

Bifurcations démographiques et hystérésis dans l'ACV écologique : pourquoi les modèles dose-effet linéaires échouent à prédire l'effondrement des colonies et l'eutrophisation

Theo Piens, Ph.D.

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

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	3
1. Introduction	4
2. Néonicotinoïdes et abeilles : bifurcation populationnelle, effondrement de colonie (Henry et al. 2012)	5
3. Eutrophisation et bistabilité de lac : hystérésis, réduction P insuffisante (Scheffer 2001)	6
4. Systèmes imbriqués et émergence	7
4.1 Agent Orange : un flux qui couple eau, sol, air, vivant	8
5. Conclusion	9
Références	10
Supplément	10

Bifurcations démographiques et hystérésis dans l'ACV écologique : pourquoi les modèles dose-effet linéaires échouent à prédire l'effondrement des colonies et l'eutrophisation

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. L'écotoxicologie et l'ACV territoriale lisent l'effet d'un stresser comme une dose-réponse qui monte régulièrement : « moins de cause » donne « moins d'effet ». Cette linéarité gouverne la fixation des doses sans effet et les plans de restauration.

Objet. Nous appliquons la théorie des transitions critiques (Scheffer) à trois cas où la non-linéarité ne tient pas à la chimie d'un sol mais à la *démographie* d'une population et à l'*hystérésis* d'un écosystème. Dans les trois, réduire la cause ne réduit pas l'effet à proportion, parce que le système possède plusieurs régimes et que l'histoire départage.

Cas. Les **néonicotinoïdes et les abeilles**, d'abord : une dose sublétalement altère la navigation des forageuses (retour réduit de 10 à 32 % ; Henry et al. 2012) ; à l'échelle de la colonie, la rétroaction démographique transforme cet effet gradué en *bifurcation*, et doubler la dose ne double pas l'effet, il fait passer d'une ruche vivante à une ruche morte (S2). L'**eutrophisation de lac**, ensuite : deux états stables, clair et turbide, séparés par une *hystérésis* ; réduire le phosphore ne restaure pas le lac au seuil de bascule, car la rétroaction qui le maintient continue de tourner (S3). L'**Agent Orange**, enfin : un flux persistant et lipophile (TCDD) qui couple sol, nappe, chaîne trophique et générations, et dont l'imprévisibilité tient à la structure couplée du système, non à un manque de mesure.

Portée. Pour ces systèmes imbriqués, l'erreur la plus coûteuse n'est pas dans le chiffre : elle est dans l'hypothèse, tue, que le chemin ne compte pas. Dans un monde de régimes, le retour en arrière n'est jamais le chemin de l'aller parcouru à l'envers.

Abstract (English). Ecotoxicology and territorial LCA read a stressor's effect as a regularly rising dose-response, where less cause gives less effect, and this linearity governs no-effect doses and restoration plans. We apply critical-transitions theory (Scheffer) to three cases where the nonlinearity lies not in soil chemistry but in population *demography* and ecosystem *hysteresis*; in all three, reducing the cause does not reduce the effect in proportion, because the system holds several regimes and history decides. With neonicotinoids and bees, a sublethal dose impairs forager homing (return down by 10 to 32 %; Henry et al. 2012), and colony-level demographic feedback turns this graded effect into a *bifurcation*: doubling the dose flips a living hive to a dead one (S2). With lake eutrophication, two stable states, clear and turbid, are separated by *hysteresis*, and cutting phosphorus does not restore the lake at the tipping load because the stabilizing feedback keeps running (S3). With Agent Orange, a persistent lipophilic flux (TCDD) couples soil, groundwater, food chain and generations, and its unpredictability is structural, not a measurement gap. For such nested systems the costliest error is the silent assumption that path does not matter; in a world of regimes, going back is never the outbound path in reverse.

1. Introduction

Une évaluation linéaire tient une promesse rassurante : réduire la cause réduit l'effet, et dans la même proportion. Cet article montre, sur trois cas écologiques, que la promesse est fausse dès que le système possède plusieurs régimes. La non-linéarité n'y tient pas à la chimie d'un sol mais à la démographie d'une population, à l'hystérésis d'un lac, au couplage multi-échelles d'un persistant. Nous mobilisons la théorie des transitions critiques (Scheffer et al. 2001 ; Scheffer 2009) et deux axiomes de l'évaluation statique, la **caractérisation linéaire** (S2) et l'**indépendance au chemin** (S3), établis dans l'article-manifeste compagnon. Les signaux d'alerte précoce, contrepartie constructive de ces bascules, sont traités dans l'article compagnon consacré au digesteur anaérobie, auquel nous renvoyons.

2. Néonicotinoïdes et abeilles : bifurcation populationnelle, effondrement de colonie (Henry et al. 2012)

Voici un cas où la non-linéarité ne tient pas à la chimie d'un sol mais à la démographie d'une population. Une dose sublétales de thiamethoxam (un insecticide néonicotinoïde) ne tue pas l'abeille ; elle altère sa navigation. La forageuse part, butine, et ne retrouve pas la ruche. Henry et al. (2012) ont mesuré directement cet effet : selon la concentration, le succès du retour des forageuses chute de 10 à 32 %. À l'échelle de l'individu, l'effet est gradué, presque anodin.

À l'échelle de la colonie, il ne l'est pas. Une ruche est un système démographique doté d'une rétroaction : les forageuses ramènent les ressources qui permettent d'élever les forageuses de demain. Tant que la perte reste faible, la colonie compense. Mais il existe un seuil (de l'ordre de 30 à 50 % de pertes cumulées sur une saison) au-delà duquel la population ne se renouvelle plus assez vite, et l'effondrement s'enclenche, irréversible dans la saison. Ce n'est pas une réponse dose-effet qui monte régulièrement ; c'est une *bifurcation*.

Un modèle démographique minimal le rend visible. En partant d'une population de forageuses soumise à une perte naturelle et à une perte supplémentaire dépendant de la dose, et en plaçant le seuil d'effondrement à 35 % de pertes cumulées, on obtient un comportement net : à dose nulle ou faible, la colonie reste stable autour de son effectif ; mais lorsque la dose franchit une valeur critique (un simple facteur deux suffit dans nos unités), elle bascule d'un coup vers l'effondrement complet, la ruche étant perdue en milieu de saison. Doubler la dose ne fait pas un effet deux fois plus grand : il fait passer d'une colonie vivante à une colonie morte (figure V6).

Vignette V6 : Néonicotinoïdes et effondrement de colonie (Henry et al. 2012, Science)
Une dose sublétales réduit le succès du retour des forageuses. Au seuil critique, la colonie bascule de l'équilibre vers l'effondrement — un regime shift populationnel.

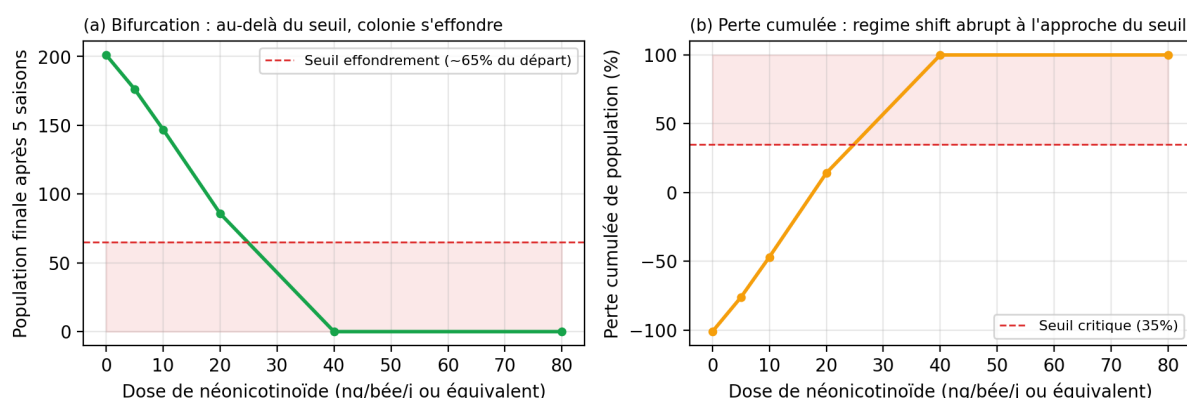


Figure V6. Néonicotinoïdes et abeilles : entre une colonie stable et une colonie effondrée, la bascule se joue sur un facteur deux de la dose. Un changement de régime que la réponse linéaire « dose → effet » ne prévoit pas.

C'est l'analogie écologique exacte de la bistabilité du digesteur (§7.5) : deux régimes, la colonie vivante et la colonie éteinte, une bascule abrupte entre eux, et un modèle linéaire de « dose → effet » incapable de l'anticiper, puisqu'il ne sait annoncer qu'un déclin proportionnel. Le mot « subléta1 » est ici le piège même. Il rassure, parce qu'aucune dose ne tue ; mais c'est leur addition silencieuse qui, un jour, franchit la ligne. On ne peut pas sommer de petits effets comme s'ils restaient petits : passé le seuil, leur somme ne grandit pas, elle change de nature, et une ruche qui bourdonnait encore la veille n'est plus, le lendemain, qu'une boîte de cire vide.

Falsifiable. Suivre des colonies exposées à des doses croissantes et mesurer non la mortalité individuelle mais la trajectoire démographique de la ruche : la lecture en régime prédit un seuil de bascule, non un déclin graduel.

3. Eutrophisation et bistabilité de lac : hystérésis, réduction P insuffisante (Scheffer 2001)

La dernière vignette est la démonstration la plus pure de l'axiome S3 (l'indépendance au chemin) pris en défaut, et elle vient de l'écologie des lacs (Scheffer et al., 2001). Un lac peu profond peut exister dans deux états stables. L'état *clair* est dominé par les plantes aquatiques enracinées, qui fixent les sédiments et séquestrent le phosphore ; l'eau y est limpide. L'état *turbide* est dominé par le phytoplancton, qui trouble l'eau, prive les plantes de lumière et les fait disparaître ; privé de leur ancrage, le phosphore est relargué des sédiments, ce qui nourrit encore le phytoplancton. Chaque état entretient sa propre cause : ce sont deux régimes auto-stabilisés.

Tant que la charge en phosphore reste faible, le lac est clair. Quand elle franchit un seuil, il bascule brutalement vers le turbide. Jusque-là, rien qu'un seuil. Le point décisif est ce qui se passe ensuite : si l'on *réduit* la charge en phosphore pour réparer, le lac ne redevient pas clair au même seuil. Il reste turbide bien en deçà, parce que la rétroaction qui le maintient (turbidité, mort des plantes, relargage du phosphore sédimentaire) continue de tourner. Il existe donc toute une plage de charges où les deux états sont possibles, et celui qu'occupe réellement le lac ne dépend pas de la charge présente, mais de l'histoire : par où l'on est arrivé. C'est l'hystérésis. Elle a la forme d'une porte récalcitrante : on la pousse, elle cède d'un coup ; mais pour la refermer, il ne suffit pas de cesser de pousser, il faut tirer, et tirer bien plus loin que le point où elle a cédé. C'est S3 mis en échec de la façon la plus coûteuse qui soit (figure V8).

Vignette V8 : Eutrophisation et bistabilité (Scheffer 2001, Nature)
Un lac peut basculer de l'état clair vers l'état turbide. Mais une fois turbide, réduire la source de phosphore ne suffit pas à le restaurer : hystérésis écologique.

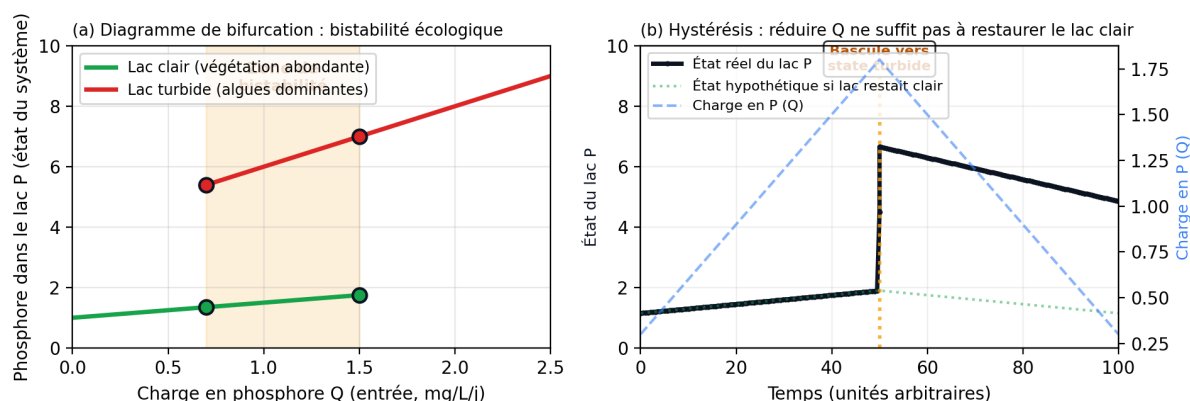


Figure V8. Hystérésis de l'eutrophisation : en augmentant la charge en phosphore, le lac suit la branche claire puis bascule vers la branche turbide ; en la réduisant, il reste turbide bien en deçà du seuil de bascule. Entre les deux seuils, l'état occupé dépend de l'histoire, non de la seule charge.

La conséquence pratique est amère pour qui finance des plans de restauration. Réduire la source de phosphore (ce que prescrit naturellement une évaluation linéaire, où « moins de cause » donne « moins d'effet ») *ne suffit pas* à restaurer un lac déjà basculé. Il faut soit la réduire drastiquement, bien en deçà du seuil de retour, soit intervenir sur la structure même du système : retirer le phosphore sédimentaire, manipuler le réseau trophique. Une ACV qui aurait crédité la réduction de phosphore d'un bénéfice proportionnel se serait trompée non sur l'ampleur, mais sur la *nature* de ce qui était en jeu. C'est, pour clore la série, l'illustration que l'erreur la plus chère n'est pas dans le chiffre : elle est dans l'hypothèse, tue, que le chemin ne compte pas. Détruire un équilibre coûte un seul franchissement ; le restaurer en coûte plusieurs, et parfois aucun ne suffit. C'est peut-être la leçon la plus sobre de toute cette partie : dans un monde de régimes, le retour en arrière n'est jamais le chemin de l'aller parcouru à l'envers.

Falsifiable. Sur un lac réel, comparer la charge de phosphore à laquelle il bascule vers le turbide à celle à laquelle il revient au clair : la lecture en régime prédit deux seuils distincts (hystérésis), la lecture linéaire un seul.

4. Systèmes imbriqués et émergence

Les neuf vignettes ne sont pas neuf anomalies indépendantes ; ce sont neuf vues d'une même structure. Un champ est un système niché dans un bassin versant, lui-même niché dans un climat ; la logistique environnementale du §6 opère à l'intérieur de ces emboîtements ; et le corps de déchet est lui-même un sous-système doté de sa dynamique interne. C'est l'image

que décrivent la théorie de la hiérarchie (Allen & Starr, 1982), la panarchie (Gunderson & Holling, 2002) et les écosystèmes vus comme systèmes adaptatifs complexes (Levin, 1998). La leçon tient en une formule, celle d'Anderson (1972) : *more is different*, le comportement du tout ne se réduit pas à la somme linéaire des parties. Et elle vaut même lorsque le déchet n'est ni vivant ni auto-reproductible : dès que de la matière interagit avec de la matière à travers ces échelles, émergent des échanges, des seuils, des régimes qu'on ne lit sur aucune des parties prises isolément. L'ontologie de l'unité statique n'est, au fond, que l'hypothèse de sommation linéaire (S2) appliquée à une hiérarchie qui, justement, ne se somme pas. La vignette qui suit en donne le cas le plus dramatique.

4.1 Agent Orange : un flux qui couple eau, sol, air, vivant

Aucun cas ne montre mieux ce couplage multi-échelles qu'Agent Orange. Entre 1962 et 1971, l'opération Ranch Hand a déversé sur le Vietnam (et, par débordement, sur le Laos et le Cambodge) de l'ordre de 74 à 80 millions de litres d'herbicides tactiques, dont environ 60 % d'Agent Orange, un mélange à parts égales de 2,4-D et de 2,4,5-T. Le 2,4,5-T était contaminé par un sous-produit de synthèse, la dioxine 2,3,7,8-TCDD, dont on estime que quelque 170 kg ont été disséminés (Stellman et al., 2003). Ces chiffres ne sont pas l'objet de la vignette ; ils en fixent l'échelle. L'objet, c'est ce que devient cette masse une fois entrée dans la hiérarchie sol–nappe–vivant.

Et ce qu'elle devient illustre, en grand, la limite de prédictibilité de l'article. Quelques années après l'épandage, le système se stabilise assez pour qu'on estime une contamination résiduelle moyenne ; mais dans l'intervalle, et bien au-delà, l'imprévisibilité domine, parce que la TCDD n'obéit pas à un transport simple. C'est une molécule fortement *lipophile* : son coefficient de partage octanol-eau vaut environ 6,9 en logarithme, sa solubilité dans l'eau est infime, et sa demi-vie d'élimination chez l'humain est de l'ordre de sept à huit ans (estimée sur la cohorte de Seveso). Elle ne se dilue donc pas, elle se *concentre* : dans les graisses des organismes, puis le long de la chaîne trophique par biomagnification, de sorte que la dose qui compte n'est pas celle du sol mais celle, multipliée, qui remonte jusqu'au prédateur et à l'humain, parfois sur la génération suivante, via les réserves grasses maternelles.

Une précision de chimie s'impose ici, car l'intuition de terrain mêle deux mécanismes qu'il faut distinguer. Le premier est celui qu'on vient de décrire : une molécule lipophile fuit l'eau pour se loger dans les graisses, y persiste et s'y accumule, c'est la TCDD, et c'est déjà une source d'imprévisibilité, car ces réserves relarguent lentement, longtemps après. Le second est plus retors : certaines substances persistantes sont à la fois *hydrophobes et lipophobes*, fuyant l'eau *et* la graisse. C'est la signature des composés perfluorés, les PFAS du §7.1, et c'est précisément la propriété qu'on recherche dans les revêtements antiadhésifs : repousser l'eau et l'huile à la fois. Or une molécule que ni l'eau ni la graisse n'accueillent est une molécule que l'organisme peine à éliminer par l'une ou l'autre voie, et qui, lourde et stable, s'accumule faute

de porte de sortie. Les deux mécanismes mènent à la persistance dans le vivant, mais par des chemins opposés ; les confondre, c'est se tromper de compartiment. La rigueur impose donc de séparer la voie lipophile, celle des dioxines, de la voie amphiphobe, celle des perfluorés, toutes deux défiant l'hypothèse d'un devenir simple, mais pas de la même façon.

À ce couplage biologique s'ajoute un couplage avec les nappes que l'appareil statique ignore tout autant. Une molécule très hydrophobe ne se dissout pas dans l'eau souterraine ; elle s'associe à la matière organique et, surtout, aux phases huileuses non aqueuses, un reste de carburant, un hydrocarbure du sol. Plus légères que l'eau, ces phases flottent au-dessus de la nappe et y piègent le contaminant dans une frange, entre la terre et l'eau. Tant que la nappe est stable, le stock paraît dormant ; mais une pluie, une remontée saisonnière, un battement du niveau remettent l'eau au contact de cette frange et remobilisent le contaminant (vers la surface ou vers l'aquifère) par à-coups, des années après le dépôt. C'est un cas d'école de dépendance au chemin (S3) doublée de logistique chimique (§6.5) : la même quantité, au même endroit, est inerte ou mobilisée selon la seule histoire hydrologique récente. Même en connaissant exactement ce qui a été déversé, on ne peut prédire ni l'instant ni l'ampleur de ces relargages. L'imprévisibilité, une fois encore, ne vient pas d'un manque de mesure, mais de la structure couplée du système lui-même.

Il faut maintenant nommer ce que cachent ces équations, car c'est ici que le propos de ce livre cesse d'être technique. Une molécule lipophile et persistante ne se contente pas de durer : elle voyage dans le temps. Logée dans les graisses, transmise de la mère à l'enfant, concentrée à chaque maillon de la chaîne alimentaire, elle reporte sa dose sur des êtres qui n'étaient pas nés quand elle a été répandue. Le Vietnam compte encore, deux générations plus tard, des malformations et des cancers que les épidémiologistes rattachent à ces épandages ; le détail des chiffres reste discuté, le sens général ne l'est plus. C'est l'illustration la plus grave de notre thèse. Quand l'évaluation statique se trompe sur un persistant, l'erreur n'est pas une imprécision comptable que l'on rectifiera l'an prochain : c'est une dette qui se transmet. Le chiffre est inscrit aujourd'hui ; il est payé demain, par d'autres, et il ne se corrige plus. Évaluer un déchet n'est jamais seulement mesurer une quantité. C'est, parfois, hypothéquer un avenir. Voilà pourquoi Agent Orange referme cette partie : il rappelle que les régimes dont nous parlons ne sont pas des abstractions de dynamiciens, mais le cadre réel où se jouent des vies.

5. Conclusion

Trois systèmes, trois régimes, une même leçon. Une colonie d'abeilles, un lac peu profond, un territoire contaminé par un persistant ne répondent pas à un stresser par un déclin proportionnel : ils tiennent un état jusqu'à ce qu'ils basculent, puis tiennent l'autre. La théorie des transitions critiques nomme ces bascules et, par les signaux d'alerte précoce, en accorde

le pressentiment. Pour l'évaluation, la conséquence est sévère : créditer une réduction de cause d'un bénéfice proportionnel, c'est se tromper non sur l'ampleur mais sur la *nature* de ce qui est en jeu. Détruire un équilibre coûte un seul franchissement ; le restaurer en coûte plusieurs, et parfois aucun ne suffit. C'est, pour cette branche écologique du programme, la leçon la plus sobre : dans un monde de régimes, le retour en arrière n'est jamais le chemin de l'aller parcouru à l'envers.

Références

- Allen, T. F. H., & Starr, T. B. (1982). *Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity*. Springer.
 - Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science*, 177(4047), 393–396.
 - Gunderson, L. H., & Holling, C. S. (2002). *Panarchy*. Island Press.
 - Henry, M., Béguin, M., Requier, F., Rollin, O., Odoux, J. F., Aupinel, P.,... & Decourtye, A. (2012). A common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees. *Science*, 336(6079), 348–350.
 - Levin, S. A. (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems*, 1(5), 431–436.
 - Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591–596.
 - Scheffer, M. (2009). *Critical Transitions in Nature and Society*. Princeton University Press.
 - Stellman, J. M., Stellman, S. D., Christian, R., Weber, T., & Tomasallo, C. (2003). The extent and patterns of usage of Agent Orange and other herbicides in Vietnam. *Nature*, 422, 681–687.
 - 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.