

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

**Vers l'émergence d'une intelligence
énergétique articulée à l'intelligence
artificielle, pour une intelligence
économique augmentée et des trajectoires
énergie-carbone durablement pilotées.**

El m'kaddem KHEDDIOUI



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.52497/jitipee.v10i1.413

Vers l'émergence d'une intelligence énergétique articulée à l'intelligence artificielle, pour une intelligence économique augmentée et des trajectoires énergie-carbone durablement pilotées.

El m'kaddem KHEDDIOUI⁽¹⁾

⁽¹⁾Laboratoire Réseaux, Informatique, Télécommunications et Multimédia
Université Hassan II de Casablanca

elm.kheddioui@gmail.com

Résumé – Face à l'accélération conjointe des contraintes climatiques, démographiques, énergétiques, géopolitiques et numériques, les cadres traditionnels de la décision stratégique doivent être renforcés. La complexité des interdépendances contemporaines impose, désormais, des dispositifs de gouvernance capables de relier de manière cohérente et vérifiable l'information stratégique, les données physiques et les trajectoires de long terme. C'est dans ce contexte qu'émerge le concept d'Intelligence Énergétique (IÉne).

Si l'Intelligence Économique (IÉco) a structuré efficacement la veille et l'analyse stratégique, elle demeure souvent limitée par l'absence d'un socle fondé sur des grandeurs physiques auditables. L'énergie occupe à cet égard une position centrale : elle irrigue les chaînes de valeur, conditionne la compétitivité et la souveraineté, concentre l'essentiel des émissions de gaz à effet de serre (GES) et révèle les vulnérabilités comme les capacités de résilience. Mesurable, territorialisée et traçable, elle constitue un point d'ancrage objectif pour le pilotage des trajectoires énergie-carbone.

Articulée à l'Intelligence Artificielle (IA), l'IÉne est définie comme un cadre de gouvernance fondé sur la mesure et l'auditabilité des flux énergétiques et carbone. Elle combine un mode autonome de pilotage des systèmes énergétiques et un mode contributif renforçant l'IÉco. À travers une approche systémique et l'illustration du cas du Maroc, ce travail montre que cette articulation offre un cadre crédible pour renforcer la gouvernabilité des transitions, améliorer la transparence et relier compétitivité, coopérativité et durabilité, sans modèle prescriptif ni clé en main.

Mots clés : Intelligence économique, Intelligence énergétique, Gouvernance de l'énergie, Données énergie-carbone, Décarbonation, Neutralité carbone, Compétitivité, Coopérativité, Souveraineté énergétique, Sécurité énergétique, Transition énergétique, Mix énergétique, Efficacité énergétique, Énergies renouvelables, Hydrogène vert, Empreinte carbone, Bilan carbone, Traçabilité carbone, Régulation carbone, Intelligence artificielle, Big data, Datacenters, Aide à la décision, Veille stratégique énergétique, Diplomatie énergétique, Interdépendances sectorielles, Transversalité de l'énergie, Développement territorial inclusif, Cohésion sociale et territoriale, Nexus eau-énergie, Politiques publiques bas carbone.

DOI : 10.52497/jitipee.v10i1.413

Glossaire des concepts utilisés

Afin de garantir une lecture homogène du manuscrit et de lever toute ambiguïté terminologique, les principaux concepts mobilisés dans cet article sont définis ci-après.

→ IÉne

Cadre conceptuel et méthodologique visant à mobiliser les données énergétiques, les outils analytiques et les dispositifs de gouvernance afin d'améliorer le pilotage des trajectoires énergie-carbone, la qualité des décisions économiques et la robustesse des arbitrages sous contraintes multiples (énergétiques, environnementales, économiques et réglementaires).

→ Mode autonome

Modalité de fonctionnement dans laquelle un acteur (organisation, territoire ou système industriel) optimise ses performances énergétiques et économiques principalement à partir de ses propres données, capacités d'analyse et marges de manœuvre, sans recourir à des dispositifs élargis de coordination ou de mutualisation.

→ Mode contributif

Modalité de fonctionnement dans laquelle plusieurs acteurs partagent volontairement des données, des indicateurs ou des référentiels afin de produire une intelligence collective, améliorer la qualité des signaux décisionnels et renforcer la cohérence des arbitrages à différentes échelles, tout en conservant leurs intérêts propres.

→ Coopétitivité

Logique organisationnelle et stratégique combinant coopération et compétition, dans laquelle des acteurs concurrents collaborent sur des dimensions non différenciantes (données, standards, infrastructures, référentiels, ...) afin de réduire les coûts systémiques, améliorer la transparence et renforcer la performance collective, tout en demeurant compétitifs sur leurs activités spécifiques.

→ Signature énergétique

Profil caractéristique de consommation d'énergie d'un système (installation, procédé, organisation, territoire, ...), décrivant la relation entre usages énergétiques, niveaux d'activité, conditions d'exploitation et variables contextuelles, et pouvant servir de base à des analyses comparatives, prédictives ou de détection d'anomalies.

→ Flexibilités énergétiques

Ensemble des capacités techniques, organisationnelles ou comportementales permettant d'ajuster, de déplacer ou de moduler les usages énergétiques dans le temps ou entre vecteurs, incluant notamment l'effacement, le report de charge, le stockage et le déstockage, afin de répondre à des contraintes réseau, économiques ou environnementales.

→ Intercorrélation robuste

Relation statistiquement et opérationnellement significative entre plusieurs variables (par exemple consommation énergétique, niveau d'activité productive et performance économique), dont la stabilité est vérifiée dans le temps, explicable au regard des processus sous-jacents, et reproductible dans des contextes sectoriels comparables.

Introduction

Depuis plus de trente ans, l'IEco s'est imposée comme l'aboutissement d'une évolution accélérée par la mondialisation des marchés. Effectivement, dans un environnement marqué par l'intensification de la concurrence, la montée des stratégies géopolitiques, la sophistication des chaînes de valeur et la multiplication des normes, elle a démontré sa pertinence. Ainsi, en structurant la veille, en consolidant l'analyse stratégique, en protégeant le patrimoine informationnel et en outillant l'influence, elle a permis aux états, aux entreprises et aux territoires de mieux lire les rapports de force, d'anticiper les risques et de transformer une information qualifiée en avantage durable [1, 2, 3].

Toutefois, le monde qui a vu l'IEco émerger n'est plus celui d'aujourd'hui. Effectivement, la crise climatique s'intensifie, les tensions énergétiques se recomposent, les transitions démographiques et technologiques s'accroissent, et les vulnérabilités systémiques se multiplient. Dès lors, les paradigmes, les outils et les stratégies ne sauraient reposer uniquement sur des supports informationnels classiques. De ce fait, et dans le prolongement des acquis de l'IEco, la question de sa transposabilité vers des champs structurants à fort pouvoir de transformation, fondés sur des grandeurs physiques mesurables, devient une nécessité [4, 5].

En effet, l'histoire économique montre que chaque cycle de puissance s'adosse à un moteur déterminant. Hier, les hydrocarbures ont structuré l'industrialisation et redistribué les équilibres géostratégiques. Aujourd'hui, l'énergie, le carbone et la donnée deviennent simultanément et à la fois une ressource, une contrainte, un indicateur et un instrument d'influence. Dans ce nouvel environnement, l'énergie occupe une place singulière, en façonnant la souveraineté, conditionnant la compétitivité, révélant les vulnérabilités et pesant sur la stabilité. D'ailleurs, les chaînes de valeur du solaire, des batteries, des réseaux électriques et de l'hydrogène illustrent cette reconfiguration, dans laquelle la sécurisation des approvisionnements, la maîtrise industrielle et l'autonomie technologique deviennent des priorités stratégiques [6, 7].

Par conséquent, l'énergie devient une variable de pilotage, au sens plein du terme, car elle relie directement la performance économique, la contrainte climatique, l'exposition géopolitique et la capacité de résilience. Elle fournit un support objectivable permettant d'apprécier, avec rigueur, la crédibilité et la soutenabilité des choix collectifs au regard des trajectoires climatiques et des exigences d'alignement, et ce pour la gouvernance publique et privée [6, 8].

Dans ce contexte, le Maroc occupe une position singulière, et par sa position à la croisée de l'Afrique et de l'Europe, il dispose d'atouts géoénergétiques majeurs, notamment un ensoleillement élevé, un littoral étendu et venté, des interconnexions transcontinentales et une diplomatie énergétique active. Ces caractéristiques le prédisposent, déjà, à devenir une plateforme régionale de durabilité, capable d'exporter de l'électricité verte, de l'hydrogène bas carbone et du savoir-faire. Toutefois, le pays demeure importateur d'hydrocarbures et exposé aux marchés fossiles, et par la suite de cette double réalité -dépendance et ambition- naît la nécessité d'un cadre de gouvernance capable d'articuler les données, les technologies et la décision stratégique [6, 9, 10].

Pour donner suite aux atouts de ce contexte, les attentes assignées à l'IEne pourraient se clarifier et s'organiser autour du pilotage pour :

- Rendre d'abord, lisibles les flux, les consommations et les émissions de GES, puis relier ces grandeurs à leurs impacts économiques, à partir de données auditables et traçables.
- Eclairer ensuite, les arbitrages publics et privés en intégrant simultanément les contraintes physiques, climatiques, industrielles et financières, afin que chaque choix de mix, d'investissement ou de procédé puisse reposer sur une base permettant la mesurabilité des variables de suivi, de contrôle, ...
- Renforcer enfin, la crédibilité externe par des preuves robustes de transparence, de fiabilité et de performance, dans un contexte où l'accès aux marchés se conditionne de plus en plus à la démonstration du contenu carbone et à la conformité aux référentiels internationaux, notamment le CBAM (Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières de l'union européenne) [11, 12].

Pour converger vers ces attentes et exigences, l'IA et les infrastructures de données massives pourraient jouer un rôle d'accélérateur de convergence. Effectivement, en collectant, consolidant et croisant des volumes importants de données issues des compteurs communicants, des systèmes de supervision, des systèmes de management de l'énergie, des réseaux, des chaînes d'approvisionnement et des bases climatiques, l'IA permettrait d'identifier des corrélations robustes, de simuler des scénarios sous contraintes multiples et de documenter les décisions de manière explicable et traçable [2, 6]. Ainsi, ce projet propose de faire de l'IA un pont méthodologique et opérationnel pour transposer ce cadre éprouvé de gouvernance de l'information vers un champ transversal à fort pouvoir de transformation, afin de rendre les trajectoires énergie-carbone plus gouvernables, plus démontrables et plus compatibles avec les exigences de compétitivité, de souveraineté, de durabilité et aussi de coopération.

Dans ce cadre, et afin de lever toute ambiguïté quant au périmètre du propos, le présent travail adopte volontairement un niveau de formalisation conceptuel et stratégique. Il ne vise pas, à ce stade, à proposer des modèles de calcul, des architectures fonctionnelles détaillées ou des indicateurs chiffrés opérationnels, mais à poser un cadre de gouvernance et d'articulation destiné à orienter et structurer des développements techniques ultérieurs.

Dans cette perspective, la contribution proposée réside dans la mise en cohérence de briques technologiques existantes au sein d'un même cadre conceptuel articulant l'IEne, l'IEco et l'IA. Cette démarche de synthèse et de cadrage s'inscrit en dialogue avec des travaux récents portant sur le jumeau numérique et la simulation des systèmes complexes [13, 14], ainsi que sur la gouvernance des données et les conditions de confiance et d'auditabilité des systèmes fondés sur l'IA [15].

Enfin, pour exposer cette réflexion avec rigueur et selon une démarche progressive, le document adopte une structuration logique mettant en évidence les interactions entre l'IEco, l'IEne et l'IA, tout en s'appuyant, de manière ponctuelle et non systématique, sur l'illustration par l'exemple du Maroc en tant que cas d'étude spécifique.

Le paragraphe 1 revient sur la genèse et les apports de l'IEco en montrant comment ce cadre a professionnalisé la maîtrise de l'information, la mise en réseau des acteurs et la lecture stratégique des interdépendances, et comment la normalisation et la preuve partagée sont devenues des ressources de puissance [1, 3].

Le paragraphe 2 rappelle que l'économie contemporaine fonctionne en réseaux imbriqués où l'énergie agit comme catalyseur transversal des chaînes de valeur. Il montre aussi, notamment à travers le cas du Maroc, que la nature des sources et la qualité des usages énergétiques conditionnent simultanément les coûts, les empreintes carbone et l'accès aux marchés, et rendant par la suite le pilotage énergie-carbone incontournable [6, 12].

Dans un troisième temps, le paragraphe 3 pose les fondements de l'IEne, en la définissant comme un système cognitif et décisionnel fondé sur des mesures vérifiables, des données tracées et des indicateurs facilement partageables. Il met en évidence les deux modes opératoires et complémentaires de l'IEne (autonome et contributif) permettant le pilotage de la performance énergie-carbone et l'éclairage de l'IEco sur les risques, l'exposition carbone et les conditions d'accès aux marchés [2, 5].

Dans le prolongement, le paragraphe 4 s'attache aux supports de convergence et d'accélération : Il montre comment l'IA, les données massives et une plateforme interopérable peuvent transformer la donnée énergétique en signal décisionnel directement exploitable. A travers ce paragraphe, il est mis en évidence que les conditions de réussite reposeraient, notamment sur des données unifiées, des référentiels communs, des exigences de MRV (Mesure, Reporting et Vérification) l'interopérabilité technique, la qualité et particularités des formations et ses approches pédagogiques [2, 3].

Enfin, le paragraphe 5 élargit la focale vers les effets systémiques possibles. Il explore les impacts sur la diplomatie énergétique, l'hydrogène vert, le nexus eau-énergie, le désenclavement territorial, le développement humain et les innovations inclusives. Ces perspectives sont présentées comme des directions analytiques ouvertes par l'articulation entre l'IEco, l'IEne et l'IA, et non comme des certitudes [6, 7].

La conclusion générale et les perspectives viennent clore la démarche en synthétisant les enseignements de l'ensemble. Elles réaffirment qu'il s'agit avant tout d'une réflexion structurée pour mieux décider, et soulignent qu'une IEne inspirée de l'IEco et soutenue par l'IA pourrait offrir un cadre exigeant pour mieux piloter les flux énergie-carbone, relier la stratégie et les preuves, et aligner la compétitivité, la souveraineté et les trajectoires climatiques crédibles [6, 11].

1. L'IEco : Genèse, apports et perspectives de transposition

L'IEco a émergé comme une réponse structurée à la montée en complexité des échanges, des normes et des rapports de force. Puis, elle s'est progressivement affirmée comme une fonction stratégique à part entière, articulant à la fois l'information, la décision et l'influence. Le présent paragraphe revient sur cette trajectoire, met en évidence ses apports concrets en termes de compétitivité et de souveraineté, puis ouvre une réflexion sur les conditions de sa transposition vers d'autres champs structurants, transformants et transversaux, prédisposés pour s'appuyer sur des données stables, actionnables et vérifiables.

1.1. Lecture stratégique de la mutation économique mondiale

Dans un environnement marqué par l'ouverture des marchés, la sophistication des chaînes de valeur, la montée en puissance des normes et l'intensification des stratégies géopolitiques, il est apparu, à un moment donné, qu'une information, même abondante, ne suffit pas. En effet, ce qui devient déterminant réside dans une information hiérarchisée, qualifiée, protégée et mobilisable au service de la prise de décision.

Par sa rigueur méthodologique et son approche structurée, en organisant la veille, en structurant l'analyse stratégique, en protégeant le patrimoine informationnel et en outillant l'influence, l'IEco transforme la dispersion des signaux en capacités d'anticipation. Elle contribue ainsi à réduire l'incertitude, à éclairer les choix d'alliance ou de positionnement, à sécuriser les investissements et à renforcer la résilience des organisations. Appuyée, en outre, sur la normalisation, des référentiels partagés et des mécanismes de preuve, elle convertit l'information fiable en avantage concurrentiel objectivable et en levier de souveraineté économique [1, 2, 3].

Après plusieurs décennies d'expérimentation et d'institutionnalisation, les résultats sont désormais tangibles ; dès lors, l'enjeu ne consiste plus à démontrer l'utilité de l'IEco, mais à examiner les conditions de sa transposition vers des champs structurants, dotés d'un fort pouvoir de transformation, d'une forte transversalité et de gisements d'information adossés à des grandeurs mesurables, traçables et auditables. Autrement dit, il s'agit de domaines où l'information stratégique se connecte directement aux réalités physiques, afin de piloter, prouver et réguler avec une légitimité renforcée.

1.2. De la reconstruction à la mondialisation : genèse d'un système concurrentiel ouvert

De l'après-guerre à l'aube des années 2000, l'économie mondiale a connu une succession de six grandes séquences, qui ont progressivement déplacé le centre de gravité d'une compétitivité presque exclusivement productiviste vers une dualité à la fois positive et, surtout, mature : compétitivité-coopétitivité.

Même si, à première lecture, cette dualité peut sembler paradoxale, voire antagoniste, l'évolution des pratiques et des cadres analytiques montre que l'IEco tend à renforcer simultanément ces deux dimensions. En effet, cette coexistence ne traduit pas une contradiction, mais plutôt un degré élevé de maturité de la conscience collective à l'échelle planétaire. D'une part, la compétitivité demeure un moteur fondamental du progrès, en exprimant l'ambition, la motivation et une forme d'égoïsme rationnel, constitutifs et légitimes de toute dynamique

d'innovation et de performance. D'autre part, la montée en complexité des défis nationaux et globaux, notamment la raréfaction des ressources naturelles, la pression démographique, l'intensification du changement climatique et l'interdépendance accrue des systèmes, a introduit une lucidité nouvelle quant aux limites de l'action isolée.

C'est précisément dans ce contexte que la compétitivité s'est progressivement « domestiquée », non pas affaiblie, mais contrainte de cohabiter avec une coopérativité mesurée et maîtrisée. Dès lors, cette dernière constitue un autre moteur du progrès, qui ne s'active pleinement que lorsque les acteurs, ancrés dans des réalités locales, reconnaissent leur impuissance individuelle face à des défis systémiques de portée planétaire, et acceptent de coopérer en pensant globalement, sans renoncer pour autant à leurs intérêts stratégiques. En ce sens, cette évolution traduit l'adoption progressive des principes de durabilité, qui imposent d'articuler performance, responsabilité et coopération à l'échelle des systèmes.

Toutefois, compte tenu des spécificités contextuelles propres à chacune des phases de son évolution -exposées ci-après- la dynamique de l'Intelligence Économique, initialement fondée sur le capital productif et les capacités industrielles, s'est progressivement orientée vers la maîtrise de l'information, des normes et des signaux stratégiques, tout en accompagnant et en structurant l'articulation mature entre concurrence et coopération. C'est précisément cette progression graduelle qui éclaire l'enchaînement des phases, lesquelles ont contribué, par paliers, à installer les conditions d'émergence de l'IÉco comme cadre organisé de gouvernance :

- Reconstruction et capital productif (1945–1960) : Dans l'immédiat après-guerre, la priorité consistait à rétablir les capacités de production et à reconstruire les infrastructures stratégiques. Le Plan Marshall avait mobilisé des ressources financières substantielles entre 1948 et 1952 pour relancer l'appareil industriel européen et moderniser les équipements, soutenant ainsi, une croissance élevée en Europe de l'Ouest portée par l'investissement et la diffusion technologique [16, 17].

La puissance économique reposait alors principalement sur le capital physique disponible et la capacité productive installée.

- Saturation des marchés et insertion des techniques commerciales (années 1960) : À mesure que les capacités industrielles se renforçaient, plusieurs marchés ont été saturés. L'une des réponses avait visé de structurer davantage la fonction commerciale en se basant sur les études de la clientèle, l'organisation de la force de vente, la prospection méthodique et la gestion des réseaux de distribution. L'information sur la demande est ainsi devenue un levier pratique d'ajustement des volumes et d'écoulement des stocks [18].

La compétitivité commença ainsi à dépendre aussi de la capacité à vendre mieux, et non plus seulement à produire davantage.

- Chocs énergétiques et redéfinition des équilibres (1970–1980) : Les crises pétrolières avaient mis en évidence la dépendance des économies au coût et à la disponibilité de l'énergie. La hausse brutale des prix, les tensions géopolitiques et les risques d'approvisionnement ont reconfiguré les rapports de force et installé l'énergie comme une contrainte stratégique majeure [19].
La vulnérabilité énergétique devint un paramètre central de la décision économique, révélant la nécessité d'une lecture informée, structurée et anticipatrice des risques.
- Saturation des marchés et insertion du marketing (1970–1980) : Dans ce contexte plus concurrentiel, où les marchés matures ne pouvaient plus absorber indéfiniment la production, l'entreprise avait dû aller au-delà des seules techniques de vente. Le marketing s'est affirmé depuis comme un dispositif structuré visant, notamment la segmentation, le positionnement, la différenciation, la gestion de l'image et de l'offre. Les données relatives aux marchés, aux clients et aux concurrents se sont progressivement traitées comme des actifs à exploiter systématiquement [20].
La compétitivité se déplaça davantage vers la capacité à analyser et utiliser l'information.
- Optimisation industrielle et qualité totale (1980–1990) : La pression sur les coûts, l'intensification des échanges internationaux et les exigences de fiabilité ont généralisé les démarches d'amélioration continue, tels que Kaizen, Just-in-Time, et contrôle statistique des procédés. La première norme ISO 9001 avait consacré l'importance de la traçabilité, de la documentation et du management par la preuve [21]. Parallèlement, la finance avait renforcé l'usage d'indicateurs standardisés de performance, faisant de la mesure un langage commun [3].
La compétitivité repose dès lors sur des systèmes structurés de mesure, de contrôle et de normalisation.
- Économie de la connaissance et avènement de l'IEco (1990–2000) : Avec la révolution numérique, l'intégration des réseaux d'information et la montée de la concurrence technologique, l'information est désormais devenue une ressource stratégique centrale. Le Rapport Martre a défini l'IEco comme un ensemble coordonné d'actions de recherche, de traitement et de diffusion de l'information utile à la décision [1]. La maîtrise des flux d'information, des référentiels et des normes s'est alors imposée comme un déterminant clé de la puissance économique [2].
La compétitivité se joue désormais sur la capacité à détecter, analyser, protéger et influencer.

Pris dans leur continuité, ces six mouvements dessinent une trajectoire nette : l'avantage compétitif s'est progressivement déplacé du seul capital matériel vers la maîtrise organisée de l'information, de la mesure et des normes. Ce déplacement a constitué la matrice de l'IEco contemporaine, conçue comme un système structuré de pilotage par l'information stratégique.

1.3. L'IEco : d'un outil de compétitivité à un cadre de gouvernance

L'IEco s'est développée en réponse conjointe à la mondialisation des échanges, à la numérisation et à la circulation accélérée de l'information, ainsi qu'à l'intensification des rivalités géoéconomiques. Elle a émergé comme une réponse structurée visant à mieux connaître les environnements, mieux lire les rapports de force, mieux protéger les actifs sensibles et mieux orienter l'action. Elle a progressivement cessé d'être un simple soutien tactique pour devenir une manière organisée de maîtriser l'information stratégique. Dans cette dynamique, l'IEco peut être analysée comme reposant sur quatre fonctions essentielles et indissociables, qui structurent l'ensemble de la démarche et conditionnent son efficacité :

- La veille permet d'identifier, de capter et de qualifier les signaux pertinents issus de l'environnement économique, technologique, réglementaire et géopolitique.
- L'analyse et la scénarisation transforment ces signaux en connaissances interprétées, en hypothèses d'évolution et en éclairages structurés utiles à la prise de décision stratégique.
- La protection vise à sécuriser le patrimoine informationnel, technologique, immatériel et relationnel des organisations, en limitant les risques de captation, de dépendance ou de vulnérabilité stratégique.
- L'influence permet de peser sur les normes, les cadres réglementaires, les marchés et les choix d'autres acteurs, en agissant de manière proactive sur les processus de formation de la décision [1].

Ces fonctions s'exercent de façon transversale, depuis le niveau des entreprises et des filières jusqu'à celui des politiques publiques nationales et territoriales, soulignant ainsi le caractère systémique et multi-échelles de l'IEco. Cette montée en puissance s'est accompagnée d'une institutionnalisation progressive :

- Aux États-Unis, la création de la SCIP (Strategic and Competitive Intelligence Professionals) en 1986 a contribué à formaliser des pratiques professionnelles et des règles de conduite partagées [22] ;
- Au Japon, la réorganisation du MITI (Ministry of International Trade and Industry – Japon) en METI (Ministry of Economy, Trade and Industry – Japon) en 2001 a intégré la veille technologique et industrielle au cœur de la stratégie économique nationale, en articulant information, politique industrielle et commerce extérieur [23] ;
- En Europe, différents programmes et dispositifs ont mobilisé des moyens importants au service de l'innovation et de la compétitivité fondée sur la connaissance [24] ;
- En France, la création d'un délégué interministériel à l'IEco en 2009, puis la mise en place du SISSE (Service de l'information stratégique et de la sécurité économiques) en 2016, ont entériné l'IEco comme fonction durable de protection, d'anticipation et de pilotage stratégique [25].

Ainsi, l'IEco s'est affirmée comme un cadre de gouvernance informationnelle intégrée, capable de transformer une information qualifiée, protégée et partagée en capital d'anticipation, en levier de compétitivité et en outil de sécurité économique.

Dans la conjoncture actuelle, marquée par des tensions énergétiques, climatiques, sociales et technologiques, une question émerge naturellement et ouvre la suite de la réflexion : un dispositif aussi éprouvé pourrait-il être transposé vers des champs transversaux, structurants et transformants, où la performance repose sur des données physiques, mesurables, traçables et vérifiables ?

1.4. IEco éprouvée : transposer les acquis vers des secteurs structurants, transformant et transversaux.

L'IEco gagnerait à se penser à la lumière de nouvelles exigences, notamment celles dictées par le développement durable, les principes de la coopération, l'esprit de la diplomatie verte et la dynamique géoénergétique et géopolitique actuelle. Inscrire ces dimensions au cœur de l'IEco relève à la fois d'un choix d'efficacité et d'un choix de responsabilité. En effet, une organisation qui prend en compte les trajectoires bas carbone, l'inclusion territoriale et l'économie circulaire devient plus lisible, plus solvable et plus légitime dans les arènes normatives [2, 4, 26].

Dans cette logique, la coopération occuperait une place centrale, surtout lorsque l'intérêt général l'exige, notamment en matière de sécurité d'approvisionnement, de stabilité des règles ou d'innovation ouverte, les acteurs ont intérêt à partager certaines informations, à coconstruire des standards et à mutualiser une partie de la veille. Des coalitions structurées et des plateformes d'échange renforcent alors la finesse des analyses, la solidité des anticipations et la capacité de résistance collective face aux chocs [27].

Parallèlement, la structure des risques et des interdépendances se complexifie. Cette évolution plaide pour une transposition de l'IEco vers des secteurs structurants à fort pouvoir de transformation. La transposition la plus féconde cible un champ transversal, relié à la majorité des maillons de la chaîne de valeur, et adossé à des indicateurs physiques ainsi qu'à des paramètres de suivi et de contrôle mesurables, traçables et auditables. Un tel ancrage permet de convertir la complexité en atout, en offrant un pilotage central et transversal capable d'aligner les signaux locaux, les enjeux globaux et des décisions opposables. Dès lors, la valeur ajoutée de l'IEco s'accroît lorsque les flux d'information sectoriels reposent sur des mesures étayées par des référentiels partagés et auditables, condition pour transformer l'expérience en preuve, puis la preuve en décision [2, 3, 5].

Dans cette perspective, l'architecture de l'IEco – mère - pourrait s'élargir pour s'appuyer sur des intelligences sectorielles dédiées à des domaines transversaux, structurants et transformants. Chacune de ces intelligences, exercerait un double rôle : d'une part, piloter son propre champ en s'inspirant des principes de l'IEco, adaptés à ses spécificités métiers ; d'autre part, remonter vers le niveau central (l'IEco mère) un patrimoine immatériel consolidé, composé de données qualifiées, d'indicateurs stabilisés et de résultats de veille et de normalisation. Ce fonctionnement en réseau produit une circulation vertueuse entre secteurs, clarifie l'action, réduit les angles morts et renforce la souveraineté de l'ensemble. L'IEne se

proposerait précisément comme l'une de ces intelligences sectorielles, dédiée à l'énergie et au carbone, et constituerait le cœur des paragraphes suivants.

2. État des lieux et cadre de transposabilité vers des champs structurants et transformants

Dans ce paragraphe, un état des lieux rigoureux est établi à partir d'hypothèses explicites. D'abord, l'observation est structurée de manière à être transformée en diagnostic opérable, reposant sur la mise en évidence fine des interdépendances entre les secteurs, les territoires et les usages, condition indispensable pour dépasser une lecture sectorielle fragmentée. Puis, l'analyse met en évidence le rôle transversal de l'énergie, en identifiant les principaux nœuds de consommation et d'émissions, tout en intégrant la matérialité croissante du numérique et de l'IA. Ensuite, l'attention se porte sur les dispositifs de management de l'énergie, dont la fragmentation structurelle continue de freiner le passage de la mesure à la décision stratégique. Enfin, l'examen du cas du Maroc éclaire les trajectoires de décarbonation et les enjeux de compétitivité, et oriente la réflexion vers les conditions de transposabilité vers des champs véritablement structurants et transformants.

2.1. Économie en réseaux : des chaînes de valeur interconnectées

Comme nous le savons, les économies contemporaines fonctionnent à la manière d'une toile d'araignée, dans laquelle chaque nœud est relié aux autres par des interdépendances plus ou moins visibles. Lorsqu'un segment de la toile se fragilise, le signal d'alerte se propage sans atténuation excessive, affecte progressivement l'ensemble du système et finit par atteindre le centre décisionnel, lequel est, en principe, en capacité de détecter ces tensions et d'ajuster sa réponse. Dans un tel système maillé, ignorer ces liens reviendrait à piloter à vue, au risque de décisions tardives ou inadaptées.

Dans cette configuration, chaque décision prise en un point du réseau produit des effets de ricochet sur les autres. Cette transversalité devient un levier de performance collective dès lors qu'elle est interprétée à travers une variable d'intégration claire. Par sa nature universelle, mesurable et traçable, l'énergie apparaît comme cette variable d'équilibre, capable d'articuler gouvernance, financement, compétences et durabilité au sein d'un cadre décisionnel partagé [3, 5].

Ce maillage, indispensable à la diffusion des valeurs ajoutées au sein des écosystèmes économiques, conduit les grandes fonctions économiques à s'appuyer sur un socle systémique commun qui articule le système productif et financier, l'énergie, l'environnement et les technologies numériques. La relation entre ces domaines est fondamentalement réciproque, dans la mesure où aucun développement maîtrisé ne peut se consolider sans stabilité énergétique, tandis qu'aucune transition énergétique n'aboutit sans une base économique, technologique et institutionnelle robuste [6].

Dans ce cadre, la qualité de l'énergie disponible conditionne, de manière transversale, la continuité de la production, la capacité d'innovation, la sécurité des chaînes d'approvisionnement et la crédibilité des trajectoires bas carbone.

2.2. L'énergie, catalyseur transversal du développement et de la résilience

Au cœur de cette économie déjà réseautée, l'énergie occupe une place singulière en constituant un principe vital des systèmes productifs, sociaux et territoriaux. Par voie de conséquence, toute variation de prix, de qualité ou de disponibilité se répercute immédiatement sur les coûts, la compétitivité, l'emploi, la cohésion sociale et la stabilité macroéconomique [6]. Elle devient ainsi un révélateur à la fois des vulnérabilités structurelles et des marges de manœuvre disponibles.

Son apport décisif au suivi, au contrôle et à l'éclairage des trajectoires de productivité tient au fait qu'elle génère des grandeurs physiques mesurables, lesquelles permettent d'objectiver les risques et de structurer la résilience des systèmes. Lorsqu'elles sont correctement instrumentées, qualifiées et interprétées, ces données rendent visibles les dépendances critiques, les goulots d'étranglement, les surconsommations, les points de fragilité des réseaux ainsi que les marges de flexibilité mobilisables. Elles constituent ainsi un socle de gouvernance fondé sur la preuve, venant compléter et encadrer des approches intégrant également des éléments de nature déclarative, comme le soulignent les référentiels normatifs européens et internationaux [2, 5].

Parce qu'elle irrigue l'industrie, le transport, le bâtiment, le numérique, le dessalement de l'eau de mer, la logistique et les services publics, l'énergie assumerait pleinement un rôle de variable d'intégration transversale. Lorsqu'elle serait adossée à des cadres de gouvernance et d'instrumentation adaptés, elle assurerait l'alignement des politiques publiques, des stratégies d'entreprise et des décisions d'investissement autour d'objectifs partagés de compétitivité, de sécurité et de durabilité [3].

Dans cette perspective, certains secteurs, en particulier l'industrie et le transport, apparaissent comme des terrains d'épreuve essentiels, à la fois par leur poids en matière de consommation et d'émissions, par leur forte exposition aux normes et aux marchés internationaux, et par la disponibilité de données physiques. Ces caractéristiques les désignent ainsi comme des laboratoires privilégiés d'un pilotage par la mesure, mis au service d'une gouvernance résiliente et démontrable.

2.3. Industrie et transport : noyau dur des consommations énergétiques et des émissions

À partir de ce constat d'interdépendances en réseaux, l'analyse se concentre sur les secteurs dans lesquels l'énergie et le carbone pèsent le plus fortement, et où une gouvernance par la mesure peut être éprouvée sans ambiguïté. L'industrie et le transport s'imposent ainsi comme le noyau dur des consommations énergétiques et des émissions, mais aussi comme des laboratoires de crédibilité pour toute stratégie fondée sur le principe « mesurer mieux pour piloter juste et décider vite ». Leur intensité énergétique, leur exposition directe aux prix et aux normes, ainsi que leur insertion dans les chaînes de valeur mondiales en font des cas tests structurants.

À l'échelle mondiale, ces deux domaines se distinguent par des ordres de grandeur particulièrement significatifs :

- L'industrie demeure fortement consommatrice d'énergie et centrale dans les dynamiques de décarbonation, concentrant environ 37 % de la consommation finale d'énergie en 2022 et près de 9 GtCO₂ d'émissions directes, soit approximativement 25 % des émissions du système énergétique, ce qui la place au cœur du défi énergie-carbone et conditionne la crédibilité des trajectoires de neutralité [6, 28].
- Le transport constitue l'autre pilier critique, représentant près de 33 % de la consommation finale d'énergie et environ 25 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie, avec des émissions proches de 8 GtCO₂ en 2022, portées notamment par la reprise des mobilités post-pandémie malgré la progression des véhicules électriques [6, 28].

Pris ensemble, l'industrie et le transport forment ainsi un espace prioritaire dans lequel la qualité des données, la robustesse des indicateurs et la capacité à relier les consommations, les émissions et les décisions deviennent déterminantes. Dans ce contexte, l'IA et ses infrastructures s'imposent comme des outils structurants pour collecter, analyser, stocker et croiser des volumes informationnels massifs. Toutefois, même lorsque les services sont numériques, leur assise demeure fondamentalement physique, les datacenters constituant des consommateurs majeurs d'énergie et d'eau, ce qui réintroduit pleinement ces infrastructures dans le champ des arbitrages énergie-carbone.

2.4. Datacenters : piliers physiques de l'IA numérique et enjeux du nexus énergie-IA-eau

Avec plus de cinq milliards d'utilisateurs et environ trente milliards d'équipements connectés, l'essor du numérique repose en réalité sur une infrastructure physique, constituée principalement par les datacenters. Loin de toute immatérialité, ces centres devenus incontournables, présentent toutefois une demande soutenue en électricité et en eau. Ils consomment déjà entre 1 et 2 % de l'électricité mondiale, et jusqu'à 10 % dans certains pays avancés, ce qui confère à leur empreinte énergétique et hydrique un caractère désormais structurant [6, 29].

De plus, le cœur de l'IA fonctionne en continu et mobilise des puissances élevées, à la fois pour le calcul et pour le refroidissement, ce dernier pouvant représenter jusqu'à 40 % de la consommation électrique totale d'un site. L'eau de refroidissement acquiert alors un caractère critique, car des milliards de litres sont requis chaque année, parfois en concurrence avec la sécurité alimentaire et les usages domestiques.

Dans les zones arides, la contrainte hydrique mobilise directement le nexus eau-énergie, dans la mesure où l'eau de refroidissement peut provenir du dessalement de l'eau de mer. Or, ce procédé repose sur une consommation électrique élevée, transformant un besoin en eau en demande énergétique additionnelle, avec des répercussions directes sur les émissions, les coûts et la stabilité des réseaux. Le pilotage de ces systèmes implique dès lors une intégration conjointe des bilans électrique et hydrique, appuyée sur des indicateurs traçables, opposables et partagés entre les acteurs [6, 29].

Dans ce cadre particulier, même si la part des datacenters ne dépasse pas 10 % de la consommation finale d'électricité à l'échelle mondiale, leur impact sur les réseaux électriques reste structurel. Celui-ci tient à une demande fortement concentrée géographiquement, à des puissances presque continues et peu flexibles du point de vue des profils de charge, ainsi qu'à un rythme de croissance plus rapide que celui du renforcement des réseaux, dans un contexte où l'exigence d'une alimentation à la fois fiable et de plus en plus bas carbone se renforce [6].

Dans ce contexte, le Maroc présente des atouts réels pour engager une approche intégrée du nexus énergie-IA-eau, à condition de mettre en cohérence les choix d'infrastructures, les modes de gouvernance et les logiques de planification. Le traitement local des données constitue un levier de souveraineté et de sécurité, tandis que l'alimentation des centres de données pourrait s'appuyer sur un mix énergétique progressivement diversifié, soutenu par le développement des énergies renouvelables, des compétences locales et de cadres normatifs en matière de protection des données [30, 31]. Toutefois, la combinaison de puissances élevées, de concentration spatiale, de rigidité de la demande et de rythmes de croissance soutenus confère aux datacenters un caractère critique en matière de planification énergétique, de gestion hydrique et de gouvernance du nexus énergie-IA-eau [6, 29].

Dès lors, chaque choix technologique, qu'il concerne le refroidissement, l'alimentation électrique ou le recours au dessalement, devrait être arbitré à l'aune de métriques communes, traçables et auditable, afin d'éclairer les décisions et d'orienter les trajectoires vers une performance durable, portée par des SMÉn (Systèmes de Management de l'Énergie) convergents et interopérables. Un socle d'alimentation en données mesurables pour une gouvernance du nexus énergie-IA-eau constitue, à ce titre, une contribution originale.

2.5. Management de l'énergie : des mécanismes diversifiés et un fonctionnement fragmenté

La gestion de l'énergie s'appuie aujourd'hui sur un ensemble de dispositifs et de démarches qui ont chacun démontré leur utilité, mais qui demeurent le plus souvent fragmentés, faiblement coordonnés et peu articulés entre eux, ce qui limite l'usage de leur potentiel. Dès lors, l'enjeu consiste à faire converger ces dispositifs au sein d'un cadre commun, interopérable et gouverné selon une stratégie explicite. C'est précisément à ce niveau que l'IÉne, appuyée sur l'IA, renforce à la fois son intérêt opérationnel, son sens et sa pertinence.

Il est à noter que d'abord, les SMÉn visent généralement la réduction des consommations et l'amélioration continue de la performance énergétique, en s'appuyant, notamment sur la norme ISO 50001 et sur des outils structurants tels que les audits énergétiques, les indicateurs de performance ainsi que des programmes et des plans d'action formalisés. Les retours d'expérience font état d'économies comprises entre 10 et 20 %, correspondant à des centaines de milliers de tonnes de CO₂ évitées chaque année [32]. Toutefois, cette approche demeure largement utilisée à l'échelle organisationnelle et se heurte à une capacité d'articulation encore limitée avec les dynamiques nationales ou territoriales, en particulier en matière de planification, de pilotage multi-acteurs et de cohérence des trajectoires énergie-carbone.

Ensuite, les solutions de type « Smart Energy » et de digitalisation apportent une flexibilité accrue en permettant de piloter les réseaux, de collecter des données en temps réel et de

développer des services énergétiques plus fins. Malgré ces atouts, leur déploiement demeure souvent partiel, à cause de leur interopérabilité avec les démarches normatives - en particulier les référentiels ISO 50001, ISO 14064 et ISO 14067 - reste limitée, alors même que ces standards constituent des repères incontournables pour la mesure et la comparaison des performances [33, 34, 35].

En parallèle, d'autres démarches complètent ce paysage sans toujours s'aligner entre elles :

- La gestion de la demande (Demand Side Management, DSM) qui vise à inciter les usagers à modérer ou à déplacer leurs consommations ;
- Les marchés de l'énergie et du carbone (certificats verts, mécanisme d'ajustement carbone aux frontières – CBAM, tarification incitative) qui reposent sur des indicateurs fiables et comparables [11, 36] ;
- La planification énergétique territoriale, avec des initiatives structurantes, notamment l'usage de bus électriques pour les grandes métropoles ou le développement de l'irrigation solaire, qui peinent encore à se connecter de manière fluide aux stratégies nationales.

Ces outils composent un véritable arsenal dont l'interopérabilité reste encore largement sous-exploitée partout dans le monde, y compris au Maroc où le mix énergétique présente des spécificités motivantes [6].

2.6. Cas du Maroc : topologie énergétique, trajectoires de décarbonation et compétitivité

Dans ce contexte, pour le Maroc comme pour d'autres économies ouvertes, la maîtrise conjointe des volumes énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre ne relève plus uniquement de l'ambition climatique. Elle s'impose désormais comme un impératif de compétitivité et de résilience, ainsi qu'une condition de sécurisation de l'accès aux marchés, de stabilisation des coûts et de crédibilisation des engagements de transition [8, 36].

Ce cadre de pilotage global prend un relief particulier dans le cas du Maroc, où la structure du système énergétique, caractérisée par un mix encore largement dominé par les produits pétroliers, complétés par le charbon et le gaz naturel, accroît la sensibilité aux chocs de prix externes et aux contraintes climatiques. Cette configuration pèse durablement sur la facture énergétique extérieure et contribue de manière significative aux émissions nationales, alors que le contexte est marqué par une croissance soutenue de la demande en carburants [6]. En 2021, l'approvisionnement énergétique total a avoisiné 23 Mtep (Méga Tonne Équivalent Pétrole) avec une dépendance extérieure proche de 90 %, tandis que les énergies renouvelables, bien qu'en progression accélérée et visible, conservent un poids encore limité dans l'approvisionnement total [30, 31].

Dans ces conditions, la trajectoire de décarbonation appelle une inflexion nette, fondée sur l'accélération des investissements, le renforcement de la flexibilité des réseaux, une intégration accrue des énergies renouvelables et de leur culture d'usage, ainsi que sur l'appropriation de leurs contraintes et de leurs opportunités par les utilisateurs, les décideurs territoriaux et les opérateurs. Cette évolution suppose, notamment des adaptations comportementales tenant

compte des contextes de consommation, des signaux de prix et des contraintes de disponibilité et des engagements du Royaume à l'internationale en matière de décarbonation et des ODD (Objectifs du Développement Durable). Elle repose également sur l'amélioration du rendement global des usages et la réduction de l'intensité carbone à l'horizon 2030 [28]. À défaut, les conséquences sur le pilotage deviennent immédiates : avec des volumes consommés élevés et carbonés, l'intensité des émissions progresse et fragilise la compétitivité, la souveraineté et l'attractivité. Le pilotage nécessite dès lors un recours à des données traçables et à des indicateurs énergie-carbone harmonisés, de bout en bout, afin de relier chaque choix technique et technologique et chaque évolution d'usage à ses effets mesurés [6, 11, 28].

Dans ce contexte, en considérant la durabilité comme une finalité structurante et non comme un objectif ponctuel, une interrogation centrale s'imposerait. Serait-il encore pertinent de piloter l'énergie au moyen d'outils fragmentés et de lectures partielles, alors que les enjeux énergétiques, climatiques et économiques apparaîtraient désormais étroitement interdépendants, dans un environnement marqué à la fois par la coopétitivité entre territoires et par ses dynamiques au sein d'un même territoire ? Cette interrogation dépasserait le seul registre conceptuel pour s'inscrire dans la continuité d'une intelligence éprouvée, ayant démontré sa capacité à structurer l'information stratégique, à organiser la veille et à sécuriser la décision dans des systèmes complexes [1, 2]. Dès lors, les principes de l'IEco pourraient-ils être transposés, totalement ou partiellement, au champ énergétique, afin d'en faire un espace de gouvernance fondé sur des données physiques facilement mesurables, traçables et vérifiables, à la hauteur des exigences de souveraineté, de compétitivité, de coopétitivité et de durabilité ?

2.7. Transposabilité de l'IEco vers l'énergie : une évolution nécessaire et structurante

L'IEco se heurte parfois à une limite structurante, liée à l'absence d'un socle informationnel physique, stable et partagé, fondé sur des grandeurs objectivables. Une partie de ses indicateurs demeure en effet composite et sujette à des interprétations, ce qui pourrait fragiliser la comparabilité objective, la traçabilité et, in fine, la robustesse des décisions. Cette fragilité pèse simultanément sur la construction d'une compétitivité durable et sur la capacité à organiser une coopétitivité féconde, tant entre territoires qu'au sein d'un même territoire ou de filières, faute de métriques communes et scientifiquement éprouvées [2, 3].

À partir de ce constat, la transposition des principes de l'IEco vers le champ énergétique apparaît à la fois nécessaire et solidement fondée, dans la mesure où elle irrigue les chaînes de valeur, génère des données d'origine physique et carbone, et conditionne de manière directe la compétitivité, la coopétitivité et la souveraineté [3, 6]. Une gouvernance énergétique inspirée de l'IEco offrirait ainsi la possibilité de proposer une lecture unifiée des flux, des risques et des opportunités, tout en préservant l'agilité opérationnelle nécessaire à l'action.

Cette transposabilité reposerait sur une analogie significative, fondée sur l'intercorrélation entre les profils de consommation énergétique et la productivité économique, toutes deux façonnées par des contraintes partagées et par des choix structurants engageant des trajectoires durables. Dans les deux champs, une information qualifiée, entendue au sens de la commandabilité et de l'observabilité, permettrait de réduire l'incertitude, d'accélérer l'apprentissage et de contribuer à la stabilisation de l'avantage concurrentiel [1, 3, 8].

Sur le plan méthodologique, une continuité claire apparaîtrait, dans la mesure où il s'agirait de capter, qualifier, protéger puis exploiter l'information afin de contrôler, anticiper et orienter l'action. La donnée énergétique, interprétée à l'aune des niveaux d'activité, des rendements d'usage et des contextes sectoriels, deviendrait ainsi un capital décisionnel, mesuré au plus près des usages, tracé dans des référentiels partagés, interprété par métier et consolidé au niveau central [2, 5]. Dans ce cadre, les choix entre le coût, la performance et les trajectoires bas carbone gagneraient en justesse et en traçabilité, en cohérence avec des cadres de référence tels que le GHG Protocol [11].

En définitive, l'énergie s'affirme comme une infrastructure de transversalité, reliant les secteurs, les territoires et les chaînes de valeur. La gouvernabilité repose alors sur des fondements partagés, combinant des définitions stabilisées, des indicateurs robustes, des données traçables et des boucles décisionnelles explicables. Dans ce prolongement, l'IA et le big data pourraient jouer un rôle de pont opérationnel entre l'IEco et l'IEne, tandis que la formation agit comme levier d'appropriation et de diffusion. Les interdépendances deviennent ainsi pilotables, permettant à une économie maillée de transformer la complexité en avantage concurrentiel durable, en alignant compétitivité, coopétitivité, inclusion et trajectoires carbone crédibles [1, 2, 6]. Sur ces bases, le paragraphe suivant précisera le cadre conceptuel et les piliers opérationnels de l'Intelligence Énergétique.

3. IEne : Fondements et définition

Dans la continuité et le prolongement de l'IEco, l'IEne est envisagée comme une réponse structurée aux exigences d'un contexte dans lequel l'énergie concentre simultanément des enjeux de souveraineté, de compétitivité, de coopétitivité, de climat et de durabilité. Sans se substituer à l'IEco, elle se positionne comme un cadre de gouvernance complémentaire, fondé sur des grandeurs physiques mesurables, permettant d'articuler de manière cohérente des données exploitables et vérifiables, des contraintes techniques, des signaux économiques et des exigences environnementales. À ce titre, l'IEne prolonge l'IEco en élargissant son champ d'application aux réalités physiques de l'énergie, tout en la renforçant (l'IEco) par l'apport d'un socle objectif, vérifiable et directement actionnable, propre à éclairer les choix stratégiques et à rendre les trajectoires énergie-carbone durablement pilotables.

Telle qu'elle est conçue, l'IEne devrait se déployer en urgence sur le champ de l'énergie, dont la nature est à la fois transversale, structurante et profondément transformante. Cette urgence se trouverait d'abord fondée sur l'impact environnemental des systèmes énergétiques, responsables d'environ 75 % des émissions mondiales de GES, ce qui place l'énergie au cœur des déséquilibres climatiques globaux [6, 8].

Par ailleurs, les chocs de prix reconfigurent durablement les rapports de force économiques, faisant de l'énergie simultanément un levier de puissance, une source de vulnérabilité et un enjeu central de souveraineté. Dans ce contexte, elle deviendrait également un terrain privilégié de coopétitivité, dès lors que le partage de référentiels de performance et la comparaison des trajectoires reposeraient sur des preuves mesurables et auditable [6, 8].

Dans ce cadre, l'IÉne viserait quatre finalités majeures :

- Contribuer à la sécurisation de l'approvisionnement énergétique ;
- Améliorer la compétitivité tout en renforçant la coopétitivité ;
- Renforcer la résilience des systèmes énergétiques et par conséquent, de l'appareil économique;
- Soutenir les trajectoires de décarbonation.

Elle s'adresse en priorité aux processus fortement énergivores, aux territoires et aux chaînes d'approvisionnement, d'une part, ainsi qu'aux opérateurs, aux gestionnaires de réseaux et aux acteurs financiers, d'autre part. Face à la diversité des domaines d'application, allant de la source énergétique jusqu'au produit et à son accès au marché, la question centrale explorée dans ce paragraphe porte sur la délimitation de ses périmètres d'action, ainsi que sur la clarification de ses fondements conceptuels et de sa définition opérationnelle.

3.1. IÉne : deux modes opératoires et augmentation de l'IÉco par un socle physique

La transposition vers l'IÉne s'impose comme une évolution à la fois naturelle et nécessaire, lisible à travers deux modes de fonctionnement distincts mais étroitement articulés entre eux :

- En mode autonome, l'IÉne pilote l'énergie et le carbone à partir de métriques universelles et normalisées, telles que la sécurité d'approvisionnement, l'efficacité énergétique, l'exposition partielle ou totale au carbone, les coûts et les facteurs d'émission. Ces grandeurs, mesurables et auditables, sont encadrées par des référentiels reconnus, notamment ISO 50001, ISO 14064 et ISO 14067 [33, 34, 35].

Ainsi, l'IÉne met en évidence le rôle stratégique des flux énergétiques dans la compétitivité, la résilience des chaînes de valeur et l'alignement sur des trajectoires bas carbone crédibles [6, 7]. Elle fournit, par conséquent, une base de comparaison partagée, renforçant la coopétitivité entre entreprises, filières et territoires.

- En mode contributif, l'IÉne acquiert une portée décisive, en pilotant l'énergie au plus près des usages, pour permettre l'alimentation de l'IÉco, notamment par des indicateurs physiques vérifiables, tels que les profils de consommation par procédé, l'intensité énergétique par unité de valeur produite, l'empreinte carbone des produits et services, ainsi que les marges de progrès issues des audits énergétiques et des systèmes de management [2, 32]. Il est à rappeler que ces données existent souvent, mais d'une manière plutôt confinée aux opérations techniques ou à des rapports faiblement connectés aux outils de décision stratégique. Les faire remonter au cœur de l'IÉco renforce la crédibilité, la transparence et l'objectivité du pilotage.

Ce socle, partagé et validé par les communautés scientifiques, académiques, techniques et professionnelles, devient également un vecteur de coopétitivité, renforçant les plateformes d'échange, les programmes de recherche et développement, les stratégies d'innovation et les alliances industrielles autour de standards communs [3].

Par ailleurs, l'exemple de secteurs énergivores, tels que la cimenterie où l'énergie représente typiquement 30 à 40 % des coûts de production et où les intensités d'émission demeurent élevées, illustre cette logique [6], vue que dans ces secteurs, les profils énergétiques devraient constituer de véritables signatures de productivité. Ainsi, la comparaison inter-sites, inter-entreprises ou inter-territoires, lorsqu'elle repose sur des métriques harmonisées, pourraient nourrir simultanément la concurrence et la coopération, en révélant des marges de progrès mutualisables et des bonnes pratiques transférables.

3.2. IÉne : esprit d'une démarche structurée

L'analyse gagne à intégrer des paramètres contextualisés, tels que la volatilité des marchés, les contraintes géoénergétique et géopolitiques, ainsi que le niveau d'exposition au carbone, notamment à travers des mécanismes réglementaires comme le CBAM [12, 37]. Lorsqu'ils sont pondérés, actualisés et traités selon une rigueur scientifique, ces paramètres permettent d'affiner les profils de consommation et de risque, en reliant de manière plus étroite - ensemble - les trajectoires énergétiques, les dynamiques économiques et les contraintes réglementaires.

L'innovation centrale portée par l'IÉne résiderait alors dans la construction d'une intercorrélation robuste et contextualisée entre le profil de productivité économique et le profil de consommation énergétique et d'empreinte carbone. Une fois établie, discutée et consolidée, cette intercorrélation deviendrait un principe directeur de pilotage, au service de l'identification des vulnérabilités, de la détection des opportunités de création de valeur et de la hiérarchisation des investissements.

Ainsi, la propagation du profil énergie-carbone, le long de la chaîne de valeur, constituerait alors un outil d'analyse systémique particulièrement puissant, qui permet d'anticiper les gains potentiels, de repérer les points de fragilité, d'orienter les investissements vers les solutions les plus efficaces et d'éclairer des politiques industrielles pour plus de cohérence avec les ODD et les trajectoires de neutralité carbone. De plus, la mise en commun de ces profils, selon des formats normalisés et validés, favoriserait en outre des dynamiques de coopération, telles que des projets de décarbonation partagés, la mutualisation d'infrastructures ou le développement de plateformes régionales d'innovation fondées sur des indicateurs communs.

3.3. Périmètre de mise en œuvre : de la source énergétique à l'accès au marché

Dans l'hypothèse de mise en place d'une IÉne, toute chaîne de valeur est lue à partir de son mix énergétique, combinant ou non, des sources fossiles et des sources à bas carbone. Dans la mesure où des énergies fortement émettrices, telles que le charbon ou certains dérivés pétroliers, sont mobilisées, des émissions de GES viennent peser sur l'empreinte carbone des produits et services.

Cependant, l'impact final ne dépend pas uniquement de l'origine des apports, mais aussi de la qualité des usages et l'efficacité de gouvernance, notamment des surconsommations, des procédés peu efficaces et un pilotage insuffisant dégradent la performance, même si la part d'énergies renouvelables augmente. En synthèse, l'empreinte reflète simultanément la composition du mix et le degré de maîtrise des usages.

En aval, l'accès à des marchés désormais fortement encadrés par des exigences croissantes en matière de contenu carbone, de traçabilité et d'auditabilité dépend de plus en plus de la capacité des acteurs à démontrer la maîtrise effective de leur empreinte carbone. Dans ce contexte, la conformité réglementaire tend à devenir un véritable avantage compétitif, tandis que la non-conformité expose à des mécanismes correctifs pénalisants, tels que des ajustements carbone aux frontières ou des restrictions d'accès aux marchés, à l'image du CBAM institué par le règlement du Parlement Européen et du Conseil de l'Union Européenne 2023/956 [12].

Dans cette logique, l'IEne se déploierait sur l'ensemble du système énergétique, de la production aux usages finaux en passant par le transport, le stockage, la conversion, et la distribution. Elle intégrerait les dispositifs de management existants et aligne les mesures sur des référentiels reconnus et sur les réglementations en vigueur. À ce titre, le GHG Protocol, les normes ISO 14064, ISO 14067 et ISO 50001 constitueraient des appuis structurants pour assurer la cohérence de la mesure, du reporting et de la vérification, ainsi que la comparabilité et l'interopérabilité des données [2].

3.4. Hypothèses structurantes : l'énergie comme signal avancé de la dynamique économique

L'IEne considérerait l'énergie comme un indicateur avancé d'activité et un levier de pilotage multiniveaux, à condition de s'appuyer sur une mesure fine et sur un dispositif rigoureux de mesure, de reporting et de vérification [5, 6].

Les hypothèses formulées ci-après relèvent d'une démarche conceptuelle et prospective. Elles ne prétendent pas à une validation empirique immédiate, mais visent à structurer l'analyse et à ouvrir des pistes de recherche falsifiables dans des travaux ultérieurs.

- H1- Indicateur avancé d'activité : signatures énergétiques potentiellement intercorrélées aux volumes produits, aux niveaux d'activité et à la productivité ;
- H2- Pilotage coordonné des flexibilités énergétiques : activation volontaire et mesurable de réductions temporaires de puissance, de reports de charge et de stockage/déstockage, en réponse à des contraintes réseau et carbone, avec contrôle de performance et auditabilité ;
- H3- Qualité et maintenance prédictive : détection précoce des dérives de fonctionnement, des pertes de rendement et des inefficiences systémiques ;
- H4- Avantage concurrentiel bas carbone : réduction du risque réglementaire, amélioration de la lisibilité carbone et facilitation de l'accès aux marchés soumis à des exigences croissantes de conformité ;
- H5- Levier de compétitivité et de diplomatie verte : construction de référentiels partagés, comparables et opposables, favorisant des coalitions crédibles entre acteurs publics et privés ;
- H6- Miroir structurant de l'IEco : reflet synthétique de la qualité de la gouvernance économique, de la cohérence des arbitrages et de la robustesse des trajectoires de développement.

Si ces hypothèses venaient à être validées empiriquement, l'écosystème disposerait d'un véritable système d'alerte et d'arbitrage fondé sur des signaux énergétiques explicables, traçables et auditables. Toutefois, ces hypothèses et les modèles de corrélation qu'elles appellent demeurent étroitement dépendants des conditions de disponibilité, de qualité et de gouvernance des données énergétiques et carbone mobilisées, ainsi que des contextes institutionnels, sectoriels et territoriaux dans lesquels ils s'inscrivent. En l'absence de dispositifs robustes de mesure, de MRV, ou lorsque les relations entre profils de consommation énergétique, dynamiques de production et performances économiques ne présentent pas de corrélations suffisamment robustes, explicables et reproductibles, la pertinence opérationnelle du cadre proposé devrait être reconsidérée, ajustée ou différenciée selon les contextes concernés.

Sur le plan méthodologique, ces hypothèses n'ont pas vocation à être interprétées comme des résultats établis, mais bien comme des propositions analytiques testables. À ce titre, leur validité ne peut être appréciée qu'à l'issue de travaux ultérieurs mobilisant des indicateurs adaptés. Ceux-ci peuvent notamment porter, d'une part, sur la qualité décisionnelle (cohérence des arbitrages, délais de décision, stabilité des trajectoires, ...) et, d'autre part, sur les relations énergie-économie (intensité énergétique par unité de valeur ajoutée, productivité associée aux usages énergétiques, exposition carbone, ...), tout en s'appuyant sur des critères exigeants de gouvernance des données (traçabilité, auditabilité, reproductibilité des analyses, ...).

Dans cette perspective, l'IÉne ne vise pas à produire isolément ces modèles, mais à s'articuler étroitement avec les disciplines scientifiques et techniques concernées, notamment la modélisation mathématique, les statistiques, les sciences de l'ingénieur, l'économie industrielle, les sciences de gestion et l'IA. Cette articulation, éclairée par des expériences comparables et des pratiques déjà éprouvées, a pour finalité de construire des modèles de corrélation et d'intercorrélation entre profils de consommation énergétique, dynamiques de production et performances économiques, en s'appuyant sur des méthodes reconnues. Or, ces relations ne peuvent être appréhendées de manière homogène : elles appellent une contextualisation et une différenciation sectorielle, compte tenu de l'hétérogénéité des procédés, des intensités énergétiques, des contraintes technologiques, des structures de coûts et des marges de flexibilité disponibles.

Dès lors, l'enjeu n'est pas de postuler une relation uniforme entre énergie et productivité, mais de développer des modèles contextualisés capables d'intégrer ces spécificités sectorielles. Cette exigence méthodologique s'inscrit dans un contexte plus large où la réussite des transitions devient de plus en plus exigeante et structurante, sous l'effet conjugué des contraintes environnementales, des impératifs de sécurité et des exigences de soutenabilité, entendue au sens fondateur de la durabilité. Ainsi, la modélisation ne constitue pas une finalité autonome, mais un instrument structurant au service d'un pilotage plus robuste et plus crédible des trajectoires de transformation, dans un contexte de transitions marquées par des contraintes systémiques croissantes.

Inversement, l'absence de corrélations robustes ou explicables entre profils de consommation énergétique et dynamiques économiques dans un secteur donné, ou l'incapacité de ces modèles

à améliorer effectivement la qualité des décisions stratégiques, constituerait un facteur de remise en question du cadre proposé. C'est précisément pour cette raison que l'IEne est conçue comme un cadre ouvert, réfutable et perfectible, appelé à être éprouvé empiriquement selon des contextes sectoriels et territoriaux différenciés.

À cet égard, cette approche rejoint les analyses critiques montrant que le pilotage par indicateurs, lorsqu'il repose sur des métriques uniformes et décontextualisées, peut produire des effets contre-productifs, et qu'il doit être adossé à une compréhension fine des systèmes observés, de leurs contextes et de leurs finalités [37-39].

3.5. Fondements de l'IEne : réinterpréter les réflexes de l'IEco, avec l'IA comme accélérateur

A l'instar de l'IEco, l'IEne s'adosserait au triptyque éprouvé de l'IEco - Veille, Protection, Influence - tout en le réinterprétant dans un univers où les signaux déterminants sont d'abord des grandeurs physiques mesurables. Là où l'IEco peut s'appuyer sur des informations comportant une part de subjectivité, l'IEne ambitionnerait de fonder le diagnostic, l'arbitrage et l'action sur des données robustes et opposables [1, 2].

Dans ce bouclage, l'IA jouerait un rôle d'accélérateur **décisionnel**, en transformant des flux de données hétérogènes en signaux exploitables, tout en documentant explicitement les hypothèses, les scénarios et les arbitrages. L'enjeu n'est pas de substituer l'IA à la gouvernance, mais de la rendre plus explicable, plus réactive et plus résiliente.

3.6. IEne : définition, architecture et dimensions structurantes

L'IEne désignerait un cadre cognitif et stratégique de gouvernance de l'énergie qui transposerait les principes de l'IEco vers un champ transversal et fortement transformant, en s'appuyant sur un socle de grandeurs physiques stables et auditables. Elle organiserait les flux d'énergie et de carbone en un système cohérent d'indicateurs destiné à éclairer les rapports de force, les arbitrages et les trajectoires de développement. Ainsi, l'IEne reposerait sur :

- Un socle de grandeurs physiques auditables ;
- Un système d'indicateurs lisibles ;
- Des fonctions de veille et de scénarisation ;
- Des boucles de pilotage de type « Mesure–Analyse–Décision–Rétroaction » ;
- Une infrastructure informationnelle interopérable avec l'IA.

En définitive, l'IEne permet de faire de l'énergie un langage partagé de gouvernance, capable d'articuler la compétitivité, l'inclusion et les trajectoires carbone crédibles. Le paragraphe suivant prolongerait cette définition en explorant les supports et outils, en particulier l'IA et les données, au service de l'opérationnalisation et de la convergence IEco–IEne.

4. Supports et outils : L'IA et les données au service de la convergence

Dans un contexte où l'accès aux marchés est de plus en plus conditionné à la démonstration de trajectoires bas carbone crédibles et vérifiables, et où l'énergie influe directement sur la

compétitivité des produits et des services, la qualité des décisions énergétiques s'impose comme un déterminant majeur de la performance économique et de la résilience organisationnelle. Dans cette perspective, l'IEne doit s'appuyer sur un socle technique et organisationnel robuste et pérenne, capable de transformer des flux de données hétérogènes en preuves opposables, fondées sur des mesures traçables, des indicateurs stabilisés et des scénarios documentés et explicables. L'IA, les plateformes de données auditables, le renforcement des compétences des acteurs ainsi que des mécanismes de coopération structurée constitueraient alors les leviers clés du pilotage d'une transition convergente, accélérée et maîtrisée de l'IEco vers une version augmentée par l'IA et l'IEne, intégrant pleinement la dimension énergétique au cœur des processus de décision stratégique.

4.1. IEne augmentée par l'IA : socle cognitif au service de la cohérence systémique et de l'interopérabilité

D'abord, l'IEne pourrait se positionner comme une matrice de gouvernance supérieure, destinée à dépasser la juxtaposition d'outils classiques et de démarches de management de l'énergie déjà existantes. Au lieu d'empiler des dispositifs isolés, elle rassemblerait, au sein d'un même cadre d'analyse, le management de l'énergie, la digitalisation, les mécanismes de marché, le DSM (Demand Side Management ; Gestion de la demande d'énergie) et la planification territoriale, afin de transformer un ensemble fragmenté d'initiatives en un système global, lisible et cohérent, créateur de valeur stratégique, économique, sociale et diplomatique.

Pour ce faire, elle s'appuierait, en complément des socles réglementaires, sur un socle de données unifiées, aligné sur des référentiels partagés (énergie, intensité carbone, valeur ajoutée, flexibilité, scopes 1, 2 et 3) et adossé aux normes ISO 50001, ISO 14064 et ISO 14067, de manière à garantir la comparabilité, la stabilité et l'interopérabilité généralisable [2, 5, 11]. Toutefois, ce socle de données ne prendrait toute sa portée que s'il est animé par un moteur d'analyse suffisamment puissant, capable d'ingérer, de corrélérer et d'interpréter des volumes massifs d'informations en temps quasi réel.

Dans cette architecture, l'IA s'imposerait comme le moteur analytique central de l'IEne, à la fois accélérateur de convergence, outil d'objectivation des décisions et facteur d'attractivité des écosystèmes énergétiques et industriels. Entraînée sur des jeux de données hétérogènes et soumise à des contraintes opérationnelles réelles, elle serait en mesure de s'adapter aux contextes sectoriels et territoriaux, en orchestrant la collecte, la structuration et l'interprétation de données issues, notamment des compteurs communicants, des réseaux intelligents, des jumeaux numériques et des chaînes d'approvisionnement. Par ses capacités d'apprentissage continu, de généralisation et de reconfiguration des modèles, l'IA offrirait ainsi, une flexibilité décisive pour accompagner l'évolution des procédés industriels, des marchés énergétiques et des cadres réglementaires, tout en renforçant la robustesse et l'auditabilité des processus de décision stratégique.

Ainsi, l'IA permettrait de relier de manière opérationnelle les profils et signatures énergétiques aux variables économiques et organisationnelles qui les déterminent, en identifiant précisément les facteurs à l'origine des écarts de performance observés. Par l'analyse croisée des données de production, de consommation, de coûts et de contraintes réglementaires, elle offrirait une

capacité d'anticipation des ruptures par la détection de signaux faibles et la construction de scénarios énergie-carbone intégrant explicitement les arbitrages entre les coûts, les délais et les exigences de conformité. Dans les secteurs fortement énergivores – tels que les fonderies, les cimenteries, la métallurgie et plus largement l'industrie lourde – cette approche renforcerait la capacité de l'IEne à cibler les leviers d'action les plus critiques, en objectivant les marges de manœuvre réellement mobilisables à court et moyen termes [6, 28].

Articulée à l'IEne, l'IA refermerait ainsi, avec souplesse et capacité d'explication, la chaîne allant de la mesure à la preuve, en rendant intelligibles, traçables et opposables les arbitrages reliant entre eux l'information économique, les flux énergétiques et les exigences climatiques.

4.2. Innovation, IA et jumeaux numériques : leviers d'opérationnalisation de l'IEne

Ensuite, au-delà de la gouvernance, l'IEne offrirait un cadre d'accueil privilégié pour des plateformes d'innovation interoperables, capables de modéliser, de simuler et d'optimiser des systèmes énergétiques complexes. Sur un socle de données unifiées, fiables et vérifiées, l'IA deviendrait un service transversal à haute valeur ajoutée, notamment par sa capacité à traiter des volumes massifs d'information, flexible dans ses cas d'usage, adaptable aux contextes sectoriels et territoriaux, et évolutive au rythme des technologies.

Dans cette architecture, les jumeaux numériques énergétiques joueraient un rôle central en offrant un espace de simulation agile pour tester des scénarios, réaliser des stress-tests sur les réseaux sous contraintes réelles, comparer des mix énergétiques ou des schémas tarifaires, et hiérarchiser les investissements avec une précision accrue. En s'adossant aux référentiels, aux services et aux exigences de l'IEne, ces jumeaux numériques resteraient traçables et auditables, ce qui renforcerait leur crédibilité et leur valeur d'aide à la décision. Parallèlement, l'IA porterait une série de services immédiatement opérationnels tels que :

- Détection d'anomalies sur les consommations, les rendements et les courbes de charge ;
- Prévision de la charge et des prix pour optimiser les achats et la production ;
- Optimisation multi-énergies, en coordonnant électricité, chaleur, froid, stockage et flexibilité ;
- Maintenance prédictive pour limiter les arrêts non planifiés ;
- Pilotage coordonné de l'effacement, du report et de la modulation des usages énergétiques.

Intégrés dans l'approche de l'IEne, ces services prendraient une importance particulière dans les secteurs fortement énergivores, dont la signature énergétique pèse significativement dans les comptes économiques [6, 28]. Ainsi conçue, l'IEne ne se limiterait pas à un cadre de reporting, mais constituerait un dispositif d'aide au pilotage, sans se substituer aux processus décisionnels humains. Elle évoluerait vers un dispositif opérationnel continu de simulation, de diagnostic et d'apprentissage, dans lequel l'IA assure un lien fonctionnel et permanent entre la mesure, la prédiction, le contrôle, l'alerte et le reporting. En rendant explicites les arbitrages sous contraintes physiques, économiques et réglementaires, elle permettrait de produire des décisions explicables, traçables et auditables, compatibles avec des dispositifs tels que le

CBAM, et de positionner l'IEne comme un outil robuste, adaptatif et durablement évolutif au service de la performance énergétique, de la conformité climatique et de la compétitivité économique [6, 12, 28]

Dans cette perspective, l'IEne pourrait contribuer à faire de l'IA, parfois perçue comme un facteur de pression potentielle sur les processus décisionnels, un outil d'aide à la régulation, à condition que des exigences explicites de gouvernance, de traçabilité et d'auditabilité des données et des traitements soient effectivement mises en œuvre.

4.3. Modalités techniques d'intégration de l'IA dans l'IEne

Dans le cadre de l'IEne, l'IA n'est pas conçue comme un dispositif autonome de décision, mais comme un ensemble d'outils analytiques mobilisables de manière ciblée, en fonction des cas d'usage, des objectifs poursuivis et du niveau de maturité des données disponibles. Elle intervient ainsi en appui aux processus de pilotage et d'arbitrage, sans s'y substituer, conformément aux principes largement établis dans la littérature sur l'aide à la décision et les systèmes sociotechniques complexes [40, 41]

À ce titre, différentes familles d'algorithmes peuvent être mobilisées de façon complémentaire. Les méthodes d'apprentissage supervisé sont principalement adaptées aux tâches de prévision, telles que l'anticipation des consommations, des charges ou des prix énergétiques, comme l'ont montré de nombreux travaux appliqués aux systèmes énergétiques [6, 42]. Les approches d'apprentissage non supervisé permettent, quant à elles, la détection d'anomalies, la segmentation de profils énergétiques ou l'identification de comportements atypiques, notamment dans des contextes de forte hétérogénéité des usages [43]. De manière plus exploratoire, des techniques d'apprentissage par renforcement peuvent être envisagées pour l'optimisation sous contraintes dynamiques — telles que la gestion des flexibilités, les arbitrages multi-énergies ou les contraintes réseau — sous réserve de dispositifs rigoureux de simulation, de contrôle et de validation préalable [44].

La mise en œuvre de ces algorithmes suppose une architecture de données structurée et robuste, reposant sur des chaînes de mesure fiables, des référentiels partagés et des dispositifs de gestion des données garantissant leur qualité, leur traçabilité et leur historisation. L'IA s'inscrit ainsi dans une architecture en couches, allant de la collecte et de la validation des données énergétiques jusqu'à des modules analytiques et de restitution, intégrés dans des outils de simulation, de pilotage et de reporting, conformément aux bonnes pratiques en matière de systèmes d'information énergétiques et de management de l'énergie [6, 33].

Par ailleurs, la question de l'explicabilité des résultats constitue un enjeu central de cette intégration. Les modèles mobilisés doivent, autant que possible, privilégier des approches interprétables ou être accompagnés de mécanismes d'explication des résultats, tels que l'analyse de l'importance des variables, la comparaison de scénarios ou l'association d'indicateurs de confiance. Ces dispositifs sont indispensables pour permettre l'appropriation des résultats par les décideurs et assurer leur auditabilité dans des cadres organisationnels, réglementaires et normatifs contraints, comme le soulignent les travaux récents sur l'IA explicable [45, 46].

Enfin, l'intégration de l'IA requiert une vigilance particulière à l'égard des biais potentiels, qu'ils soient liés à la qualité et à la représentativité des données, aux effets de structure sectoriels, aux choix de modélisation ou aux conditions d'apprentissage. Ces biais ne peuvent être corrigés par la seule technique. Ils appellent des dispositifs explicites de gouvernance, de validation croisée des modèles et de contrôle humain, afin que l'IA demeure un outil d'aide à la décision et ne devienne ni un facteur d'opacité, ni un mécanisme de rigidification des arbitrages, conformément aux analyses critiques sur les risques socio-techniques des systèmes algorithmiques [47, 48].

4.4. Formation et institutionnalisation : durabilité, régulation et sensibilisation

Par ailleurs, aucun dispositif d'IEne ne peut s'inscrire dans la durée sans un socle solide de compétences capables non seulement de l'exploiter, mais aussi de le faire évoluer et de le repenser en fonction des exigences réglementaires, technologiques et géoéconomiques du contexte. La formation constitue, à ce titre, un levier stratégique majeur de pérennisation et de crédibilité du dispositif.

Elle concernerait en priorité les cycles de master ainsi que les filières d'ingénieurs et de techniciens spécialisés en énergie, électricité, réseaux électriques, informatique et IA, mais également les formations en économie, gestion, management et IEco. Ces profils sont indispensables pour assurer l'articulation entre les données énergie-carbone, les coûts, les marchés et les cadres normatifs, et pour traduire des indicateurs techniques complexes en décisions opérationnelles de compétitivité et de coopération, en stratégies d'accès aux marchés, ainsi qu'en démonstrations de conformité réglementaire et extra-financière. L'écosystème de compétences s'organiserait autour d'au moins trois noyaux complémentaires :

- Un noyau opérationnel, composé d'ingénieurs, de techniciens et d'équipes data/IT, chargé du comptage, de la modélisation, de l'alimentation des tableaux de bord et des dispositifs de MRV;
- Un noyau d'analyse, rassemblant des profils en économie, de la gestion et de l'IEco, responsable de la scénarisation, de l'évaluation des risques et de l'articulation, notamment entre la performance économique, les contraintes énergétiques et les exigences climatiques ;
- Des instances de pilotage, réunissant des directions industrielles, des responsables QSE (Qualité, Sécurité et Environnement), des autorités publiques et des régulateurs, en charge des arbitrages stratégiques et garantes de l'alignement global du dispositif avec les politiques publiques, les stratégies d'entreprise et les engagements climatiques.

Les parcours de formation pourraient être structurés selon trois niveaux progressifs. Un premier niveau, centré sur les fondements, viserait à consolider la maîtrise des principes de mesure, de suivi et de pilotage énergétique et carbone. Un niveau avancé introduirait la simulation multi-contraintes, l'analyse de scénarios et le traitement de cas réels issus d'environnements industriels ou territoriaux. Enfin, un niveau expert porterait sur les référentiels normatifs, la finance durable, la taxonomie verte et les exigences de conformité réglementaire et contractuelle.

Chaque étape s'appuierait sur des ateliers fondés sur des données réelles, des exercices de mise en situation décisionnelle, ainsi que sur des certifications internes alignées sur les normes ISO 50001, ISO 14064 et ISO 14067. L'efficacité globale du dispositif de formation serait suivie à l'aide d'indicateurs stables et auditables, tels que le taux d'achèvement des parcours, les résultats aux évaluations, le temps de décision après alerte, l'écart entre prévisions et réalisations en matière d'énergie et de carbone, ainsi que le degré d'usage effectif des tableaux de bord décisionnels [3].

En parallèle, une structure de gouvernance explicite et formalisée s'imposerait comme condition de crédibilité et de durabilité. Elle reposerait sur un comité multi-acteurs, une répartition claire des responsabilités, des rituels de suivi réguliers, des audits énergie-carbone et des indicateurs d'adhérence portant sur la qualité et la couverture des données, l'actualisation des KPI et les gains effectivement mesurés et vérifiés. Cette organisation serait complétée par une boucle d'amélioration continue de type PDCA (Plan-Do-Check-Act) et par un registre des risques structuré, conformément aux recommandations de l'AFNOR et de l'ISO [2, 33].

En synthèse, la formation, la gouvernance et la normalisation se renforceraient ainsi mutuellement et constitueraient le socle opérationnel indispensable à la pérennisation de l'IEne.

Dans ce cadre, la montée en compétences, la clarification des responsabilités et l'adossement explicite aux normes internationales instaurent les conditions d'un langage commun entre acteurs publics, privés et territoriaux. Une fois ce socle consolidé, le partage maîtrisé des données, des méthodes et des référentiels devient possible sans fragiliser ni la compétitivité individuelle ni celle d'un groupement d'intérêt. C'est précisément sur cette base qu'une logique de coopétitivité peut émerger, en transformant les standards, les achats bas carbone et les effets d'écosystème en leviers collectifs de performance économique, environnementale et stratégique.

4.5. Compétitivité – coopétitivité : une dynamique conjointe au service de la durabilité

Enfin, l'émergence de l'IEne, en continuité avec les apports de l'IEco et avec ses deux modes opératoires ; autonome et contributif ; gagnerait à « domestiquer » volontairement et avec lucidité la compétitivité, en la faisant sortir d'une logique de rivalité pure pour l'inscrire durablement dans une dynamique où l'ambition concurrentielle croise l'esprit coopétitif. Ainsi, viser la compétitivité planétaire pourrait désormais rappeler « progresser avec l'autre pour faire gagner, plutôt, l'esprit de la durabilité », compte tenu de la diversité et de l'intensification des contraintes coercitives qui s'exercent désormais à l'échelle globale, et non plus uniquement communautaire.

Dans cette perspective, l'intégration systématique de critères énergie-carbone, de traçabilité et de conformité au CBAM dans les politiques d'achats adresserait aux fournisseurs un signal clair, lisible et durable. Elle inciterait les chaînes de valeur à se transformer, tout en valorisant l'engagement, la motivation et la capacité de chaque acteur à s'aligner sur des trajectoires compatibles avec le climat [12]. La coopétitivité prendrait alors la forme d'un partage pré-concurrentiel structuré des référentiels, des outils de MRV et des bonnes pratiques. En mutualisant les méthodes, les indicateurs et les retours d'expériences, les acteurs réduiraient leurs coûts de conformité, accéléreraient la diffusion des standards et renforceraient leur

crédibilité collective sur les marchés internationaux [3]. La compétitivité ne disparaît pas pour autant : elle se reconfigure. Elle se déplace vers la qualité d'exécution, la rapidité d'adaptation et la capacité à innover à l'intérieur de cadres communs.

Pour amplifier cette dynamique, des clubs territoriaux ou sectoriels peuvent jouer un rôle de catalyseurs, en permettant la mutualisation de la formation, de l'instrumentation, des infrastructures de données et des dispositifs d'accompagnement. Progressivement, de véritables effets d'écosystème émergent, et ainsi, plus les acteurs adoptent des cadres convergents et des outils interopérables, plus la valeur informationnelle, la confiance et l'attractivité collective se renforcent [5]. Une compétitivité planétaire, nourrie par la coopétitivité, devient alors un levier de durabilité, en conjuguant la performance économique, la responsabilité climatique, le partage, et diplomatie des standards au service de trajectoires de développement réellement soutenables.

5. Effets systémiques de l'IEne : De la cohésion territoriale à la coopétitivité internationale

Les secteurs analysés dans ce paragraphe constituent des piliers essentiels de tout processus de développement durable, inclusif et équitable. Toutefois, face à l'intensification des contraintes énergétiques, climatiques, démographiques et sociales, ils ne peuvent plus être abordés de manière isolée. Leur déploiement exige désormais une lecture systémique, intégrée et cohérente, plaçant l'humain à la fois comme finalité des politiques publiques et comme acteur central des dynamiques de transformation.

Dans ce contexte, le développement s'inscrit de façon irréversible dans un cadre de durabilité, issu de limites planétaires qui dépassent la seule capacité d'intervention volontaire. Il ne relève plus d'un choix politique, mais d'un horizon structurant conditionnant l'ensemble des stratégies sectorielles. Les résultats durables ne peuvent alors émerger que d'une mise en convergence des secteurs clés, appelés à fonctionner en complémentarité afin de générer des effets systémiques à forte valeur économique, sociale et territoriale.

Une telle ambition repose sur des modes de gouvernance fondés prioritairement sur la mesure objectivée. Les trajectoires de transition ne peuvent plus s'appuyer sur des démarches déclaratives, mais requièrent des données mesurées et auditables, seules capables de garantir la crédibilité des décisions et la robustesse des arbitrages. Cette exigence méthodologique constitue aujourd'hui un socle de la gouvernance contemporaine des transitions.

C'est à ce niveau que l'IEne trouve toute sa portée, qui en articulant des données, des indicateurs, des normes et des capacités d'analyse, elle agit comme un levier structurant de synchronisation et d'optimisation des dynamiques sectorielles. Les interactions entre secteurs ne sont plus subies, mais pilotées dans une logique de cohérence systémique, permettant de transformer des contraintes physiques, économiques et réglementaires en opportunités de transformation territoriale et de compétitivité durable.

Fondée sur une gouvernance rigoureuse de la donnée et sur une traçabilité opposable, cette forme émergente d'intelligence est appelée à être mobilisée dans des secteurs stratégiques de grande envergure. Les énergies renouvelables de proximité, l'hydrogène vert, la gestion

intégrée du nexus eau-énergie, les infrastructures numériques ou encore la diplomatie verte constituent autant de champs dans lesquels l'IÉne permet de renforcer simultanément la cohésion des territoires et une coopération internationale fondée sur la preuve, l'amélioration continue, la durabilité et la maîtrise des interdépendances.

5.1. IÉne et énergies renouvelables de proximité : accélérer la performance territoriale durable

Les infrastructures énergétiques fondées sur les énergies renouvelables, lorsqu'elles sont conçues et déployées conformément aux principes de l'IÉne, constituent un facteur structurant majeur du développement territorial et humain. En renforçant l'accès équitable à une énergie fiable et continue, elles contribuent directement à la réduction des inégalités sociales et spatiales, tout en améliorant l'effectivité des services essentiels. Dans les zones rurales et montagneuses en particulier, l'accès à l'électricité conditionne la scolarisation, la continuité pédagogique et l'égalité des chances, tout en soutenant la connectivité numérique des territoires et l'accès aux services publics dématérialisés.

Dans cette dynamique, l'IÉne joue un rôle déterminant en permettant le déploiement, l'optimisation et la stabilisation de micro-réseaux énergétiques territorialisés, reliant de manière intégrée les ménages, les services collectifs (écoles, centres de santé) et les activités productives locales. Ces dispositifs dépassent leur seule fonction technique pour s'imposer comme de véritables outils opérationnels de cohésion sociale et de résilience communautaire. En identifiant et structurant les interdépendances énergétiques à l'échelle locale, ils renforcent les mécanismes de solidarité, favorisent l'auto-organisation collective et soutiennent les dynamiques de développement local, contribuant ainsi, à réduire durablement les fractures entre centres urbains, zones périurbaines et espaces ruraux ou montagneux.

Par ailleurs, l'amélioration de l'accès à l'énergie produit des effets sociaux indirects mais structurants, notamment par la réduction du temps consacré aux tâches domestiques pénibles et peu productives, encore largement assumées par les femmes et les enfants. Ce gain de temps et d'énergie renforce les capacités humaines, éducatives et économiques des communautés, et participe à une transformation progressive des équilibres sociaux ; déjà ; à l'échelle territoriale.

L'un des apports majeurs de l'IÉne réside également dans sa capacité à rendre visibles, mesurables et traçables les contributions souvent sous-estimées des solutions énergétiques décentralisées à ancrage territorial. Qu'il s'agisse de stations solaires de proximité ou mobiles, de kits autonomes individuels, ou de systèmes collectifs de pompage et d'alimentation, l'IÉne permet d'intégrer ces dispositifs dans les bilans énergétiques et carbone, renforçant ainsi leur reconnaissance dans les stratégies climatiques et leur légitimité économique et sociale.

Enfin, inscrites dans une démarche structurée d'IÉne territorialisée, les données issues de ces systèmes (production, consommation, continuité de service, coûts, usages et impacts sociaux) deviennent un levier central d'aide à la décision publique et d'amélioration continue. Elles permettent d'ajuster finement les politiques et les investissements en fonction de leur contribution effective au développement humain, à la cohésion territoriale et à la performance économique locale. Sous réserve de leur inscription dans des référentiels partagés, interopérables et adossés à une gouvernance inclusive et stable, les territoires peuvent ainsi

s'affirmer comme de véritables laboratoires d'innovation énergétique inclusive, fondés sur la mesure, la traçabilité et l'apprentissage collectif.

Cette logique de performance territoriale fondée sur la preuve trouve un prolongement naturel lorsqu'elle est transposée à des filières émergentes de plus grande échelle, au premier rang desquelles figure la chaîne de valeur de l'hydrogène vert.

5.2. Chaîne de valeur d'hydrogène vert : gouvernance, performance et compétitivité par l'IEne

L'IEne constituerait un levier structurant pour le développement rationnel, compétitif et soutenable de la filière hydrogène vert, en permettant en premier lieu, de qualifier de manière objectivée les gisements énergétiques mobilisables, leur variabilité temporelle et leur adéquation aux besoins des électrolyseurs. Cette capacité de caractérisation fine conditionne l'optimisation des facteurs de charge, la stabilité des procédés et, in fine, la réduction du coût actualisé de l'hydrogène produit, élément déterminant de la compétitivité économique de la filière.

Au-delà de cette première fonction, l'IEne offre une capacité de pilotage multi-échelles ; technologique, territoriale et systémique ; en intégrant de manière cohérente les données relatives aux réseaux électriques, aux ressources hydriques, aux contraintes foncières, aux usages industriels et aux infrastructures logistiques. Cette approche intégrée permet d'arbitrer de façon éclairée entre production centralisée ou décentralisée, injection réseau ou usage dédié, stockage électrique ou chimique, tout en réduisant les risques d'impasses technico-économiques et en favorisant des trajectoires de déploiement progressives, ajustables et résilientes.

Enfin, l'IEne permet d'assurer une traçabilité fine et opposable des flux énergétiques et carbone, en certifiant l'origine renouvelable de l'électricité utilisée, en mesurant les gains climatiques effectifs et en répondant aux exigences croissantes de normalisation, de taxonomie et de diplomatie énergétique internationale. À ce titre, elle conditionne l'intégration durable de l'hydrogène vert dans les chaînes de valeur nationales et transfrontalières, en dépassant les seules logiques expérimentales pour inscrire la filière dans une dynamique d'amélioration continue, de crédibilité et de compétitivité durable.

Cette exigence de traçabilité et de performance systémique met toutefois en lumière une interdépendance critique, celle de l'énergie et de l'eau, qui devient centrale lorsque la filière hydrogène est déployée à grande échelle, ouvrant ainsi naturellement sur la problématique du nexus eau-énergie.

5.3. Nexus eau-énergie sous contrainte : gouvernance stratégique et performance durable par l'IEne

Dans un contexte de stress hydrique structurel, le recours croissant au dessalement de l'eau de mer place l'énergie au cœur effectif de la gestion rationnelle de l'eau, faisant du nexus eau-énergie un enjeu stratégique majeur. La maîtrise des consommations énergétiques conditionne désormais directement le coût, la continuité et la soutenabilité du service de l'eau, tant pour les populations que pour les activités productives. À ce titre, l'IEne offre un cadre opérationnel de

gouvernance permettant d'optimiser le couplage entre sources énergétiques conventionnelles et renouvelables, afin de réduire le coût de l'eau produite, de sécuriser l'approvisionnement et de renforcer, par la suite, la résilience des territoires.

En structurant la mesure objectivée, la traçabilité et la reddition de comptes sur l'ensemble de la chaîne énergie-eau, l'IEne permet de comparer de manière rigoureuse les options technologiques, d'orienter les investissements vers les solutions les plus sobres et d'inscrire les projets dans une logique d'amélioration continue portée par des trajectoires bas carbone. Cette capacité d'évaluation et d'ajustement progressif renforce la crédibilité des choix opérés auprès des bailleurs, des décideurs publics et des citoyens, tout en limitant les risques d'arbitrages sous-optimaux ou de dépendances coûteuses à long terme.

Dans cette perspective, une énergie maîtrisée devient un vecteur d'équité territoriale et de performance économique, en facilitant l'acheminement d'une eau abordable vers les zones rurales et montagneuses grâce à une planification énergétique étroitement articulée aux besoins d'adduction et d'irrigation. Toutefois, la généralisation de tels dispositifs accroît également la pression sur les systèmes énergétiques et hydriques, soulignant la nécessité d'une gestion fine des ressources, fondée sur des données fiables et interopérables. Cette exigence ouvre naturellement sur le rôle croissant des infrastructures numériques et de l'IA, appelées à soutenir le pilotage frugal et sécurisé de ces interdépendances critiques.

5.4. IA et infrastructures numériques : l'IEne au service de la frugalité et de la performance

Les infrastructures numériques, en particulier les datacenters, constitueraient le socle opérationnel du développement de l'IA, et par conséquent, elles sont un élément clé de la mise en œuvre, de la performance et de la pérennisation de l'IEne. Effectivement, l'IA permet d'analyser des volumes massifs de données, de modéliser des systèmes complexes et de piloter les processus énergétiques dans une logique d'amélioration continue, indispensable pour faire face à des contraintes croissantes et évolutives.

Cependant, cette capacité implique des consommations énergétiques élevées et des besoins importants en eau pour le refroidissement. Les datacenters exercent ainsi une pression directe sur les équilibres énergétiques et hydriques, avec des impacts potentiels sur l'environnement, l'économie locale et la cohésion sociale, en particulier dans les territoires déjà soumis à des tensions sur les ressources. L'IA devient alors un facteur d'arbitrage critique, susceptible de renforcer la performance des systèmes, mais aussi, en l'absence de gouvernance adaptée, d'en accentuer les déséquilibres.

Dans un contexte où les données sont devenues des actifs stratégiques et où la continuité de service est non négociable, l'enjeu central réside dans la compatibilité entre la souveraineté numérique, la sobriété énergétique, et la préservation des ressources locales. L'IEne apporte un cadre de réponse fondé sur la cohérence des bilans énergétiques et hydriques, l'usage d'indicateurs mesurés, traçables et opposables, et la priorisation de solutions techniques sobres, adaptées aux contraintes territoriales et aux trajectoires bas carbone.

Dans cette perspective, l'IA ne peut contribuer durablement à la performance des territoires que si elle est conçue comme une infrastructure frugale et gouvernée, inscrite dans une démarche de responsabilité et de transparence. L'IEne permet alors de transformer l'IA d'un facteur de pression potentielle en un outil de régulation, d'optimisation et d'apprentissage continu, condition essentielle pour inscrire l'innovation numérique dans une trajectoire de durabilité.

Cette maîtrise des infrastructures numériques constitue enfin un prérequis pour faire émerger des innovations inclusives, fondées sur les compétences locales et la création d'emplois durables, ouvrant naturellement sur la question de l'innovation inclusive et de l'ancrage territorial.

5.5. Innovation inclusive, IEne et compétences : amélioration continue, emplois et ancrage territorial

L'IEne ne se limite pas uniquement à l'optimisation des systèmes techniques, elle pourrait agir également comme un levier structurant d'innovation inclusive, en articulant de manière cohérente l'énergie, les compétences et les territoires, ainsi que les conditions économiques, sociales et institutionnelles qui les façonnent. En ce sens, elle transforme la transition énergétique en un processus capacitant, orienté vers la création de valeur locale, la réduction des asymétries et le renforcement durable de la cohésion territoriale.

Cette dynamique d'innovation s'opérationnalise à travers la construction de scénarios actionnables, élaborés à partir des contextes territoriaux, des contraintes spécifiques et des trajectoires possibles. Appuyés sur des outils avancés, tels que les jumeaux numériques, les simulations et les modèles prédictifs, ces scénarios permettent d'objectiver les choix, de réduire l'incertitude décisionnelle et d'inscrire l'action publique et privée dans une logique d'amélioration continue. Ils renforcent ainsi la robustesse des stratégies territoriales et favorisent l'émergence de solutions adaptées, reproductibles et inclusives.

Dans cette perspective, un système énergétique fiable, mesuré et transparent constitue le socle opérationnel de l'innovation inclusive. En sécurisant durablement les usages numériques, les infrastructures de proximité, les tiers-lieux, les ateliers de fabrication et les dispositifs de formation, il abaisse structurellement les barrières d'accès à l'innovation pour les jeunes, les entrepreneurs et les collectivités. Il crée les conditions d'un apprentissage collectif continu, ancré dans les territoires et fondé sur la confiance, la stabilité des services et la capacité d'agir localement.

C'est dans ce cadre que le développement de dispositifs de formation ouverts et intensifs, notamment dans le numérique et l'IA, adossés à des infrastructures sobres et à un accès maîtrisé aux données, acquiert une portée stratégique. En articulant énergie fiable, montée en compétences, financement durable et accompagnement de projets, l'IEne favorise l'émergence d'innovations directement utiles aux territoires. Elle contribue ainsi à la constitution d'écosystèmes d'innovation inclusive, dans lesquels la maîtrise des flux d'énergie et de carbone devient un catalyseur de compétences locales, d'emplois qualifiés et d'ancrage territorial durable.

Cette capacité à structurer des compétences et des écosystèmes crédibles à l'échelle locale constitue également un atout stratégique majeur sur la scène internationale, en préparant le terrain d'une diplomatie verte fondée sur la compétence, la preuve et la confiance.

5.6. Diplomatie verte et IÉne : de la performance nationale au soft power à l'internationale

L'énergie demeure un instrument discret mais déterminant de puissance, de négociation et d'influence. La recomposition des approvisionnements, la concentration des chaînes de valeur industrielles et la montée des exigences relatives à l'empreinte carbone vérifiable traduisent une imbrication croissante entre la sécurité d'accès, la performance climatique et la capacité à peser sur les normes et les standards internationaux. Dans ce contexte, la crédibilité énergétique devient un facteur structurant de positionnement géopolitique et économique.

Une démarche structurée d'IÉne permet précisément de transformer la performance énergétique interne en levier d'influence externe. En s'appuyant sur des données mesurées, traçables et opposables, l'IÉne rend démontrables la robustesse du mix énergétique, la fiabilité des infrastructures, la cohérence des trajectoires bas carbone et la conformité des productions aux exigences internationales. Elle constitue ainsi un outil de diplomatie énergétique fondée sur la preuve, renforçant la coopétitivité internationale des pays et des territoires engagés dans des transitions crédibles.

Appuyée sur le développement des énergies renouvelables, la modernisation des réseaux et la mise en place de dispositifs de mesure, de MRV, cette approche permet notamment au Maroc de consolider une position de partenaire fiable et prescripteur. Au-delà des flux énergétiques, le transfert de savoir-faire, la co-diffusion de méthodes d'IÉne et la construction de capacités locales deviennent alors des vecteurs d'influence à part entière. L'IÉne alimente ainsi des formes de soft power et de skill power, fondées sur la compétence, la crédibilité et la confiance, au service d'alliances durables et d'une diplomatie verte alignée sur les impératifs de durabilité.

Conclusion et perspectives

En conclusion, l'émergence d'une IÉne articulée à l'IA, au service d'une IÉco augmentée, apparaît à la fois motivante et solidement justifiée. Elle constitue un appui structuré à la décision publique et privée, orienté vers un développement territorial, humain et environnemental mieux piloté parce que mieux démontré, en résonance avec les exigences contemporaines d'optimisation, de performance, de compétitivité, de coopétitivité et de diplomatie énergétique.

D'abord, l'IÉco a démontré que la décision gagne en fiabilité lorsqu'elle s'appuie sur une information qualifiée, une veille organisée et une influence maîtrisée [1, 2, 3].

Ensuite, parce que l'énergie structure l'activité productive et pèse simultanément sur les coûts, les risques et les émissions, l'IÉne s'impose comme un prolongement à forte valeur ajoutée. Elle apporte à l'IÉco un langage commun fondé sur des grandeurs physiques mesurables, traçables et auditables, capables de rendre les trajectoires énergie-carbone durablement pilotables [11, 33, 34]. Par conséquent, la donnée énergétique, mesurée au plus près des usages, devient un vecteur de convergence entre ingénieurs, économistes, décideurs publics, régulateurs, acteurs financiers et territoires.

En outre, les profils de consommation énergétique peuvent devenir un miroir pertinent des dynamiques de l'économie réelle. Parce que l'énergie se décrit par des indicateurs vérifiables et auditables, l'IÉne constitue une base de gouvernabilité, de validation et de calibration de l'IÉco, tout en respectant son propre périmètre. Ainsi, la complémentarité entre IÉco et IÉne cesse d'être un principe général pour devenir un mécanisme opérationnel de convergence.

Afin d'en accroître l'efficacité et l'impact, l'IÉne se déploie selon deux modes dont l'articulation renforce la robustesse du pilotage. En mode autonome, elle vise la performance intrinsèque du système énergétique, depuis la sécurité d'approvisionnement jusqu'à l'optimisation du mix, la maîtrise de l'empreinte carbone, l'efficacité, la sobriété et la résilience [6]. En mode contributif, elle éclaire l'IÉco en recalant les analyses économiques sur la preuve physique. Elle réduit ainsi les incertitudes d'arbitrage, renforce l'alignement des objectifs stratégiques et stabilise les trajectoires énergie-carbone à partir d'indicateurs stables, de référentiels partagés et de preuves auditables [2, 33]. Dans cette perspective, l'IA et les plateformes de données jouent un rôle d'entraînement décisif. Elles accélèrent la détection des signaux, resserrent la corrélation entre énergie, production et émissions, et améliorent la scénarisation sous contraintes, à condition que soient garanties l'explicabilité, la cybersécurité et la gouvernance des modèles [5]. Simultanément, la formation des compétences, l'institutionnalisation des rôles, la structuration des processus et la pratique de l'audit assurent la constance des méthodes et la pérennité des résultats. La synergie entre IA, données massives et systèmes de management permet ainsi d'anticiper les chocs énergétiques et réglementaires, de sécuriser des marges de souveraineté et de résilience, d'améliorer la compétitivité des filières exportatrices et d'assurer l'alignement durable des politiques énergie-climat [6, 12].

Au regard de ses effets systémiques, l'IÉne diffuse ses impacts de manière transversale et cumulative. Elle renforce une diplomatie fondée sur la preuve, rend opérationnel le nexus eau-énergie, soutient l'inclusion territoriale par des solutions renouvelables locales, stimule des innovations inclusives et crédibilise les trajectoires hydrogène lorsqu'elles s'adosent à des

métriques robustes [6, 7]. Dans ce cadre, le Maroc dispose d'atouts distinctifs, liés à sa position géographique, à la diversité de ses ressources et à un mix énergétique en transition, ce qui appelle un pilotage renforcé par la preuve [9, 10]. L'IÉne facilite alors l'accès aux données utiles, accélère des arbitrages justes et efficaces, et aligne intérêts locaux, objectifs nationaux et exigences internationales, tout en consolidant la crédibilité du Royaume dans la géoéconomie énergétique.

En définitive, maîtriser l'énergie par l'intelligence revient à mieux maîtriser le développement par la connaissance. Par ses deux modes, autonome et contributif, l'IÉne articule gouvernabilité, validation et convergence. Elle produit des résultats tangibles, durables et vérifiables. La donnée énergétique devient ainsi simultanément un levier d'influence, un langage de coopération et un instrument de souveraineté, au bénéfice des organisations, des territoires et du Maroc.

Les développements proposés appellent des prolongements concrets, structurés autour de trois familles de perspectives complémentaires : méthodologiques, opérationnelles et institutionnelles.

Sur le plan méthodologique, il convient de stabiliser davantage le référentiel de l'Intelligence Énergétique. Cela suppose d'affiner sa définition, de préciser les jeux d'indicateurs prioritaires, de formaliser les liens fonctionnels entre mode autonome et mode contributif, et de documenter rigoureusement les conditions d'usage responsable de l'Intelligence Artificielle, notamment en matière d'explicabilité, de maîtrise des biais et de cybersécurité. En parallèle, des travaux comparatifs entre secteurs et territoires permettront de tester la robustesse des hypothèses formulées et d'éviter que le modèle ne reste cantonné à des cas exemplaires isolés [2, 5].

Sur le plan opérationnel, la priorité est donnée à l'expérimentation encadrée. Il s'agit de mettre en place des démonstrateurs IÉne-IA sur des périmètres ciblés, tels qu'un site industriel fortement consommateur d'énergie, un opérateur de réseau, un territoire pilote combinant électricité, eau et mobilité, ou encore une chaîne d'exportation soumise au mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (CBAM) [12]. Ces pilotes doivent être conçus comme de véritables laboratoires de preuve, intégrant la documentation des données sources, la transparence des méthodes, la traçabilité des décisions et l'évaluation des gains obtenus en matière de coûts, d'émissions, de délais de décision et de réduction des risques. Leur objectif n'est pas uniquement de démontrer la faisabilité technique, mais d'établir que l'articulation entre IÉne, IA et IÉco produit des bénéfices mesurables, reproductibles et transférables.

Sur le plan institutionnel et académique, les perspectives reposent sur la montée en puissance des compétences et des alliances. L'intégration de modules relatifs à l'IÉne, à l'IA appliquée à l'énergie, à la mesure, au reporting et à la vérification, à la normalisation et à la gouvernance, dans les cursus d'ingénierie, d'énergie, de numérique, d'économie et d'Intelligence Économique constitue un levier stratégique [2, 33, 34]. Elle favorisera l'émergence d'une génération de professionnels capables de manier simultanément les langages de la physique, de la donnée, de la régulation et du marché. En outre, des regroupements multi-acteurs, associant États, agences, universités, entreprises et collectivités territoriales, pourront structurer des

plateformes partagées de données, de standards et de retours d'expérience, afin d'organiser une coopération régulée plutôt qu'une fragmentation coûteuse et peu efficace [3].

À moyen terme, ces perspectives convergent vers un même horizon : faire de l'IEne, enrichie par l'IA et arrimée à l'IEco, un bien commun méthodologique, à la fois disponible, auditable et adaptable. Un cadre capable de permettre à chaque filière et à chaque territoire de piloter ses choix énergétiques et climatiques à partir de preuves objectivées, et non de conjectures. La suite du travail consistera à formaliser ces démonstrateurs, à définir des critères de succès partagés et à proposer une feuille de route progressive, afin que ce projet quitte le registre de la conceptualisation pour entrer pleinement dans celui de l'action structurée.

Références

- [1] Martre, H., Clerc, P., & Harbulot, C. (1994) « Intelligence économique et stratégie des entreprises. » Rapport du commissariat général au Plan, Paris, La documentation française, 17, 82-94.
https://www.academia.edu/download/34665216/Intelligence_Economique_et_Strategies_des_Entreprises.pdf
- [2] Référentiel d'intelligence économique et management de l'information stratégique, AFNOR, Paris ;
- [3] BSI/Cebr, (Avril 2022) "The contribution of standards to the UK economy" A Cebr report for BSI.
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.bsigroup.com/siteassets/pdf/en/about-us/bsi-the-economic-contribution-of-standards-to-the-uk-economy-uk-en.pdf&ved=2ahUKewjc9-XDjdGSAXW0dqQEHaNiAV0QFnoECBcQAQ&usq=AOvVaw2l0K_JR6tz3guMsm5IKjBn
- [4] J. Theys, (2002) « La gouvernance entre innovation et impuissance. », Open Edition Journal, Dossier 2, 2003
<https://doi.org/10.4000/developpementdurable.1523>
- [5] K. Blind, A. Jungmittag, A. Mangelsdorf, "The Economic Benefits of Standardization, Deutsches Institut für Normung", issued DIN German Institute for Standardization
<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.din.de/resource/blob/89552/68849fab0eeaaafb56c5a3ffe9959c5/economic-benefits-of-standardization-en-data.pdf&ved=2ahUKewiQuNq4kNGSAXXYQvEDHbi5CG4QFnoECBsQAQ&usq=AOvVaw2WylWJfFaaqhXU9iExleTt>
- [6] IEA, (2024) "World Energy Outlook 2024" (et rapports sectoriels associés), International Energy Agency, Paris.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- [7] IRENA, (2023), "World Energy Transitions Outlook 2023", International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
<https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- [8] IPCC, (2023), "Climate Change 2023 – AR6 Synthesis", Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Genève.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [9] Office des Changes, 2024.
<https://www.oc.gov.ma/fr>
- [10] MASEN, 2024, « Stratégie de déploiement des énergies renouvelables et hydrogène vert »
https://www.masen.ma/fr/hydrogene-vert-maroc?_gl=1*mpzlyq*_ga*MjAzOTAxMDI0Ni4xNzcwODI3NDAx*_ga_HCBYJKYP64*czE3NzA4Mjc0MDEkbzEkZzEkdDE3NzA4Mjc0NTEkajEwJGwwJGgw
- [11] WRI/WBCSD, (2015), "GHG Protocol – Corporate Accounting and Reporting Standard, World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development."
<https://www.wri.org/initiatives/greenhouse-gas-protocol>

- [12] Commission européenne, (2023) , Règlement (UE) 2023/956, MACF/CBAM.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj/eng>
- [13] M. Grieves and J. Vickers, (2017), “Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems”, Florida Inst. Technol., Melbourne, FL, USA, Tech. Rep, 2016.
https://www.researchgate.net/profile/Michael-Grieves/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept/links/57c6f44008ae9d64047e92b4/Origins-of-the-Digital-Twin-Concept.pdf
- [14] Tao, F., Zhang, M., & Nee, A. Y. C. (2019) “Digital twin driven smart manufacturing.” Academic press.
- [15] Janssen, M., Brous, P., Estevez, E., Barbosa, L. S., and Janowski, T. (2020). “Data governance: Organizing data for trustworthy Artificial Intelligence.” Government information quarterly, 37(3), 101493
<https://doi.org/10.1016/j.giq.2020.101493>
- [16] Page Wikipedia consultée le 01/0/2026, “Plan Marshall 1948–1952“
https://en.wikipedia.org/wiki/Marshall_Plan
- [17] B. Eichengreen, (2006) “The European economy since 1945: coordinated capitalism and beyond.” Princeton University Press.
- [18] T. Levitt, (1960), “Business should stay out of politics.” Business Horizons, 3(2), 45-51.
[https://doi.org/10.1016/S0007-6813\(60\)80044-4](https://doi.org/10.1016/S0007-6813(60)80044-4)
- [19] Yergin, D. (1991) “The Prize: The Epic Quest for Oil”. Money, and Power (New York, 1991)
- [20] K. F. Fox and P. Kotler (1980). “The marketing of social causes: the first 10 years.” Journal of marketing, 44(4), p 24-33.
<https://doi.org/10.1177/0022242980044004>
- [21] ISO 9001, 1987
https://cdn.standards.itech.ai/samples/16533/1db59e1e010545f486fc92b6b85c78f2/ISO-9001-1987.pdf&ved=2ahUKewiUssLt_tGSAxW_OfsDHZkROocQFnoECBgQAQ&usq=AOvVaw1icMd82oN67k3TQ3wj0Xlc
- [22] SCIP, (1986) « Documents fondateurs de la Society of Competitive Intelligence Professionals »
<https://www.scip.org/page/resources>
- [23] METI, (2001) « Réorganisation et orientation stratégique », Tokyo ;
<https://www.meti.go.jp/>
- [24] European Commission, (2015) « Innovation et compétitivité fondée sur la connaissance ».
https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/competitiveness-compass_fr
- [25] SISSE, 2016, « Création du Service de l'Information Stratégique et de la Sécurité Économiques. »
<https://www.entreprises.gouv.fr/service-de-linformation-strategique-et-de-la-securite-economiques-sisse>
- [26] F. Fourati-Jamoussi, M.J.F. Dubois, (2021) « De l'intelligence économique à l'intelligence des transitions. » Cahiers COSTECH-Cahiers Connaissance, organisation et systèmes techniques.
<https://hal.science/hal-03250651v1>
- [27] Salvétat, D., & Le Roy, F. (2007). Coopétition et intelligence économique. Revue française de gestion, 176(7), 147-161.
https://shs.cairn.info/article/RFG_176_0147?tab=texte-integral
- [28] IEA, (2025) « Analyses prospectives et trajectoires de décarbonation », International Energy Agency, Paris
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
- [29] ADEME–Arcep, (2022), « Pour un numérique soutenable »
<https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/impact-environnemental/enquete-annuelle-pour-un-numerique-soutenable-edition-2022.html>
- [30] MASEN, (2023) « Rapport annuel sur le développement des énergies renouvelables au Maroc »
<https://www.masen.ma/fr/reports>
- [31] ONEE, (2023) « Bilan électrique national et perspectives », Office National de l'Electricité et de l'Eau.
<https://www.one.ma/fr/pdf/Rapport%20d'Activit%C3%A9s%202023%20VF.pdf>

- [32] AMEE, 2023, « Retour d'expérience sur ISO 50001 au Maroc »
<https://efficaciteenergetique.ma/normes>
- [33] ISO 50001, “Energy management systems – Requirements with guidance for use”, ISO, Genève;
<https://www.iso.org/fr/iso-50001-energy-management.html>
- [34] ISO 14064, “Greenhouse gases – Part 1”, ISO, Genève.
<https://www.iso.org/fr/standard/66453.html>
- [35] ISO 14067 “Carbon footprint of products”, ISO, Genève.
<https://www.iso.org/fr/standard/71206.html>
- [36] CBAM, 2023 Mécanisme d’ajustement carbone aux frontières.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj/eng>
- [37] Theodore M. Porter, (1995) “Trust in Numbers. The pursuit of objectivity, in science and public life”, Genèses. Sciences sociales et histoire Année 1997 27 pp. 168-169, Editions Belin.
- [38] Scott, James C. (1998) “Seeing Like a State: How Certain Schemes to Improve the Human Condition Have Failed.”, Yale University Press, p. 11. ISBN 978-0-30007016-3.
- [39] Jerry Z. Muller, (2018) “The Tyranny of Metrics”, ISBN-13 978-0691174952
- [40] Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Pearson.
- [41] G. Shmueli, (2010) “To Explain or to Predict ?”, Statistical Science, Vol. 25, No. 3, p 289–310
<https://doi.org/10.1214/10-STS330>
- [42] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, (2009) “The Elements of Statistical Learning”, Springer New York, NY.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- [43] V. Chandola, A. Banerjee, V. Kumar, (2009) “Anomaly detection: A survey”, ACM Computing Surveys (CSUR), Volume 41, Issue 3, No.: 15, p. 1-58.
<https://doi.org/10.1145/1541880.1541882>
- [44] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto, (2018) “Reinforcement Learning: An Introduction”, A Bradford Book The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England
- [45] F. Doshi-Velez, B. Kim, (2017) “Towards A Rigorous Science of Interpretable Machine Learning”
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.08608>
- [46] Ribeiro et al., (2016) "Why Should I Trust You?: Explaining the Predictions of Any Classifier"
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1602.04938>
- [47] C. O’Neil, (2016) “Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy”, Crown Publishing Group, USA.
<https://dl.acm.org/doi/10.5555/3002861>
- [48] European Commission, (2019) “Ethics Guidelines for Trustworthy AI”
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>