

**Archéologie réglementaire de l'évaluation
environnementale : encoder des axiomes statiques dans le
droit, et aller vers des cadres de décision conscients du
régime**

Theo Piens, Ph.D.

Chercheur environnemental indépendant, France · ORCID 0000-0002-4422-2786

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	3
1. Introduction	4
2. Archéologie réglementaire : où les axiomes sont gravés	5
3. Conséquence méthodologique : évaluer le régime, pas seulement la quantité	6
3.1 Classification des déchets par régime, non par seule catégorie	8
4. Décider quand l'unité n'existe pas	8
5. Conclusion	10
Annexe. Portefeuille de régimes : déchets, molécules et leurs bascules	10
Références	12
Supplément	12

Archéologie réglementaire de l'évaluation environnementale : encoder des axiomes statiques dans le droit, et aller vers des cadres de décision conscients du régime

Theo Piens, Ph.D. · Chercheur environnemental indépendant, France

ORCID 0000-0002-4422-2786

Préprint, version de travail (FR). Calculs et figures reproductibles, déposés en accès ouvert (DOI Zenodo à la première version stable). Compagnon scientifique du préprint ChaoticLCA (Piens 2026, Zenodo 10.5281/zenodo.20086772). Aucun conflit d'intérêt déclaré.

Cet article appartient au programme de recherche « Les déchets comme systèmes dynamiques » (Piens, en préparation). Ses sections sont numérotées de façon autonome ; les rares renvois en §x.y non résolus dans le texte pointent vers les articles compagnons, à savoir le Manifeste théorique (axiomes S1 à S4, théorèmes T1 à T4), le digesteur anaérobie, la toxicologie des contaminants émergents, la logistique environnementale, l'écologie des transitions critiques et la décision publique, ou vers le manuscrit-livre.

Résumé

Contexte. Les évaluateurs et les régulateurs décident à partir de nombres uniques : un score, un seuil, un crédit. Lorsque le système évalué possède plusieurs régimes, ces nombres ne sont pas seulement incertains ; ils sont, par endroits, dépourvus de sens, et la décision qu'ils portent est mal fondée.

Objet. Nous montrons d'abord où les quatre axiomes de l'évaluation statique (S1 à S4, établis dans l'article-manifeste compagnon) sont **gravés dans le droit**, à savoir REACH, CLP, EN 15804, la liste européenne des déchets et USEtox, non par négligence mais par choix d'administrabilité. Connaître l'axiome qu'un texte code, c'est savoir d'avance la classe de déchets qu'il jugera mal.

Outils. Nous proposons ensuite une **évaluation consciente du régime**. Une *jauge d'imprévisibilité*, placée en tête de rapport, agrège quelques sous-scores (proximité d'une bifurcation, type de non-linéarité, horizon du milieu, régime de la donnée) en une position du vert au rouge. Et lorsque l'unité n'existe pas, trois cadres de décision s'offrent selon le régime diagnostiqué : le **minimax** pour une bascule irréversible et grave, la **robustesse info-gap**

pour une zone d'acceptabilité à élargir, la **gestion adaptative** quand le suivi est possible et l'action réversible. Un cas chiffré, le digesteur conduit près de son pli, montre que les trois donnent trois consignes distinctes, toutes rationnelles.

Portée. Le diagnostic de régime ne s'oppose pas aux textes : il indique, pour chacun, le point précis où la lecture réglementaire doit être complétée par une lecture dynamique. Se tromper de cadre, par exemple appliquer l'espérance d'utilité à un système bistable, n'est pas une imprécision : c'est une erreur de catégorie.

Abstract (English). Assessors and regulators decide on single numbers: a score, a threshold, a credit. When the assessed system holds several regimes, these numbers are not merely uncertain but locally meaningless, and the decision they carry is ill-founded. We first show *where* the four axioms of static evaluation (S1 to S4, established in the companion manifesto) are encoded in law, namely REACH, CLP, EN 15804, the European Waste List and USEtox, not by negligence but by administrability: knowing which axiom a text encodes tells you in advance the class of wastes it will misjudge. We then propose regime-aware assessment. An *unpredictability gauge* at the head of the report aggregates sub-scores (proximity to a bifurcation, type of nonlinearity, medium horizon, data regime) into a position from green to red; and when the unit does not exist, three regime-matched frameworks apply: minimax for severe irreversible tipping, info-gap robustness for an acceptability zone to widen, and adaptive management where monitoring is feasible and action reversible. A worked case, a digester operated near its fold, yields three distinct and rational set-points. Regime diagnosis does not oppose the texts; it marks where regulatory reading must be completed by a dynamical one. Choosing the wrong framework, such as expected utility on a bistable system, is not imprecision but a category error.

1. Introduction

Une réglementation a besoin de classes figées et de facteurs constants : c'est la condition de son administrabilité à grande échelle. Mais cette commodité a un prix, et ce prix est payé par les décisions prises là où le système évalué ne se laisse pas figer. Cet article part d'un diagnostic, les quatre axiomes implicites de l'évaluation statique, l'estimation ponctuelle (S1), la caractérisation linéaire (S2), l'indépendance au chemin (S3) et l'invariance catégorielle (S4), établis et démontrés dans l'article-manifeste compagnon ; il montre ensuite où ils sont inscrits dans le droit, puis ce qu'on peut faire, concrètement, pour décider quand l'unité n'existe pas. Nous rappelons seulement que ces axiomes, raisonnables dans leur domaine

d'origine, deviennent faux pour des classes précises de déchet, et que la sortie d'un système non linéaire est un *régime*, un état de fonctionnement qualitativement distinct, et non une quantité bruitée.

2. Archéologie réglementaire : où les axiomes sont gravés

Les quatre axiomes ne sont pas que des habitudes de calcul : ils sont inscrits dans le droit et dans les normes, et c'est ce qui explique pourquoi leurs fractures se reproduisent avec une telle régularité. Ce ne sont pas des erreurs locales qu'un praticien plus soigneux corrigerait ; ce sont des choix de structure, gravés en amont de lui. Parcourir les textes qui gouvernent l'évaluation, c'est retrouver nos quatre axiomes un à un.

Le règlement REACH (CE 1907/2006) organise toute la connaissance chimique européenne *par substance* : un numéro CAS, un dossier, un profil de danger réputé valable pour tous les usages et tous les états physiques. C'est l'invariance catégorielle (S4) érigée en principe d'enregistrement. Et la démonstration de sécurité qu'il exige (montrer que l'exposition reste sous des doses dérivées sans effet, les DNEL) suppose en outre une dose-réponse monotone (S2) : pour un perturbateur endocrinien à réponse non monotone, un DNEL calé sur les fortes doses peut certifier « sans effet » un régime de faible dose qui, lui, en produit un (§7.2). Deux axiomes pour le prix d'un.

Le règlement CLP (CE 1272/2008), qui classe et étiquette, procède par catégories dichotomiques fondées sur des propriétés intrinsèques : une substance est cancérogène de catégorie 1, ou elle ne l'est pas. C'est encore S4, et c'est S1 (l'estimation ponctuelle) sous une autre forme, un seuil par catégorie. L'amiante lié dans une matrice et l'amiant libéré en fibres y reçoivent la même classe, alors que toute la différence d'exposition est là : la nomenclature n'a aucun moyen d'encoder que le danger dépend de la forme.

La norme EN 15804, qui régit les déclarations environnementales des produits de construction, agrège les impacts linéairement, par des facteurs constants, et crédite le module D (la matière ou l'énergie évitée) d'un montant fixe, indépendant de l'état du système qui reçoit ce flux. C'est la caractérisation linéaire (S2) et l'indépendance au chemin (S3) inscrites dans la comptabilité elle-même. Un digesteur proche du washout (§7.5) y conserve, sur le papier, son crédit méthane, quand bien même il serait en train de devenir une source.

La liste européenne des déchets (décision 2000/532/CE) attribue à chaque flux un code et une classe (dangereux ou non) figés, indépendants du contexte de stockage. C'est S4 à l'échelle des déchets : il n'existe pas de catégorie « inerte en masse, mobile en fines », de sorte que la requalification contextuelle du §7.4 n'a tout bonnement pas de case où s'inscrire.

Le modèle USEtox, enfin, qui fournit les facteurs de caractérisation de toxicité, résume chaque substance par un facteur unique et linéaire agrégeant écotoxicité, persistance et bioaccumulation. C'est S2 et S1 réunis dans un seul nombre. Il ne peut, par construction, encoder ni la non-monotonie (§7.2), ni la mobilité commandée par le redox (§7.8), ni le fait qu'un seuil PFAS chute de quatre ordres de grandeur en six ans (§7.1).

Ces choix ne relèvent pas de l'ignorance. Ils rendent le système administrable à très grande échelle et transfèrent la charge de la preuve au déclarant : « respectez le seuil, vous êtes couvert. » Une réglementation, en cela, ressemble à l'écartement d'une voie ferrée : une fois les rails posés, tout doit rouler à cette largeur, et une réalité taillée autrement ne peut tout bonnement pas y circuler. Le prix de cette commodité est que la non-linéarité se trouve placée littéralement hors-champ, invisible, donc irrémédiable, tant que la nomenclature n'offre aucune place au régime.

Cette archéologie a une utilité directe, et c'est ainsi qu'il faut s'en servir : connaître l'axiome qu'un texte code, c'est savoir d'avance la classe de déchets qu'il jugera mal. Là où une décision s'appuie sur REACH ou USEtox, on sait qu'il faut se méfier des substances à réponse non monotone ; là où elle s'appuie sur la liste des déchets ou sur CLP, des matériaux dont le danger dépend de la forme ; là où elle s'appuie sur EN 15804, des procédés susceptibles de basculer de régime. Le diagnostic de régime ne s'oppose pas à ces textes : il indique, pour chacun, le point précis où la lecture réglementaire doit être complétée par une lecture dynamique.

3. Conséquence méthodologique : évaluer le régime, pas seulement la quantité

La proposition constructive découle directement du diagnostic. Là où l'appareil statique dissimule l'incertitude dans une marge ou un seuil, une évaluation *consciente du régime* fait l'inverse : elle rapporte, à côté du chiffre, le régime que le système occupe. Est-on dans une réponse monotone ou non monotone ? une distribution bornée ou à queue lourde ? un état unique ou une bistabilité ? loin d'une bifurcation, ou tout près ? Ce n'est pas une information de plus noyée dans le rapport ; c'est la clé qui dit *comment lire le chiffre*, avec quelle confiance, et sur quel horizon.

Une jauge d'imprévisibilité. Pour rendre ce signal lisible sans alourdir la pratique, nous proposons de l'adosser au rapport sous la forme d'une jauge : un curseur unique sur une échelle colorée, à placer en tête du document, à côté du résultat principal, comme on appose un indice de confiance. Elle ne remplace pas le chiffre et ne prétend pas le corriger ; elle l'encadre, en disant : *ici, le résultat est aussi prévisible que la donnée le permet* ; ou au contraire : *ici, il faudrait d'abord améliorer la donnée, et si l'on ne peut pas, améliorer la prédictivité du résultat avant d'en faire une décision*. Concrètement, plutôt qu'un nombre

seul, on en présente deux (le résultat et son régime), et c'est leur écart qui situe l'étude dans une zone raisonnable ou non. Elle joue le rôle d'un témoin de tableau de bord : elle ne conduit pas à la place du praticien, mais elle lui dit quand lever le pied.

La jauge agrège quelques sous-scores que cet article a déjà tous introduits, ce qui la rend reproductible et non arbitraire. Le premier est la **proximité d'une bifurcation** : le système traité est-il, comme le digesteur du §7.5 ou le lac du §7.9, susceptible d'occuper deux régimes, et opère-t-on près du pli ? Les signaux d'alerte précoce (§7.6) en donnent la mesure. Le deuxième est le **type de non-linéarité** en jeu, c'est-à-dire l'axiome (S1–S4) le plus exposé, une réponse non monotone, une spéciation contextuelle ou une queue lourde ne pèsent pas de la même façon. Le troisième est l'**horizon du milieu**, l'exposant $\lambda_{\max}$ du §5.2 : un contaminant atmosphérique ou en sol digité hérite d'un horizon court. Le quatrième est le **régime de la donnée** elle-même, la note de qualité et son couplage, au sens du préprint compagnon. De ces sous-scores se déduit une position sur trois bandes : au **vert**, un régime stable et prévisible, où l'ACV standard et sa marge log-normale suffisent ; à l'**orange**, une zone de transition, où l'on recommande d'assortir le résultat de signaux d'alerte et d'une analyse de sensibilité ; au **rouge**, un régime bistable ou chaotique proche d'une bascule, où le chiffre seul ne doit pas porter la décision, laquelle relève alors des cadres du §4.

Figure 9. Proposition opérationnelle : la jauge d'imprévisibilité (régime du document)

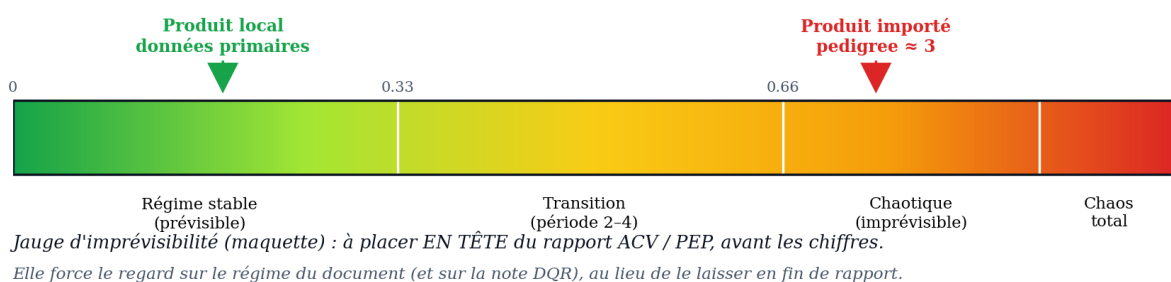


Figure 9. Maquette de la jauge d'imprévisibilité : du vert (régime stable, prévisible) à l'orange (transition) puis au rouge (proche d'une bascule, chaotique). Le curseur se place en tête de rapport, à côté du résultat. Exemple : un produit importé renseigné par des données de qualité moyenne glisse vers la zone de transition, là où un produit local bien caractérisé reste au vert.

Reste à dire comment un praticien s'en sert sans rompre la comptabilité existante, car c'est la condition de son adoption. La jauge ne modifie aucun calcul réglementaire : elle s'ajoute en page d'ouverture, comme une refonte de la note de qualité des données qui, au lieu de se résumer à un score, dirait aussi *de quel type* d'incertitude il s'agit. Un praticien qui intègre cette lecture dès le départ ne change pas ses inventaires ; il change les questions qu'il pose. Devant un digesteur, il vérifie la distance au pli avant de revendiquer un crédit ; devant un produit dont l'usage dépend d'un facteur volatil, l'électricité d'un luminaire (§1.1), il rapporte une fourchette de régime plutôt qu'un point ; devant un déchet dont le danger dépend de la forme, il teste le régime de lixiviation du contexte de stockage réel (§7.4) au lieu de la seule

teneur. Et il peut présenter tout cela à un auditeur sans heurter la norme, puisqu'il n'a rien retranché : il a seulement ajouté, à côté du nombre exigé, l'information qui dit s'il faut, ou non, lui faire confiance.

3.1 Classification des déchets par régime, non par seule catégorie

L'imprévisibilité d'un déchet ne tient pas tant à sa *nature* qu'à son *confinement* et à son *contexte*. Un même déchet inerte a, en principe, un faible taux d'imprévisibilité ; mais ce taux dépend en réalité de l'armature qui le protège, du mode de stockage, de la logistique qui le transporte, de l'environnement qui le reçoit et de la sensibilité climatique de la zone. Un inerte stocké à l'air libre, à côté de déchets ultimes, sous un climat agressif, n'occupe pas le même régime que le même inerte en confinement étanche. À l'autre extrême, un champ de vigne entier relève d'une très haute imprévisibilité même avec de bons outils et de bonnes données, parce que là, l'« armature » pertinente est le *cadrage lui-même*, l'étendue qu'on accepte d'analyser et les voies d'échappement qu'on choisit d'ignorer.

C'est pourquoi nous proposons, en complément de la classification réglementaire, une grille de lecture par régime : pour chaque grande famille de déchets, quel est le facteur qui déclenche la bascule (humectation, anaérobiose, perturbation mécanique, changement climatique) et quel niveau d'imprévisibilité en résulte. L'annexe A en donne une première version, conçue comme la graine d'un instrument plus ambitieux : un portefeuille de molécules et de catégories, indexé par régime, que nous esquissons en clôture.

4. Décider quand l'unité n'existe pas

Lorsque la sortie d'un système est bimodale (T2), l'espérance d'utilité classique trompe : sa moyenne tombe dans la vallée que le système n'occupe jamais. Décider sous régime non linéaire demande d'autres critères, choisis selon le régime diagnostiqué en partie I.

Minimax, garantir le pire cas. On choisit l'action qui minimise la pire conséquence possible. Pertinent quand la bascule est irréversible et la conséquence grave : dimensionner un digesteur loin du pli, surconfiner un persistant (TCDD) quel que soit le scénario redox envisagé. Coût : un surdimensionnement. Bénéfice : aucune branche catastrophique n'est atteignable.

Robustesse (info-gap, Ben-Haim 2006). On fixe un seuil de satisfaction (crédit énergétique $\geq X$, dose $\leq Y$) puis l'on maximise l'amplitude d'incertitude tolérée sans le violer. Pertinent quand il existe une zone d'acceptabilité à élargir, par exemple maintenir une exposition sous le pic d'une courbe non monotone (§7.2).

Gestion adaptative (Williams 2011). On agit, on observe des signaux, dont les signaux d'alerte précoce de §7.6, puis on corrige. Pertinent quand le suivi est possible et l'action réversible : sols à redox variable (§7.8) surveillés par sondes Eh, charge d'un digesteur ajustée sur la montée de variance des acides gras volatils. Inopérant pour les latences longues (TCDD), où l'alerte arriverait trop tard.

Régime diagnostiqué	Axiome violé	Réversibilité	Approche
Bistable, bascule grave	S1, S3	non	minimax
Dose-réponse non monotone	S2	oui	info-gap
Dépendant du contexte, suivi possible	S4	partielle	adaptative
Persistant multi-compartiments	S3, S4	non	minimax + générations futures

Un cas chiffré rend le choix concret. Reprenons le digesteur du §7.5, dont le pli est à $D_{\text{fold}} \approx 0,587 \text{ j}^{-1}$, et supposons que sa charge réelle fluctue de $\pm 25 \%$ autour de la consigne, une qualité de donnée moyenne, de l'ordre d'un DQR de 3. À quelle charge nominale l'exploiter ? L'espérance d'utilité naïve répond « le plus près possible du pli », pour maximiser le débit et donc le crédit méthane moyen ; c'est précisément le piège de T2, car tout près du pli la sortie est bimodale et la moyenne ne décrit aucun état réel. Les trois cadres donnent trois réponses distinctes, toutes rationnelles. Le **minimax** exige qu'aucun scénario ne provoque le washout : en pire cas, la charge réelle monte de 25 % et un coup de froid abaisse le pli d'environ 15 % (vers $0,50 \text{ j}^{-1}$) ; il faut alors $D_{\text{nominale}} \times 1,25 \leq 0,50$, soit $D \leq 0,40 \text{ j}^{-1}$, un débit amputé d'un tiers, mais aucune bascule atteignable. L'**info-gap** vise à rester un puits net tout en maximisant l'amplitude de fluctuation tolérée : pour être robuste à 35 % de variation (au-delà des 25 % attendus), on pose $D_{\text{nominale}} = 0,587 / 1,35 \approx 0,43 \text{ j}^{-1}$, un peu plus de débit que le minimax, au prix d'une vulnérabilité aux fluctuations extrêmes seulement. La **gestion adaptative**, enfin, exploite à $D \approx 0,50 \text{ j}^{-1}$ (au plus près du pli) mais surveille le temps de retour τ (la montée de variance des acides gras volatils, §7.6) et réduit la charge dès que le signal d'alerte s'allume ; elle capte le débit maximal, au prix de capteurs en ligne et d'une réversibilité d'action. Trois consignes ($0,40, 0,43, 0,50 \text{ j}^{-1}$), un seul système : le choix ne porte pas sur la précision d'un nombre, mais sur la posture que l'on adopte face à une bascule irréversible.

On peut voir ces trois cadres comme trois tempéraments devant la même falaise. Le minimax recule jusqu'à ne plus jamais risquer la chute ; l'info-gap s'approche du bord en gardant une marge sûre ; la gestion adaptative avance les yeux sur le vide, prête à reculer au premier vertige. Aucun n'a tort dans l'absolu ; chacun convient à un type de précipice, et tout l'art consiste à savoir, grâce au diagnostic, devant quel précipice l'on se tient.

Le diagnostic de régime n'est donc pas un raffinement académique : il sélectionne le cadre de décision. Se tromper de cadre (appliquer l'espérance d'utilité à un système bistable) n'est pas une imprécision, c'est une erreur de catégorie.

5. Conclusion

L'évaluation environnementale force parfois l'évaluateur à se tromper, non par incompetence mais parce que ses textes fondateurs ont gravé des axiomes que la réalité non linéaire contredit. On ne répare pas cela par un supplément de données : aucune accumulation de mesures ne corrige une hypothèse fausse. On le répare en rendant le régime visible, par une jauge d'imprévisibilité qui dit comment lire le chiffre, et par des cadres de décision (minimax, info-gap, gestion adaptative) choisis selon le régime diagnostiqué plutôt que selon une moyenne qui, près d'une bascule, ne décrit aucun état réel. Ces outils ne retranchent rien à la comptabilité existante ; ils ajoutent, à côté du nombre exigé, l'information qui dit s'il faut, ou non, lui faire confiance. C'est tout ce qu'un évaluateur peut honnêtement offrir à ceux qui vivront en aval de ses rapports : non la promesse que rien ne basculera, mais la lucidité de savoir où regarder, et le sang-froid de le faire à temps.

Annexe. Portefeuille de régimes : déchets, molécules et leurs bascules

Cette annexe est la graine d'un instrument plus vaste. Nous la concevons comme la première page d'un futur portefeuille, une base de données ouverte qui indexerait molécules et catégories de déchets par leur régime dynamique, leur axiome critique et leur déclencheur de bascule, à la manière d'un répertoire consultable avant toute évaluation. La grille ci-dessous en fixe le format ; sa version étendue, beaucoup plus fournie, fera l'objet d'un travail dédié.

La logique est celle du §3.1 : l'imprévisibilité d'un flux tient moins à sa nature qu'à son confinement et à son contexte. Chaque ligne associe donc, à une famille de déchet ou à une molécule, le régime qu'elle peut occuper, l'axiome qu'elle met en défaut, le facteur qui déclenche sa bascule, le niveau d'imprévisibilité qui en résulte et la vignette qui la traite.

Famille / molécule	Régime dominant	Axiome critique	Déclencheur de bascule	Imprévisibilité	Vignette
Inerte C&D (amas, couvert)	point fixe	(aucun)	(aucun)	basse	n/a
Inerte C&D (fines)	bascule de classe	S4	lixiviation acide, mouillage	moyenne → haute	§7.4
Gypse / plâtre	acidification	S4, S3	anaérobiose de décharge (H ₂ S)	haute	§7.4
Cendres volantes (fluor)	spéciation HF	S4	pH < 4 + silice réactive	moyenne → haute	§7.4
Digestat / biogaz	bistabilité de procédé	S1, S3	charge proche du pli	moyenne	§7.5
PFOA / PFAS	queue lourde, seuil mobile	S1, S4	révision toxicologique, accumulation	haute	§7.1
Perturbateurs endocriniens (BPA)	dose-réponse non monotone	S2	exposition de basse dose	haute	§7.2
Arsenic (sols)	bascule redox	S4	aération ↔ saturation (Eh)	haute	§7.8
Thiamethoxam (néonicotinoïde)	bifurcation populationnelle	S2	seuil de pertes de colonie	haute	§7.7
Phosphore (lixivié → lac)	hystérésis d'eutrophisation	S3	franchissement du seuil de charge	haute (irréversible)	§7.9
TCDD (dioxine)	persistance lipophile, multi- compartiments	S3, S4	battement de nappe, chaîne trophique	très haute	§8.1
Amiante (lié)	point fixe... jusqu'à rupture	S4	perturbation mécanique	basse → très haute	§7.4
Amiante (friable) / fibres	régime fibre	S4	mise en suspension	très haute	§7.4
Nanotubes (longs)	analogie fibre	S4	(mal caractérisé)	inconnue (à surveiller)	art. manifeste

Le format est volontairement homogène avec le diagnostic des axiomes (S1–S4) et la jauge du §3 : à terme, chaque entrée du portefeuille porterait aussi sa position sur la jauge d'imprévisibilité, de sorte qu'un praticien puisse, dès le cadrage d'une étude, lire le régime probable d'un flux avant d'en calculer le moindre impact.

Références

- Ben-Haim, Y. (2006). *Info-Gap Decision Theory: Decisions Under Severe Uncertainty* (2^e éd.). Academic Press.
 - Décision 2000/532/CE de la Commission. Liste européenne des déchets. *Journal officiel*.
 - Décision 2003/33/CE du Conseil. Critères et procédures d'admission des déchets dans les décharges. *Journal officiel de l'Union européenne*.
 - Règlement (CE) n° 1907/2006 (REACH) ; Règlement (CE) n° 1272/2008 (CLP). *Journal officiel de l'Union européenne*.
 - EN 15804:2012+A2:2019. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable, déclarations environnementales sur les produits*.
 - Rosenbaum, R. K., et al. (2008). USEtox, the UNEP-SETAC toxicity model. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(7), 532–546.
 - Williams, B. K. (2011). Adaptive management of natural resources: framework and issues. *Journal of Environmental Management*, 92(5), 1346–1353.
 - Zampori, L., & Pant, R. (2019). *Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method*. JRC Technical Report EUR 29682 EN, Commission européenne.
 - Piens, T. (2026). Chaotic dynamics in life-cycle inventory pedigree (preprint). Zenodo 10.5281/zenodo.20086772.
-

Supplément

Code et figures reproductibles (Python ; numpy/scipy/matplotlib), déposés en accès ouvert (DOI Zenodo à la première version stable). Les facteurs cités ne sont pas des points choisis mais des valeurs représentatives d'un espace de paramètres plausible, assorties de balayages de robustesse.