



DES EQUILIBRES FRAGILES AUX RUPTURES SYSTEMIQUES: UNE RELECTURE
DES POINTS DE BASCULEMENT AU PRISME DE LA DYNAMIQUE DES SYSTEMES

Arnaud DIEMER

Revue Francophone du Développement Durable

ISSN 2269-1464

2026 - n°27 - Mars

Pages 33 - 65.

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://erasme.uca.fr/publications/revue-francophone-du-developpement-durable/>

Pour citer cet article

DIEMER A. (2026), Des équilibres fragiles aux ruptures systémiques: une relecture des points de basculement au prisme de la dynamique des systèmes, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°27, Mars, p. 33 - 65.

Des équilibres fragiles aux ruptures systémiques : une relecture des points de basculement au prisme de la dynamique des systèmes

Arnaud DIEMER

Université Clermont Auvergne, CERDI (CNRS-IRD), LISC (INRAE)

Postgrowth Institute, French Chapter of System Dynamics Society

Schumacher Institute Fellowship

Résumé : Les points de basculement désignent des seuils critiques où un système change brutalement d'état sous l'effet de dynamiques non linéaires et de rétroactions positives. En dynamique des systèmes, ils apparaissent notamment lorsque les flux dépassent la capacité d'absorption des stocks, entraînant une perte de stabilité. Ces phénomènes sont communs à des domaines variés : climat, santé, sécurité alimentaire, technologies ou résilience communautaire. Les points de basculement peuvent être négatifs (crises, effondrement) mais aussi et surtout positifs, comme l'adoption rapide des véhicules électriques ou des changements de comportements. Leur dynamique est influencée par des facteurs structurels (boucles de rétroaction, retards) mais aussi par des phénomènes stochastiques, rendant les transitions parfois probabilistes. Les archétypes de systèmes permettent d'identifier des patterns récurrents, tandis que les points leviers de Donella Meadows indiquent où agir pour influencer ces dynamiques. L'enjeu central est de passer d'une compréhension des basculements à une capacité de pilotage des systèmes, en anticipant les seuils critiques, en renforçant la résilience et, lorsque c'est possible, en orientant les transactions vers des trajectoires soutenables.

Mots clés : Bifurcations, Boucles de rétroaction, Points de basculement, Points leviers, Seuil critique

La question des *Tipping Points* (points de basculement) a été introduite lors des travaux sur le réchauffement climatique¹ (Robinson, Calov, Ganopolski, 2012, Ditlevsen, Johnsen, 2010, Nobre, Bornha, 2009, Schellnhuber, 2009, Lenton & al., 2008), il s'agissait d'une part, de comprendre de quelle manière les événements extrêmes pouvaient apparaître, et d'autre part, d'identifier les leviers susceptibles de faire basculer un système (Rockström & al., 2018). Dans les rapports scientifiques du GIEC (IPCC, 2021) évoquant le changement climatique induit par les émissions de GES, l'adoption généralisée de la voiture électrique était ainsi associée à un point de basculement.

Selon Lenton & al. (2008), le point de basculement est un seuil au-delà duquel « une petite perturbation peut qualitativement altérer l'état ou le développement futur d'un système ». Pour Scheffer (2009), cela équivaut à une « transition critique dans laquelle un petit changement des conditions externes provoque un changement brutal de l'état du système ». Strogatz (2015) relie les points de basculement aux bifurcations des systèmes dynamiques non linéaires où la structure des équilibres change.

¹ Les travaux de Gladwell (2000) et Milkoreit (2023) ont étendu leur champ d'action aux sciences sociales. De leur côté, Kopp, Shwom, Wagner & Yuan (2016) et Arthur (1994) les ont appliqués aux systèmes sociotechniques.

Plus récemment, Abrams & al. (2026) ont proposé une synthèse interdisciplinaire de la littérature sur les points de basculement et identifié trois propriétés essentielles - les rétroactions auto-renforçantes, le comportement de seuil et la persistance - comme caractéristiques déterminantes de la dynamique de basculement.

Dans ce qui suit, nous considérerons qu'**un point de basculement désigne, dans un système dynamique, un seuil critique à partir duquel une perturbation, même faible, peut entraîner un changement qualitatif abrupt et souvent irréversible de l'état du système, en raison de mécanismes non linéaires et de rétroactions internes.** Dans le cadre de la dynamique des systèmes (Diemer, 2026), il correspond généralement à une bifurcation où un état d'équilibre disparaît ou devient instable, conduisant le système à évoluer vers un nouvel attracteur.

Un système est un groupe d'éléments interactifs ou interdépendants qui agissent selon un ensemble de règles communes pour former un tout reconnaissable et unifié - par exemple, une économie. Un point de basculement est un type de seuil (Lenton, 2020, 2013). C'est un seuil critique à partir duquel un système subit un changement brutal, souvent irréversible, de son état ou de sa dynamique (Scheffer, 2009). Le petit changement qui fait qu'un système passe un point de basculement peut être décrit comme un déclencheur. Le changement important qui en résulte, s'apparente à un changement qualitatif de l'aspect ou du fonctionnement d'un système - par exemple, le passage d'une économie alimentée par des combustibles fossiles à une économie alimentée par des énergies renouvelables (Kopp & al., 2016).

En dynamique des systèmes, les points de basculement sont souvent confondus avec les points leviers de Donella Meadows (2008). Ces derniers montrent où agir dans un système alors que les points de basculement indiquent comment le système réagit. Ces deux notions sont donc complémentaires mais bien différentes. Les points leviers sont des endroits dans un système où une petite action peut produire de grands effets, il existe ainsi une hiérarchie (12 leviers) d'interventions allant des paramètres aux paradigmes. Une action dans un système entraîne une transformation de ce même système. Les points de basculement sont des seuils critiques internes au système, au-delà desquels il change brutalement d'état. La dynamique du système est en rupture.

Tableau 1 : Les différences fondamentales entre points leviers et points de basculement

<i>Aspect</i>	<i>Points leviers</i>	<i>Points de basculement</i>
Origine	Décision humaine	Structure du système
Objectif	Transformer efficacement	Comprendre/anticiper
Nature	Outil d'intervention	Propriété du système
Temporalité	Choix d'action	Résultat d'une dynamique
Contrôle	Potentiellement maîtrisable	Souvent subi

Malgré leurs différences, les points leviers et les points de basculement partagent plusieurs caractéristiques : (i) leur nature non linéaire (une petite cause a de grands effets) ; (ii) leur dépendance à la structure (les deux dépendent des boucles de rétroaction) ; (iii) leur vision systémique (ils sont au coeur de la dynamique des

systèmes). D'une certaine manière, un point levier peut enclencher ou éviter un point de basculement (des points leviers sont des sortes de boutons d'action qui permettent d'influencer les points de basculement). Le passage de l'un à l'autre peut être décomposé en trois étapes : (1) identification de la structure du système (stocks, flux, boucles de rétroaction), (2) localisation des points de basculement (seuils critiques, zones d'instabilité), (3) Mise en évidence des points leviers (où agir pour s'éloigner du seuil ou déclencher une transition souhaitée).

Cet article propose une relecture des points de basculement à la lumière d'une méthode, la dynamique des systèmes, initiée par Forrester dans les années 60. Nous précisons dans un premier temps, les mécanismes fondamentaux et quelques illustrations des points de basculement. Puis, dans un deuxième temps, nous verrons comment modéliser les points de basculement dans un modèle quantitatif. Enfin, dans un troisième temps, nous nous appuyons sur quelques études de cas pour positionner les points de basculement au niveau des diagrammes de boucles causales et des diagrammes stocks flux en vue de simuler et scénariser un modèle.

Le point de basculement en dynamique des systèmes

En dynamique des systèmes, l'évolution du système dépend de variables d'état, de boucles de rétroaction et de paramètres². Lorsque certaines conditions franchissent un seuil critique, le système peut passer d'un équilibre stable à un autre (Sterman, 2000).

Un point de basculement est généralement associé à :

- Une non linéarité forte,
- Des effets de seuil,
- Des boucles de rétroaction positives amplificatrices
- Une possible hystérésis (le retour en arrière nécessite des conditions différentes de celles du basculement).

Un point de basculement doit ainsi être compris comme une propriété émergente des systèmes complexes, révélant leur vulnérabilité à des changements rapides lorsque certaines limites critiques sont franchies (Dakos & al., 2012, Dakos & al., 2008).

Les mécanismes fondamentaux

- Les points de basculement émergent souvent de **l'interaction entre des boucles négatives (stabilisatrices) et des boucles positives (déstabilisatrices)**. Lorsque les rétroactions positives dominent, une petite perturbation peut entraîner un changement disproportionné.

² Ce chapitre intègre des éléments qui seront développés dans le chapitre 12 – Le modèle stocks flux. A ce titre, le lecteur peut faire des va et vient entre ces deux chapitres pour se familiariser avec la construction d'un SFD et les possibilités de simulation par ordinateur.

- Mathématiquement, les points de basculement correspondent à **des bifurcations** dans les systèmes dynamiques (Ashwin & al., 2012). A ce stade, un équilibre disparaît ou devient instable (Strogatz, 2015). De manière générale, la question des points de basculement renvoie à la position de ces points dans une **structure de comportement** (c'est la forme mathématique ou graphique que prend une fonction).

Figure 1 : Les points de bascule et les structures de comportement



Source : Gladwell, 2000

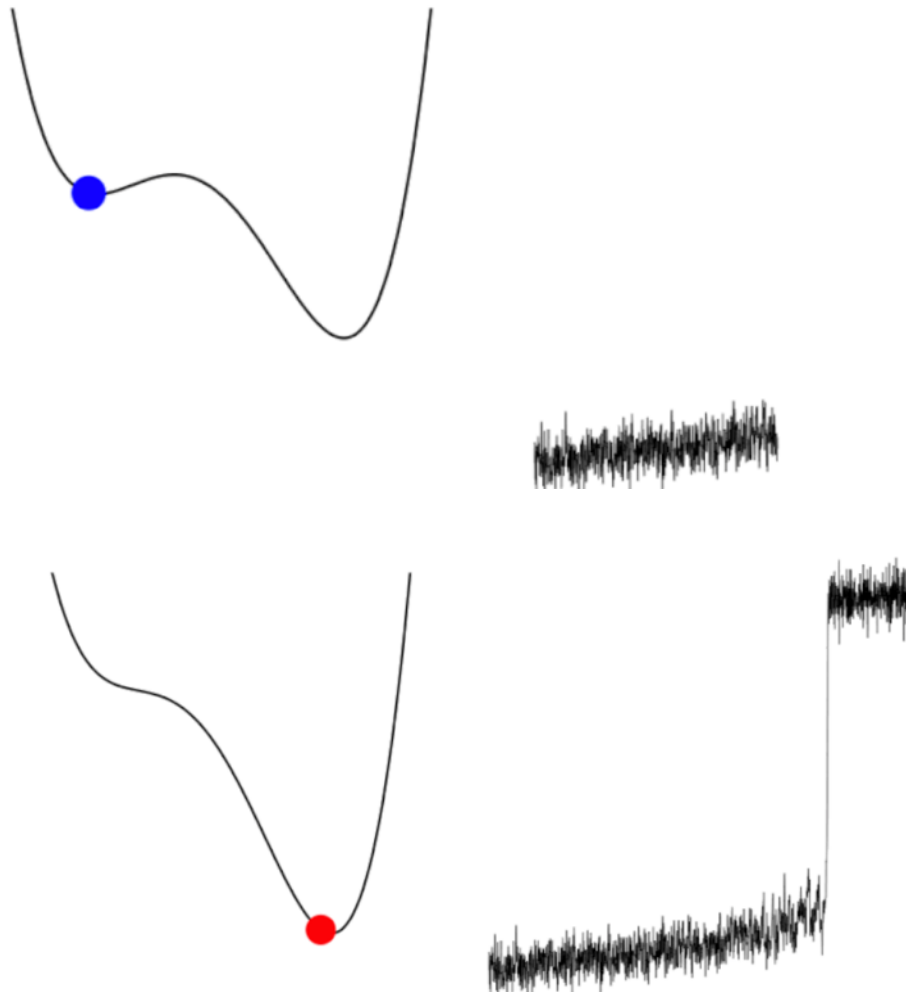
Le système commence (en bleu) dans l'un des deux états stables possibles, représenté par la boule dans la vallée de gauche. Sous l'effet d'un forçage externe au fil du temps (de gauche à droite), cet état perd de sa stabilité (violet), ce qui se traduit par une vallée de moins en moins profonde et un abaissement du sommet de la colline. Passé un point de basculement, l'état stable initial disparaît et le système subit un changement brusque et auto-propulsé vers l'autre état stable restant (rouge).

Le changement associé au passage d'un point de basculement comprend généralement les qualités suivantes :

- la brusquerie (le changement est rapide par rapport aux facteurs qui le forcent) ;
- l'auto-perpétuation (le changement se poursuit même si le forçage est supprimé, jusqu'à ce qu'un nouvel état soit atteint) ;
- l'irréversibilité (le changement est difficile ou impossible à inverser) (Milkoreit et al., 2018).

Concrètement, deux effets interviennent : (1) des amplitudes et donc des écart-types qui s'éloignent de la moyenne (la fonction reste cependant continue, point bleu sur la courbe), (2) un décrochage (passage à un palier supérieur ou inférieur) qui va rompre la continuité de la fonction (logique de temps discret).

Figure 2 : Les points de bascule, une sorte de décrochage du système



Source : Gladwell, 2000

Dès lors, un point de basculement se produit lorsque le changement dans une partie d'un système devient auto-entretenu au-delà d'un seuil, entraînant un impact substantiel, généralisé, fréquemment abrupt et souvent irréversible (Armstrong McKay et al., 2022 et Milkoreit et al., 2018). Cette définition inclut les possibilités de points de basculement non interrompus et réversibles (Klose & al., 2020) ou plus largement le risque significatif de défaillances en cascades entre des éléments de basculement en interaction³ (Fang, Wang, Kurths, Fan, 2025 ; Wunderling & al., 2021).

Les qualités des points de basculement décrites ci-dessus peuvent résulter de plusieurs caractéristiques génériques des systèmes dans lesquels ils se produisent et des forces auxquelles ils sont soumis (Wunderling & al., 2021) Un mécanisme de rétroaction (ou boucle de rétroaction) est une boucle fermée de causalité par laquelle

³ De telles interactions peuvent augmenter considérablement le risque systémique dans un contexte de réchauffement climatique.

un changement dans un système se répercute en amplifiant ou en atténuant ce changement. Les mécanismes de rétroaction peuvent être mathématiquement positifs ou négatifs, selon qu'ils amplifient ou atténuent les effets d'un changement. Le basculement peut se produire lorsque les mécanismes de rétroaction amplificateurs/renforçants (positifs) dépassent les mécanismes amortisseurs/équilibrants (négatifs) et deviennent suffisamment puissants pour soutenir un changement qui se perpétue de lui-même (Thom, 1972, Hastings, Petrovskii, Vitolo, Cox, 2012).

- Avant un basculement, le système perd progressivement sa capacité à absorber les perturbations (Lenton, 2013, 2011). C'est à la fois, un ralentissement critique (critical slowing down), une augmentation de la variance et une corrélation temporelle accrue. Ces signaux sont l'expression d'une perte de résilience et sont utilisés pour anticiper les transitions critiques (Armstrong McKay, 2022).

Quelques illustrations de points de basculement

La forêt amazonienne

L'Amazonie génère sa propre pluie grâce à l'évapotranspiration des arbres (Nobre, Borna, 2009). Si la déforestation et le réchauffement dépassent un certain seuil (estimé à 20-25% de perte de couverture forestière), la forêt pourrait ne plus maintenir son cycle hydrologique. L'une des conséquences pourrait être le basculement vers une savane sèche, avec perte massive de biodiversité et libération de milliards de tonnes de CO₂ (Nobre, Lovejoy, 2019).

Le climat

Dans un système climatique, plusieurs éléments sont susceptibles de basculer : la fonte de la calotte du Groenland et ses effets sur le niveau des océans (Robinson, Calov, Ganopolski, 2012), la fonte des glaciers et ses effets sur les réserves d'eau douce, le dépérissement de l'Amazonie et son effet sur l'absorption du CO₂... Les travaux de Franckle & al. (2022) et de Lenton & al. (2008) ont largement contribué à identifier ces points critiques globaux.

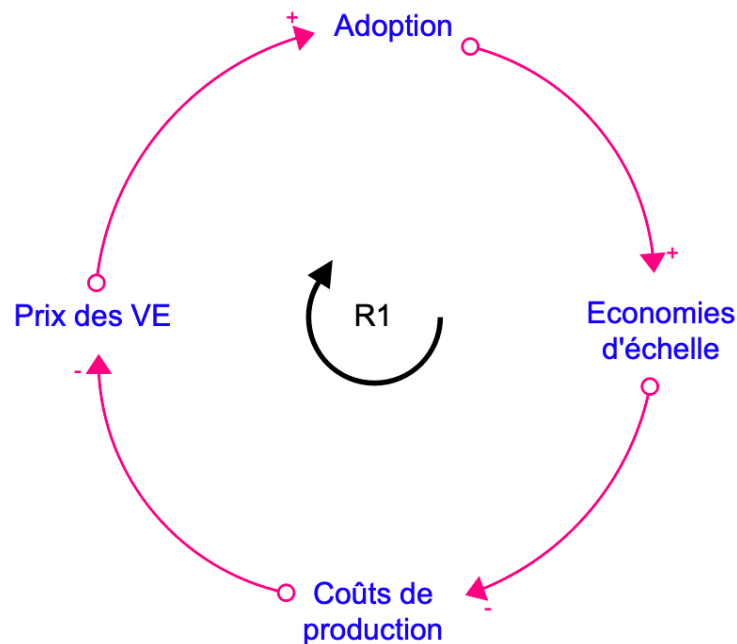
L'adoption de la voiture électrique

Initialement, le monde fait face à une adoption lente des véhicules électriques car ces voitures sont chères, il y a peu d'infrastructures de recharge, et un certain scepticisme des consommateurs sur leur autonomie kilométrique. Le point de bascule intervient lorsqu'un certain pourcentage de la population adopte les voitures électriques (15 à 20% des ventes annuelles, AIE, 2022), cela déclenche alors une baisse des coûts de production (économie d'échelle), une multiplication des bornes de recharge et un effet de norme sociale (les ménages cherchent à s'équiper en voiture électrique). Économiquement, le point de bascule illustre le passage d'un marché de niche à un marché de masse (Diemer, 2000). La diffusion en S (relation comportement structure,

les effets d'apprentissage et les externalités de réseau illustrent ce que l'on pourrait appeler un basculement socio-technique.

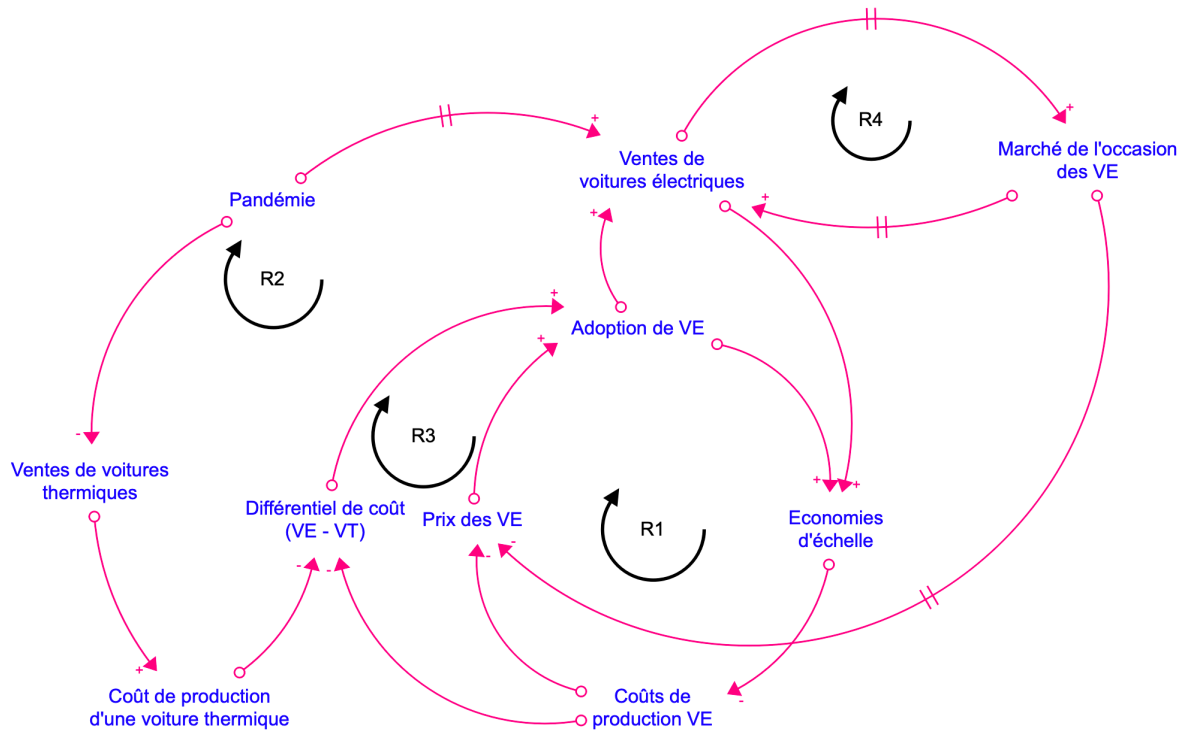
Les véhicules électriques pourraient même atteindre un point de basculement auto-entretenu. Dès lors la transition pourrait devenir irréversible sans politique supplémentaire. Ce résultat repose sur une boucle positive typique d'un point de basculement : adoption → Economies d'échelle → baisse des coûts de production → baisse des prix de ventes → hausse de l'adoption.

Figure 3 : La boucle de rétroaction positive d'un point de basculement



Cette idée rejoint un article de Lam & Mercure (2022) dans lequel le basculement vers les voitures électriques dépendrait de leur accessibilité pour les utilisateurs actuels de voitures thermiques et des conséquences de la pandémie (Coronavirus). En effet, en analysant les ventes de voitures sur les quatre grands marchés internationaux de 2016 à 2021, les auteurs constatent que la pandémie a considérablement affecté les ventes de voitures thermiques (de nombreux modèles ont été retirés du marché) tandis que la sortie de crise a produit une explosion des ventes de voitures électriques (R2). C'est ce basculement qui fait que le coût d'une voiture électrique est en train de se rapprocher tout doucement du coût d'une voiture thermique et qui rend la technologie accessible à grande échelle (R3). Boulton, Buxton et Lenton (2025) ajoutent que ce basculement en termes de coût peut être accentué par l'émergence d'un marché de l'occasion des voitures électriques, ce qui pourrait déclencher un basculement social massif (R4).

Figure 4 : Pandémie, Coût de production et marché de l'occasion, les trois points de basculement vers les voitures électriques.



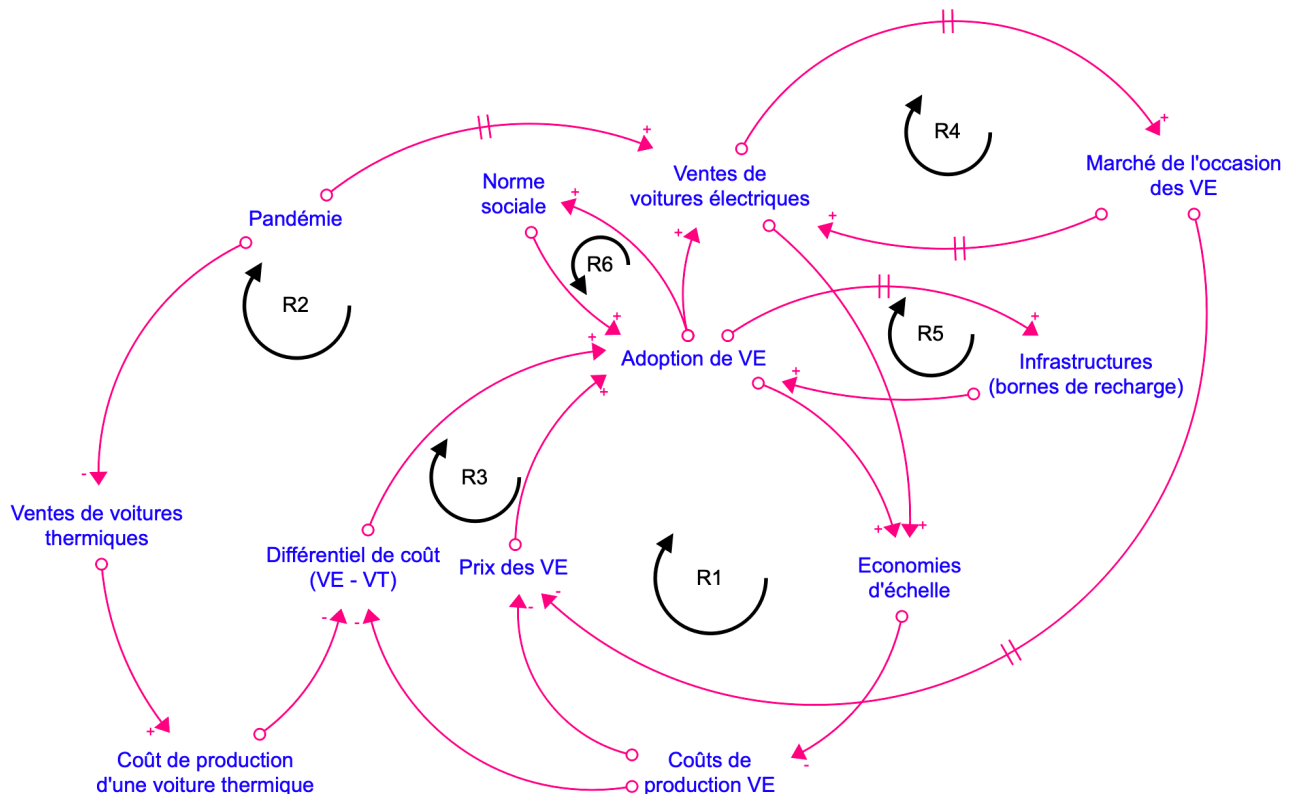
La baisse de la consommation

En période de crise (hausse du prix du pétrole, augmentation du prix des aliments, inflation), les ménages réduisent leurs dépenses (suite à une dégradation de leur pouvoir d'achat. Si la confiance des ménages chute au-delà d'un certain seuil, la baisse de la consommation devient auto-entretenue. La boucle de renforcement (+) s'intensifie : consommation (signe -), production (signe -), licenciement (signe -) consommation (signe -). Une spirale récessive apparaît et peut être difficile à enrayer sans intervention publique (logique des trappes, Krugman, 1998). De manière générale, des transitions rapides se produisent dans le cas d'une adoption technologique (voir le cas de la voiture électrique), de crises financières ou de dynamiques d'opinion.

Notons ici que la baisse de la consommation comme point de basculement est plus subtile que le basculement vers les voitures électriques. C'est typiquement une forme de *Social Tipping Point* ou de *Behavioral Tipping Point*. Otto & al. (2020) ont ainsi montré que des changements de comportements en termes de consommation ou de norme sociale pouvaient déclencher des transitions rapides à grande échelle. Dès lors, c'est la combinaison de plusieurs tipping points (adoption de la voiture électrique, baisse de la consommation et changement de normes sociales) qui constitue l'un des enjeux principaux (Lenton & al., 2020 ; Centola & al., 2018). Les points de basculement

pourraient ainsi avoir une structure identique : une boucle de renforcement (adoption des VE, baisse des coûts, baisse des prix, hausse de l'adoption, R1), un effet réseau (plus d'utilisateurs, plus d'infrastructures – ici les bornes de recharge – plus d'adoption, R5) et un changement de normes sociales (passage d'une minorité à une majorité de détenteurs de VE, R6). Bien entendu, ce genre de basculement n'est pas automatique, il peut même être progressif (importance du délai temporel) ou dépendant de politiques.

Figure 5 : Une structure identique de points de basculement



Modélisation des points de basculement

La modélisation des points de basculement peut prendre plusieurs formes :

Une approche par systèmes dynamiques non linéaires

L'exercice de modélisation repose ici sur la théorie des systèmes dynamiques où l'évolution d'un système est décrite par des équations différentielles non linéaires :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \delta)$$

où x représente l'état du système et δ un paramètre de contrôle.

Un point de basculement survient lorsqu'une variation de δ entraîne une modification qualitative du comportement du système (Strogatz, 2015).

On parle alors de bifurcation. Il peut s'agir d'une bifurcation de selle-nœud (disparition soudaine d'un équilibre stable), d'une bifurcation de Hopf (apparition d'oscillations), d'une bifurcation transcritique ou pitchfork (échange de stabilité des états). Ces bifurcations ont été décrites par Steven Strogatz (2015) dans son ouvrage *Nonlinear Dynamics and Chaos*.

Une approche par les paysages et les attracteurs multiples

Une manière intuitive de représenter un point de basculement consiste à utiliser un paysage de potentiel : les vallées représentent des états stables (attracteurs) et des crêtes représentent des seuils critiques. Lorsque le système est perturbé ou que le paysage se déforme (via un paramètre externe), un attracteur peut disparaître, forçant le système à basculer vers un autre état. Cette approche est utilisée en écologie (Scheffer, 2009).

Hystérésis et Irréversibilité

Un aspect clé des points de basculement est l'hystérésis : (i) le seuil de transition aller est différent du seuil de retour, (ii) le système peut rester bloqué dans un nouvel état même si les conditions initiales sont restaurées (Ashwin, Wieczorek, Vitolo, Cox, 2012). Mathématiquement, cela correspond à des zones de multi-stabilité où plusieurs attracteurs coexistent (Thom, 1972). Ce phénomène est crucial dans les systèmes climatiques, les systèmes économiques, les transitions énergétiques.

Les signaux précoces de type Early Warning Signals

Avant un point de basculement, certains indicateurs statistiques peuvent être détectés. Leur modélisation repose sur l'analyse de séries temporelles. Les principaux signaux sont le ralentissement critique (critical slowing down), l'augmentation de la variance, l'augmentation de l'autocorrélation et l'asymétrie des fluctuations. Ces phénomènes s'expliquent par la diminution de la résilience du système (le retour à l'équilibre devient plus lent). Cette approche a été largement documentée par Dakos & al. (2012).

Les modèles de dynamique des systèmes

En dynamique des systèmes, les points de basculement émergent de l'interaction entre les stocks (accumulation), les flux et les boucles de rétroaction (Sterman, 2000). Contrairement aux modèles analytiques, ces modèles reposent sur la simulation. L'exemple typique est celui du World 3 dans lequel on a une boucle de rétroaction positive (croissance), une contrainte de ressources (limite), un dépassement (overshoot) et un effondrement rapide (basculement).

Les modèles stochastiques et bruit

Dans les systèmes réels, le bruit joue un rôle important :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \delta) + \sigma\eta(t)$$

où $\eta(t)$ est un bruit aléatoire. Le bruit peut déclencher un basculement avant le seuil théorique ou provoquer des transitions entre états stables (fuites d'attracteurs). On introduit ici la notion de basculement induit par le bruit (*noise-induced tipping*). Ashwin & al. (2012) apportent une distinction entre ce qu'ils appellent un B-tipping (c'est la bifurcation), un N-tipping (c'est le bruit) et le R-tipping (c'est la vitesse du changement). De leur côté, Thompson et Sieber (2010) ont analysé les points de basculement climatique en proposant une estimation probabiliste du moment du basculement et une intégration du bruit dans les bifurcations. Dès lors, Bifurcation + Bruit = *Tipping Point Probabiliste*. Enfin, Guivarch et Pottier ont intégré le risque de basculement dans les modèles économiques via une approche probabiliste des dommages (c'est le coût social des émissions de GES et du réchauffement climatique). Les tipping points augmentent fortement le risque économique.

Les approches numériques et la simulation

Les méthodes numériques permettent d'explorer les points de basculement. Plusieurs techniques peuvent être utilisées : (i) analyse de bifurcation (logiciels tels qu'AUTO, MATCONT), (ii) les simulations Monte Carlo, (iii) l'analyse de sensibilité, (iv) les scénarios prospectifs. Ces outils sont essentiels lorsque les systèmes sont de grande dimension ou que les équations sont inconnues ou difficiles à résoudre.

Evangelou & al. (2023) ont ainsi étudié la dynamique collective au point de basculement d'un réseau épidémiologique adaptatif de type « sensible-infecté-sensible » (SIS) à l'aide d'une approche fondée sur les données et assistée par l'apprentissage automatique. Ils ont identifié une équation différentielle stochastique effective (eSDE) dépendante des paramètres, grâce à une architecture ResNet d'apprentissage profond inspirée des intégrateurs stochastiques numériques. Ils ont ainsi pu construire un diagramme de bifurcation effectif approximatif basé sur le terme de dérive identifié de l'eSDE et le comparer au diagramme de bifurcation du modèle SIS de champ moyen. Ils ont observé une bifurcation de Hopf sous-critique dans la dynamique SIS effective du réseau en évolution, qui provoque le comportement de point de basculement ; celui-ci prend la forme d'oscillations collectives de grande amplitude qui surviennent spontanément - bien que rarement - à proximité d'un état stationnaire (bruité).

De leur côté, Fabiani & al. (2024) ont présenté un cadre d'apprentissage automatique faisant le lien entre l'apprentissage sur variétés, les réseaux neuronaux, les processus gaussiens et l'approche multi-échelle sans équation, afin de construire différents types de modèles d'ordre réduit efficaces à partir de simulateurs détaillés basés sur des agents, et de procéder à une analyse numérique multi-échelle systématique de leur dynamique émergente. Les tâches spécifiques comprennent la détection des points de basculement et la quantification de l'incertitude des événements rares qui se produisent à proximité de ceux-ci. Les auteurs prennent ici un exemple de modèle stochastique de marché financier piloté par des événements, décrivant le comportement mimétique des traders. Ils notent que le cadre proposé révèle qu'autour

des points de basculement, la dynamique émergente peut être efficacement décrite par une équation différentielle stochastique unidimensionnelle, révélant ainsi la dimension intrinsèque de la forme normale du type spécifique de point de basculement. Cela permet une réduction significative du coût de calcul des tâches.

Malgré leur puissance, ces modèles présentent certaines limites : une incertitude sur les paramètres critiques, une simplification excessive des systèmes réels, une difficulté de validation empirique ou encore des interactions multi-échelles difficiles à capturer. Comme le souligne John Sterman (2000), les modèles doivent être utilisés comme outils d'exploration plutôt que de prédiction précise.

Etude de cas sur les points de basculement

Dans ce qui suit, nous présenterons des études de cas dans cinq domaines stratégiques : (i) l'intelligence artificielle, (ii) la santé, (iii) une chaîne de valeur de ressources, (iv) la résilience climatique et l'Arctique, (v) la sécurité alimentaire et (vi) la résilience communautaire.

L'intelligence artificielle

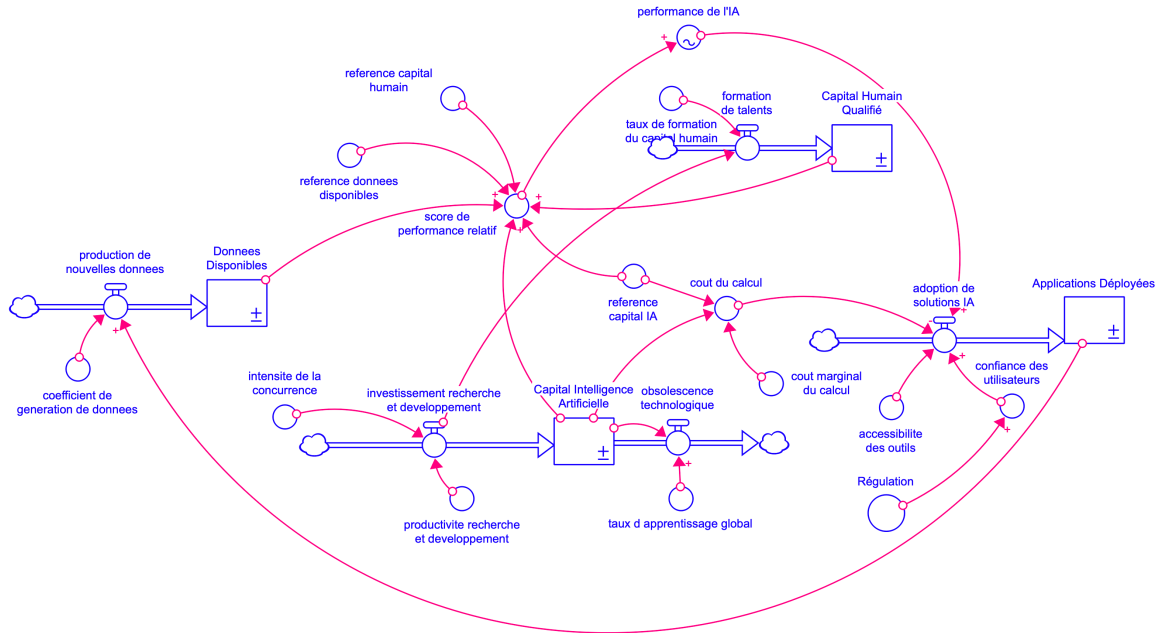
La problématique peut prendre la forme suivante : comment l'intelligence artificielle pourrait connaître une accélération brutale (basculement technologique) liée aux effets d'apprentissage et d'investissement ? Les stocks identifiés sont le capital d'intelligence artificielle (modèles, infrastructures, algorithmes), les données disponibles (data sets exploitables), le capital humain qualifié (ingénieurs, chercheurs) et les applications déployées (entreprises équipées). Les flux sont les investissements en recherche et développement, la production de nouvelles données, la formation de talents, l'adoption de solutions IA et l'obsolescence technologique. Les variables auxiliaires sont la performance de l'IA, le coût du calcul, l'accessibilité des outils (open source vs propriétaire), la confiance des utilisateurs et la régulation. Les paramètres sont la productivité de la R&D, le coût marginal du calcul, le taux d'apprentissage (learning rate global) et l'intensité de la concurrence.

Le modèle stocks flux structure l'écosystème de l'Intelligence Artificielle en quatre stocks : l'infrastructure technique, les données, le capital humain qualifié et les applications déployées. La boucle de rétroaction principale est activée par les applications déployées qui génèrent de nouvelles données, lesquelles améliorent la performance de l'IA, boostant ainsi l'adoption future de l'IA. L'obsolescence technologique agit comme un mécanisme de régulation négative, drainant le capital à mesure que le progrès s'accélère. Le coût du calcul est modélisé comme une barrière qui s'abaisse grâce aux économies d'échelle du capital d'IA, facilitant ainsi une adoption exponentielle, une fois certains seuils franchis.

Les données sont le carburant de l'IA. L'expertise humaine optimise l'utilisation du capital et des données. La performance de l'IA est une fonction des ressources disponibles. L'attractivité des solutions déployées augmente avec leur efficacité. La

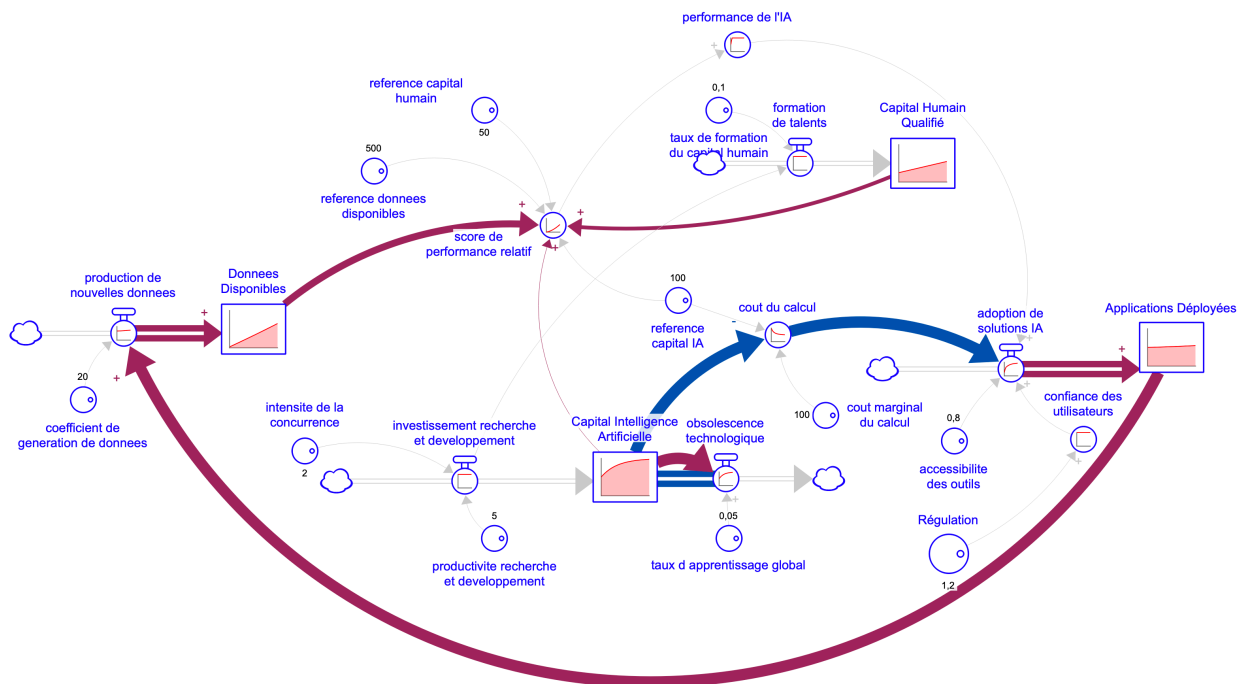
confiance des utilisateurs réduit les barrières psychologiques et légales. L'usage de l'IA génère des données réelles. Un apprentissage rapide rend les anciennes méthodes obsolètes.

Figure 6 : Les points de basculement dans la généralisation de l'IA



De ce fait, le point de basculement intervient lorsque la performance de l'IA multiplié par l'accessibilité des outils est supérieure au seuil d'adoption massive. Cela génère une boucle de rétroaction positive : plus d'IA, plus de données, meilleure IA, adoption accrue. Il y a cependant des risques de basculement négatif, une saturation énergétique (coût du calcul), une régulation restrictive ou une perte de confiance.

Figure 7 : La dynamique de l'IA via les boucles de rétroaction



Une chaîne de valeur des ressources, illustration par le lithium

Avec la voiture électrique, le lithium est devenu une ressource hautement stratégique. Tous les pays se sont lancés dans une sécurisation de leurs approvisionnements en relançant les programmes d'exploration du sous-sol (exemple des PEPR français) et en cherchant à diversifier leurs sources d'importations. La problématique peut ainsi prendre la forme suivante : comment une chaîne de valeur peut-elle basculer entre pénurie et surproduction ?

Les principaux stocks peuvent être identifiés : réserves naturelles de lithium, stocks extraits, les stocks transformés (raffinés), les stocks en circulation (produits finis) et les stocks recyclés. Les flux comprennent l'extraction minière, le raffinage, la production industrielle, la consommation et le recyclage. Les variables auxiliaires sont le prix du lithium, la demande industrielle, la capacité de production, le taux de recyclage et l'innovation technologique. Les paramètres pris en compte sont le coût d'extraction, le taux de découverte de nouvelles réserves, l'élasticité prix demande et le rendement du recyclage.

Ce modèle représente le cycle de vie du lithium (2026 à 2050). Il s'appuie sur une boucle de rétroaction entre l'offre et la demande, dans laquelle le prix du lithium joue le rôle de variable d'ajustement de l'équilibre (Diemer, Buscaglia, 2026). Lorsque les stocks de lithium raffiné sont faibles par rapport à la demande, le prix augmente, ce qui déclenche deux réactions : cela encourage une hausse des taux d'extraction minière et rend le recyclage plus rentable (augmentant ainsi le taux de recyclage).

À l'inverse, des prix élevés freinent la demande industrielle via la variable d'élasticité-prix. Le modèle tient également compte de la « fin de vie » du lithium en circulation, qui finit par alimenter un stock de recyclage avant d'être réintégré dans l'offre utilisable (une meilleure efficacité technique du recyclage augmente le volume de lithium récupéré), illustrant ainsi un archétype de système en boucle fermée. L'innovation technologique est modélisée comme un moteur auxiliaire qui augmente la demande au fil du temps, reflétant la transition énergétique mondiale (les innovations dans le domaine des batteries et des énergies vertes augmentent la demande structurelle de lithium).

Il y a deux points de basculement : (i) un basculement possible vers la pénurie : la demande excède la capacité d'extraction (la hausse du prix génère de la spéculation et une tension sur la chaîne d'approvisionnement) ; (ii) un basculement vers la surcapacité : les investissements massifs peuvent provoquer une surproduction⁴ (ce qui peut entraîner une chute des prix, des faillites et une contraction brutale du secteur).

⁴ Notons que la surproduction peut également provenir du marché des voitures électriques. Si l'offre est supérieure à la demande, la production de voitures peut chuter et donc générer moins de demande de lithium.

Figure 8: Les points de basculement de la chaîne de valeur de l'IA

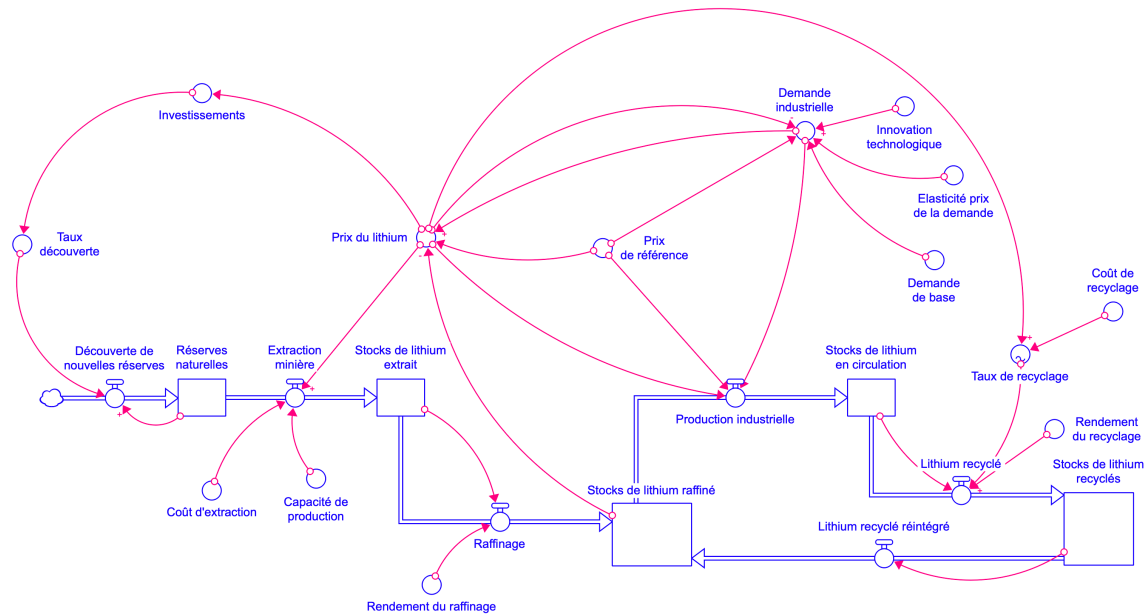
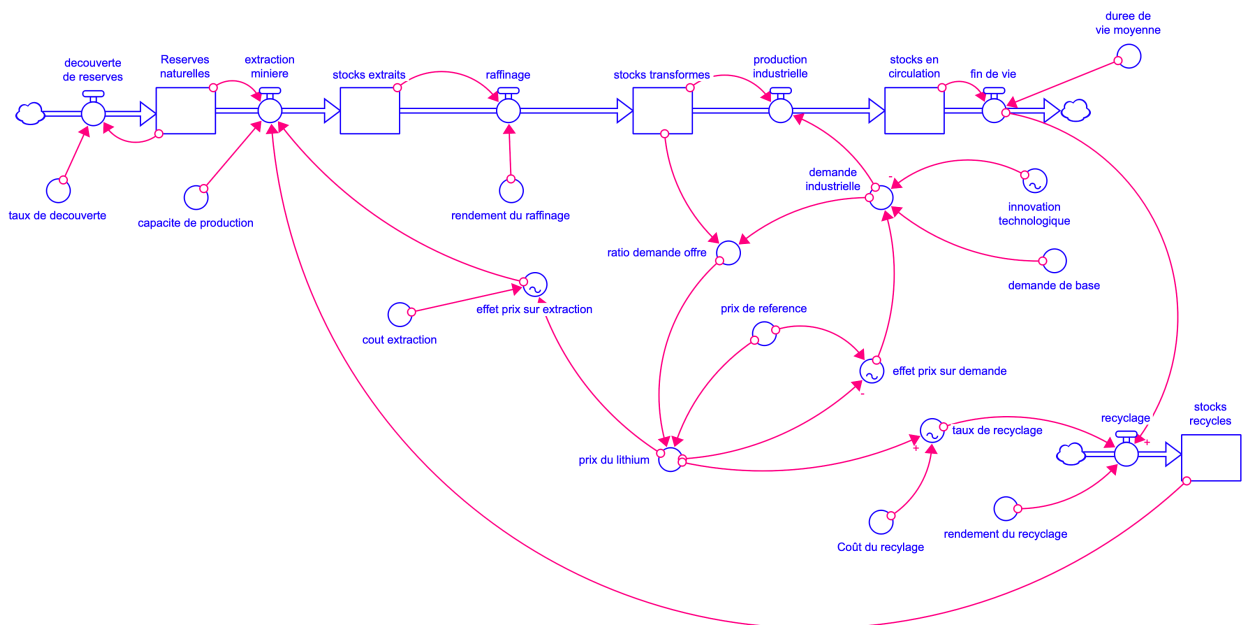


Figure 9 : Renversement gravitaire du modèle stocks flux en insistant sur la vision circulaire de la chaîne de valeur



Ces deux points de basculement tournent autour de deux boucles, l'une positive (la hausse des prix du lithium augmente les investissements, qui vont successivement mener à une hausse de la production), l'autre à décalage temporel (les investissements vont augmenter le taux de découverte, qui entraîne avec un certain retard, la découverte de nouvelles réserves, l'extraction...).

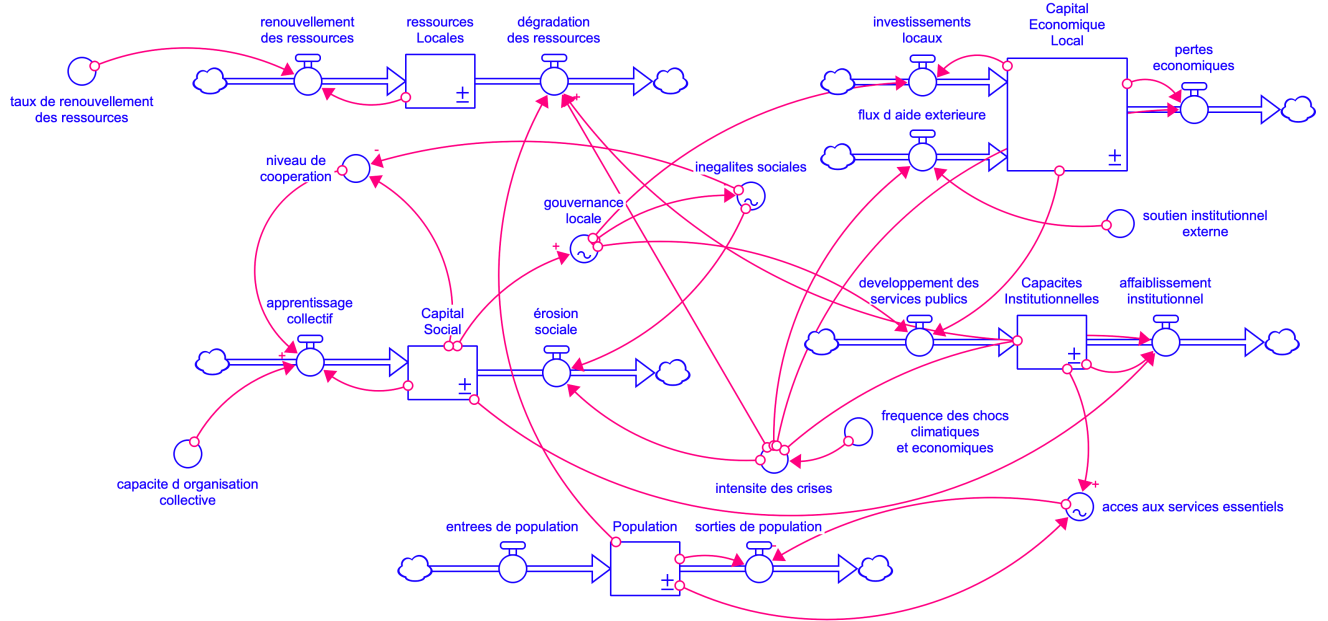
La résilience communautaire

La résilience communautaire désigne la capacité d'un groupe social à absorber des chocs, s'adapter et se transformer face à des perturbations comme les crises économiques, sanitaires ou climatiques (Berkes, Ross, 2013, Norris, Stevens, Pfefferbaum, Folke, 2006, Walker & al., 2004, Adger, 2000). Elle repose en grande partie sur le capital social (Aldrich & al., 2015, Aldrich, 2012), c'est à dire la confiance, les réseaux d'entraide et la coopération entre individus (Magis, 2010, Cutter & al., 2008). Les travaux de Elinor Ostrom montrent que des communautés bien organisées peuvent gérer durablement des ressources communes et mieux faire face aux crises (Bruneau & al., 2003, Paton & al., 2001). La diversité des ressources locales (énergie, alimentation, compétences) renforce également cette capacité d'adaptation. La gouvernance joue un rôle clé, des institutions locales efficaces facilitent la coordination et la prise de décision rapide (Koliou & al. 2018, Manyena, 2006). Les apprentissages collectifs issues des crises passées améliorent la résilience communautaire. La problématique peut prendre la forme suivante : *Comment une communauté peut-elle basculer entre résilience et fragilité systémique face aux crises ?*

Les stocks sont constitués du capital social (confiance, réseaux), des ressources locales (nourriture, eau, énergie), des capacités institutionnelles (services publics) et le capital économique local. Les flux sont composés des investissements locaux, d'une dégradation des ressources, des flux d'aide extérieure, de la migration (entrées et sorties de population) et apprentissage collectif. Les variables auxiliaires sont le niveau de coopération, les inégalités sociales, un accès aux services essentiels, la fréquence des chocs climatiques et économiques et la gouvernance locale. Les paramètres identifiés sont la capacité d'organisation collective, le taux de renouvellement des ressources, une intensité des crises, un soutien institutionnel externe.

Le point de basculement correspond au moment où une communauté passe d'un état capable d'absorber les chocs à un état de désorganisation durable. Ce seuil est généralement franchi lorsque plusieurs ressources critiques chutent simultanément : capital social (confiance), accès aux ressources essentielles (eau, nourriture, énergie) et capacité institutionnelle). Avant ce basculement, la communauté peut encaisser les perturbations grâce à des mécanismes d'entraide et d'adaptation. Mais si les chocs deviennent trop fréquents ou trop intenses, les boucles positives de dégradation prennent le dessus. Concrètement, le point de basculement intervient lorsque le capital social et les ressources sont inférieurs au seuil critique. Le basculement repose sur une perte de coordination, qui peut provoquer une forme d'inefficacité, une sorte d'exode et un effondrement local. Ce point de basculement est souvent invisible car il résulte d'une érosion progressive de la résilience jusqu'à ce qu'un événement déclencheur (catastrophe, crise économique) provoque un effondrement rapide (Koliou & al., 2018, Patel & al., 2017).

Figure 10 : Les points de basculement de la résilience communautaire



Le modèle stocks flux repose sur deux boucles clés :

- (1) *Boucle positive de résilience* : Une coopération peut générer plus de confiance, une meilleure gestion et de la résilience.
- (2) *Boucle négative (effondrement)* : Une crise provoque une perte de confiance, une désorganisation, une aggravation de la crise.

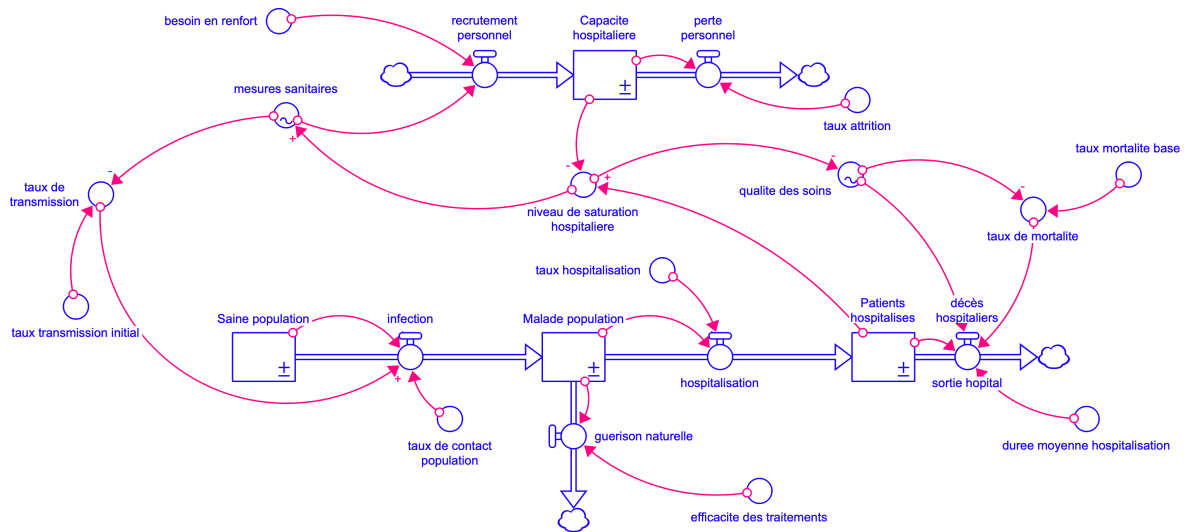
Le système de santé et la capacité hospitalière

Un système de santé bascule vers une crise hospitalière lorsque la demande de soins dépasse durablement sa capacité d'absorption. Ce processus est souvent progressif au départ : une hausse des admissions (épidémie, vieillissement, crise sanitaire) augmente le taux d'occupation des lits et mobilise davantage le personnel. A mesure que la saturation approche, les délais de prise en charge s'allongent et la qualité des soins commence à se dégrader.

La problématique repose sur une question simple : comment un système de santé peut atteindre un point de saturation et un basculement vers une crise hospitalière ?

Le modèle intègre les stocks de population saine, de population malade, des patients hospitalisés et une capacité hospitalière disponible (lits, personnel). Les flux prennent en compte le taux d'infection (entrée vers la population malade), le taux d'hospitalisation, le taux de guérison, le taux de mortalité et le recrutement/perte de personnel soignant. Les variables auxiliaires intègrent un taux de transmission, un niveau de saturation hospitalière, une qualité des soins, un délai de prise en charge et des mesures sanitaires (confinement, vaccination). Les paramètres prennent en compte la capacité maximale des hôpitaux, la durée moyenne d'hospitalisation, l'efficacité des traitements et le taux de contact dans la population.

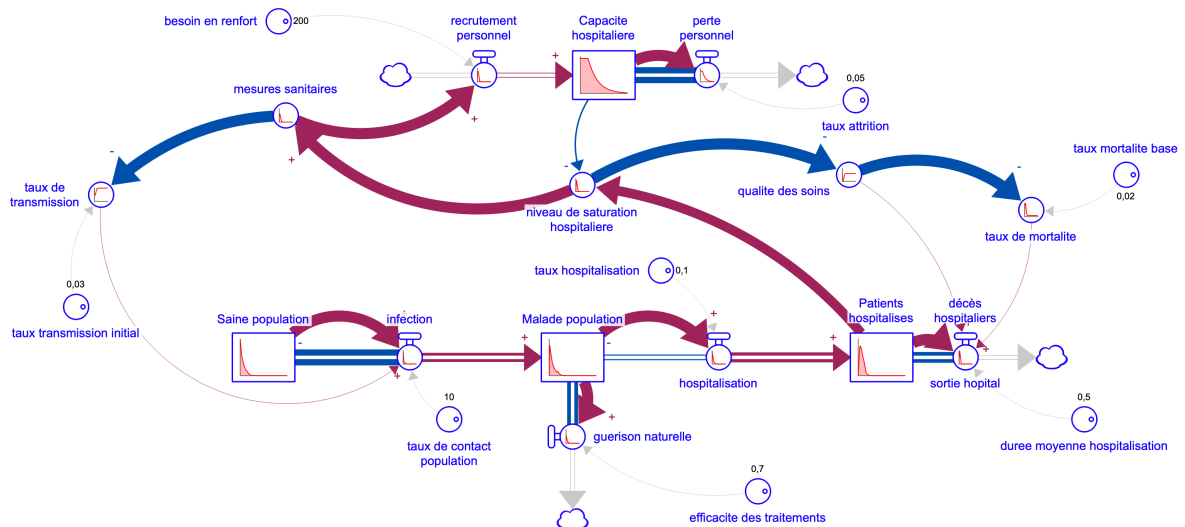
Figure 11 : Les points de basculement vers une crise sanitaire



Le point de basculement est franchi lorsque la capacité effective – lits, personnel, équipements – est dépassée. A ce stade, des boucles de rétroaction positives s’enclenchent : surcharge, fatigue du personnel, baisse de la performance, erreurs médicales, durée d’hospitalisation plus longue, saturation accrue. Parallèlement, l’absentéisme augmente (burn out, maladie), réduisant encore les ressources.

Un autre mécanisme critique est la désorganisation du système : déprogrammation d’actes, priorisation en urgence, perte de coordination entre services. Cela peut entraîner une augmentation de la mortalité évitable et une détérioration globale de la prise en charge. Ce basculement est souvent enclenché par un choc externe, mais il résulte surtout d’une érosion préalable de la résilience (manque d’investissements, pénurie de personnel). Les dynamiques présentées ici sont révélateurs des retards et des contraintes de capacité produisant des transitions brutales.

Figure 12 : La dynamique du système de santé



Ce type de dynamique est proche des modèles épidémiologiques enrichis étudiés en dynamique des systèmes (Sterman, 2000, Diemer, 2020). Le modèle simule la dynamique de crise hospitalière en utilisant une boucle de rétroaction équilibrante et une dynamique de saturation. La population saine s'infecte selon un taux de transmission, créant un stock de malades. Une fraction de ces malades requiert une hospitalisation. Lorsque le stock de patients hospitalisés s'approche de la capacité hospitalière, le niveau de saturation augmente. Cette saturation déclenche deux effets majeurs : (i) une dégradation de la qualité des soins (représentée par une fonction graphique), ce qui augmente le taux de mortalité (point de basculement vers la crise) ; (ii) le déclenchement de mesures sanitaires qui réduisent le taux de transmission pour freiner l'épidémie. Le modèle inclut également la gestion de capacité (recrutement vs perte de personnel) pour simuler la réponse du système face à la charge.

La sécurité alimentaire

La sécurité alimentaire repose sur un équilibre entre la disponibilité, l'accès et la stabilité des ressources alimentaires. Un système peut fonctionner de manière relativement stable tant que la production agricole, les stocks et les échanges internationaux compensent les fluctuations locales. Cependant, cette stabilité est fragile car elle dépend de facteurs climatiques, économiques et géopolitiques étroitement interconnectés.

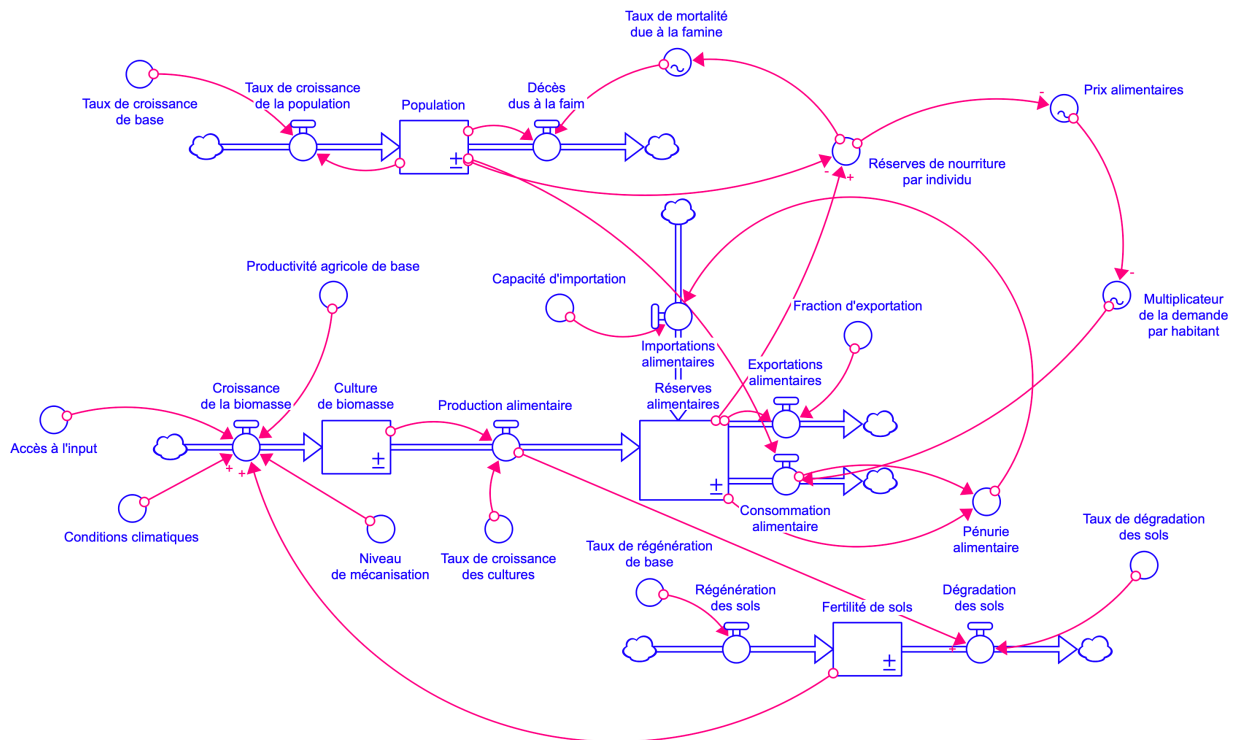
La problématique peut se poser de la manière suivante : comment un système agricole peut basculer vers une crise alimentaire ?

Le modèle structurel intègre des stocks tels que les stocks de nourriture (réserves alimentaires), la biomasse agricole (cultures en croissance), la fertilité des sols et la population dépendante. Les flux comprennent la production agricole, la consommation alimentaire, la dégradation des sols, la régénération des sols, les exportations et les importations. Les variables auxiliaires prennent en compte le rendement agricole, les conditions climatiques, les prix des denrées, l'accès aux entrants (engrais, eau) et le niveau de mécanisation. Les paramètres intègrent le taux de croissance des cultures, le taux de dégradation des sols, la productivité agricole de base et l'élasticité de la demande alimentaire.

Ce modèle illustre les archétypes « Le succès des plus forts » et « Les limites de la croissance » au sein d'un système agricole. Le stock de « réserves alimentaires » constitue le tampon central qui équilibre la demande de la « population dépendante » et l'offre issue de la « biomasse en croissance ». Il existe une boucle de rétroaction critique dans laquelle la « production alimentaire » entraîne la « dégradation des sols », ce qui finit par réduire la « fertilité des sols », créant ainsi un déclin auto-entretenu de la productivité future. Le modèle rend compte de l'élasticité-prix à travers une variable « prix des denrées alimentaires » qui ajuste la « consommation alimentaire » en fonction de la disponibilité. Des crises sont déclenchées lorsque l'épuisement des

sols ou des chocs climatiques font chuter la production en dessous du seuil de consommation, entraînant une mortalité due à la famine.

Figure 13 : Les points de basculement de la sécurité alimentaire



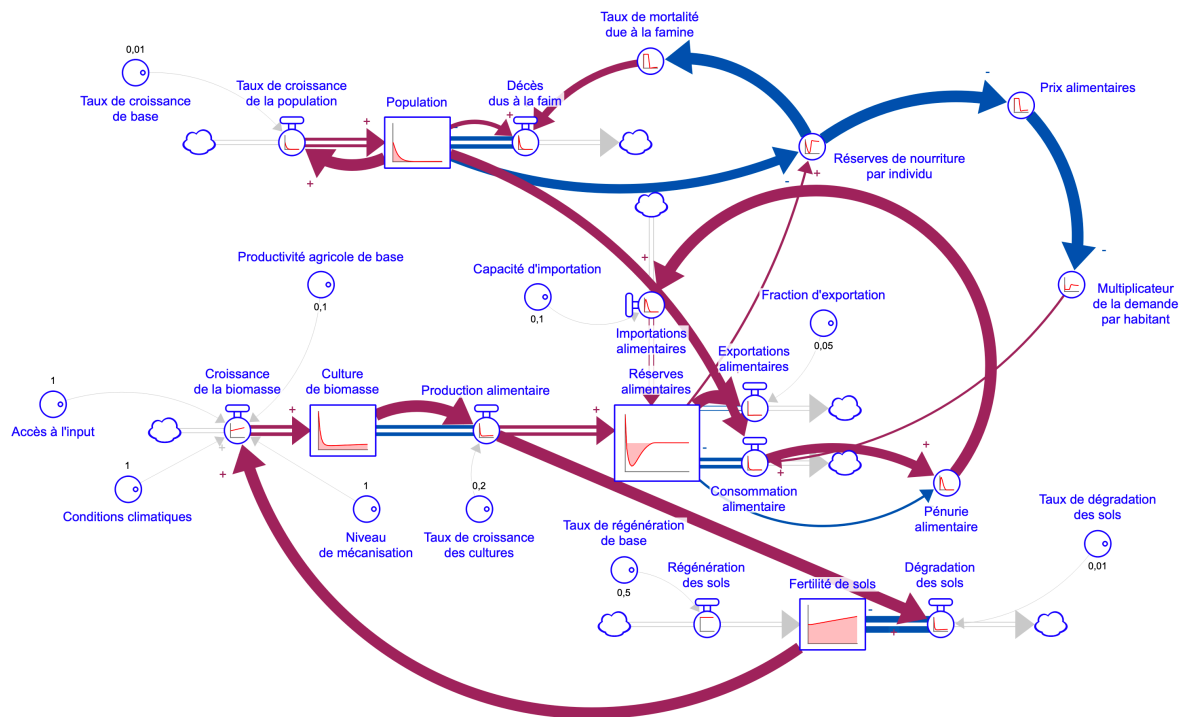
Le basculement vers une crise alimentaire survient lorsque cet équilibre est rompu de manière durable. Une baisse de la production (sécheresse, dégradation de sols, conflits) combinée à une demande croissante peut entraîner une diminution rapide des stocks. Lorsque les réserves deviennent insuffisantes, les prix augmentent fortement, réduisant l'accès à la nourriture pour les populations les plus vulnérables.

Des boucles de rétroaction positives peuvent alors amplifier la crise : hausse des prix, spéculation, restriction des exportations, raréfaction de l'offre, nouvelle hausse des prix. Par ailleurs, la dégradation des sols et la surexploitation des ressources réduisent la capacité future de production, ce qui aggrave la situation à moyen terme.

Le point de basculement est souvent précédé d'une perte de résilience : dépendance excessive aux importations, faible diversification des cultures, ou manque de stocks stratégiques. Un choc supplémentaire peut alors provoquer une transition rapide vers une situation de pénurie généralisée.

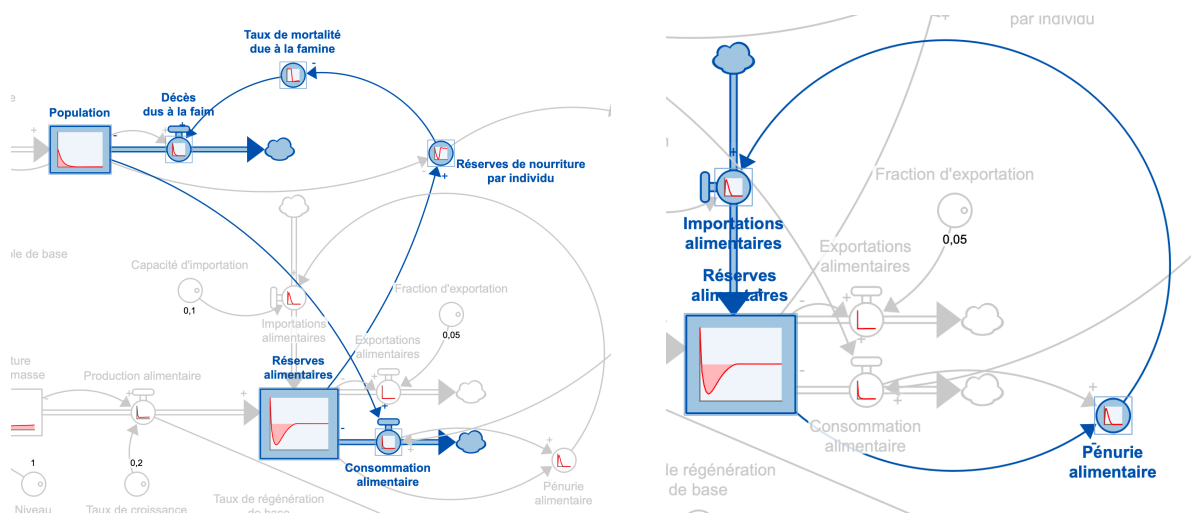
La dynamique du modèle met en lumière deux boucles : (1) une boucle de rétroaction négative (production, stocks et stabilisation) ; (2) une boucle de rétroaction positive (dégradation, baisse des rendements, surexploitation).

Figure 14 : La dynamique de la sécurité alimentaire



Par exemple, une meilleure fertilité des sols accélère la croissance de la biomasse. A l’opposé, les modes de production intensifs appauvrissent les sols en nutriments. De la même manière, les conditions climatiques favorables améliorent le développement de la biomasse. Des réserves alimentaires plus importantes augmentent la disponibilité individuelle.

Figure 15 : Les boucles de rétroaction associées aux points de basculement

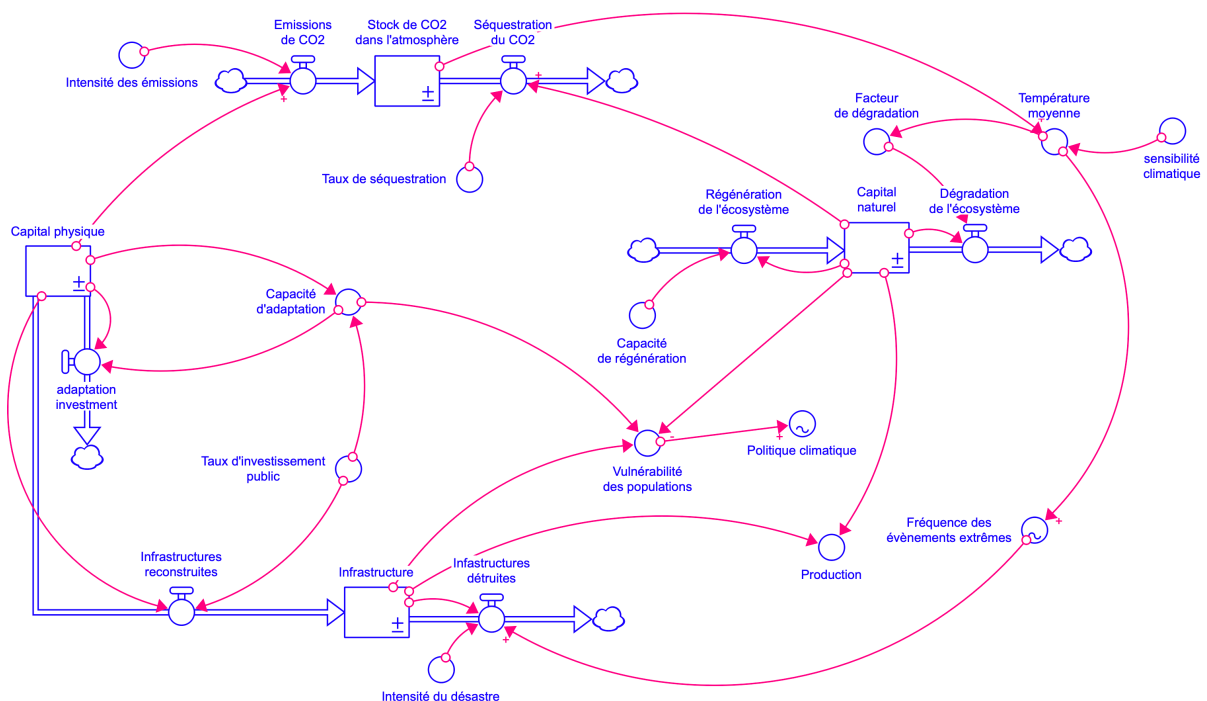


des chocs climatiques plus fréquents), conduisant à un archétype (voir chapitre 13) de type « limites à la croissance » où les chocs climatiques détruisent les infrastructures et le capital physique⁵ nécessaire au développement. Le stock de capital naturel (forêts, eau, biodiversité) assure une boucle rééquilibrage essentielle en séquestrant le carbone⁶ et en réduisant la vulnérabilité des populations⁷. Cependant, à mesure que les températures augmentent, le flux de dégradation de l'écosystème s'accélère, créant potentiellement une spirale descendante auto-renforçante où la perte de tampons naturels accroît la vulnérabilité⁸ et diminue la séquestration, accélérant encore davantage le changement climatique.

Un territoire peut approcher un point de basculement lorsque les pressions climatiques dépassent sa capacité d'adaptation. Ainsi, la répétition de catastrophes peut dégrader des infrastructures plus vite qu'elles ne sont réparées, tandis que la perte d'écosystèmes réduit les capacités de régulation naturelle. La perte massive de forêts provoque une baisse de la séquestration du carbone et donc une hausse de la concentration de CO₂ et une amplification du réchauffement climatique.

Des boucles de rétroaction positives peuvent alors apparaître : émissions de CO₂, réchauffement climatique, dégradation environnementale, moins de puits de carbone, augmentation de la vulnérabilité, impacts accrus des événements climatiques, nouvelles dégradations.

Figure 16 : Points de basculement dans la résilience territoriale



⁵, C'est toute l'activité économique qui est à l'origine des émissions de GES.

⁶ Une plus grande superficie de forêts et une plus grande biodiversité permettent une plus grande capture de carbone.

⁷ Des écosystèmes sains agissent comme des amortisseurs face aux chocs climatiques.

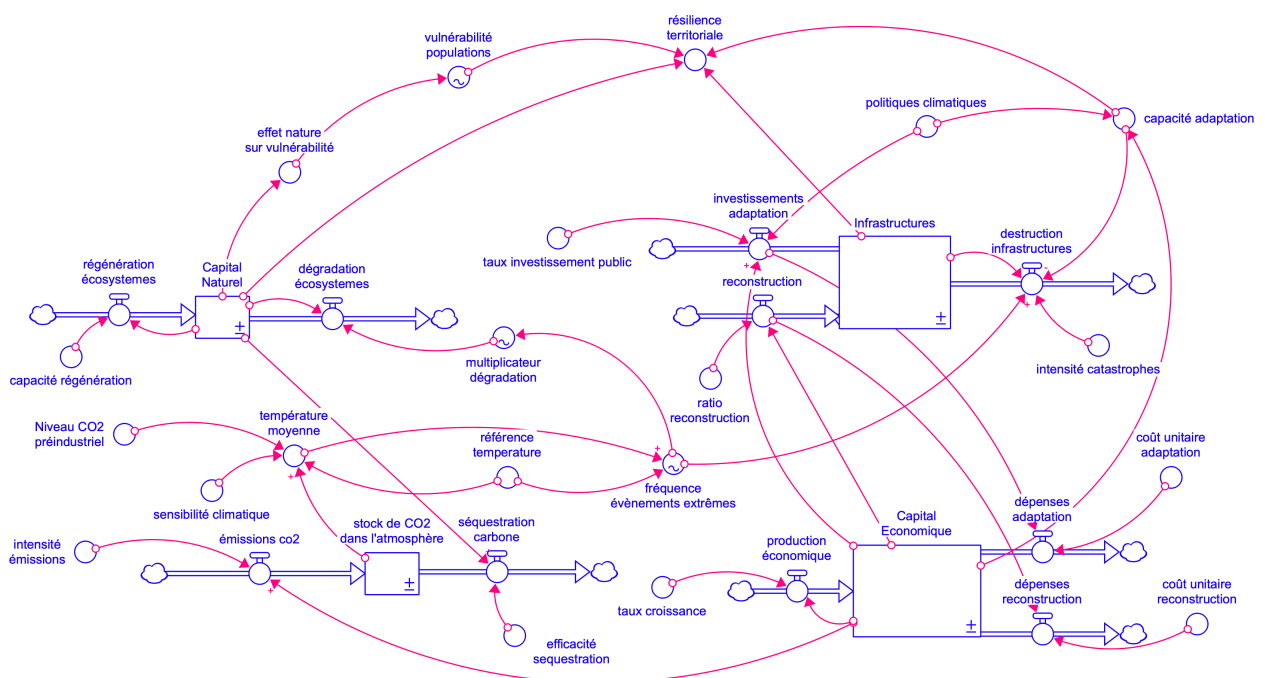
⁸ Une vulnérabilité perçue comme plus élevée entraîne des réponses politiques plus fermes.

Le territoire peut alors rentrer dans un régime de crises récurrentes (voire de déclin économique et démographique) ou enregistrer une perte de résilience systémique (c'est la remis en cause de la boucle : investissements, adaptation, réduction des impacts). Lenton & al. (2008) rappellent que ces dynamiques sont non linéaires et difficiles à inverser. Renforcer la résilience implique donc d'investir en amont dans la diversification des ressources, la restauration des écosystèmes et l'adaptation des infrastructures afin d'éviter de franchir ces seuils critiques.

Il est cependant possible d'améliorer notre compréhension des points de basculement, en plaçant au cœur du modèle, la notion de résilience territoriale. Dans ce qui suit, nous considérerons que la résilience se définit comme par la capacité d'adaptation du territoire à maintenir ses stocks (infrastructures, capital économique, capital naturel et capital humain, ici la population) grâce à des investissements d'adaptation et à la reconstruction des infrastructures, malgré la pression croissante des chocs climatiques. Ce nouveau modèle a le mérite d'illustrer l'érosion de la résilience territoriale via une boucle de rétroaction positive destructrice. On retrouve comme précédemment, l'activité économique et ses émissions de CO₂, qui élève la température (base température pré-industrielle) et multiplie les événements extrêmes. Ces chocs dégradent le capital naturel, qui affaiblit simultanément la séquestration du carbone (accélérant ainsi le réchauffement climatique) et augmente la vulnérabilité des populations. Le territoire tente de compenser par la reconstruction et l'adaptation financées par le capital économique.

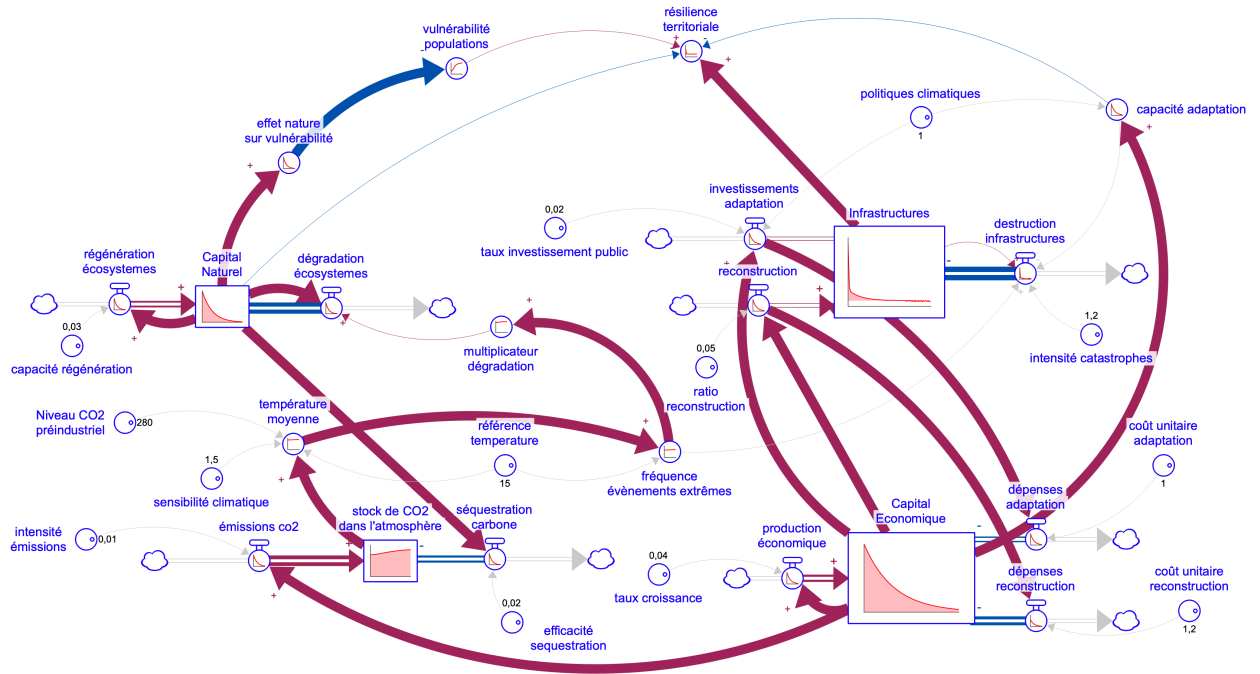
Cependant, si le rythme des catastrophes dépasse la capacité de régénération naturelle et de reconstruction économique, le stock d'infrastructures décline, entraînant une perte irrémédiable de résilience territoriale.

Figure 17 : La dynamique de l'érosion de la résilience territoriale



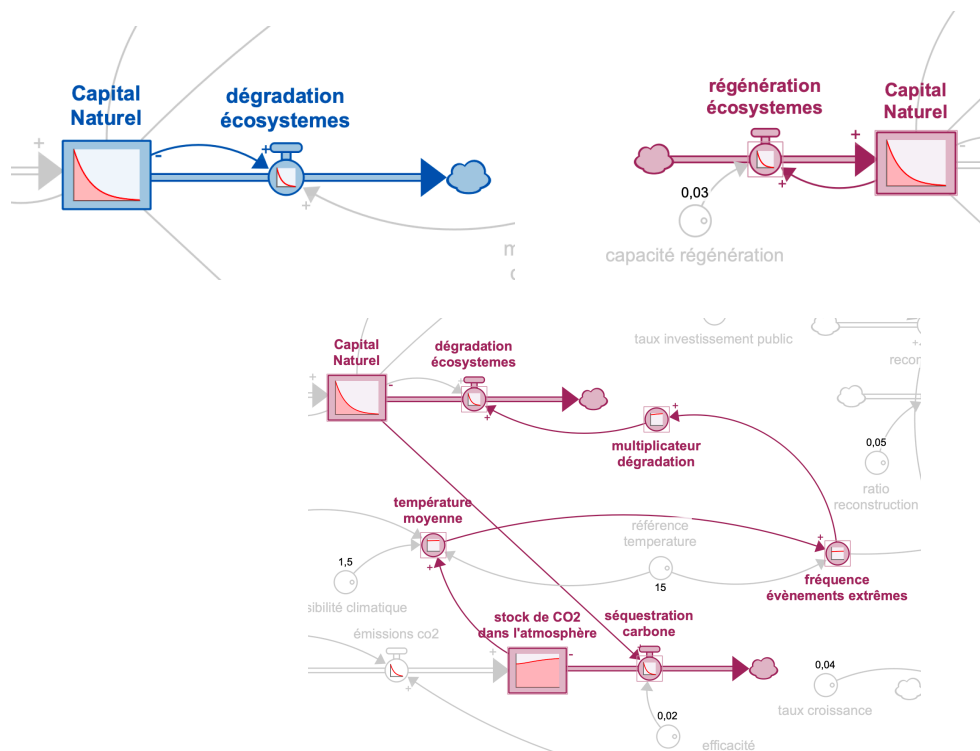
On retrouve ici les boucles de rétroaction positive et négative susceptibles d'éroder la résilience territoriale, qu'il s'agisse de la destruction de capital naturel, d'infrastructures, de capital économique ou encore les populations résidant sur le territoire.

Figure 18 : Les points de basculement au cœur des boucles de rétroaction



Ces dynamiques peuvent être illustrées par les trois boucles de rétroaction suivantes :

Figure 19 : Trois expressions de l'érosion de la résilience territoriale



Ces six cas sont une parfaite illustration de la richesse des points de basculement dans une analyse en dynamique des systèmes. Ils tendent à montrer que ces « tipping points » émergent toujours de la même structure : un stock critique, un flux qui dépasse une capacité de régulation et une boucle de rétroaction positive dominante.

Tableau 2 : Comparatif des points de basculement

Domaine	Stock critique	Flux perturbateur	Basculement
<i>Intelligence Artificielle</i>	Capital technologique (données, modèles talents)	Investissements et adoption	Accélération massive (ou blocage) de la diffusion
<i>Chaîne de valeur</i>	Réserves et capacités de production	Extraction/ production vs demande	Pénurie ou surproduction, Instabilité des marchés
<i>Résilience communautaire</i>	Capital social (Confiance, coopération)	Flux de coopération / ressources locales	Désorganisation sociale et perte de résilience
<i>Santé</i>	Capacité hospitalière (Lits, personnel)	Hospitalisations	Saturation système Crise hospitalière
<i>Sécurité alimentaire</i>	Fertilité des sols Stocks alimentaires	Production vs consommation	Crise alimentaire
<i>Résilience Climatique</i>	Capital naturel et infrastructures	Emissions de CO2 et dégradations	Perte de résilience Crises climatiques récurrentes

C'est précisément ce cadre qui vient compléter les points leviers de Donella Meadows (leverage points) et qui est au cœur de la dynamique des systèmes. En identifiant les points de basculement de façon précoce, on parvient à anticiper les crises, tester des politiques (crash tests) et identifier les leviers d'action. En proposant une intégration opérationnelle des points de basculement (qui décrivent la dynamique des systèmes) et des points leviers (qui définissent les moyens d'agir sur cette dynamique,) il est possible de concevoir une architecture de cadre méthodologique.

Etape 1 : Cartographie structurelle du système

Identifier les stocks critiques, les flux dominants et perturbateurs, les boucles de rétroaction grâce aux diagrammes de boucles causales (CLD) et aux *diagrammes stocks flux* (SFD, étape 12).

Etape 2 : Identification des points de basculement

Détecter les seuils critiques (capacité, ressources, saturation), les zones de multi-stabilité, les indicateurs de perte de résilience grâce à la simulation dynamique (étape 15), la méthode des scénarios (étape 16) ou des signaux statistiques (variance, ralentissement).

Etape 3 : Localisation des points leviers

Mobiliser la hiérarchie des 12 points leviers de Donella Meadows (Paramètres, Boucles de rétroaction, Structure du système, Règles et incitations, Objectifs, Paradigmes) pour identifier les leviers capables de modifier les flux, renforcer les stocks et transformer les rétroactions.

Etape 4 : Couplage des leviers et des basculements

Construire une matrice afin d'éviter les basculements négatifs et déclencher les basculements positifs.

Tableau 3 : Matrice de couplage des leviers et des basculements

<i>Point de basculement</i>	<i>Leviers associés</i>	<i>Effet attendu</i>
Saturation	Investissement de capacité	Eloigner le seuil
Pénurie	Recyclage, substitution	Réduire la pression
Effondrement social	Renforcement du capital social	Restaurer la résilience

Etape 5 : Typologie des stratégies

Le cadre méthodologique permet d'identifier trois stratégies : (1) *la prévention* (agir avant le seuil, renforcer la résilience), (2) *la stabilisation* (réduire les rétroactions positives, amortir les chocs), (3) *la transformation* (provoquer un basculement souhaité, changer la structure du système).

Ce cadre est une avancée clé, il permet de passer d'une compréhension des points de basculements à une capacité de pilotage des systèmes complexes. Il suggère également de transformer une approche descriptive des crises en une approche stratégique et interventionnelle.

Bien entendu, il existe de nombreuses limites à son application (incertitude sur les seuils, difficulté de mesure des stocks immatériels ou encore interactions multi-systèmes). Toutefois, les perspectives sont nombreuses : développement d'indicateurs de résilience, simulation multi-échelles ou couplage avec l'intelligence artificielle et les données en temps réel.

Conclusion

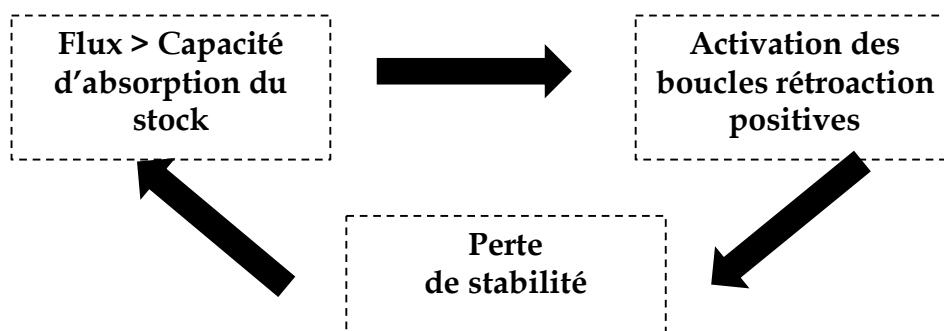
La mobilisation du concept de point de basculement en dynamique des systèmes constitue un puissant levier pour comprendre et anticiper les transformations rapides des systèmes complexes. Elle permet de dépasser une vision linéaire des évolutions pour mettre en évidence les dynamiques non linéaires, marquées par des seuils critiques et des changements d'état parfois irréversibles. En identifiant les interactions entre stocks, flux et boucles de rétroaction, cette approche révèle que les crises ne sont pas uniquement déclenchées par des chocs externes, mais souvent par une accumulation progressive de tensions internes. L'un des principaux apports d'une telle grille de lecture, est de montrer que des systèmes très différents – santé, alimentation, climat, technologies ou organisations sociales – partagent des structures

dynamiques communes. Dans chacun des cas, un déséquilibre persistant entre pressions et capacités d'adaptation peut conduire à un basculement. Les travaux de Marten Scheffer et de Timothy Lenton ont particulièrement contribué à formaliser ces transitions critiques et à en identifier les signaux précurseurs. Mobiliser ces concepts permet également d'améliorer la prise de décisions. En repérant les zones de fragilité et les seuils critiques, les décideurs peuvent agir en amont pour renforcer la résilience des systèmes, en diversifiant les ressources, en réduisant les dépendances ou en augmentant les capacités d'absorption. Cela implique toutefois d'accepter une part d'incertitude et de privilégier des stratégies adaptatives plutôt strictement prédictives. Enfin, l'intégration des points de basculement dans les modèles offre une perspective opérationnelle pour simuler des scénarios et tester des politiques publiques. Elle ouvre la voie à une approche plus systémique et proactive de la gestion des risques, essentielle dans un contexte de transformations globales rapides. Aussi, loin d'être uniquement un concept théorique, le point de basculement devient un outil central pour penser et piloter la soutenabilité des systèmes contemporains.

D'une certaine manière, la question des points de basculement ne se limite pas à une simple étape en dynamique des systèmes, elle permet de reformuler une problématique (étape 1) et de comprendre comment les systèmes sociotechniques complexes basculent lorsque les flux dépassent la capacité adaptative des stocks critiques, et quels leviers permettent de prévenir ou de retarder ces transitions ?

Cette réflexion dépasse l'ambition de ce livre et ouvre la voie à un programme de recherche ambitieux que nous pourrions résumer de la manière suivante : Existe-t-il des lois structurelles communes des points de basculement dans les systèmes complexes (santé, climat, alimentation, chaîne de valeur, résilience communautaire...) et comment les mobiliser pour améliorer la résilience des sociétés. ? Cette question repose sur une hypothèse centrale : les points de basculement émergent d'une structure universelle que l'on peut représenter par la figure suivante :

Figure 20 : Détermination d'une structure universelle



Cette hypothèse est forte car elle est modélisable et transversale. Le cadre conceptuel tourne autour de trois blocs : Structure universelle, dynamique et résilience.

Figure 21 : Le cadre conceptuel



On imagine toute de suite ce qu'un tel cadre conceptuel peut engendrer, ni plus ni moins, une unification des disciplines. Il serait dès lors possible de relier le climat, l'économie, la santé, la technologie ... autour d'un même formalisme, la dynamique des systèmes ! Nous retombons ici sur le postulat central de ce livre : la dynamique des systèmes, qui est avant tout transdisciplinaire, transforme chaque sujet, chaque étude de cas, chaque système complexe en objet transdisciplinaire. L'identification de lois génériques pose la question de l'existence d'un ratio critique flux/stock, du rôle universel des retards dans les crises et des signatures communes des points de basculement.

La modélisation en dynamique des systèmes revient à produire des modèles stocks - flux comparables, des indicateurs de résilience et des outils d'aide à la décision. Les enseignements d'un tel cadre sont déterminants, ils soulignent que : (1) les crises sont endogènes (elles ne viennent pas seulement des chocs externes mais de structures internes et d'accumulations très souvent invisibles⁹), (2) les systèmes échouent progressivement puis brutalement (longue phase d'érosion, basculement rapide), (3) les boucles de rétroaction dominant (stabilisation avec les boucles négatives et amplification avec les boucles positives), (4) le rôle central des retards (investissements tardifs, réponses politiques lentes¹⁰, amplification des crises), (5) la résilience est structurelle (elle dépend de la diversité, de la redondance et de la modularité).

Des contributions originales pourraient permettre de proposer un indicateur synthétique (capacité d'adaptation, pression des flux), une typologie des basculements (basculement par saturation, basculement par épuisement, basculement par désorganisation), un cadre de simulation unifié ou encore un positionnement académique à l'intersection de la dynamique des systèmes, de la théorie de la résilience, de la science de la durabilité et de l'économie des ressources.

⁹ Il nous a fallu du temps pour comprendre que nos activités économiques émettaient des GES et que ces deniers agissaient sur le réchauffement climatique.

¹⁰ C'est ce que nous avons identifié par l'inaction climatique (Diemer, 2026).

Références bibliographiques

- ABRAMS J. & al. (2026), Integrating tipping point concepts across diverse systems, *Communication Sustainability*, 1, 68, <https://doi.org/10.1038/s44458-026-00063-5>
- ADGER W.N (2000), Social and ecological resilience : are they related ? *Progress in Human Geography*, vol 24, 347 - 364.
- ALDRICH D.P, MEYER M.A (2015), Social Capital and Community Resilience, *American Behavioral Scientist*, vol 59 (2), 254 - 269.
- ALDRICH D.P (2012), *Building Resilience, Social Capital in Post Disaster Recovery*, University of Chicago Press.
- ARMSTRONG McKay D.I & al. (2022), Exceeding 1.5° global warming could trigger multiple climate tipping points, *Science*, 377, eabn 7950.
- ARTHUR W.B (1994), *Increasing returns and path dependence*, University of Michigan Press.
- ASHWIN P., WIECZOREK S., VITOLO R., COX P. (2012), Tipping points in open systems, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 370, 1166 - 1184.
- BERKES F., ROSS H. (2013), Community Resilience: Toward An Integrated Approach, *Society and Natural Resources*, vol 26 (1), 5 - 20.
- BONANNO G. A. (2004), Loss, trauma and human resilience, *American Psychologist*, vol 59, 20 - 28.
- BOULTON C.A, BUXTON J.E, LENTON T.M (2025), Early Opportunity Signals of a tipping point in the UK's second hand electric vehicle market, *Earth System Dynamics*, vol 16, issue 2, 411-421.
- BRUNEAU M., CHANG S.E, EGUCHI R.T & al. (2003), A Framework to quantitatively assess and enhance resilience, *Earthquake Spectra*, vol 19, 733 - 752.
- CARPENTER S.R & al. (2011), Early Warnings of regime shifts, *Ecology Letters*, 14, 618 - 626.
- CENTOLA D. & al. (2018), Tipping points in social convention, *Science*, 360, 1116 - 1119.
- CIMERALLO G.P, REINHORN A.M, BRUNEAU M. (2010), Framework for analytical quantification of disaster resilience,
- CUTTER S.L, BURTON C.G, EMRICH C.T (2010), Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions, *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, vol 7 (1).
- CUTTER S. L., BARNES L., BERRY M., BURTON C., EVANS E., TATE E., WEBB J. (2008), A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, *Global Environmental Change*, vol 18, 598 - 606.
- DAKOS V., CARPENTER S.R, BROCK W.A, & al. (2012), Methods for detecting early warnings, *PLoS ONE*, 7 (7), e41010.

- DAKOS V. & al. (2008), Slowing down as early warning signal, *PNAS*, 105, 14308 – 14312.
- DE IULIIS M., KAMMOUTH O., CIMELLARO G. (2022), Fuzzy logic approach for measuring resilience.
- DIEMER A. (2026), *La dynamique des systèmes*, Editions Oeconomia.
- DIEMER A. (2000), De la discrimination par les prix à la discrimination intertemporelle, Université Paris Dauphine.
- DITLEVSEN P.D, JOHNSEN S.J (2010), Abrupt climate change, *Geophysical Research Letters*, 37.
- DITLEVSEN P.D (2010), Tipping points and early warning, *Geophysical Research Letters*, 37.
- EVANGELOU N., al. (2023), *Tipping points of evolving epidemiological networks : Machine learning assisted, data driven effective modelling*, ArXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.00797>
- FABIANI G. & la. (2024), Task-oriented machine learning surrogates for tipping points of agents based models, *Nature Communications*, vol 15, 1 – 13, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48024-7>
- FANG S. & al. (2025), Tipping points and cascading transitions, methods, principles and evidences, *National Science Review*, ArXiv, Physics, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.01168>
- FARMER J.D & al. (2019), Sensitive intervention points, *Science*, 364, 132 – 134.
- FLORA C.B, FLORA J.L (1993, 2008), *Rural Communities, Legacy and Change*.
- FOLKE C. (2006), Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses, *Global Environmental Change*, vol 16, 253 – 267.
- FRANZKE C.L.E & al. (2022), Climate tipping perspectives, *Environmental Research Letters*, 17, 015004.
- GANJI A., ALIMOHAMMADI N., MILES S. (2019), Challenges in community resilience planning and simulation modeling.
- GHIL M. & al. (2011), Extreme events and tipping, *Nonlinear processes in Geophysics*, 18, 295 – 350.
- GLADWELL M. (2000), *The Tipping Point*, New York, Little, Brown and Company.
- IPPC (2021), *Climate Change 2021, the physical Science Basis*, Cambridge University Press.
- HASTINGS A., WYSHAM D. (2010), Regime shifts in ecological systems, *Ecology Letters*, 13, 464 – 472.
- HOLLING C.S (1973), Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1 – 23.
- KLOSE A.K, & al. (2020), Emergence of cascading dynamics, *Earth System Dynamics*, 11, 35 – 52.

- KOLIOU M., VAN DER LINDT J., McALLISTER T. (2018), State of the research in community resilience, *Sustainable and Resilient Infrastructure*.
- KOPP R.E. & al. (2016), Climate economic shocks, *Climatic change*, 134, 365 – 378.
- LAM A., MERCURE J.F (2022), *Evidence for a global vehicle tipping point*, Working paper series number 2002/01, 1 – 36, University of Exeter, Global Systems Institute.
- LENTON T.M & al. (2020), Positive tipping points, *Global Sustainability*, 3, e1.
- LENTON T.M (2013), Environmental tipping points, *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 1 – 29.
- LENTON T.M, HELD H., KRIEGLER E., HALL J.W, LUCHT W., RAHMSTORF S., SCHELLNHUBER H.J (2008), Tipping elements in the earth's climate system, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 1786 - 1793.
- MAGIS K. (2010), Community Resilience : An Indicator of Social Sustainability, *Society and Natural Resource*, vol 23 (5), 401 – 416.
- MANYENA S.B (2006), The concept of resilience revisited, *Disasters*, 30, 434 – 450.
- MASTEN A.S (2001), Ordinary magic : resilience processes in development, *American Psychologist*, 56, 227 – 238.
- MEADOWS D.H (2008), *Thinking in Systems*, Chelsea Green.
- MILKOREIT M. (2023), Social tipping points everywhere ? *WIREs Climate Change*, 14, e813.
- MILKOREIT M. & al. (2018), Defining tipping points, *Environmental Research Letters*, 13, 0330005.
- NIST (2016), *Community resilience planning guide*.
- NOBRE C.A, BORMA L.S (2009), Amazon tipping point, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1, 28 – 36.
- NORRIS F.H, STVENS S.P, PFEFFERBAUM B., WYCHE K.F, PFEFFERBAUM R.L (2008), Community Resilience as a metaphor, theory, set of capabilities and strategy for disaster readiness, *American Journal of Community Psychology*, vol 41, 127-150.
- OTTO I.M & al. (2020), Social tipping dynamics, *PNAS*, 117, 2354 – 2365.
- PATEL S.S, ROGERS M.B, AMLLOT R., RUBIN G.J (2017), What do we mean by community resilience ? *PLoS Current Disasters*.
- PATON D., JOHNSTON D. (2001), Disaster and Communities : vulnerability, resilience and preparedness, *Disaster Prevention and Management*, vol 10, 270 – 277.
- PIERINI S. (2012), Stochastic tipping points, *Physical Review*, 85, 011102.
- ROBINSON A., CALOV R., GANOPOLSKI A. (2012), Greenland ice sheet tipping, *Nature Climate Change*, 2, 429 – 432.
- SCHEFFER M. & al. (2012), Anticipating critical transitions, *Science*, 338, 344-348.
- SCHEFFER M. (2009), *Critical Transitions in Nature and Society*, Princeton University Press.

SCHEFFER M., BASCOMPTE J., BROCK W.A & al. (2009), Early warning signals for critical transitions, *Nature*, 461, 53 - 59.

SCHELLBHULBER H.J (2009), Tipping elements in the earth system, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 20561 - 20563.

STERMAN J.D (2000), *Business Dynamics*, McGraw-Hill.

STROGATZ S.H (2015), *Nonlinear dynamics and chaos*, Westview Press.

THOM R. (1972), *Stability and Morphogenesis*. Benjamin Editions.

THOMPSON J.M.T, SIEBER J. (2011), Predicting climate tipping, *Philosophical Transactions*, 369, 1026 - 1223.

WALKER B., HOLLING C.S, CARPENTER S.R, KINZIG A. (2004), Resilience, adaptability and transformability, *Ecology and Society*, vol 9 (2), 5.

WUNDERLING N. & al. (2021), Climate tipping casacdes, *Earth System Dynamics*, 12, 601 - 619.