

pp. 137-156. Sterman, J (2000). *Business Dynamics*. McGraw-Hill.

Chapitre 5 : Diagrammes des boucles causales

“Nous façonnons nos bâtiments ; par la suite, ce sont nos bâtiments qui nous façonnent.”

- Winston Churchill

La rétroaction est l'un des concepts fondamentaux de la dynamique des systèmes. Pourtant, nos modèles mentaux ne tiennent souvent pas compte des rétroactions critiques qui déterminent la dynamique de nos systèmes. Dans la dynamique des systèmes, nous utilisons plusieurs outils de diagramme pour capturer la structure des systèmes, notamment les diagrammes de boucles causales et les cartes de stock et de flux. Ce chapitre se concentre sur les diagrammes de boucles causales, y compris les directives, les pièges et les exemples.

5.1 Notation du diagramme causal

Les diagrammes de boucles causales (CLD) sont un outil important pour représenter la structure de rétroaction des systèmes. Utilisés depuis longtemps dans les travaux universitaires et de plus en plus couramment dans les entreprises, les CLD sont excellents pour

- Capturer rapidement vos hypothèses sur les causes de la dynamique ;
- Éliciter et capturer les modèles mentaux des individus ou des équipes ;
- Communiquer les feedbacks importants que vous pensez être responsables d'un problème.

Les conventions pour dessiner les diagrammes de cause sont simples mais doivent être suivies fidèlement. Considérez les diagrammes de cause comme des partitions musicales. La propreté compte, et les symboles et styles idiosyncrasiques rendent difficile la lecture de votre partition par vos collègues musiciens. Au début, vous aurez peut-être du mal à construire et à interpréter ces diagrammes. Cependant, avec de la pratique, vous serez bientôt capable de lire à vue.

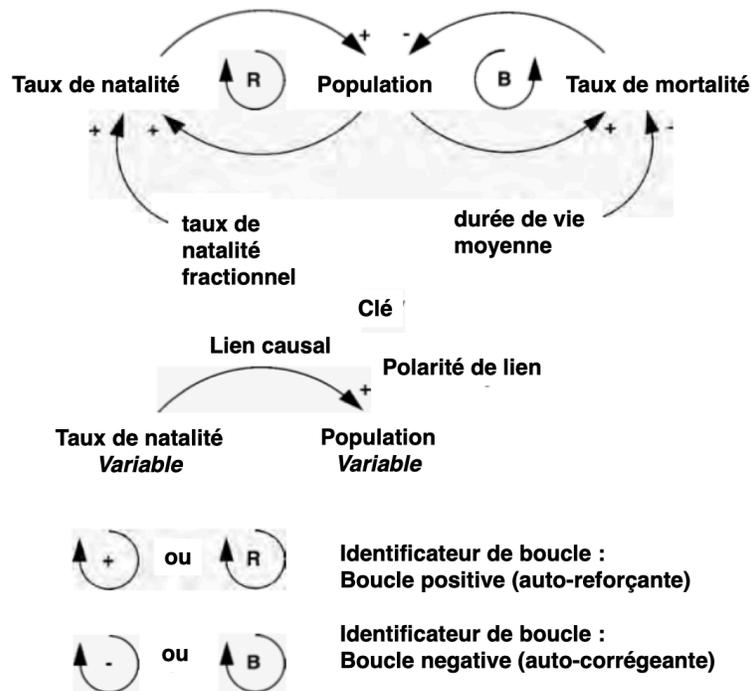
Un diagramme causal est constitué de variables reliées par des flèches indiquant les influences causales entre les variables. Les boucles de rétroaction importantes sont également identifiées dans le diagramme. La figure 5-1 présente un exemple et la clé de la notation.

Les variables sont reliées par des liens de causalité, représentés par des flèches. Dans l'exemple, le taux de natalité est déterminé à la fois par la population et par le taux de natalité fractionné. Chaque lien de causalité se voit attribuer une polarité, positive (+) ou négative (-), pour indiquer comment la variable dépendante change lorsque la variable indépendante change. Les boucles importantes sont mises en évidence par un identificateur de boucle qui indique si la boucle est une rétroaction positive (renforcement) ou négative (équilibre). Notez que l'identificateur de boucle circule dans le même sens que la boucle à laquelle il correspond. Dans l'exemple, la rétroaction positive reliant les naissances et la population circule dans le sens des aiguilles d'une montre, tout comme son identifiant de boucle ; la boucle négative du taux de mortalité circule dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, tout comme son identifiant.

Le tableau 5-1 résume les définitions de la polarité des liens.

Figure 5-1 : Notation des diagrammes de boucles causales

Exemple



Un lien positif signifie que si la cause **augmente**, l'effet **augmente** au-dessus de *ce qu'il aurait été autrement*, et si la cause **diminue**, l'effet **diminue** en dessous de *ce qu'il aurait été autrement*. Dans l'exemple de la figure 5-1, une augmentation du taux de natalité fractionné signifie que le taux de natalité (en personnes par an) augmentera au-dessus de ce qu'il aurait été, et une diminution du taux de natalité fractionné signifie que le taux de natalité tombera en dessous de ce qu'il aurait été. Autrement dit, si la fécondité moyenne augmente, le taux de natalité, compte tenu de la population, augmentera ; si la fécondité diminue, le nombre de naissances diminuera. Lorsque la cause est un taux de flux qui s'accumule dans un stock, il est également vrai que la cause s'ajoute au stock. Dans l'exemple, les naissances s'ajoutent à la population (voir le chapitre 6 pour en savoir plus sur les stocks et les flux).

Un lien négatif signifie que si la cause **augmente**, l'effet **diminue** en dessous de *ce qu'il aurait été autrement*, et que si la cause **diminue**, l'effet **augmente** au-dessus de *ce qu'il aurait été autrement*. Dans l'exemple, une augmentation de la durée de vie moyenne de la population signifie que le taux de mortalité (en nombre de personnes par an) sera inférieur à ce qu'il aurait été, et une diminution de la durée de vie moyenne signifie que le taux de mortalité sera supérieur à ce qu'il aurait été. Autrement dit, si l'espérance de vie augmente, le nombre de décès diminue ; et si l'espérance de vie diminue, le taux de mortalité augmente.

Les polarités de liaison décrivent la structure du système. Elles ne décrivent pas le comportement des variables. C'est-à-dire qu'elles décrivent ce qui se passerait **SI** un changement intervenait. Elles ne décrivent pas ce qui se passe réellement. Le taux de natalité fractionné - pourrait augmenter ; il pourrait diminuer - le diagramme de cause ne vous dit pas ce qui *va* se passer. Il vous indique plutôt ce qui se passerait si la variable changeait.

Notez la phrase *au-dessus (ou en dessous) de ce qu'elle aurait été* dans la définition de la polarité des liens. Une augmentation d'une variable de cause ne signifie pas nécessairement que l'effet

augmentera réellement. Il y a deux raisons à cela. Premièrement, une variable a souvent plus d'une entrée. Pour déterminer ce qui se passe réellement, vous devez savoir comment toutes les entrées changent. Dans l'exemple de la population, le taux de natalité dépend à la fois du taux de natalité fractionné et de la taille de la population (c'est-à-dire $\text{taux de natalité} = \text{taux de natalité fractionné} * \text{population}$). Vous ne pouvez pas dire si une augmentation du taux de natalité fractionné entraînera effectivement une hausse du taux de natalité ; vous devez également savoir si la population augmente ou diminue. Une baisse suffisamment importante de la population peut faire chuter le taux de natalité même si le taux de natalité fractionné augmente. Lorsque vous évaluez la polarité des liens individuels, supposez que toutes les autres variables sont constantes (la fameuse hypothèse de ceteris paribus). Lors de l'évaluation du comportement réel d'un système, toutes les variables interagissent simultanément (toutes les autres variables ne sont pas égales) et une simulation informatique est généralement nécessaire pour retracer le comportement du système et déterminer quelles boucles sont dominantes.

Tableau 5-1 : Polarité de lien : Définitions et exemples

Symbole	Interprétation	Mathématiques	Exemples
$X \xrightarrow{+} Y$	Toutes choses égales par ailleurs, si X augmente (diminue), alors Y augmente (diminue) au-dessus (en dessous) de ce qu'il aurait été. Dans le cas des accumulations, X s'ajoute à Y.	$\frac{\partial Y}{\partial X} > 0$ Dans le cas d'accumulations, $Y = \int_{t_0}^t (X + \dots) ds + Y_{t_0}$	Qualité du produit $\xrightarrow{+}$ Ventes du produit Effort $\xrightarrow{+}$ Résultats Naissances $\xrightarrow{+}$ Population
$X \xrightarrow{-} Y$	Toutes choses égales par ailleurs, si X augmente (diminue), alors Y diminue (augmente) en dessous (au-dessus) de ce qu'il aurait été. Dans le cas des accumulations, X soustrait de Y.	$\frac{\partial Y}{\partial X} < 0$ Dans le cas d'accumulations, $Y = \int_{t_0}^t (-X + \dots) ds + Y_{t_0}$	Prix du produit $\xrightarrow{-}$ Ventes du produit Frustration $\xrightarrow{-}$ Résultats Décès $\xrightarrow{-}$ Population

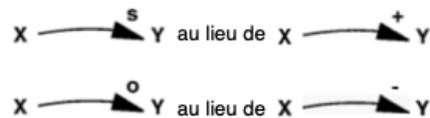
Deuxièmement, et surtout, les diagrammes de boucles causales ne font pas la distinction entre les stocks et les flux - les accumulations de ressources dans un système et les taux de changement qui modifient ces ressources (voir chapitre 6). Dans l'exemple de la population, la population est un stock - elle accumule le taux de natalité moins le taux de mortalité. Une augmentation du taux de natalité augmente la population, mais une diminution du taux de natalité ne diminue pas la population. Les naissances ne peuvent qu'augmenter la population, elles ne peuvent jamais la réduire. Le lien positif entre les naissances et la population signifie que le taux de natalité augmente la population. Ainsi, une augmentation du taux de natalité accroît la population au-dessus de ce qu'elle aurait été autrement et une diminution du taux de natalité fait baisser la population en dessous de ce qu'elle aurait été autrement. diminue la population en dessous de ce qu'elle aurait été autrement.

De même, la polarité négative du lien entre le taux de mortalité et la population indique que le taux de mortalité soustrait de la population. Une baisse du taux de mortalité n'augmente pas la population. Une baisse des décès signifie que moins de personnes meurent et que plus de personnes restent en vie : la population est plus élevée qu'elle ne l'aurait été autrement. Notez que vous ne pouvez pas dire si la population va réellement augmenter ou diminuer : La population diminuera même si le

taux de natalité augmente si le taux de mortalité est supérieur aux naissances. Pour savoir si un stock augmente ou diminue, vous devez connaître son taux de variation net (dans ce cas, les naissances moins les décès). Cependant, il est toujours vrai que si le taux de natalité augmente, la population sera supérieure à ce qu'elle aurait été en l'absence de la variation des naissances, même si la population continue de diminuer. La population diminue à un rythme plus lent qu'elle ne le ferait autrement. Les chapitres 6 et 7 traitent de la structure et le comportement des stocks et des flux.

Un point sur le processus : Une note sur la notation

Dans une partie de la littérature sur la dynamique des systèmes, en particulier dans la tradition de la pensée systémique (voir, par exemple, Senge et al. 1994 et Kim 1992), une autre convention pour les diagrammes causaux a été développée. Au lieu de + ou -, la polarité d'un lien causal est désignée par S ou O, respectivement (indiquant la même relation ou une relation opposée entre les variables indépendantes et dépendantes) :



Le lien indiqué par un S (*Same* – même) se lit comme suit : "X et Y vont dans la même direction", tandis que le lien indiqué par un O (*Opposite* – opposé) se lit comme suit : "X et Y vont dans la direction opposée". Ainsi, la qualité du produit et les ventes ont tendance à évoluer dans la même direction, tandis que le prix du produit et les ventes ont tendance à évoluer dans la direction opposée.

La notation S et O a été motivée par le désir de rendre les diagrammes de causalité encore plus faciles à comprendre pour les personnes ayant peu de connaissances en mathématiques. La question de savoir quelle notation est la meilleure fait l'objet d'un débat animé. Richardson (1997) fournit de solides arguments contre l'utilisation de S et O. Il note que l'énoncé "X et Y se déplacent dans la même direction" n'est généralement pas correct, pour les raisons mentionnées ci-dessus. L'énoncé correct est le suivant : "Si X augmente, Y augmente au-delà de ce qu'il aurait été". Autrement dit, un lien de causalité est une déclaration contingente de l'effet individuel d'un changement hypothétique. Les variables X et Y peuvent être positivement liées et pourtant Y peut baisser même si X augmente, car d'autres variables affectent également Y. Les définitions S et O ne fonctionnent pas non plus pour les relations de stock et de flux. Les naissances et la population n'évoluent pas dans le même sens : une diminution des naissances n'entraîne pas une diminution de la population car le taux de natalité est un apport au stock de population. La définition correcte est donnée dans le tableau 5-1 : pour une polarité de lien positive, si X augmente, Y sera toujours plus élevé qu'il ne l'aurait été ; pour une polarité négative, si X augmente, Y sera toujours plus bas qu'il ne l'aurait été. Dans ce livre, j'utiliserai les signes + et - pour indiquer la polarité des liens. En tant que modélisateur, vous devez savoir comment interpréter les notations s et o lorsque vous les voyez, mais vous devez utiliser les notations + et - pour indiquer la polarité des liens.

5.2 Lignes directrices pour les diagrammes de boucles causales

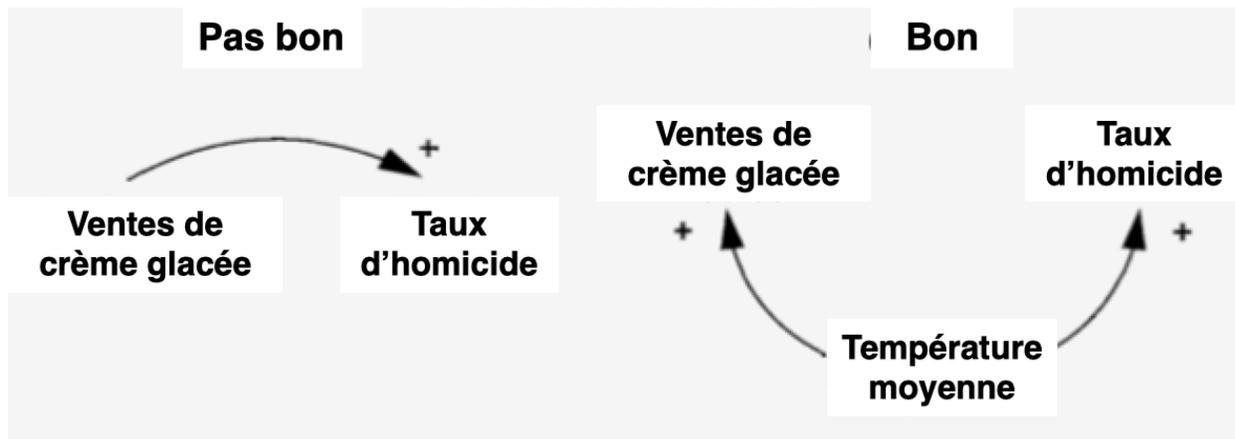
5.2.1 Causation versus corrélation

Chaque lien dans votre diagramme doit représenter (ce que vous pensez être) des relations causales entre les variables. Vous ne devez pas inclure de corrélations entre les variables. La racine latine du mot simuler, *simulare*, signifie "imiter". Un modèle de dynamique des systèmes doit imiter la structure du système réel suffisamment bien pour que le modèle se comporte de la même manière que le système

réel. Le comportement comprend non seulement la reproduction de l'expérience historique, mais aussi la réponse à des circonstances et des politiques entièrement nouvelles. Les corrélations entre les variables reflètent le comportement passé d'un système. Les corrélations ne représentent pas la structure du système. Si les circonstances changent, si des boucles de rétroaction précédemment dormantes deviennent dominantes, si de nouvelles politiques sont mises à l'essai, les corrélations précédemment fiables entre les variables peuvent s'effondrer. Vos modèles et diagrammes de causalité doivent inclure uniquement les relations qui, selon vous, reflètent la structure causale sous-jacente du système. Les corrélations entre les variables émergeront du comportement du modèle lorsque vous le simulerez.

Bien que les ventes de crème glacée soient positivement corrélées avec le taux de meurtre, vous ne pouvez pas inclure dans vos modèles un lien entre les ventes de crème glacée et le meurtre. Au contraire, comme le montre la figure 5-2, les ventes de crème glacée et les meurtres augmentent en été et diminuent en hiver en fonction des fluctuations de la température moyenne. Confondre corrélation et causalité peut conduire à de terribles erreurs de jugement et de politique. Le modèle de la partie gauche de la figure 5-2 suggère que la réduction de la consommation de crème glacée permettrait de réduire le taux de meurtre, de sauver des vies et de permettre à la société de réduire le budget de la police et des prisons.

Figure 5-2 : Les diagrammes de causalité doivent inclure uniquement (ce que vous croyez être) de véritables relations de causalité



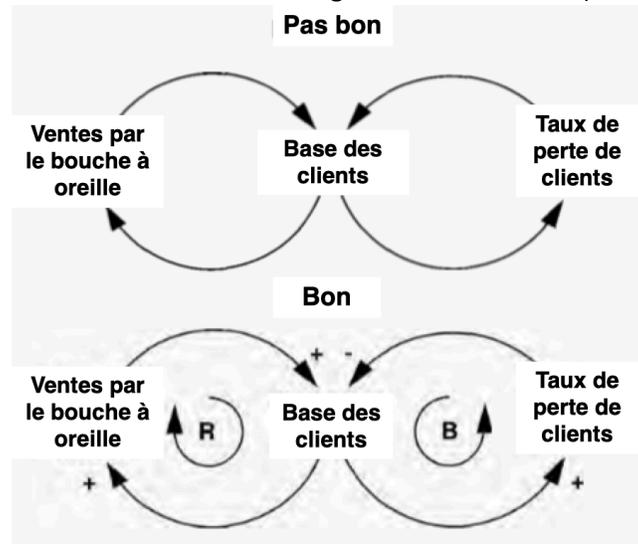
Si peu de gens sont susceptibles d'attribuer des meurtres à un cône à double creux occasionnel, de nombreuses corrélations sont plus subtiles et il est souvent difficile de déterminer la structure causale sous-jacente. Une grande partie de la recherche scientifique cherche les véritables aiguilles causales dans une énorme botte de foin de corrélations : La vitamine C guérit-elle le rhume ? La consommation de son d'avoine peut-elle réduire le taux de cholestérol et, dans l'affirmative, le risque de crise cardiaque diminue-t-il ? La croissance économique entraîne-t-elle une baisse du taux de natalité ou ce taux est-il imputable à l'alphabétisation, à l'éducation des femmes et à l'augmentation du coût de l'éducation des enfants ? Les entreprises qui mettent en œuvre de sérieux programmes d'amélioration de la qualité obtiennent-elles des rendements supérieurs pour leurs actionnaires ? Les scientifiques ont appris par expérience qu'il est difficile d'obtenir des réponses fiables à de telles questions et qu'il est nécessaire de s'en tenir à la méthode scientifique - expériences contrôlées, essais randomisés en double aveugle, grands échantillons, études de suivi à long terme, réplication, inférence statistique, etc. Dans les systèmes sociaux et humains que nous modélisons souvent, de telles expériences sont difficiles, rares

et souvent impossibles. Les modélisateurs doivent être particulièrement attentifs à la question de savoir si les relations dans leurs modèles sont causales, quelle que soit la force de la corrélation, la valeur du R^2 ou la signification statistique des coefficients d'une régression. Comme l'a fait remarquer l'économiste anglais Phelps-Brown (1972, p. 6), "Lorsque, comme c'est souvent le cas, les fluctuations de différentes séries répondent en commun au pouls de l'économie, il est très facile d'obtenir un bon ajustement, et de l'obtenir pour un grand nombre d'équations différentes..." L'exécution de régressions entre séries temporelles ne peut qu'être trompeuse".

5.2.2 Étiquetage de polarité de lien

Indiquez la polarité de chaque lien dans vos diagrammes. Étiquetez la polarité des boucles de rétroaction importantes dans vos diagrammes, en utilisant les définitions du tableau 5-1 pour vous aider à déterminer si les liens sont positifs ou négatifs. Les boucles de rétroaction positives sont également appelées boucles de renforcement et sont indiquées par un + ou un R, tandis que les boucles négatives sont parfois appelées boucles d'équilibrage et sont indiquées par un - ou un B (figure 5-3).

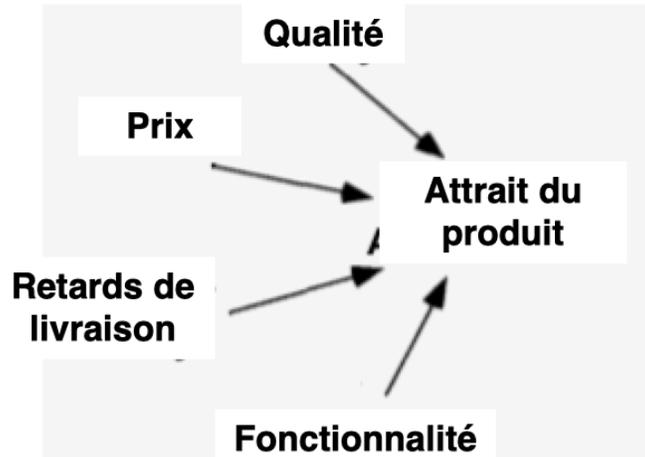
Figure 5-3 : Étiqueter les polarités des liens et des boucles. Notez que tous les liens sont étiquetés et que les identificateurs de polarité des boucles montrent quelles boucles sont positives et quelles boucles sont négatives. Les identificateurs de boucles sont dans le sens des aiguilles d'une montre pour les boucles dans le sens des aiguilles d'une montre (et vice versa).



Challenge : Attribution des polarités des liens

Considérez l'attrait d'un produit pour les clients car il dépend de divers attributs du produit (Figure 5-4). Attribuez les polarités des liens. Quelles boucles de rétroaction pourraient être créées lorsque l'attrait du produit modifie la demande pour le produit de l'entreprise ? Ajoutez-les au diagramme, en indiquant les polarités des liens et des boucles.

Figure 5-4 : Attrait d'un produit dépend de divers attributs



5.2.3 Détermination de polarité des boucles

Il existe deux méthodes pour déterminer si une boucle est positive ou négative : la méthode rapide et la méthode correcte.

La méthode rapide : Compter le nombre de liens négatifs

Le moyen rapide de savoir si une boucle est positive ou négative est de compter le nombre de liens négatifs dans la boucle. Si le nombre de liens négatifs est pair, la boucle est positive ; si ce nombre est impair, la boucle est négative. Cette règle fonctionne parce que les boucles positives renforcent le changement tandis que les boucles négatives sont autocorregéantes ; elles s'opposent aux perturbations. Imaginez une petite perturbation dans l'une des variables. Si la perturbation se propage autour de la boucle pour renforcer le changement initial, alors la boucle est positive. Si la perturbation se propage autour de la boucle pour s'opposer au changement original, alors la boucle est négative. Pour s'opposer à la perturbation, le signal doit subir une inversion nette de signe lorsqu'il se propage dans la boucle. L'inversion nette ne peut se produire que si le nombre de liens négatifs est impair. Un seul lien négatif provoque l'inversion du signal : une augmentation devient une diminution. Mais un autre lien négatif inverse à nouveau le signal, de sorte que la diminution devient une augmentation, renforçant ainsi la perturbation d'origine. Voir "Mathématiques de la polarité des boucles" ci-dessous pour une dérivation formelle de cette règle.

La méthode rapide fonctionne toujours... sauf quand elle ne fonctionne pas. Pourquoi échoue-t-elle ? Dans un diagramme complexe, il est trop facile de mal compter le nombre de liens négatifs dans une boucle. Et il est facile de mal étiqueter la polarité des liens lorsque vous dessinez le diagramme pour la première fois. Compter le nombre de signes négatifs a peu de chances de révéler ces erreurs. La bonne méthode, consistant à tracer soigneusement l'effet d'une perturbation autour de la boucle, révélera souvent une polarité mal étiquetée et vous aidera, vous et votre auditoire, à saisir la signification et le mécanisme de la boucle. Attribuer la polarité de la boucle de la bonne manière plutôt que de la manière rapide permet de gagner du temps à long terme.

La bonne méthode : Tracer l'effet d'un changement autour de la boucle

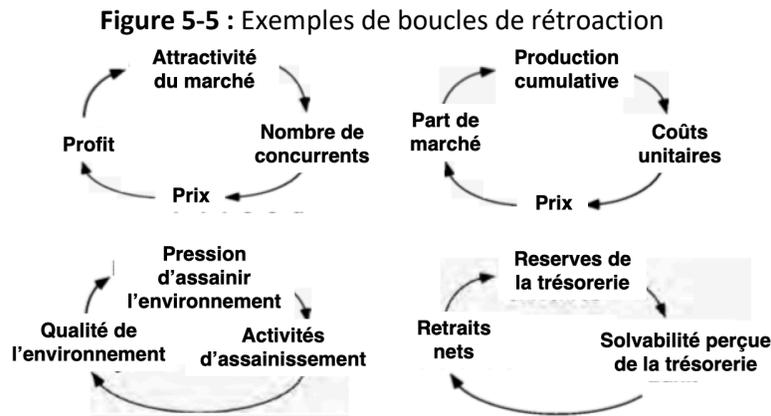
La bonne méthode de déterminer la polarité d'une boucle est de suivre l'effet d'une petite modification de l'une des variables à mesure qu'elle se propage dans la boucle. Si l'effet de rétroaction renforce le changement initial, il s'agit d'une boucle positive ; s'il s'oppose au changement initial, il s'agit d'une boucle négative. Vous pouvez commencer avec n'importe quelle variable de la boucle ; le résultat doit être le même. Dans les boucles de marché illustrées à la figure 5-3, supposez que les ventes par le

bouche à oreille augmentent. Comme le lien entre les ventes par le bouche à oreille et la clientèle est positif, la clientèle augmente. Comme le lien entre la base de clients et les ventes par le bouche à oreille est positif, le signal se propage autour de la boucle pour augmenter encore les ventes par le bouche à oreille. L'effet de rétroaction renforce le changement initial, la boucle est donc positive. Pour ce qui est de l'autre boucle, supposons une légère augmentation du taux de perte de clients. Si les pertes de clients augmentent, le nombre de clients diminue. Avec une base de clients plus faible, il y a moins de clients qui peuvent abandonner. L'effet de rétroaction s'oppose au changement initial, la boucle est donc négative.

Cette méthode fonctionne quel que soit le nombre de variables dans une boucle et quelle que soit la variable de départ. (Identifiez les polarités de la boucle pour l'exemple commençant par la base de clients au lieu des ventes par le bouche à oreille : vous devriez obtenir le même résultat). Vous pouvez également supposer une diminution initiale d'une variable plutôt qu'une augmentation initiale.

Challenge : Identifier la polarité des liens et des boucles

Identifier et étiqueter la polarité des liens et des boucles dans les exemples montrés dans la **Figure 5-5**.



Mathématiques de la polarité des boucles

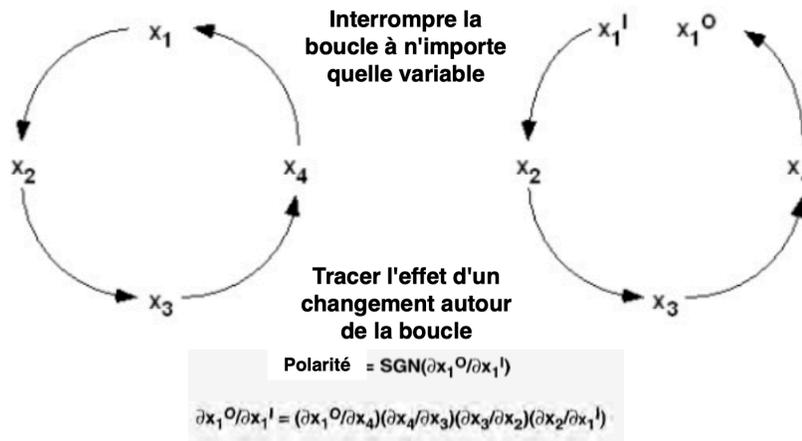
Lorsque vous déterminez la polarité de la boucle, vous calculez ce que l'on appelle en théorie du contrôle le signe du gain de la boucle ouverte. Le terme "gain" fait référence à la force du signal renvoyé par la boucle : un gain de deux signifie que la variation d'une variable est doublée à chaque cycle autour de la boucle ; un gain de 0,5 négatif signifie que la perturbation se propage autour de la boucle pour s'opposer à elle-même avec une force moitié moindre. Le terme "boucle ouverte" signifie que le gain est calculé pour un seul cycle de rétroaction en rompant - ouvrant - la boucle à un moment donné. Considérons une boucle de rétroaction arbitraire composée de n variables, x_1, \dots, x_n . Vous pouvez calculer le gain de la boucle ouverte à n'importe quel point ; laissez x_1 désigner la variable que vous choisissez. Lorsque vous interrompez la boucle, x_1 se divise en une entrée, x_1^1 , et une sortie, x_1^0 (figure 5-6). Le gain en boucle ouverte est défini comme la dérivée (partielle) de x_1^0 par rapport à x_1^1 , c'est-à-dire l'effet de rétroaction d'une petite variation de la variable lorsqu'elle revient à elle-même. La polarité de la boucle est le signe du gain en boucle ouverte :

$$\text{Polarité de boucle} = \text{SGN}(\partial x_1^0 / \partial x_1^1) \tag{Équation 5-1}$$

où SGN() est le signe ou la fonction signe, renvoyant +1 si son argument est positif et - 1 si l'argument est négatif (si le gain en boucle ouverte est nul, la fonction SGN = 0 : il n'y a pas de boucle). Le gain en boucle ouverte est calculé par la règle de la chaîne à partir des gains des liens individuels $\partial x_i / \partial x_{i-1}$:

$$\text{SGN}(\partial x_1^0 / \partial x_1^1) = \text{SGN}[(\partial x_1^0 / \partial x_n) (\partial x_n / \partial x_{n-1}) (\partial x_{n-1} / \partial x_{n-2}) \dots (\partial x_2 / \partial x_1)] \quad (\text{Équation 5-2})$$

Figure 5-6 : Calcul du gain en boucle ouverte d'une boucle



Comme le signe d'un produit est le produit des signes, la polarité de la boucle est également donnée par :

$$\text{SGN}(\partial x_1^0 / \partial x_1^1) = \text{SGN}(\partial x_1^0 / \partial x_n) * \text{SGN}(\partial x_n / \partial x_{n-1}) * \text{SGN}(\partial x_{n-1} / \partial x_{n-2}) * \dots * \text{SGN}(\partial x_2 / \partial x_1) \quad (\text{Équation 5-3})$$

Utiliser la bonne méthode pour déterminer la polarité de la boucle en traçant l'effet d'un petit changement autour d'une boucle équivaut à calculer l'équation (5-3). L'équation (5-3) explique également pourquoi la méthode rapide fonctionne : Comme le produit de deux signes négatifs est un signe positif, la polarité négative d'une boucle ouverte nécessite un nombre impair de liaisons négatives dans la boucle.

Tous les liens devraient avoir des polarités non ambiguës

On dit parfois qu'un lien peut être soit positif, soit négatif, en fonction d'autres paramètres ou de l'endroit où le système fonctionne. Par exemple, les gens dessinent souvent le diagramme de la partie gauche de la figure 5-7 qui relie les recettes d'une entreprise au prix de son produit et affirment ensuite que le lien entre le prix et les recettes de l'entreprise peut être positif ou négatif, selon l'élasticité de la demande. Si la demande est très élastique, un prix plus élevé signifie moins de recettes car une augmentation de 1 % du prix entraîne une baisse de la demande de plus de 1 %. Le lien aurait une polarité négative. Si la demande est inélastique, une augmentation de 1 % du prix entraîne une baisse de la demande inférieure à 1 %, de sorte que les recettes augmentent. Le lien serait positif. Il semble qu'aucune polarité unique ne puisse être attribuée.

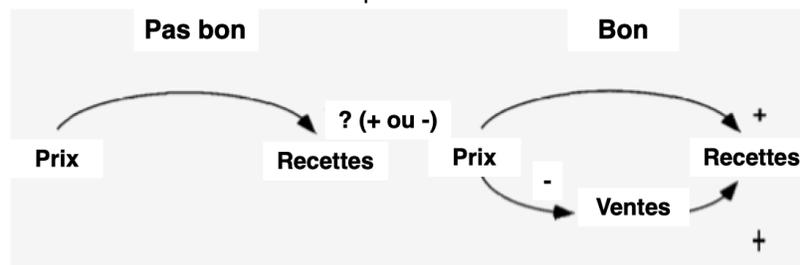
Lorsque vous avez du mal à attribuer une polarité claire et sans ambiguïté à un lien, cela signifie généralement qu'il existe plus d'une voie causale reliant les deux variables. Vous devez rendre ces différentes voies explicites dans votre diagramme. Dans l'exemple, le prix a au moins deux effets sur les recettes : (1) il détermine le montant des recettes générées par unité vendue et (2) il affecte le nombre d'unités vendues. En d'autres termes, les Recettes = Prix * Ventes, et les ventes (unitaires) dépendent du prix (on peut supposer que la courbe de demande est à pente descendante : des prix plus élevés

réduisent les ventes). Le diagramme approprié est illustré dans la partie droite de la figure 5-7. Il n'y a maintenant aucune ambiguïté quant à la polarité de l'un ou l'autre des liens.

L'élasticité de la demande par rapport au prix détermine le chemin de causalité qui domine. Si la demande est assez insensible au prix (l'élasticité de la demande est inférieure à un), le chemin inférieur de la figure 5-7 est faible, le prix augmente les recettes unitaires plus qu'il ne diminue les ventes, et l'effet net d'une augmentation du prix est une augmentation des recettes. À l'inverse, si les clients sont très sensibles au prix (l'élasticité de la demande est supérieure à un), le chemin supérieur domine. L'augmentation du revenu par unité est plus que compensée par la baisse du nombre d'unités vendues, de sorte que l'effet net d'une hausse de prix est une baisse du revenu. La séparation des chemins vous permet également de spécifier des retards différents, le cas échéant, dans chacun d'eux. Dans l'exemple ci-dessus, il est probable qu'il y ait un long délai entre un changement de prix et un changement dans les ventes, alors qu'il y a peu ou pas de retard dans l'effet du prix sur les recettes.

La séparation des liens dont la polarité est apparemment ambiguë dans les voies multiples sous-jacentes est une méthode fructueuse pour approfondir votre compréhension de la structure causale, des délais et du comportement du système.

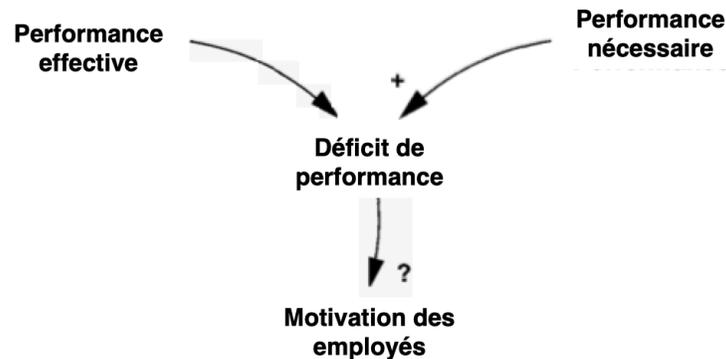
Figure 5-7 : Les liens causaux doivent avoir une polarité non ambiguë. Les polarités apparemment ambiguës indiquent généralement la présence de plusieurs voies causales qui doivent être représentées séparément.



Challenge : Motivation des employés

L'équipe de votre client s'inquiète de la motivation de ses employés et discute des meilleurs moyens de susciter un effort maximal de la part de ses membres. Ils ont dessiné un diagramme (Figure 5-8) et discutent de la polarité des liens. Un groupe soutient que plus le déficit de performance est important (plus l'écart entre la performance requise et la performance réelle est grand), plus la motivation des employés sera grande. Ils affirment que le secret de la motivation consiste à fixer des objectifs agressifs, voire impossibles à atteindre (appelés objectifs extensibles) pour susciter une motivation et un effort maximum. L'autre groupe soutient qu'un déficit de performance trop important ne fait qu'engendrer de la frustration, car les gens en concluent qu'ils n'ont aucune chance d'atteindre l'objectif, et que le lien avec la motivation des employés devrait donc être négatif. Développez le diagramme pour résoudre le conflit apparent en intégrant les deux théories. Discutez des liens qui dominent dans différentes circonstances. Pouvez-vous donner des exemples tirés de votre propre expérience où ces différentes voies étaient dominantes ? Comment un manager peut-il savoir quelle voie est susceptible de dominer dans une situation donnée ? Quelles sont les implications pour la fixation des objectifs dans les organisations ? Les performances réelles et requises ne sont pas exogènes mais font partie de la structure de rétroaction. Comment la motivation se répercute-t-elle sur la performance, et comment la performance réelle peut-elle affecter l'objectif ? Indiquez ces boucles dans votre diagramme et expliquez leur importance.

Figure 5-8 : Diagramme causal de motivation des employés dessiné par une équipe de gestion



5.2.4 Nommer les boucles

Que vous utilisiez des diagrammes de cause pour obtenir les modèles mentaux d'un groupe de clients ou pour communiquer la structure de rétroaction d'un modèle, vous vous retrouverez souvent à essayer de suivre plus de boucles que vous ne pouvez en gérer. Vos diagrammes peuvent facilement surcharger les personnes que vous essayez d'atteindre. Pour aider votre public à naviguer dans le réseau de boucles, il est utile de donner un numéro et un nom à chaque rétroaction importante. En numérotant les boucles R1, R2, B1, B2, etc., vous aidez votre public à trouver chaque boucle lorsque vous en discutez. Le fait de nommer les boucles aide le public à comprendre la fonction de chaque boucle et fournit une sténographie utile pour la discussion. Les étiquettes se substituent alors à un ensemble complexe de liens de causalité. Lorsque vous travaillez avec un groupe de clients, il est souvent possible de leur demander de nommer la boucle. Souvent, ils suggéreront une phrase fantaisiste ou un jargon propre à l'organisation pour chaque boucle.

La figure 5-9 présente un diagramme de causalité élaboré par des ingénieurs et des responsables lors d'un atelier destiné à explorer les causes des retards de livraison des travaux de conception de leur organisation. Le diagramme représente le comportement des ingénieurs qui tentent de terminer un projet dans les délais impartis. Les ingénieurs comparent le travail restant à faire avec le temps restant avant la date limite. Plus l'écart est grand, plus ils ressentent une pression sur le calendrier. Lorsque la pression sur le calendrier s'accumule, les ingénieurs ont plusieurs choix. Premièrement, ils peuvent faire des heures supplémentaires. Au lieu des 50 heures normales par semaine, ils peuvent arriver tôt au travail, sauter le déjeuner, rester tard et travailler tout le week-end. En brûlant l'huile de minuit (travailler d'arrache-pied), ils augmentent la vitesse à laquelle ils accomplissent leurs tâches, réduisent l'arriéré de travail et soulagent la pression sur les horaires (boucle d'équilibre B1). Cependant, si la semaine de travail reste trop élevée pendant trop longtemps, la fatigue s'installe et la productivité en souffre. Cependant, si la semaine de travail reste trop élevée pendant trop longtemps, la fatigue s'installe et la productivité diminue. Avec la baisse de la productivité, le taux d'achèvement des tâches diminue, ce qui augmente la pression sur les horaires et conduit à des heures encore plus longues : la boucle de renforcement Burnout R1 limite l'efficacité des heures supplémentaires. Une autre façon de terminer le travail plus rapidement est de réduire le temps passé sur chaque tâche. En consacrant moins de temps à chaque tâche, on augmente le nombre de tâches effectuées par heure (productivité) et on soulage la pression sur les horaires, ce qui ferme la boucle d'équilibre B2. Le nom de cette boucle a fait l'objet de vives discussions. Les managers prétendent que les ingénieurs doivent toujours leur travail ; ils estiment que la pression sur les horaires est nécessaire pour éliminer le gaspillage et amener les ingénieurs à se concentrer sur leur travail. Les ingénieurs affirmaient que la pression sur les délais était si forte qu'ils n'avaient d'autre choix que de réduire

5.2.5 Indiquer les retards importants dans les liens causals

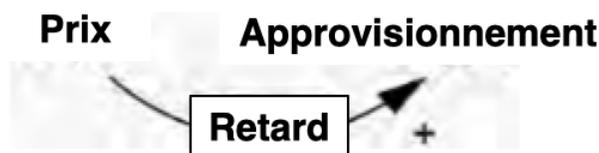
Les délais sont essentiels pour créer une dynamique. Ils donnent de l'inertie aux systèmes, peuvent créer des oscillations et sont souvent responsables des compromis entre les effets à court et à long terme des politiques. Vos diagrammes de causalité doivent inclure les retards qui sont importants pour l'hypothèse dynamique ou significatifs par rapport à votre horizon temporel. Comme le montre le chapitre 11, les retards impliquent toujours des structures de stock et de flux. Il est parfois important de faire apparaître ces structures de manière explicite dans vos diagrammes. Cependant, il suffit souvent d'indiquer la présence d'un retard dans un lien causal sans montrer explicitement la structure de stock et de flux. La figure 5-10 montre comment les délais sont représentés dans les diagrammes de causalité.

Lorsque le prix d'un bien augmente, l'offre aura tendance à augmenter, mais souvent seulement après des retards importants, le temps que de nouvelles capacités soient commandées et construites et que de nouvelles entreprises entrent sur le marché. Voir également les retards dans les boucles Burnout et « Ouvrage hâté = ouvrage gâté » de la figure 5-9.

Exemple : Demande en énergie

La réaction des ventes d'essence au prix implique de longs retards. À court terme, la demande d'essence est assez inélastique : si les prix augmentent, les gens peuvent réduire quelque peu leurs déplacements discrétionnaires, mais la plupart d'entre eux doivent toujours se rendre en voiture au travail, à l'école et au supermarché. Lorsque les gens se rendent compte que les prix risquent de rester élevés, ils peuvent organiser des covoiturages ou utiliser les transports en commun, s'ils sont déjà disponibles. Au fil du temps, les prix élevés entraînent d'autres réactions. Tout d'abord, les consommateurs (et les constructeurs automobiles) attendent de voir si le prix de l'essence va rester assez élevé et assez longtemps pour justifier l'achat ou la conception de voitures plus efficaces (un retard de perception et de décision de peut-être un an ou plus). Une fois que les gens ont décidé que le prix ne baissera pas de sitôt, les constructeurs automobiles doivent alors concevoir et construire des voitures plus efficaces (un délai de plusieurs années). Même lorsque des voitures plus efficaces seront disponibles, la grande majorité des voitures en circulation seront des modèles plus anciens et inefficaces qui ne seront remplacés que lorsqu'ils seront usés et mis au rebut, soit un délai d'environ 10 ans. Si les prix restent élevés, la densité de l'habitat finira par augmenter, les gens abandonnant les banlieues pour se rapprocher de leur travail. Au total, le retard total dans le lien entre le prix et la demande d'essence est nettement supérieur à une décennie. Au fur et à mesure que le parc automobile est remplacé par des voitures plus efficaces et que (peut-être) de nouvelles lignes de transport en commun sont conçues et construites, la demande d'essence est assez élastique.

Figure 5-10 : Représentation des retards dans les diagrammes causals

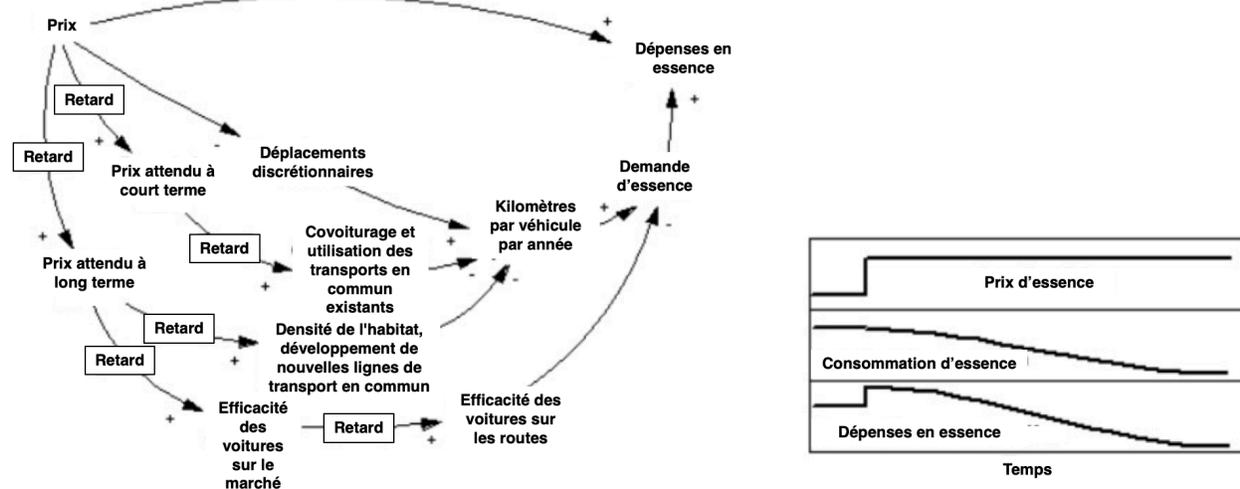


La demande à long terme est assez élastique. La figure 5-11 rend explicites ces différentes voies d'ajustement de la demande d'essence.

La représentation explicite des nombreux délais entre un changement de prix et le changement de demande qui en résulte permet de mieux voir le comportement pire que meilleur des dépenses en essence causées par une hausse de prix. Le bas de la figure 5-11 montre la réponse de la demande et des dépenses d'essence à une augmentation hypothétique et imprévue du prix de l'essence. À court terme, la demande d'essence est plutôt rigide, de sorte que la première réponse à une augmentation du prix de l'essence est une augmentation des dépenses en essence. Si le prix élevé persiste, les améliorations de l'efficacité réduisent progressivement la consommation d'essence par véhicule-kilomètre, et finalement, les modes d'habitation et la disponibilité des transports en commun s'adaptent pour réduire le nombre de véhicules-kilomètres par an. À long terme, les ajustements de la demande font plus que compenser la hausse des prix et les dépenses diminuent. Du point de vue du consommateur, il s'agit d'une situation pire que le mieux. Les délais et le compromis qu'ils créent contribuent à expliquer pourquoi il s'est avéré si difficile, aux États-Unis du moins, d'augmenter les taxes sur l'essence. Bien que les avantages à long terme l'emportent sur les coûts à court terme, même en termes de valeur actuelle nette, ils ne commencent à s'accumuler qu'après de nombreuses années. Les responsables gouvernementaux, concentrés sur la prochaine campagne de réélection, jugent que les coûts à court terme sont politiquement inacceptables. Ils le font parce que le public n'est pas disposé à sacrifier un peu aujourd'hui pour des avantages plus importants demain.

Figure 5-11 : Différents retards dans la réponse de la demande et des dépenses d'essence au prix. À gauche : La réponse à court terme à la hausse des prix est faible, tandis que la réponse à long terme est substantielle, car le parc automobile est progressivement remplacé par des modèles plus efficaces et les modes de vie changent.

À droite : Réponse à une hypothétique augmentation permanente et non anticipée du prix de l'essence. La consommation diminue lentement en raison des longs délais d'ajustement de l'efficacité des automobiles et de la modification des modes d'habitat et des itinéraires de transport en commun. Les dépenses augmentent donc immédiatement et ne tombent que plus tard en dessous du niveau initial : un compromis pire que meilleur pour les consommateurs. Bien entendu, à mesure que la demande diminue, une pression à la baisse s'exerce sur les prix, ce qui peut faire baisser encore plus les dépenses, mais aussi décourager toute nouvelle amélioration de l'efficacité. La rétroaction sur les prix est délibérément ignorée dans le diagramme.



5.2.6 Noms des variables

Les noms des variables doivent être des noms ou des phrases nominales

Les noms des variables dans les diagrammes et modèles causaux doivent être des noms ou des phrases nominales. Les actions (verbes) sont capturées par les liens causaux reliant les variables. Un diagramme causal capture la structure du système, pas son comportement - pas ce qui s'est réellement passé mais ce qui se passerait si d'autres variables changeaient de diverses manières. La figure 5- 12 montre des exemples de bonnes et de mauvaises pratiques.

Le diagramme correct indique : Si les coûts augmentent, alors le prix augmente (au-dessus de ce qu'il aurait été), mais si les coûts diminuent, alors le prix diminue (en dessous de ce qu'il aurait été). En ajoutant le verbe "augmente" au diagramme, on suppose que les coûts ne feront qu'augmenter, ce qui oriente la discussion vers un modèle de comportement (l'inflation). Il est déroutant de parler d'une diminution de la hausse des coûts ou d'une baisse de la hausse des prix - les prix augmentent-ils, augmentent-ils à un rythme décroissant ou baissent-ils ? en baisse, ou en baisse ?

Figure 5-12 : Les noms des variables doivent être des noms ou des phrases nominales.

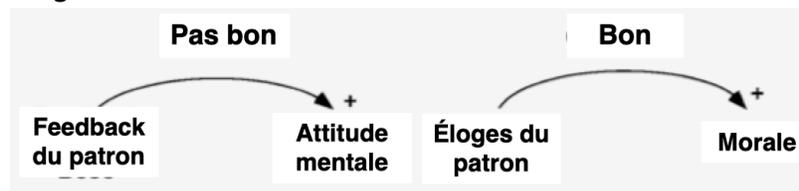


Les noms des variables doivent avoir un sens clair de l'orientation

Choisissez des noms pour lesquels la signification d'une augmentation ou d'une diminution est claire, des variables qui peuvent être plus grandes ou plus petites. Sans un sens clair de la direction des variables, vous ne serez pas en mesure d'attribuer des polarités de lien significatives.

Dans la partie gauche de la figure 5-13, aucune des variables n'a une direction claire : Si le retour d'information du patron augmente, cela signifie-t-il que vous recevez plus de commentaires ? Ces commentaires du patron sont-ils bons ou mauvais ? Et qu'est-ce que cela signifie pour l'attitude mentale d'augmenter ? La signification du côté droit est claire : plus d'éloges de la part du patron stimule le moral ; moins d'éloges l'érode (bien que vous ne devriez probablement pas laisser votre estime de soi dépendre autant de l'opinion de votre patron).

Figure 5-13 : Les noms des variables doivent avoir un sens clair.

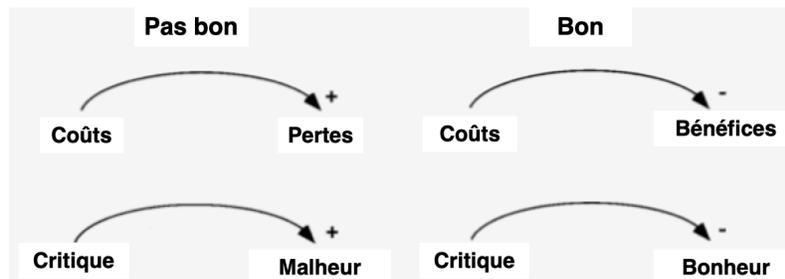


Choisissez des variables dont le sens normal de la direction est positif.

Les noms de variables doivent être choisis de manière à ce que leur sens normal soit positif. Évitez l'utilisation de noms de variables contenant des préfixes indiquant la négation (non, un, etc. ; figure 5-14).

La pratique comptable standard étant Profit = Recettes - Coûts, le meilleur nom de variable est Profit, qui diminue lorsque les coûts augmentent et augmente lorsque les coûts diminuent. De même, les critiques peuvent vous rendre malheureux, mais il est confus de parler d'un malheur croissant ; un meilleur choix est le bonheur positif, qui peut diminuer lorsque vous êtes critiqué et augmenter lorsque les critiques diminuent. Bien qu'il existe des exceptions occasionnelles, la diminution du non-respect de ce principe diminuera l'incompréhension de votre public.

Figure 5-14 : Choisissez des variables dont le sens normal de la direction est positif.

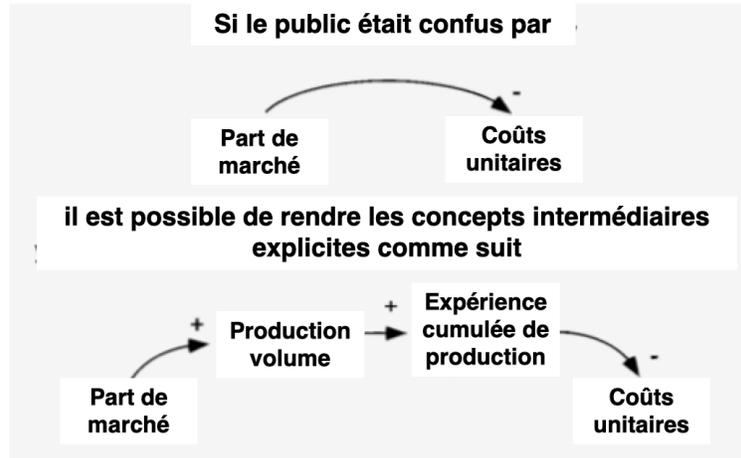


5.2.7 Conseils pour la mise en page des diagrammes de boucles causales

Pour maximiser la clarté et l'impact de vos diagrammes de cause, vous devez suivre certains principes de base de la conception graphique.

1. Utilisez des lignes courbes pour les retours d'information. Les lignes courbes aident le lecteur à visualiser les boucles de rétroaction.
2. Faites en sorte que les boucles importantes suivent des trajectoires circulaires ou ovales.
3. Organisez vos diagrammes de manière à minimiser les lignes croisées.
4. Ne mettez pas de cercles, d'hexagones ou d'autres symboles autour des variables dans les diagrammes de cause. Les symboles sans signification sont des "déchets de diagramme" et ne servent qu'à encombrer et à distraire. Une exception : Vous aurez souvent besoin de rendre explicite la structure de stock et de flux d'un système dans vos diagrammes. Dans ce cas, les rectangles et les valves autour des variables indiquent au lecteur quels sont les stocks et quels sont les flux - ils transmettent des informations importantes (voir chapitre 6).
5. Itérer. Comme vous ne saurez souvent pas ce que seront toutes les variables et les boucles lorsque vous commencerez, vous devrez redessiner vos diagrammes, souvent plusieurs fois, pour trouver la meilleure disposition.

Figure 5-15 : Rendez les liens intermédiaires explicites pour clarifier une relation de cause à effet.



5.2.8 Choisir le bon niveau d'agrégation

Les diagrammes de boucles causales sont conçus pour communiquer la structure de rétroaction centrale de votre hypothèse dynamique. Ils ne sont pas destinés à être des descriptions d'un modèle au niveau détaillé des équations. Si vous avez trop de détails, il est difficile de voir la structure globale de la boucle de rétroaction et la façon dont les différentes boucles interagissent. Si vous avez trop peu de détails, il est difficile pour votre public de comprendre la logique et d'évaluer la faisabilité et le réalisme de votre modèle.

Si votre public ne saisit pas la logique d'un lien de causalité, vous devez rendre certaines des variables intermédiaires plus explicites. La figure 5-15 en donne un exemple. Vous pouvez penser que dans votre secteur d'activité, les gains de parts de marché entraînent une baisse des coûts unitaires, car des volumes plus importants font progresser votre entreprise plus rapidement sur la courbe d'apprentissage. Le panneau supérieur comprime cette logique en un seul lien de causalité. Si votre public a trouvé ce lien déroutant, vous devez désagréger le diagramme pour montrer les étapes de votre raisonnement de manière plus détaillée, comme le montre le panneau inférieur.

Une fois que vous avez clarifié cette logique à la satisfaction de tous, vous pouvez souvent "découper" la représentation plus détaillée en une forme simple et plus agrégée. Le diagramme plus simple sert alors de marqueur pour la structure causale sous-jacente, plus riche.

5.2.9 Ne pas mettre toutes les boucles dans un seul grand diagramme

La mémoire à court terme peut contenir 7 ± 2 morceaux d'information à la fois. Cela pose une limite assez nette à la taille et à la complexité effectives d'une carte causale. En présentant d'un seul coup une carte causale complexe, il est difficile de voir les boucles, de comprendre lesquelles sont importantes ou comment elles génèrent la dynamique. Résistez à la tentation de rassembler toutes les boucles que vous et vos clients avez identifiées dans un seul diagramme complet. De tels diagrammes sont impressionnants - Mon Dieu, quelle quantité de travail cela a dû représenter ! Comme votre modèle doit être grand et complet ! - mais ils ne sont pas efficaces pour communiquer avec votre public. Un grand diagramme qui remplit un mur peut être parfaitement compréhensible pour la personne qui l'a dessiné, mais pour les personnes avec lesquelles l'auteur cherche à communiquer, il ne se distingue pas d'un Jackson Pollock et a beaucoup moins de valeur.

Comment alors communiquer la riche structure de rétroaction d'un système sans trop simplifier ? Construisez votre modèle par étapes, avec une série de diagrammes de boucles causales plus petits. Chaque diagramme doit correspondre à une partie de l'histoire dynamique racontée. Peu de gens peuvent comprendre un diagramme causal complexe s'ils n'ont pas l'occasion d'en assimiler les éléments un par un. Développez un diagramme distinct pour chaque boucle importante. Ces diagrammes peuvent être suffisamment détaillés pour montrer comment le processus fonctionne réellement. Ensuite, regroupez les diagrammes en une vue d'ensemble plus simple et de haut niveau pour montrer comment ils interagissent les uns avec les autres. Dans les présentations, construisez votre diagramme pièce par pièce à partir des morceaux (voir les sections 5.4 et 5.6 pour des exemples).

5.2.10 Rendre explicites les objectifs des boucles négatives

Toutes les boucles de rétroaction négative ont des objectifs. Les objectifs sont l'état souhaité du système, et toutes les boucles négatives fonctionnent en comparant l'état réel à l'objectif, puis en déclenchant une action corrective en réponse à l'écart. Rendez les objectifs de vos boucles négatives explicites. La figure 5-16 présente deux exemples. Le panneau supérieur montre une boucle négative affectant la qualité du produit d'une entreprise : plus la qualité est faible, plus les programmes d'amélioration de la qualité seront lancés et (vraisemblablement) les déficiences de la qualité seront corrigées. Le fait de rendre les objectifs explicites encourage les gens à se demander comment les objectifs sont formés. Dans la plupart des systèmes, les objectifs ne sont pas donnés de manière exogène mais font eux-mêmes partie de la structure de rétroaction. Les objectifs peuvent varier dans le temps et répondre aux pressions de l'environnement. Dans l'exemple, qu'est-ce qui détermine le niveau souhaité de qualité du produit ? L'ordre du PDG ? Les études comparatives de la qualité des concurrents ? Les commentaires des clients ? Les niveaux de qualité passés de l'entreprise ? Lorsque l'objectif est explicite, ces questions sont plus susceptibles d'être posées et les hypothèses concernant les réponses peuvent être rapidement intégrées au modèle.

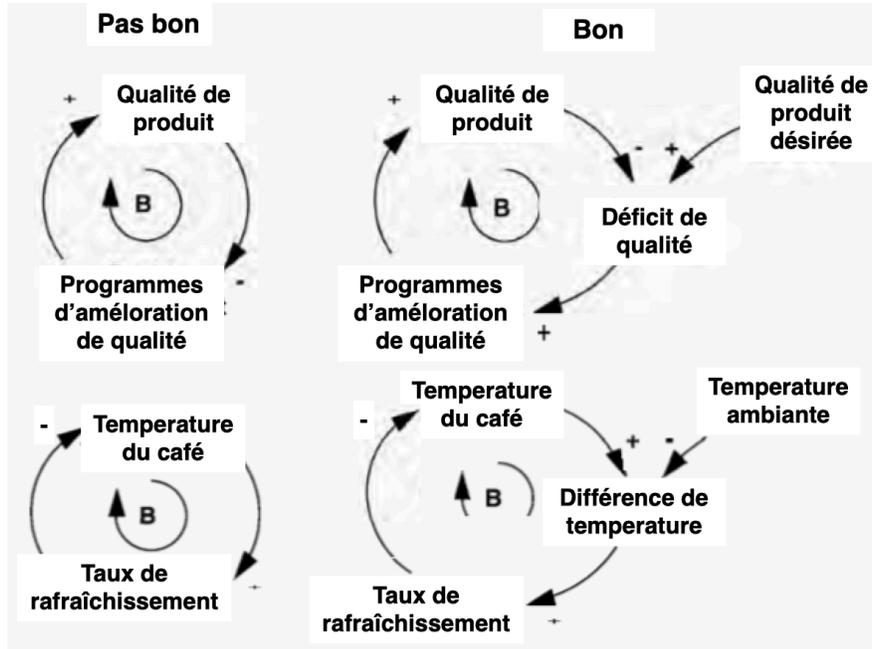
Rendre les objectifs des boucles négatives explicites est particulièrement important lorsque les boucles capturent le comportement humain. Mais il est souvent important de représenter les objectifs de manière explicite, même lorsque la boucle n'implique pas du tout de personnes. Le deuxième exemple illustre la rétroaction négative par laquelle une tasse de café se refroidit à la température ambiante. La vitesse de refroidissement (la vitesse à laquelle la chaleur se diffuse du café chaud vers l'air ambiant) est à peu près proportionnelle à la différence entre la température du café et la température ambiante. Le processus de refroidissement s'arrête lorsque les deux températures sont égales. Cette loi fondamentale de la thermodynamique est rendue claire lorsque le but est montré explicitement.

Il existe des exceptions au principe consistant à montrer les objectifs des boucles négatives. Considérons la boucle du taux de mortalité de la figure 5-1, dont l'objectif est implicite (et égal à zéro : à long terme, nous sommes tous morts). Vos modèles ne doivent pas représenter explicitement l'objectif de la boucle de la mort ou les objectifs de processus de décroissance similaires, tels que la dépréciation des biens d'équipement.

Figure 5-16 : Rendre explicites les objectifs des boucles négatives. L'agence humaine ou les processus naturels peuvent déterminer les objectifs.

En haut : Le but de la boucle est déterminé par une décision de gestion.

En bas : Les lois de la thermodynamique déterminent le but de la boucle.



5.2.11 Distinguer les conditions réelles et perçues

Il existe souvent des différences importantes entre l'état réel des choses et la perception de cet état par les acteurs du système. Il peut y avoir des retards causés par les processus de déclaration et de mesure. Il peut y avoir du bruit, des erreurs de mesure, des biais et des distorsions. Dans l'exemple de gestion de la qualité présenté à la figure 5-16, il peut y avoir des retards importants dans l'évaluation de la qualité et dans le changement d'opinion de la direction sur la qualité du produit. La distinction entre les conditions perçues et les conditions réelles permet de poser des questions telles que "Combien de temps faut-il pour mesurer la qualité ? Pour changer l'opinion de la direction sur la qualité, même après que les données soient disponibles ? Pour mettre en œuvre un programme d'amélioration de la qualité ? Pour obtenir des résultats ? Outre les longs délais, il peut y avoir un biais dans le système de reportage, ce qui fait que la qualité rapportée diffère systématiquement de la qualité ressentie par le client. Les clients ne déposent pas de demande de garantie pour tous les problèmes ou ne signalent pas tous les défauts à leur représentant commercial. Le personnel de vente et de réparation peut ne pas signaler toutes les plaintes des clients au siège social. L'évaluation de la qualité par la direction peut être biaisée parce que les subordonnés filtrent les informations qui leur parviennent. Certains cadres de l'industrie automobile reçoivent les derniers modèles pour leur usage personnel ; ces voitures sont soigneusement sélectionnées et fréquemment entretenues par les mécaniciens de l'entreprise. Leur impression de la qualité des voitures de leur entreprise sera plus élevée que celle du client moyen qui achète dans le commerce et garde la voiture pendant 10 ans. Le diagramme peut être modifié comme le montre la figure 5-17. Le diagramme montre maintenant comment la direction, malgré ses bonnes intentions, peut en venir à avoir une vision très exagérée de la qualité du produit, et vous êtes bien placé pour discuter des moyens de réduire les délais et d'éliminer les distorsions.

Figure 5-17 : Distinguer les conditions réelles et perçues

