

# La boucle cybernétique

## 1) Avant propos

Afin de cadrer ce cours, nous explorons quelques objets situés aux frontières de l'IA. De façon générale, le fait d'étudier des configurations extrêmes, nous permet d'extrapoler les modèles. Ainsi, le passage aux limites que nous faisons dans ce chapitre nous aide à analyser, séparer et classer les caractéristiques et profils des mécanismes étudiés. Alors nous abordons la boucle cybernétique pour cette raison.

En effet l'IA s'attache entre autres, au raisonnement automatique. Une des briques de base du raisonnement est la *déduction* (ex :  $a \rightarrow b$ ). Ensuite, quelques déductions portant sur le même sujet peuvent se faire consécutivement : nous obtenons une *chaîne de déduction* (ex :  $a \rightarrow b$ ,  $b \rightarrow c$ ,  $c \rightarrow d$ ). Puis cette dernière peut retomber sur son point de départ, alors elle se reboucle : c'est la *boucle de réaction* (ex :  $a \rightarrow b$ ,  $b \rightarrow c$ ,  $c \rightarrow d$ ,  $d \rightarrow a$ ). Et, finalement, quand elle est effectuée par la machine, elle devient cybernétique et nous obtenons notre *boucle cybernétique de réaction*.

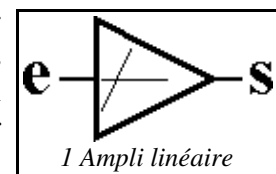
Ce polycopié, simple et imagé, permet aux étudiants non électroniciens, de se faire une idée de la boucle cybernétique. La démarche pédagogique consiste à développer un parallèle avec des montages mécaniques, plus intuitifs car appartenant à notre quotidien.

## 2) Introduction

### 2.A) L'espoir cybernétique

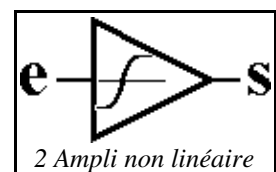
Après la guerre, sous l'impulsion de Norbert Wiener, apparaît la cybernétique. C'est la nouvelle science à la mode, et les scientifiques, réitèrent ce qu'ils ont déjà dit à propos des centraux téléphoniques : cette machine par sa complexité nous rapproche de la compréhension du cerveau.

Rosemblat, s'inspirant des neurones des seiches, va essayer de simuler des fonctions analogiques élémentaires au moyen d'amplificateurs linéaires, mais rapidement, sous les coups de Seymour Papert et Marvin Minsky, cette direction s'essouffle, et les chercheurs partent travailler vers une nouvelle discipline naissante : l'informatique.



### 2.B) Le second souffle des réseaux neuronaux

Dans les années 80 les travaux sur les neurones ont connu un renouveau grâce aux réseaux neuronaux. C'est l'avènement du connexionnisme. Ils utilisent une représentation analogique, donc sub-symbolique de l'information. Pour éviter le défaut signalé par Seymour Papert et Marvin Minsky, ils traitent des signaux au moyen d'amplificateurs analogiques asymptotiques, donc non-linéaires. Leurs principaux domaines d'utilisation sont la classification et l'apprentissage. Ceci induit, par exemple, des applications dans le traitement des perceptions : analyse et reconnaissance d'images et de son.



## 2.C) Le grand concept de la réaction

La cybernétique est basée sur un concept très simple, mais très performant : la notion de réaction. C'est parce qu'il est très important que j'ai été amené à dessiner et rédiger ces pages. La contre réaction apparaît vers les dernières étapes du raisonnement, quand la chaîne de déduction se reboucle.

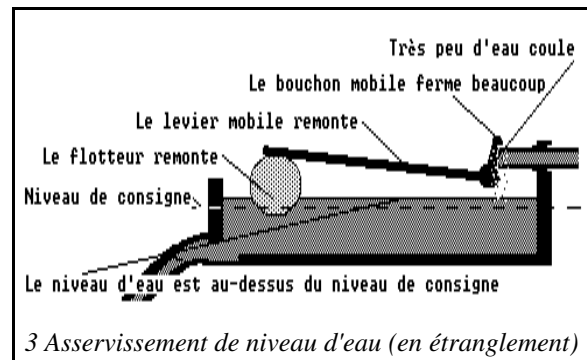
Signalons encore une étape qui vient après : la démarche d'adaptation. Dans ses écrits à propos de l'intentionnalité, le philosophe Daniel Dennett [Den 1981][Den 1987] en parle souvent, pour dire que l'asservissement de température basé sur une réaction négative, n'est pas intentionnel. Dans ce cours d'IA, nous verrons que la réaction positive, débouche sur le bistable et peut introduire l'intentionnalité.

## 2.D) La boucle cybernétique : la première structure intelligente ?

J'ai commis quelques conférences sur l'intelligence artificielle, et j'ai été parfois attaqué par des philosophes qui n'aiment pas tellement entendre qu'une machine peut être intelligente.

Puis un jour, Jean-Pierre, le mari d'une amie, lève la main et affirme : *La boucle cybernétique est la première structure intelligente que je connaisse.* Cette aide m'a fait plaisir mais m'a un peu étonné. Ce montage, si simple, qui se décrit au moyen d'un système d'équations différentielles du premier degré, comment peut-on le considérer comme *intelligent* ?

Depuis j'ai un peu révisé mon jugement, et je pense que cette structure constitue une des premières étapes vers l'intelligence artificielle. C'est pourquoi, malgré sa simplicité, je vous prie de la prendre au sérieux.



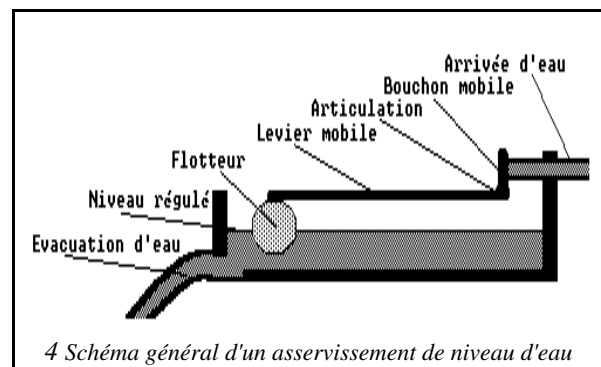
3 Asservissement de niveau d'eau (en étranglement)

## 3) Analysons tout d'abord un exemple

### 3.A) Description générale

Le dessin ci-contre présente un schéma synoptique d'un régulateur de niveau d'eau, dont un exemple quotidien est celui de la chasse d'eau. Le but est d'obtenir dans un récipient un niveau d'eau régulé, c'est à dire un niveau d'eau constant, même s'il y a une fuite.

Dans ce récipient, nageant à la surface du liquide nous trouvons un flotteur, dont la hauteur est fonction du niveau de l'eau dans le récipient. Ce flotteur est arrimé à un levier, entraînant un bouchon mobile qui vient presser contre l'arrivée d'eau. Son rôle est de moduler le débit en appuyant plus ou moins, sur l'arrivée d'eau.



4 Schéma général d'un asservissement de niveau d'eau

Pour que cet exemple concret modélise bien un régulateur électronique, il faut faire l'hypothèse que le récipient présente, à sa base, au niveau du mécanisme de vidange, une fuite. Finalement, dans le cadre de cette étude, nous serons souvent amenés à étudier comment ce défaut est toujours compensé par la régulation de la boucle.

### 3.B) Dans le cas où le niveau monte au-dessus du niveau de consigne

Supposons que, pour une raison non précisée, la fuite qui extrayait l'eau du réservoir, diminue un peu. Immédiatement après cette perturbation, le débit d'eau qui coule dans le réservoir pour compenser la fuite, demeure le même. Il est donc supérieur à celui de la fuite. Donc le niveau

d'eau monte, le flotteur monte, le bras monte et vient appuyer plus fort sur le bouchon mobile. L'arrivée d'eau se trouve diminuée seulement à la fin de cette boucle de réaction. Finalement nous constatons que la correction s'oppose à la perturbation.

En conclusion nous voyons que le système ainsi construit, tend à s'équilibrer pour compenser les perturbations extérieures qui moduleraient la fuite. Nous disons qu'il est auto-régulé.

### 3.C) Cas où le niveau descend au-dessous du niveau de consigne

Supposons maintenant que la fuite initiale augmente. L'arrivée d'eau par le haut, ne peut compenser cette fuite : le niveau d'eau baisse, le flotteur baisse, le levier baisse, et le bouchon mobile s'éloigne de l'arrivée d'eau. Il laisse couler beaucoup plus de liquide. Ainsi la boucle est bouclée, et par ce mécanisme dit de *réaction*, et même plus précisément de *contre réaction*, notre système trouve un autre état d'équilibre.

## 4) La boucle de réaction

Le mécanisme que nous avons décrit s'appelle une boucle de réaction. Le terme *boucle* vient du fait que les effets de la perturbation se propagent d'élément en élément, et reviennent au départ, après avoir décrit une boucle. Nous obtenons les étapes suivantes :

### 4.A) Diminution de la fuite

- Augmentation du niveau d'eau
- Augmentation de la hauteur du levier
- Augmentation de la pression du bouchon mobile
- Diminution du débit
- Diminution du niveau d'eau

### 4.B) Augmentation de la fuite

- Diminution du niveau d'eau
- Diminution de la hauteur du levier
- Diminution de la pression du bouchon mobile
- Augmentation du débit
- Augmentation du niveau d'eau

Nous voyons donc que, partant d'un niveau d'eau, nous y revenons après une réaction en cycle de tous les éléments de cette boucle. D'où le nom de cette structure : *boucle de réaction*.

## 5) Boucle de réaction négative

### 5.A) Définition

Dans le type de boucle que nous venons de décrire, la réaction du système s'oppose aux perturbations et tend à les compenser. Nous convenons donc de l'appeler *boucle de réaction négative* ou encore *boucle de contre réaction*.

## 5.B) Modélisation d'un amplificateur

La contre-réaction (réaction négative) tend à stabiliser le système quand il est déséquilibré par les perturbations. Ainsi, dans ce mode de fonctionnement, le débit de la fuite correspond à celui de l'arrivée d'eau.

Maintenant, compliquons un peu le montage, et partageons l'eau qui arrive dans un rapport de 1 pour 10 : nous laissons le petit flux de 1 remplir le réservoir, et dérivons le flux de 10 pour notre usage personnel.

Comment s'équilibre le montage ? Le système converge vers un autre lieu de stabilité : niveau d'eau = niveau de consigne ; flux de fuite = flux qui entre dans le réservoir. Ainsi, puisque nous partageons le flux qui arrive dans les proportions 1/10, pour notre usage personnel, nous obtenons un flux égal à 10 fois celui de la fuite.

Attention, maintenant ça devient subtil : si nous choisissons de considérer le flux de fuite plutôt comme un flux de commande, alors nous pouvons estimer que nous avons fabriqué un merveilleux amplificateur dynamique de courant de gain 10... Et il suffit de diviser le flux d'entrée dans les proportions 1/100, pour obtenir un gain de 100. Etc...

## 6) Boucle de réaction positive

### 6.A) Introduction

Le schéma ci-dessous présente un autre type de boucle dit : *boucle de réaction positive*, qui fonctionne très différemment.

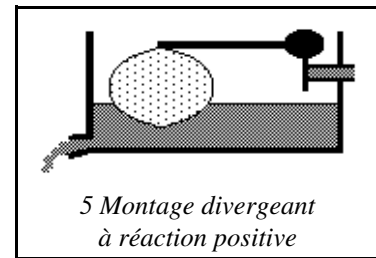
## 6.B) Analysons ses deux configurations de fonctionnement

### a) Premier cas

D'abord, nous partons d'un point d'équilibre où le niveau d'eau est égal au niveau de consigne. Ensuite, par exemple, nous supposons qu'une perturbation diminue le flux de fuite.

À ce moment là, il entre plus d'eau dans le réservoir qu'il n'en sort, et le niveau d'eau monte. Ceci fait monter le flotteur, qui ouvre encore plus l'arrivée d'eau. Donc le niveau monte encore. Et indéfiniment, le cycle se reboucle en se renforçant, jusqu'au débordement.

Ici, la perturbation diminue la fuite, ce qui augmente le niveau d'eau. La grandeur mathématique décrite est la hauteur de l'eau. Donc la diminution de la fuite constitue une perturbation positive. La réaction positive, confirme la perturbation (positive) et augmente encore le niveau d'eau : nous observons une courbe positive (dirigée vers le haut :  $+e^{+at}$ ).



### b) Second cas

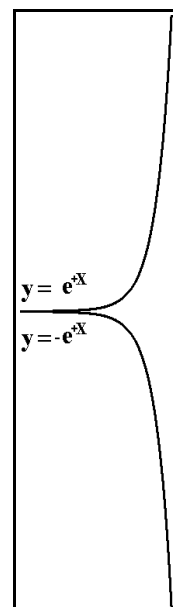
Repartons de l'état d'équilibre précédent, mais, supposons cette fois que la perturbation augmente la fuite : il sort plus d'eau du réservoir qu'il n'y en arrive. Alors le niveau se met à baisser, ce qui étrangle à nouveau l'arrivée d'eau.

Ici encore le cycle se reboucle indéfiniment, en se renforçant, jusqu'à l'assèchement du réservoir. Dans cette configuration le flotteur pend dans le vide et ferme totalement l'arrivée d'eau. Ainsi au moins, il n'y a pas de catastrophe.

Dans ce cas, la perturbation augmente la fuite, ce qui diminue le niveau d'eau. Elle constitue une perturbation négative. La réaction positive, confirme la perturbation (négative) et diminue encore le niveau d'eau : nous observons une courbe négative (dirigée vers le bas :  $-e^{+at}$ ).

## 6.C) La réaction positive, une réaction qui confirme la perturbation

À travers cet exemple nous voyons que la réaction est positive. Loin de s'opposer aux perturbations, elle les confirme, les amplifie selon un processus d'avalanche. La mise en équation de ce système différentiel du premier ordre conduit à un processus exponentiel à coefficient positif : le  $+at$  de  $e^{+at}$  ou de  $-e^{+at}$ . Dans les deux cas nous obtenons un système qui réagit à la même vitesse, en fonction de  $+at$ . Cependant, nous observons une courbe positive (dirigée vers le haut :  $+e^{+at}$ ) dans le cas d'emballement du système, et une courbe négative (dirigée vers le bas :  $-e^{+at}$ ) dans le cas de l'étranglement.

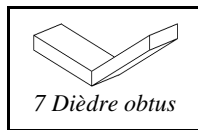


## 6.D) Modélisation d'une mémoire bistable

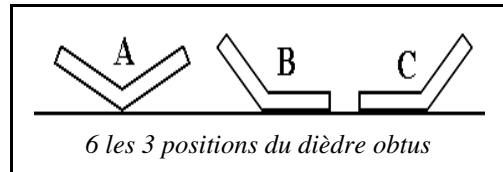
Il est important de noter que ce système à réaction positive possède deux lieux de stabilité : le *lieu de butée haute*, et le *lieu de butée basse*. Ceci est très important ; nous disons que ce montage possède deux états stables : il est bistable.

Si nous plaçons le système en déséquilibre haut ou bas, il reste dans cette position, nous disons que ce montage constitue une mémoire élémentaire. Nous sommes donc en présence d'une modélisation physique d'une mémoire bistable à un bit, un drapeau (flag en anglais).

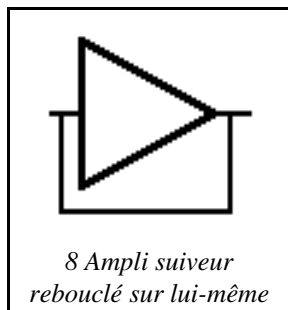
### 6.E) Plier un ticket de métro pour modéliser une mémoire bistable



Quand nous plions un peu un ticket de métro, au milieu dans le sens de sa largeur, nous obtenons un dièdre obtus, qui présente deux lieux de stabilité B et C, et d'autres analogies avec le bistable, que nous développerons avec plaisir.



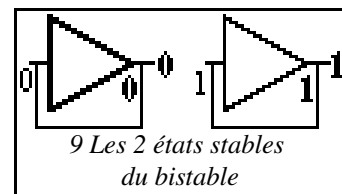
### 6.F) Analyser le fonctionnement d'une mémoire bistable



Voici, à gauche, le schéma d'une mémoire électronique bistable : elle est construite au moyen d'un amplificateur non inverseur. Il fonctionne en suiveur : sa sortie recopie son entrée. Au moyen d'un câblage électrique conducteur, nous rebouclons sa sortie sur son entrée. Alors la boucle est bouclée.

Le dessin de droite précise les niveaux booléens des entrées et sorties correspondant à chacun des deux états stables (0 et 1) qu'elle peut prendre. Par exemple, un 0 en entrée est traduit par l'ampli en un 0 en sortie. Par câblage, nous le ramenons en entrée. Il vient confirmer le 0 initial. La boucle est bouclée et le système demeure stable et autonome. Nous sommes en présence d'une mémoire.

Bien sûr, nous pouvons tenir le même raisonnement pour l'état 1.

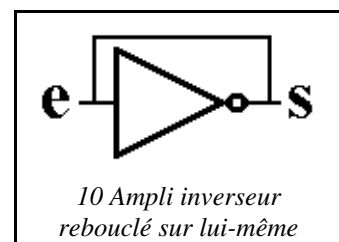


### 6.G) Analyser le fonctionnement d'un oscillateur

Voici, à droite, le schéma d'un oscillateur, d'une boucle cybernétique électronique astable : elle est construite au moyen d'un amplificateur inverseur. Sa sortie est l'inverse de son entrée. Au moyen d'un câblage électrique, nous rebouclons sa sortie sur son entrée. Ainsi la boucle est bouclée.

Mais nous ne pouvons pas dessiner les états du montage, car il oscille. Par exemple, un 0 en entrée est traduit par l'ampli en un 1 en sortie. Par câblage, nous le ramenons en entrée. Il vient contrarier et remplacer le 0 initial. Ce 1 en entrée produit un zéro en sortie qui revient en entrée remplacer le précédent 1. La boucle est bouclée. Le système vient de faire un cycle 0-1-0, il est instable et oscille en fonction du temps de réponse de l'inverseur. Nous sommes en présence d'un oscillateur.

Dans les systèmes amplificateurs ce phénomène est fréquent. Quand il n'est pas désiré, nous l'appelons *accrochage*. En neurobiologie, il correspond aux acouphènes du cerveau.



## 7) Conclusion

Nous venons d'aborder la boucle de réaction de façon simple. Cependant nous retenons que :

- Quand la réaction confirme la perturbation, elle est positive et nous obtenons une avalanche vers un des deux lieux stable : nous sommes en présence d'un bistable, i.e. une mémoire.
- Quand la réaction s'oppose à la perturbation, elle est négative et nous obtenons une régulation de niveau vers un lieu médian (instable). Ce schéma sert à fabriquer une régulation, un ampli à gain régulé, ou une évolution, une adaptation, (un apprentissage).

## 8) Bibliographie

[Den 1981] Daniel Dennett,  
*True believers : the intentional strategy and why it works*,  
in Scientific explanation, A.HEATH, Oxford U.P., 1981.

[Den 1987] Daniel Dennett,  
*Three kinds of intentional psychology*,  
in the intentional stance MIT, 1987.



## Table des matières

La boucle cybernétique.....	1
1) Avant propos.....	1
2) Introduction.....	1
2.A) L'espoir cybernétique.....	1
2.B) Le second souffle des réseaux neuronaux.....	1
2.C) Le grand concept de la réaction.....	2
2.D) La boucle cybernétique : la première structure intelligente ?.....	3
3) Analysons tout d'abord un exemple.....	3
3.A) Description générale.....	3
3.B) Dans le cas où le niveau monte au-dessus du niveau de consigne.....	3
3.C) Cas où le niveau descend au-dessous du niveau de consigne.....	4
4) La boucle de réaction.....	4
4.A) Diminution de la fuite.....	4
4.B) Augmentation de la fuite.....	4
5) Boucle de réaction négative.....	4
5.A) Définition.....	4
5.B) Modélisation d'un amplificateur.....	5
6) Boucle de réaction positive.....	5
6.A) Introduction.....	5
6.B) Analysons ses deux configurations de fonctionnement.....	6
a) Premier cas.....	6
b) Second cas.....	6
6.C) La réaction positive, une réaction qui confirme la perturbation.....	6
6.D) Modélisation d'une mémoire bistable.....	6
6.E) Plier un ticket de métro pour modéliser une mémoire bistable.....	7
6.F) Analyser le fonctionnement d'une mémoire bistable.....	7
6.G) Analyser le fonctionnement d'un oscillateur.....	7
7) Conclusion.....	8
8) Bibliographie.....	8