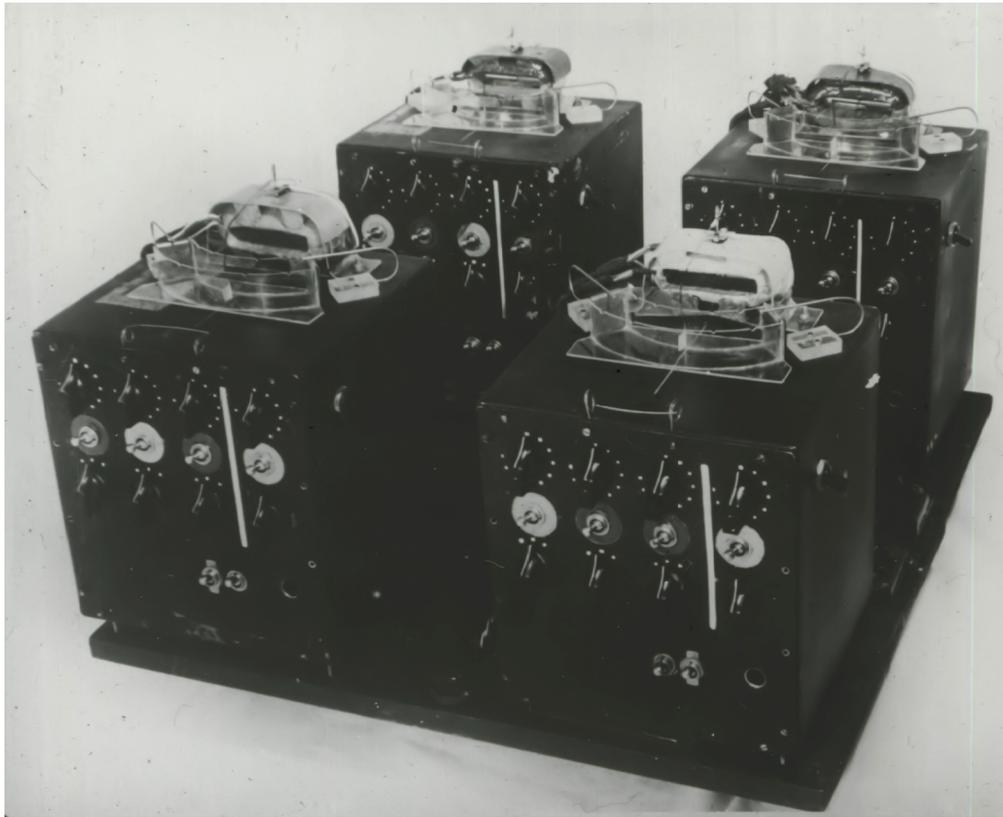


W. Ross Ashby et *An Introduction to Cybernetics* (1956)

Gustave Cortal

2021



# 1 *An Introduction to Cybernetics*

## 1.1 Processus dans un système

La première partie du livre pose les bases mathématiques et analyse les systèmes à états discrets. Elle met l'accent sur la notion de changement d'état. Un système n'est pas une chose, mais une liste de variables. Un état d'un système est une propriété ou une condition bien définie qui peut être reconnu s'il arrive encore. Chaque système a donc plusieurs états possibles. Les opérants de la transformation sont les états d'un système. Ainsi, une séquence d'états dans le temps d'un système est sa ligne de conduite, son comportement. On prend l'exemple d'une peau pâle qui bronze sous l'influence du soleil. Nous observons la transition peau pâle  $\rightarrow$  peau bronzée. La peau pâle représente l'opérant, l'opérateur est le soleil et la transformée est le résultat de l'opération du soleil sur la peau pâle, qui est la peau bronzée.

Un ensemble de transitions sur un ensemble d'opérants est appelé une transformation. Nous pouvons maintenant formaliser facilement la transformation en prenant un système quelconque. La figure 1 indique les transitions des différents états du système ( $A, B, C, D, E$ ) sous la transformation  $U$ . Une représentation du changement des états peut également être fait à travers un graphe (figure 2).

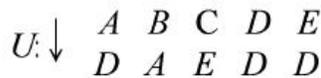


FIGURE 1: La transformation  $U$  et les changements d'états

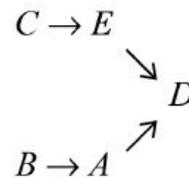


FIGURE 2: Le graphe de changements d'états

La machine déterministe est une transformation close à valeurs singulières, comme présentée ci-dessus. Ashby insiste sur le fait qu'une telle machine doit être étudiée dans sa façon d'agir et non comme une chose matérielle. Pour analyser un système, l'aspect fonctionnel prévaut sur l'aspect matériel. Nous avons décrit la machine comme une unité close qui se repose sur elle-même. Nous nous demanderons maintenant comment plusieurs systèmes peuvent se coupler entre eux.

## 1.2 Processus de communication entre systèmes

### 1.2.1 Machine avec entrée

Nous considérons maintenant les systèmes ouverts, ce qu'Ashby appelle « Machine avec entrée<sup>1</sup> » (*Machine with input*) comportant des paramètres. Un paramètre est une valeur qui détermine quelle est la transformation à appliquer aux états d'un système. Un paramètre est une entrée (*input*) du système qui peut varier. Alors que les machines présentées dans la section 1.1 comportent seulement une transformation, donc un seul comportement, les machines avec entrée peuvent faire varier leur comportement à travers la variation de leurs paramètres, comme illustré sur la figure 3.

C'est à l'observateur de déterminer les paramètres d'un système. Pour un système électrique, il est facile de déterminer les paramètres, mais pour un système biologique, la complexité augmente puisque le nombre de paramètres ainsi que leur détermination dépasse l'observateur. Un système est donc considéré comme « très large » s'il bat l'observateur en termes de complexité et de richesse des connexions.

---

1. Aussi appelée transducteur.

$$R_1: \begin{array}{c} \downarrow \\ a \ b \ c \ d \\ c \ d \ d \ b \end{array} \quad R_2: \begin{array}{c} \downarrow \\ a \ b \ c \ d \\ b \ a \ d \ c \end{array} \quad R_3: \begin{array}{c} \downarrow \\ a \ b \ c \ d \\ d \ c \ d \ b \end{array}$$

FIGURE 3: Les différentes transformations selon la valeur d'un paramètre

### 1.2.2 Couplage entre machines

Une propriété fondamentale des machines est le fait qu'elles puissent se coupler entre elles. Plusieurs machines couplées peuvent en former une seule et les parties d'une machine peuvent être également des machines. La figure 4 présente deux machines P et R couplées ensemble. La flèche représente le fait que la machine P, lors du couplage, affecte les conditions de la machine R. Ainsi, la machine P modifie les paramètres en entrée de la machine R. Le comportement de la machine R dépend donc du comportement de la machine P, on dit également que la machine P domine la machine R.

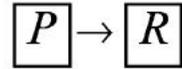


FIGURE 4: La machine P domine la machine R

Dans le cas où la machine R modifie également les paramètres en entrée de la machine P, comme sur la figure 5, le système contenant les machines R et P comporte des boucles de rétroaction ou *feedbacks*. La rétroaction est l'action en retour d'un effet sur sa propre origine. Une machine peut avoir des effets immédiats sur une autre et inversement. Un système comportant des *feedbacks* ne peut être étudié à travers ses parties seulement, comme le ferait la méthode cartésienne en considérant le tout comme la somme de ses parties. Lorsque nous sommes en présence de *feedbacks*, les interactions entre les parties d'un système deviennent fondamentales, et cela nécessite de considérer le système comme un tout supérieur à la somme de ses parties et d'adopter une pensée complexe<sup>1</sup>.

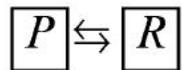


FIGURE 5: La présence de *feedbacks* entre P et R

Ainsi, le comportement d'une machine ne peut se déduire du comportement de ses parties. La cybernétique nous invite à considérer le couplage entre ses parties. Les propriétés du tout ne reflètent pas forcément les propriétés des parties et vice versa. Plus un système est large, plus son comportement s'éloigne de celui de ses parties.

Un système qui domine l'autre est moins « richement connecté » que deux systèmes avec *feedbacks*. Deux systèmes sans effets immédiats sont dits fonctionnellement indépendants, et le système entier est considéré comme réductible, puisqu'il n'existe aucun couplage entre ses parties, comme illustré sur la figure 6.

La notion de couplage chez Ashby peut être rapprochée de celle de résonance interne chez Gilbert Simondon. Lorsqu'une réalité est en cours d'individuation, il y a « une dépendance de chaque sous ensemble par rapport à l'ensemble, il y a aussi une dépendance de l'ensemble par rapport aux sous ensembles<sup>2</sup> ». Il y a ainsi communication entre deux ordres de grandeur différents. Ce phénomène

1. Nous faisons référence à la pensée de la complexité d'Edgar Morin, qui s'est inspiré d'Ashby : <https://www.franceculture.fr/emissions/les-chemins-de-la-philosophie/profession-philosophe-edgar-morin-paraphilosophie>

2. *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, p. 320.

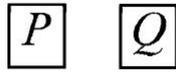


FIGURE 6: Le système P-Q réductible

s'appelle la résonance interne et est contemporain de l'individuation d'un système. L'objet technique se concrétise lorsque chaque élément qu'il contient entre en résonance. La concrétisation est l'augmentation de la synergie fonctionnelle des différents éléments d'un objet technique.

### 1.2.3 État d'équilibre et homéostat

Un système entre dans un état d'équilibre lorsque la transformation d'un état n'opère aucun changement. Ainsi, si nous considérons une transformation  $T$  et un état  $B$ , un état d'équilibre est atteint lorsque  $T(B) = B$ . De plus, si la séquence de changement d'état forme un cycle, alors ce cycle représente aussi un état d'équilibre (voir figure 2). Considérons une perturbation  $D$  qui change l'état du système vers un état voisin. Un système possède un équilibre stable si après  $n$  changements d'états après une perturbation, celui-ci se retrouve dans son état avant la perturbation :  $\lim_{n \rightarrow \infty} T^n D(a) = a$ .

Le principe de l'homéostat est énoncé page 82 et repose sur une propriété fondamentale : Le tout est à un état d'équilibre si et seulement si chaque partie est à un état d'équilibre dans les conditions imposées par les autres parties. Cela veut dire qu'une partie à un pouvoir de veto sur les états d'équilibre du système entier. L'état d'équilibre du système entier doit être accepté par toutes ses parties. Considérons l'homéostat illustré sur la figure 8 qui est composé d'une partie A et d'une partie B couplées ensembles. A est composée de quatre aiguilles qui forment un système à quatre variables où les valeurs de B sont les entrées. L'état de A est spécifié par la position des quatre aiguilles. Selon les conditions et les entrées de A, celle-ci peut avoir plusieurs états d'équilibre lorsque les aiguilles sont au centre ou en déviation extrême. B est composée d'un relais qui peut être activé ou non ainsi que de quatre interrupteurs pas à pas qui peuvent être chacun dans 25 positions. B possède donc  $2 \times 25 \times 25 \times 25 \times 25 = 781250$  états. L'entrée de ce système est le système A. B a été construit de telle sorte que, lorsque le relais est activé, aucun des états de B ne soit à l'équilibre (les interrupteurs continuent de bouger), alors que lorsque le relais n'est pas activé, ils sont tous en équilibre (les interrupteurs restent où ils sont). Pour finir, B a été couplé avec A pour que le relais soit désactivé seulement quand A est en équilibre stable lorsque les aiguilles sont au centre.

Un équilibre du système entier implique que B doit être en équilibre<sup>1</sup>. Mais B a été construit pour que cela se produise seulement lorsque son relais n'est pas activé. Et celui-ci n'est pas activé seulement quand les aiguilles sont au centre. Ainsi, B exerce son pouvoir de veto sur tous les équilibres de A sauf lorsque les aiguilles sont au centre. En parcourant les différents états successifs, l'homéostat effectue une course inéluctable vers son état d'équilibre.

### 1.2.4 Boite Noire

La Boite Noire est un concept central abordé par Ashby. Il s'agit d'un système ouvert où l'expérimentateur n'a accès qu'aux entrées (*input*) et sorties (*output*) du système puisque les mécanismes internes ne sont pas totalement ouverts à l'inspection. Par exemple, un enfant qui doit ouvrir une porte doit manipuler la poignée (l'entrée) pour produire un mouvement d'ouverture (la sortie). Il apprend à manipuler l'entrée et la sortie de ce système sans comprendre le mécanisme interne qui les lie.

---

1. Selon la propriété fondamentale énoncée précédemment

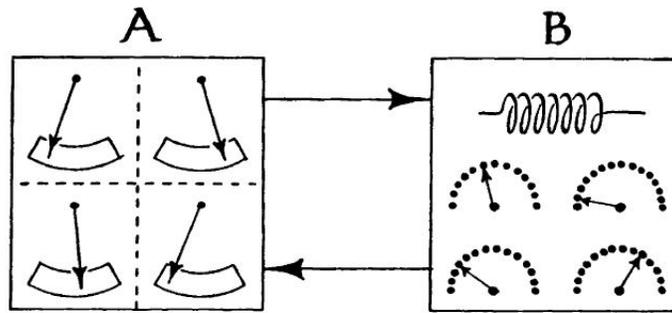


FIGURE 7: L'homéostat d'Ashby

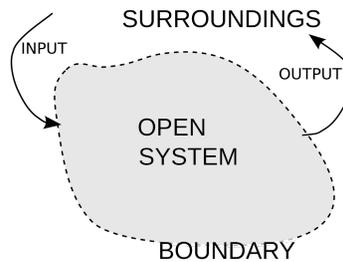


FIGURE 8: L'homéostat d'Ashby

La connaissance d'une Boite Noire est obtenue en recodant le protocole qui lie les entrées aux sorties, qui permet de retrouver les connexions qui donnent à partir des entrées les sorties d'un système. Les réseaux de neurones artificiels sont considérés comme des Boites Noires puisqu'ils apprennent, à partir d'un jeu de données composé d'entrées et de sorties, à produire le meilleur modèle possible en minimisant une fonction de coût qui compare les sorties du réseau aux sorties réelles.

Le comportement d'un système ne spécifie pas les connexions. Il peut exister des machines isomorphiques, c'est-à-dire des machines qui ont le même comportement tout en étant différentes dans leur protocole. Elles peuvent être fonctionnellement identiques, mais matériellement différentes<sup>1</sup>. Ashby développe une théorie des Boites Noires, selon laquelle celles-ci ne se comportent pas comme des objets réels, puisque les objets réels sont tous des Boites Noires. La théorie de la Boite Noire est une théorie des systèmes où une attention particulière est donnée à la question de savoir quelle information provient de l'objet et comment elle peut être reçue par l'observateur. Cette théorie étudie donc les relations entre l'expérimentateur et son environnement et une attention spéciale est accordée au flux d'information. L'idée est bien résumée par Goldman dans *Information theory : A study of the real world thus becomes a study of transducers*<sup>2</sup>.

Il est important de souligner que l'expérimentateur de la Boite Noire se couple avec cette dernière. Il affecte la Boite Noire tout en étant affecté par cette dernière. Ils forment un système avec *feedbacks* (voir figure 9). La technologie est anthropologiquement constitutive et constituante dans le sens où la technologie et l'humain se couplent au sein d'un système, on ne peut penser l'humain sans la technique et inversement. Simondon dira qu'il existe une relation transductive entre l'humain et la technique, c'est-à-dire une relation qui a valeur d'être et qui est constituante des deux termes.

1. Cela a été développé dans le cours de SC11 également  
 2. *An Introduction to Cybernetics*, p. 110.



FIGURE 9: Le couplage entre la Boite Noire et l'expérimentateur

Dans la prochaine section, nous présenterons succinctement divers concepts introduits par Ashby pour penser la régulation des systèmes.

### 1.2.5 Variété, contrainte et information

La variété est le nombre d'éléments distincts d'un ensemble d'états d'un système. Il est un indicateur du nombre de comportements différents et donne une idée sur la complexité d'un système. Néanmoins, la variété d'un ensemble n'est pas la propriété intrinsèque de celui-ci. Il faut spécifier l'observateur et sa capacité de discrimination pour bien la définir. Il est possible de transmettre de la variété. Un transducteur qui ne peut pas prendre plus de  $r$  états ne peut transmettre plus de  $\log_2 r$  bits par étape. La variété peut ainsi être exprimée sous forme de chiffres binaires.

Le concept de variété lié avec celui d'information et de contrainte nous permet de comprendre l'acte de communication. La contrainte est le fait de réduire la variété d'un ensemble sous une certaine condition. Chaque loi de la nature est une contrainte puisque celles-ci excluent des possibilités en prédisant qu'elles ne vont jamais arriver. La cybernétique pourrait être redéfinie à travers le prisme de la contrainte puisqu'elle observe la totalité des possibles et se demande pourquoi seulement une certaine portion des possibilités sont actualisées. La prédiction des états implique la présence de contrainte, la machine doit être vue en tant que contrainte. La variété d'une machine fermée sur elle-même ne peut jamais augmenter et souvent descend, mais que se passe-t-il pour une machine ouverte qui communique avec d'autres systèmes ?

L'acte de communication implique l'existence d'un ensemble de possibilités. Pour saisir cet acte, il faut étudier l'information d'un message, qui n'est pas une propriété intrinsèque de celui-ci. Le bruit (*noise*) n'est pas distinguable intrinsèquement de n'importe quelle forme de variété. Le bruit dépend du récepteur qui décide de l'information à retenir. Un signal a valeur d'information s'il produit du sens selon la structure de sens du système récepteur.

Ashby considère l'information comme « ce qui supprime l'incertitude » et ce qui « mesure la quantité d'incertitude supprimée ». Ainsi, il est intéressant de s'intéresser au gain d'information d'un système lorsqu'un message arrive. Pour cela, l'entropie est utilisée comme mesure d'incertitude :  $\sum p \log p$  où  $p$  représente les probabilités de chaque évènement.

Considérons la réception d'un message qui invite le récepteur à réviser l'estimation de quelque chose qui va arriver, d'une distribution A à une distribution B. Les deux distributions sont représentées sur la figure 10. Le gain d'information est représenté par la quantité finale d'entropie du système moins sa quantité initiale. La distribution A a une entropie de  $-20$  alors que la distribution B a une entropie de  $-3$ . Le gain d'information apporté par le message est ainsi de  $(-3) - (-20) = 17$ .

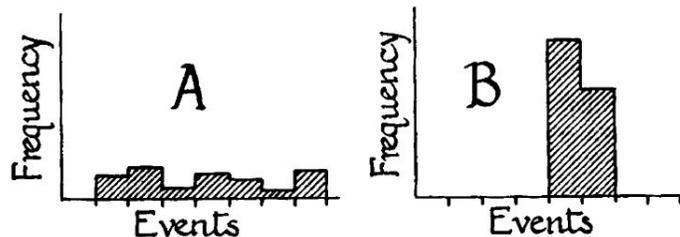


FIGURE 10: Passage d'une distribution A à une distribution B