** : acier, chemins de fer, électricité → dominance **M** (**acier, cuivre**), **S** (**infrastructures**).
3. **Troisième (1900–1950)** : automobile, pétrole, chimie → dominance **E** (**pétrole**), **M** (**alliages, plastiques**).
4. **Quatrième (1950–2000)** : électronique, aviation, nucléaire → montée de **I** (**électronique, calcul**), **E** (**nucléaire, pétrole**).
5. **Cinquième (2000–2020)** : numérique, internet → dominance **I**, baisse relative de **M** et **E** par unité de PIB.

6. **Sixième (2020–2050 ?)** : IA, biotech, transition énergétique → possible dominance durable de **I**, mais avec contraintes fortes sur **M** (métaux critiques) et **S** (occupation foncière).

Le prisme METSI permet de comprendre ces cycles comme un **glissement progressif des facteurs dominants** :

- de M/E au départ → vers I aujourd'hui,
- avec S (territoire) comme contrainte permanente, jamais totalement absente.

7.2. Révolutions industrielles et transitions

Révolutions industrielles passées : chaque transition correspond à une **réorganisation du mix METSI**. Aujourd'hui : la transition numérique et énergétique combine deux forces opposées :

- **Numérique/IA** : forte montée de I, relative déconnexion de M/E (ex. dématérialisation, logiciels, plateformes).
- **Transition bas carbone** : dépendance accrue à certains M (Cu, Li, Co, Nd...) et E renouvelables intermittents.

L'économie mondiale vit une tension entre deux transitions simultanées :

- une transition de **découplage (I)**,
- une transition de **recouplage (M/E)**.

7.3. Découplage énergie – prospérité

Un enjeu central est de savoir si la prospérité (PIB réel) peut croître indépendamment de la consommation énergétique (E). Dans METSI, cela correspond à : augmentation de **I** plus rapide que diminution de **E**. Empiriquement, certains pays montrent un découplage relatif (croissance + baisse de consommation d'énergie fossile). Mais au niveau mondial, la corrélation entre PIB et énergie reste forte.

METSI aide à préciser :

- un **découplage local** est possible (si I domine),
- mais un **découplage global** est incertain tant que M et E restent limités par des stocks finis.

7.4. Le dérèglement climatique et la contrainte S/E

- Changement climatique = rétroaction négative sur M, E, T, S.
- Agriculture et pêche → baisse de productivité (M).
- Surfaces habitables → réduction par montée des mers, canicules (S).
- Besoin accru d'adaptation → augmentation de T (main d'œuvre) et I (innovation).

Le METSI permet d'intégrer le climat comme un facteur **dégradant les coefficients kM, kE, kS** au fil du temps.

7.5. Singularité technologique (I explosif ?)

Certains prospectivistes évoquent une **singularité** liée à l'IA (auto-amélioration rapide, créativité autonome).

- Dans METSI : cela correspond à une **croissance exponentielle de I(t)**, dépassant les contraintes M, E, S.
- Si ce scénario se réalise, METSI deviendrait un modèle avec une variable I quasi illimitée, capable de repousser les « pics » physiques (peak oil, peak copper) par substitution technologique.
- Risque inverse : I pourrait aussi décliner (obsolescence, perte de savoir, dépendance numérique fragile), conduisant à une « stagnation cognitive ».

7.6. Typologie des futurs possibles avec METSI

Le modèle permet de représenter quatre trajectoires prospectives :

1. **Stagnation** : I faible → contrainte forte de M et E → crises récurrentes.
2. **Innovation modérée** : I progresse → retard des « pics » M/E → croissance ralentie mais soutenable.
3. **Singularité** : I explose → nouvelle ère économique où la contrainte physique est partiellement contournée.
4. **Déclin cognitif** : I s'effondre → régression, dépendance totale aux stocks physiques → contraction durable.

Avec cette section, METSI se distingue de World3 :

- World3 insistait surtout sur les stocks physiques (M, E, S).
- METSI y ajoute **I comme facteur évolutif**, capable de transformer les cycles et d'introduire des ruptures.

8. Politiques publiques et stratégies METSI

L'apport du modèle METSI n'est pas seulement analytique : il peut aussi guider les politiques économiques et industrielles. En intégrant les intrants physiques et immatériels (M, E, T, S, I), il offre une boussole pour arbitrer entre court terme et long terme, efficacité financière et soutenabilité matérielle.

8.1. Politique monétaire et valeur intrinsèque

- **Monnaie \approx valeur (M \approx V)** : dans METSI, la monnaie est une représentation imparfaite et instable de la valeur intrinsèque.
- **Inflation physique vs monétaire** : METSI distingue :
 - inflation due à la rareté physique (hausse kM, kE, kS),
 - inflation due à la masse monétaire (quantitative easing, taux directeurs).

- **Apport METSI** : indiquer aux banques centrales ***quel levier activer*** : corriger la sphère monétaire (M, vitesse de circulation) ou investir dans l'outil de production (améliorer A, développer I).

8.2. Politique budgétaire et investissements publics

Dans l'équation keynésienne, l'investissement public G est essentiel.

Avec METSI : G peut être ventilé en fonctions ciblées :

- soutenir M (sécuriser les approvisionnements stratégiques),
- investir dans E (nucléaire, renouvelables, réseaux),
- renforcer T (formation, compétences rares),
- optimiser S (aménagement, urbanisme),
- développer I (R&D, brevets, clusters numériques).

On peut comparer l'efficacité de deux programmes d'investissement : par ex. programme nucléaire vs éolien, zone commerciale étalée vs compacte.

8.3. Politique industrielle et chaînes de valeur

Mondialisation = optimisation des chaînes de valeur → externalisation là où T est moins cher, ou M/E moins coûteux.

Avec METSI : on peut optimiser autrement :

- en réduisant la dépendance critique (M),
- en valorisant les compétences locales (T, I),
- en minimisant l'empreinte territoriale (S).

Cela permet de décider : relocaliser ou non ? quel cluster privilégier (aéronautique, agroalimentaire, numérique) ?

8.4. Politique territoriale et urbanisme

Métropoles vs villes moyennes : METSI mesure la consommation de S et E, la productivité de T, la concentration de I.

Exemples :

- Ville haussmannienne → densité forte (S faible), T optimisé (services concentrés).
- Pavillonnaire → S très élevé, E élevé (transport), T dispersé.
- Ville numérique (smart city) → I élevé, dépendance E/M variable.

Stratégies régionales : Bretagne, Pays basque, Lombardie... chaque région peut être vue comme une « **matrice METSI** », avec ses manques et ses atouts.

8.5. Stratégie innovation et capital immatériel (I)

Le facteur I est décisif : IA, biotech, data, brevets.

Politiques publiques :

- soutien à la recherche fondamentale,

- protection de la propriété intellectuelle,
- capital-risque et financement d'amorçage.

Effet multiplicateur : chaque hausse de I améliore l'efficacité des autres facteurs (M, E, T, S).

8.6. Synthèse SWOT METSI appliquée aux politiques

- **Forces** : METSI révèle les atouts tangibles (M, E, S) et intangibles (I).
- **Faiblesses** : dépendance importée (matières critiques, énergie fossile).
- **Opportunités** : transitions technologiques (IA, SMR nucléaires, smart cities).
- **Menaces** : dérèglement climatique, pic de ressources, stagnation cognitive.

Cette section montre que METSI n'est pas seulement une théorie « élégante » mais une **boîte à outils pour la décision publique et privée**. Elle complète et dépasse World3 (contraintes physiques) et le Growth Lab de Harvard (ubiquité/complexité économique).

9. Applications concrètes du modèle METSI

Le modèle METSI gagne en légitimité s'il peut être appliqué à des cas réels ou simulés. Cette section illustre comment la décomposition **M-E-T-S-I** permet de comparer des alternatives, d'anticiper des impasses, et de guider des décisions.

9.1. Urbanisme résidentiel : trois modèles de ville

Ville haussmannienne moderne :

- M : important au départ (construction en pierre, béton, verre).
- E : modéré (isolation, compacité → moins de chauffage par habitant).
- T : optimisé (services proches, mobilité faible).
- S : faible par habitant (forte densité).
- I : urbanisme rationalisé, infrastructures partagées.

→ Profil METSI efficace : compacité = moindre empreinte par habitant.

Immeubles HLM espacés :

- M : similaire.
- E : plus élevé (espaces moins isolés, besoin de mobilité).
- S : plus élevé (espaces verts + dispersion).
- I : moins optimisé (fragmentation).

→ Profil intermédiaire.

Pavillonnaire dispersé :

- M : plus faible par logement (mais répétition d'équipements individuels).
- E : élevé (chauffage, mobilité).

- S : très élevé (étalement urbain).
- I : faible (urbanisme fragmenté).

→ Profil METSI peu efficace.

Conclusion : le modèle montre que, à population équivalente, la compacité réduit S et E, donc la valeur intrinsèque unitaire par habitant.

9.2. Zones commerciales : étalée vs compacte

Zone commerciale étalée (actuelle) :

- M : élevé (multiples bâtiments, voiries, parkings).
- E : élevé (chauffage/climatisation dispersée).
- S : très élevé (surface artificialisée).
- I : faible (peu de mutualisation).

Zone compacte en immeuble unique :

- M : concentré (un seul gros bâtiment, infrastructures partagées).
- E : réduit (efficacité énergétique centralisée).
- S : divisé par 2 ou 3 (parkings souterrains, densification).
- I : élevé (GTB, logistique, sécurité intégrée).

Conclusion : la variante compacte consomme moins de ressources et optimise l'I.

9.3. Agriculture et fermes verticales

Maraîchage classique en pleine terre :

- M : faible (terre, serres).
- E : faible à modéré (mécanisation, irrigation).
- S : très élevé (grands espaces).
- T : modéré (main-d'œuvre agricole).
- I : faible (technique traditionnelle).

Ferme verticale en zone urbaine :

- M : élevé (infrastructures, verre, acier).
- E : très élevé (éclairage LED, climatisation, pompes).
- S : faible (bâtiment compact).
- T : faible (automatisation).
- I : élevé (algorithmes de culture, capteurs, automatisation).

Conclusion : compromis METSI entre S et E. Les fermes verticales gagnent si l'énergie est décarbonée et abondante.

9.4. Transition énergétique : nucléaire vs éolien

Nucléaire SMR (cas Bretagne) :

- M : très élevé (béton, acier, uranium).

- E : production massive, pilotable.
- T : modéré (ingénierie qualifiée).
- S : faible (petite emprise).
- I : élevé (savoir-faire rare, filière spécifique).

Éolien terrestre/offshore :

- M : élevé (acier, béton, terres rares).
- E : production variable, non pilotable.
- T : faible (maintenance).
- S : plus élevé (dispersion d'éoliennes).
- I : modéré (technologie mature).

Conclusion : le METSI éclaire le dilemme : nucléaire → forte intensité M mais I et E élevés, éolien → dépendance critique en M et S, I plus faible.

9.5. Numérique et intelligence artificielle (réseau de data centers, Bretagne)

- **M** : bâtiments, serveurs, câbles, refroidissement.
- **E** : consommation continue, forte mais optimisable (cogénération, récupération chaleur).
- **T** : faible (maintenance), mais fort en amont (conception IA).
- **S** : modéré (campus concentrés).
- **I** : très élevé (algorithmes, données, savoir-faire).

Conclusion : le numérique illustre un secteur où la valeur se concentre dans I plus que dans M/E.

9.6. Transports : route vs rail (Lorient – Saint-Brieuc)

Autoroute/route rapide :

- M : élevé (béton, bitume).
- E : très élevé (voitures, carburant/électricité).
- S : élevé (emprise linéaire + parkings).
- T : dispersé (temps de conduite individuel).
- I : faible (infrastructure basique).

Ligne ferroviaire modernisée :

- M : élevé (rails, gares, signalisation).
- E : réduit par passager (efficacité).
- S : plus faible (emprise étroite).
- T : optimisé (temps collectif réduit).
- I : élevé (systèmes de contrôle, automatisation).

Conclusion : ferroviaire plus efficace en METSI pour flux réguliers, routier reste compétitif pour flux diffus → complémentarité à organiser.

9.7. Synthèse

Ces applications montrent que METSI :

- **compare des scénarios hétérogènes** (ville, énergie, numérique, transport, agriculture),
- **révèle des arbitrages physiques cachés derrière les prix**,
- **permet d'anticiper les impasses** (pénurie de M critiques, dépendance E fossile, saturation S),
- **met en valeur I comme levier de résilience**.

10. Discussion : apports et limites du modèle METSI

Le modèle **METSI** propose une approche physico-économique originale, qui articule les intrants matériels, énergétiques, temporels, spatiaux et immatériels pour définir une valeur intrinsèque indépendante des fluctuations monétaires de court terme.

Il ne s'agit pas d'un substitut aux théories économiques classiques, mais d'un **complément structurant** qui permet de relier la physique, l'ingénierie et l'économie.

10.1. Apports principaux

1. Un cadre unificateur

- METSI permet de relier les approches **physiques** (World3, Club de Rome),
- les approches **monétaires et macroéconomiques** (Keynes, PIB, valeur ajoutée),
- et les approches **structurales** (Growth Lab, complexité économique).

→ Une même grille de lecture peut comparer des produits, des secteurs, ou des nations.

2. Détection des impasses technologiques et des trajectoires robustes

- Par comparaison des profils METSI, on peut identifier si une filière repose sur des ressources limitées (M, E, S) ou sur des leviers plus durables (I).
- Exemple : éolien vs nucléaire, pavillonnaire vs haussmannien.

3. Lien direct entre micro et macro

- Chaque produit a un coût intrinsèque en METSI,
- agrégé au niveau national → reflète le potentiel productif réel,
- agrégé au niveau mondial → permet une lecture alternative au PIB.

4. Prise en compte explicite de l'immatériel (I)

- L'intelligence, l'innovation et l'information sont intégrées comme facteurs de production, alors qu'ils sont souvent traités comme « résidus » dans les modèles classiques.

- Cela permet d'expliquer les ruptures (révolutions industrielles, intelligence artificielle, transitions numériques).

5. Outil stratégique

- Comparer des scénarios (ville, énergie, transport, agriculture).
- Identifier les « **chaînon manquant** » pour un territoire.
- Éclairer les politiques publiques (investissement, relocalisation, innovation).

10.2. Limites et défis

1. Disponibilité et qualité des données

- M et E sont mesurables, mais S (surface) et surtout I (innovation/immatériel) sont difficiles à quantifier de manière robuste.
- Besoin de proxys (brevets, publications, bases de données, capital humain).

2. Hétérogénéité des contextes

- Les coefficients kM, kE, kT, kS, kI varient selon les pays, les institutions, les normes, ce qui rend les comparaisons délicates.
- Risque de subjectivité dans le choix des pondérations.

3. Dynamique complexe

- Le modèle reste statique dans sa forme la plus simple (photo instantanée).
- Pour capturer les cycles longs (Kondratieff, transitions énergétiques), il faut passer à des systèmes dynamiques (équations différentielles, simulations Monte Carlo).

4. Relations avec les prix de marché

- Le prix reste déterminé par l'offre et la demande, la spéculation, la rareté perçue.
- Le lien avec la valeur intrinsèque n'est pas direct → nécessite un facteur d'efficacité institutionnelle/organisationnelle (A) et un facteur de fluctuation (f).

5. Acceptabilité scientifique et institutionnelle

- Le modèle bouscule la séparation habituelle entre économie et physique.
- Son adoption dépendra de sa capacité à produire des résultats concrets et utiles (prospectives, politiques publiques, comparaisons internationales).

6. La population

- World3 intègre un modèle de population (naissance, décès...) qui peut être adapté au modèle METSI
- La notion de « capital humain », ses liens entre éducation et prospérité économique, peut être ajouté au modèle.

10.3. Perspectives de développement

1. Modélisation dynamique :

- Développer des versions différentielles (stocks, flux, obsolescence, innovation).
- Intégrer la démographie comme variable explicite.

2. Applications territoriales :

- Études de cas (régions, pays).

- Comparaison de politiques énergétiques, urbaines, numériques.

3. Lien avec les politiques monétaires :

- Explorer la relation $M \approx V$ (monnaie \approx valeur intrinsèque).
- Tester l'utilité de METSI pour détecter l'origine physique ou monétaire de l'inflation.

4. Exploration prospective :

- Scénarios de singularité de I (intelligence artificielle, capital cognitif).
- Scénarios de déclin (perte de savoirs, effondrement démographique).

10.4. Conclusion de la discussion

Le modèle METSI est à la fois **simple dans ses fondements** (décomposer tout produit ou service en intrants physiques et immatériels) et **puissant dans ses applications** (détection d'impasses, comparaison de scénarios, prospective).

Ses limites actuelles sont surtout pratiques (mesure, données, calibration), mais sa logique théorique lui permet de dépasser à la fois les modèles classiques (Keynes, PIB, VA) et les modèles prospectifs (World3, Growth Lab).

Il ouvre un champ de recherche et d'expérimentation où la **valeur économique** retrouve une assise dans le réel physique, tout en intégrant l'immatériel comme moteur des ruptures futures.

Conclusion générale

Le modèle physico-économique **METSI** (Matière, Énergie, Temps, Surface, Intangible) part d'une intuition simple : toute production humaine peut être ramenée à une combinaison d'intrants physiques et immatériels. En redonnant un socle tangible à la valeur, il permet de dépasser les limites d'une économie définie uniquement par des flux monétaires et de reconnecter la sphère financière avec les contraintes réelles du monde.

Cette approche apporte plusieurs résultats :

- Elle **clarifie la notion de valeur** en distinguant la valeur intrinsèque (coût physico-immatériel) du prix de marché (valeur extrinsèque), tout en articulant cette distinction avec la valeur ajoutée et les comptes nationaux.
- Elle **réinscrit l'économie dans la physique** : rareté des matières premières, dépendance énergétique, limites territoriales, temps humain disponible.
- Elle **intègre l'intangible (I)** comme facteur à part entière, en rendant compte du rôle décisif de l'information, de l'innovation et de la connaissance dans les cycles économiques et les transitions technologiques.
- Elle **dialogue avec les grandes traditions de modélisation** : prolongement de la Théorie générale de Keynes (flux monétaires et investissement), enrichissement des modèles de production (Cobb-Douglas, CES, Leontief), complémentarité avec les modèles prospectifs (World3, Growth Lab).

Au-delà de la théorie, le METSI ouvre un champ d'application pratique :

- évaluer les trajectoires énergétiques (filères renouvelables vs nucléaire),

- comparer des modèles urbains ou agricoles,
- analyser des infrastructures numériques ou de transport,
- mesurer la soutenabilité d'une politique régionale ou nationale,
- explorer des scénarios prospectifs (découplage énergie-richesse, singularité de l'intelligence artificielle, effondrement des ressources).

Bien sûr, des limites subsistent : la difficulté de mesurer certaines composantes (notamment l'immatériel et l'efficacité institutionnelle), l'hétérogénéité des contextes nationaux, la nécessité de passer à des modèles dynamiques pour saisir les cycles longs et les ruptures. Mais ces limites ne réduisent pas la fécondité du cadre : elles en tracent au contraire le programme de recherche et d'expérimentation.

En définitive, le METSI peut être vu comme un **pont entre économie et physique**, entre la matérialité des intrants et l'abstraction des valeurs financières, entre le passé des révolutions industrielles et les défis futurs des transitions énergétique, numérique et climatique.

Il ne prétend pas remplacer les modèles existants, mais les relier et les dépasser par un cadre plus universel, où la **valeur économique se définit dans le monde réel** avant de s'exprimer dans la sphère monétaire.

En ce sens, il invite à une nouvelle lecture des politiques économiques et monétaires : relancer la production, ce n'est pas seulement injecter de la monnaie, mais optimiser l'usage des ressources physiques et immatérielles ; prévenir les crises, ce n'est pas seulement équilibrer un budget, mais anticiper les goulots d'étranglement matériels et énergétiques.

Le METSI est donc moins une fin qu'un **point de départ** : une grammaire commune pour décrire, comparer et projeter les activités humaines, du produit à la planète, du court terme au long terme.

Sommaire

Synthèse	3
Le modèle physico-économique METSI	3
The Physico-Economic Model METSI.....	4
1. Introduction	5
1.1. Pourquoi un modèle physico-économique ?	5
1.2. De la valeur à la valeur intrinsèque.....	5
1.3. Originalité de l'approche	6
1.4. Objectifs du document	6
2. Valeur et production.....	6
2.1. La valeur en économie classique.....	6
2.2. La valeur intrinsèque et la valeur extrinsèque.....	6
2.3. Valeur ajoutée et PIB	7
2.4. Production et facteurs METSI.....	7
2.5. Capital et investissement.....	7
2.6. Vers une redéfinition de la valeur économique.....	8
3. Facteurs de production et fonction METSI	8

3.1. Héritage des fonctions de production.....	8
3.2. Substitution et complémentarité dans METSI	8
3.3. Formulations possibles de la fonction METSI.....	9
3.4. L'efficacité globale (A).....	9
3.5. Capital et amortissement dans METSI.....	10
4. Applications dynamiques du modèle METSI.....	10
4.1. Cycles longs et révolutions industrielles.....	11
4.2. Impasses technologiques et substitutions.....	11
4.3. Découplage énergie – prospérité.....	12
4.4. Chocs exogènes et résilience.....	12
4.5. Applications prospectives	12
5. Valeur intrinsèque, prix et monnaie	13
5.1. Valeur intrinsèque vs prix de marché.....	13
5.2. Le capital comme outil de production.....	13
5.3. Lien avec la Théorie générale de Keynes	13
5.4. Monnaie et représentation de la valeur	14
5.5. Monnaies multiples et parité de pouvoir d'achat (PPA)	14
5.6. Enjeux pour la politique économique	14
6. Cas d'application du modèle METSI	15
6.1. Exemple micro : la voiture thermique vs la voiture électrique	15
6.2. Exemple micro : le smartphone.....	15
6.3. Exemple micro : l'IA générative.....	16
6.4. Exemple méso : la ville.....	16
6.5. Exemple méso : zone commerciale.....	16
6.6. Exemple macro : politique énergétique régionale (cas Bretagne).....	16
6.7. Enjeux stratégiques et cycles longs.....	17
7. Cycles économiques, transitions et prospective	17
7.1. Les cycles de Kondratieff et leur lecture METSI.....	17
7.2. Révolutions industrielles et transitions	18
7.3. Découplage énergie – prospérité.....	18
7.4. Le dérèglement climatique et la contrainte S/E	18
7.5. Singularité technologique (I explosif ?).....	19
7.6. Typologie des futurs possibles avec METSI.....	19
8. Politiques publiques et stratégies METSI.....	19
8.1. Politique monétaire et valeur intrinsèque.....	19
8.2. Politique budgétaire et investissements publics	20
8.3. Politique industrielle et chaînes de valeur.....	20
8.4. Politique territoriale et urbanisme	20
8.5. Stratégie innovation et capital immatériel (I).....	20
8.6. Synthèse SWOT METSI appliquée aux politiques	21
9. Applications concrètes du modèle METSI.....	21
9.1. Urbanisme résidentiel : trois modèles de ville	21
9.2. Zones commerciales : étalée vs compacte	22
9.3. Agriculture et fermes verticales	22
9.4. Transition énergétique : nucléaire vs éolien.....	22
9.5. Numérique et intelligence artificielle (réseau de data centers, Bretagne).....	23

9.6. Transports : route vs rail (Lorient – Saint-Brieuc).....	23
9.7. Synthèse	24
10. Discussion : apports et limites du modèle METSI	24
10.1. Apports principaux.....	24
10.2. Limites et défis.....	25
10.3. Perspectives de développement.....	25
10.4. Conclusion de la discussion	26
Conclusion générale	26
Sommaire	27