

DYNAMIQUE ET COGNITION

Timothy Van Gelder

Van Gelder, T. (1998). Dynamics and cognition. Mind design II. Cambridge MIT Press p 421-450
Traduit dans Fiset, D. & Poirier P. (3003). Philosophie de l'esprit : problèmes et perspectives
pp329-369.

Qu'est-ce que la cognition ? L'orthodoxie contemporaine soutient que c'est la computation : **l'esprit est une espèce particulière d'ordinateur et les processus cognitifs sont des manipulations internes de représentations symboliques.** Cette idée générale a dominé la philosophie et la rhétorique des sciences cognitives - et même, dans une large mesure, sa pratique - depuis que cette discipline a émergé du chaos cybernétique d'après-guerre. Elle a fourni le cadre conceptuel général de plusieurs des recherches les plus développées et les plus perspicaces portant sur la nature des opérations mentales. Toutefois, depuis au moins dix ans, la perspective computationnelle a perdu beaucoup de son éclat.

Bien que le travail s'inspirant de cette perspective continue, **nombre de difficultés et de limites sont devenues de plus en plus apparentes** et, partout dans les sciences cognitives, les chercheurs sont en quête d'autres façons de comprendre la cognition. Par conséquent, on trouve maintenant sous l'égide des sciences cognitives plusieurs programmes de recherche qui, d'une manière ou d'une autre, s'opposent à l'approche computationnelle traditionnelle, parmi lesquels le connexionnisme, les approches neurocomputationnelles, la psychologie écologique, la robotique située et la vie artificielle.

Mais ressort-il de ces différents programmes une nouvelle conception de la nature de la cognition ? De manière plus générale, y a-t-il réellement une option de rechange à l'explication de la cognition en termes de computation ? L'un des arguments les plus convaincants en faveur de la conception computationnelle est ce qu'on a appelé l'argument du « de-quoi-d'autre-pourrait-il -s'agir ? » Suivant les mots d'Allen Newell :

Bien qu'il existe une petite chance que nous voyions émerger un nouveau paradigme pour l'esprit, cela me paraît peu probable. Au fond, il ne semble exister aucune option viable. Cette position n'est pas surprenante. On aboutit dans bien des sciences à un stade où il n'y a plus guère d'options de rechange aux théories acceptées. Dans ce cas, toute l'activité scientifique intéressante s'inscrit dans la perspective principale. Il me semble que nous nous rapprochons passablement de cette situation en ce qui a trait à la théorie computationnelle de l'esprit. (Newell, « Are there Alternatives ? », Acting and Reflecting, sous la dir. de W.Sieg, Dordrecht, Kluwer, 1990, p. 5 ; nous traduisons).

La thèse centrale de cet article consiste à dire qu'il existe en fait une option viable. Plutôt que des ordinateurs, peut-être les systèmes cognitifs sont-ils des systèmes dynamiques; plutôt que computation, peut-être les processus cognitifs sont-ils évolution d'espace des configurations dans ces systèmes d'une espèce très différente. Cette hypothèse, si elle est correcte, neutralise l'argument du « de-quoi-d'autre-pourrait-il -s'agir ? » et fait progresser le projet plus englobant qui consiste à évaluer les hypothèses rivales touchant la nature de la cognition. Notons que l'atteinte de ces objectifs n'exige pas que nous établissions la vérité de l'hypothèse dynamique. Elle exige simplement qu'on la décrive et la justifie suffisamment **pour montrer qu'elle constitue bel et bien une conception rivale de la cognition suffisamment viable pour apparaître aujourd'hui comme une avenue de recherche sérieuse et fructueuse.**

Une façon efficace de présenter la conception dynamique consiste à faire un détour un peu inhabituel en se penchant sur les débuts de la révolution industrielle en Angleterre, autour de 1788.

1. LE PROBLÈME DU RÉGULATEUR

L'un des défis techniques décisifs qu'a dû relever la révolution industrielle était de trouver une source d'énergie fiable, continue et uniforme. Dans la seconde moitié du xvii^e siècle, il s'agissait en l'occurrence de **transformer l'action oscillante d'un piston à vapeur en un mouvement de rotation d'un volant**. L'ingénieur écossais James Watt a accompli l'un des progrès techniques les plus importants de l'histoire lorsqu'il a élaboré et fait breveter un système d'engrenages pour machines à vapeur rotative. L'énergie-vapeur n'était dès lors plus limitée au pompage ; elle pouvait être appliquée à toute machinerie pouvant être actionnée par un volant. L'industrie du coton avait un besoin particulièrement pressant de remplacer ses chevaux et ses moulins à eau par ces nouvelles machines. Toutefois, un filage et un tissage de qualité requièrent une source d'énergie qui soit hautement uniforme, c'est-à-dire qu'il doit y avoir très peu ou pas de variation dans la vitesse de rotation du volant conducteur principal. Le problème est d'autant plus aigu que la vitesse d'un volant est affectée tant par la pression de la vapeur qui vient des chaudières que par le volume de charge total imposé à la machine ; or ceux-ci sont en perpétuelle fluctuation.

La manière de régulariser la vitesse du volant est assez claire. Dans le tuyau transmettant la vapeur de la chaudière au piston, il y a une soupape d'étranglement. La pression dans la chambre à piston et, donc, la vitesse de la roue peuvent donc être ajustées en tournant cette valve. Pour faire en sorte que la vitesse de la machine reste uniforme, la valve doit être tournée au bon moment et tout juste suffisamment pour compenser les modifications du volume de charge et de la pression dans la chaudière. **Comment s'y prendre ?**

La solution la plus évidente consiste à employer un mécanicien qui tourne la valve au besoin. Toutefois, cette solution comporte plusieurs désavantages : les mécaniciens doivent être payés et ils sont souvent incapables de réagir avec la diligence voulue. La révolution industrielle se vit donc confrontée à un second défi technique : concevoir un **dispositif qui puisse ajuster automatiquement la valve de manière à maintenir constante la vitesse du volant en dépit des changements de volume de charge et de pression**. Un tel dispositif est connu sous le nom de **régulateur**.

Très souvent, la meilleure manière d'aborder les problèmes de construction mécaniques difficiles est de subdiviser l'opération en sous-opérations plus simples et de poursuivre le processus de décomposition jusqu'à ce que quelqu'un voie comment construire un appareil capable d'exécuter les diverses opérations partielles.

Dans le cas du régulateur, **la décomposition appropriée semble claire**. La valve ne doit être ajustée que lorsque le volant ne tourne pas à la bonne vitesse. Ainsi, la première sous-opération consiste à mesurer la vitesse du volant, la seconde à calculer s'il existe un écart entre la vitesse désirée et la vitesse effective. S'il n'y a pas d'écart, aucun ajustement n'est requis, du moins pour le moment. S'il y a écart, le régulateur doit alors déterminer quel doit être l'ajustement de la valve pour amener le volant à la vitesse désirée. Cela dépendra, bien entendu, de la pression-vapeur actuelle, et le régulateur automatique doit donc mesurer la pression-vapeur actuelle et ensuite calculer l'ajustement de la valve. Finalement, la valve doit effectivement être ajustée. Cette séquence générale de sous-opérations doit être exécutée assez souvent pour maintenir la vitesse du volant suffisamment proche de la vitesse désirée.

Un dispositif capable de résoudre le problème du régulateur automatique devrait aussi être capable d'exécuter ces différentes sous-opérations très souvent et dans l'ordre exact. **On pourrait donc le concevoir comme obéissant à l'algorithme suivant :**

- (1) Commencement :
 - (a) mesurer la vitesse du volant ;
 - (b) comparer la vitesse effective avec la vitesse désirée.
- (2) S'il n'y a pas d'écart, retourner à l'étape (1) ; sinon :
 - (a) mesurer la pression-vapeur actuelle ;
 - (b) calculer l'ajustement de la pression-vapeur désiré ;
 - (c) calculer l'ajustement nécessaire de la valve ;
 - (d) ajuster la valve.
- (3) Retourner à l'étape 1.

Il doit exister des dispositifs physiques capables d'exécuter chacune de ces sous-opérations. On peut concevoir que le régulateur automatique comprend un tachymètre (pour mesurer la vitesse du volant), un dispositif pour calculer l'écart entre les vitesses effective et désirée, un dispositif pour mesurer le niveau de pression-vapeur, un appareil pour calculer l'ajustement du papillon, un ajusteur pour le papillon et une espèce de dispositif central qui coordonne la séquence des opérations. Cette décomposition conceptuelle de l'opération de régulation pourrait même correspondre à sa composition effective, c'est-à-dire que chaque opération pourrait être exécutée par une composante physique distincte. Le problème de construction mécanique se réduirait donc à celui (vraisemblablement beaucoup plus simple) de construire les diverses composantes et de les connecter ensemble de manière à ce que le système entier fonctionne de manière cohérente.

Aussi évidente qu'elle puisse paraître aujourd'hui, **ce n'est pas de cette manière que le problème du gouverneur automatique a été résolu.** D'une part, cette solution exige des instruments capables d'effectuer promptement des calculs relativement complexes; d'autre part, elle exige des transducteurs pouvant transformer des conditions physiques en arguments symboliques sur lesquels on pourra effectuer les calculs, pour ensuite transformer de nouveau ces résultats en ajustements physiques. Remplir l'une et l'autre de ces conditions était toutefois bien au-delà de ce qu'il était possible de faire au XVIII^e siècle.

La solution que Watt a trouvée en s'inspirant de la technologie des moulins à vent de l'époque est beaucoup plus directe et élégante. Il s'agit d'un axe vertical monté sur le volant principal de telle sorte qu'il tourne à une vitesse directement dépendante de celle du volant lui-même (voir schéma 1). Reliés à l'axe par des charnières se trouvent deux bras, et à l'extrémité de chaque bras une boule de métal. Lorsque l'axe tourne, la force centrifuge pousse les bras vers l'extérieur et donc vers le haut. Par un arrangement ingénieux, ce mouvement des bras est lié directement à la valve. Il en résulte que lorsque la vitesse du volant principal augmente, les bras s'élèvent, refermant la valve et réduisant le débit de vapeur; lorsque la vitesse diminue, les bras tombent, ouvrant la valve et admettant un débit de vapeur accru. La machine adopte ainsi une vitesse constante et maintenue avec une diligence et une régularité extraordinaires bien que la pression et le volume de charge fluctuent considérablement.

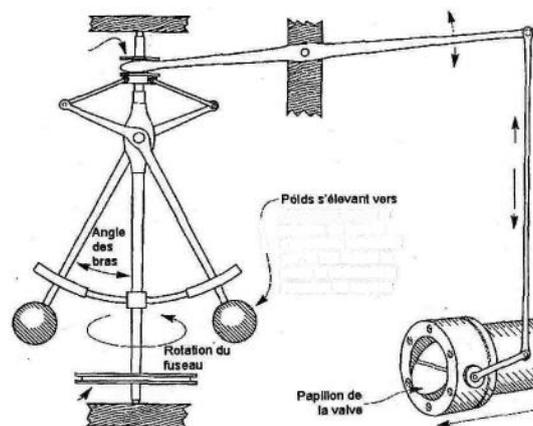


schéma1: Le régulateur centrifuge de Watt dont la fonction est de contrôler la vitesse d'un moteur à vapeur. (Dessin adapté de Farey 1827).

Il vaut la peine d'insister sur la manière absolument remarquable dont le régulateur centrifuge exécute sa tâche. Ce dispositif n'était pas seulement l'un de ces expédients mécaniques dont on se servait faute de pouvoir recourir à la technologie informatique. En 1858, le Scientific American affirmait d'une variante américaine du régulateur centrifuge d'origine que «si son action n'est pas d'une absolue perfection, à notre avis, elle s'en approche suffisamment pour qu'on n'en désire pas davantage».

Mais quel intérêt tout cela peut-il bien avoir pour la philosophie des sciences cognitives ? La réponse apparaîtra plus clairement si nous examinons de plus près certaines différences entre les deux types de régulateurs.

2. DEUX ESPÈCES DE RÉGULATEURS

La construction des deux régulateurs décrits dans la section précédente est manifestement différente. Toutefois, ils règlent tous deux le même problème et on peut tenir pour acquis (pour les fins de la discussion) qu'ils le règlent tous deux de manière adéquate. S'ensuit-il qu'ils appartiennent en fait à la même espèce de dispositifs en dépit des quelques différences dans leur construction? Ou sont-ils plutôt profondément différents même si en apparence leur performance est similaire ?

Il est naturel de concevoir le premier régulateur comme un dispositif computationnel, c'est-à-dire comme un dispositif qui calcule des résultats - notamment l'ajustement voulu concernant l'angle de la valve. Un examen plus minutieux révèle qu'il y a en fait ici un ensemble complexe de propriétés qui agissent simultanément, ensemble qu'il peut être utile de diviser.

Peut-être la plus centrale des propriétés distinctives du régulateur computationnel est-elle sa dépendance envers les représentations. Comme on l'a souligné plus haut, **chaque aspect de son opération transige d'une manière ou d'une autre avec des représentations.** Il mesure d'abord son environnement (la machine) pour obtenir une représentation symbolique de la vitesse actuelle de la machine. Il exécute ensuite une série d'opérations sur cette représentation et sur d'autres, ce qui résulte en une représentation du rendement, soit la spécification symbolique de l'altération que doit subir la valve. Cette représentation finale fait ensuite en sorte que le mécanisme d'ajustement du papillon opère la modification correspondante.

C'est la raison pour laquelle on le dit à juste titre computationnel (dans un sens maintenant un peu plus étroit) : **il calcule littéralement l'ajustement désiré de la valve en manipulant des symboles selon une séquence de règles.** Dans le contexte du dispositif et de sa situation, ces symboles ont une signification, et le régulateur remplit correctement sa fonction du fait que la manipulation des symboles est en accord systématique avec ces significations. Les manipulations sont des opérations discrètes qui s'accomplissent nécessairement dans une séquence déterminée ; par exemple, l'ajustement adéquat de la valve ne peut être calculé qu'une fois calculé l'écart entre la vitesse actuelle et la vitesse désirée. Au niveau le plus élevé, le dispositif entier opère de manière cyclique: **il mesure d'abord (ou « perçoit ») son environnement; il calcule ensuite de façon interne l'ajustement de la valve ; il effectue enfin cet ajustement (il « agit » sur son environnement). Une fois la modification effectuée, le régulateur reprend le cycle encore et encore, inlassablement.**

Notons enfin que le régulateur automatique est homonculaire dans sa construction. L'homoncularité est une forme particulière de décomposition d'un système en parties ou composantes où chacune n'est responsable que d'une partie de la tâche globale. Des composantes homonculaires, comme les départements ou comités dans les

bureaucraties, interagissent en communiquant (c'est-à-dire en passant des messages doués de signification). Évidemment, la nature représentationnelle et computationnelle du régulateur est essentielle à sa composition homonculaire : si le système entier ne fonctionnait pas en manipulant des représentations, il ne serait pas possible à ses composantes d'interagir en communiquant. Ces propriétés - représentation, computation, opération séquentielle et cyclique et homoncularité - forment un groupe interdépendant; un dispositif possédant l'une possédera en général les autres.

Or, le régulateur centrifuge de Watt ne possède pas cet agrégat de propriétés, non plus que l'une ou l'autre d'entre elles. Aussi évident qu'il puisse paraître, ce point mérite d'être discuté et justifié puisqu'il se heurte souvent à de la résistance. Il nous permettra en outre d'éclaircir quelques faits intéressants.

Une impression commune veut que l'angle que décrivent les bras du régulateur représente la vitesse actuelle de la machine et que c'est précisément parce que ces quantités sont ainsi reliées que le régulateur est capable de contrôler cette vitesse. Cette impression est toutefois trompeuse : **le concept de représentation n'arrive pas à expliquer ce qui se passe ici.** Les explications sérieuses du fonctionnement du régulateur- qu'elles viennent du manuel de mécanique de la seconde moitié du XIX^e siècle en expliquant la construction, de l'analyse dynamique de Maxwell (voir ci-dessous ou des traitements mathématiques contemporains) - ne reprennent jamais le discours représentationnel. Pourquoi ?

Le cœur du problème est le suivant: à tous moments, la vitesse de la machine influence l'angle des bras. Mais les bras sont directement reliés au papillon qui contrôle le débit de vapeur de la machine. Ainsi, l'angle des bras influence à tous moments la vitesse de la machine. Les quantités déterminent donc simultanément et réciproquement la forme de leur changement.

Il n'y a rien de mystérieux dans cette relation ; elle se laisse facilement saisir par des descriptions mathématiques. Néanmoins, elle est beaucoup plus complexe et subtile que le concept commun de représentation, soit, de manière très rudimentaire, le concept de chose « tenant lieu » (standing for) d'une autre.

Pour pouvoir décrire la relation entre l'angle des bras et la vitesse de la machine, nous avons besoin d'un cadre conceptuel plus puissant que ne l'est le discours qui porte sur les représentations. **Ce cadre conceptuel est le langage mathématique de la dynamique ; or, dans ce langage, les deux quantités sont dites couplées.** Ainsi, le véritable problème que soulève une description du régulateur comme dispositif représentationnel, c'est que la relation de représentation - où quelque chose tient lieu de quelque chose d'autre - est carrément trop simple pour **rendre compte de l'interaction effective entre le régulateur centrifuge et la machine.**

Si le régulateur centrifuge n'est pas représentationnel, alors il ne peut pas être computationnel, du moins pas au sens spécifique où il fonctionnerait par une manipulation de représentations symboliques gouvernée par des règles. **Sa nature non computationnelle peut aussi être établie d'une autre manière.** Non seulement il n'y a aucune représentation à manipuler, mais il n'y a pas non plus de manipulations distinctes qui puissent être considérées comme des opérations computationnelles - pas d'étapes discontinues et identifiables au cours desquelles une représentation pourrait être transformée en une autre.

Au contraire, **le fonctionnement du système en entier est continu et uniforme; il n'est ni possible ni utile de décomposer de manière non arbitraire les changements qui se produisent avec le temps en manipulations distinctes.** Il s'ensuit que les opérations du régulateur centrifuge ne sont en rien séquentielles ni cycliques à la manière du régulateur computationnel. Puisque la procédure ne comporte pas d'étapes, il ne peut pas non plus y avoir de séquence dans laquelle ces étapes seraient effectuées. Jamais une opération ne doit être effectuée pour qu'une autre puisse l'être. Par conséquent, le fonctionnement du régulateur n'a rien de cyclique. Le dispositif possède, bien entendu, un « input » (là où l'axe est relié à la machine) et un « output » (la connexion à la valve). Mais le régulateur centrifuge ne suit pas une séquence répétitive au cours de laquelle il prend d'abord une

mesure, calcule ensuite l'ajustement, effectue ensuite cet ajustement puis prend une nouvelle mesure, et ainsi de suite. **Au contraire, input, activité interne et output se produisent continuellement et simultanément, de même qu'une radio produit de la musique tandis que son antenne reçoit des signaux.**

Le fait que le régulateur centrifuge ne soit ni séquentiel ni cyclique indique une autre différence profonde entre les deux espèces de régulateurs. **En un sens profond, on peut dire que le temps n'importe pas dans le fonctionnement du régulateur computationnel.** Bien entendu, dans la mesure où le dispositif doit adéquatement contrôler la vitesse de la machine, ses opérations doivent être assez rapides ; de plus, elles doivent se produire dans le bon ordre. Cependant, au-delà de ces restrictions minimales, **rien ne dicte quand chacune des opérations internes doit se produire, pendant combien de temps elles doivent être exécutées ou combien de temps doit s'écouler entre chacune d'elles.**

Seules des considérations pragmatiques relatives à l'exécution importent : quels algorithmes doit-on utiliser?, quels instruments utiliser pour effectuer ces algorithmes?, et ainsi de suite. **La synchronisation des opérations internes est donc essentiellement arbitraire** par rapport au cours plus englobant des événements. C'est un peu comme si le volant disait au système de régulation automatique : «Va trouver quel, doit être l'ajustement de la valve pour que je continue à tourner à une vitesse de 100 tours/minute. Peu m'importe la façon dont tu y parviens, le nombre d'étapes que cela requiert ou le temps qu'il te faut pour exécuter chaque étape, pourvu que tu me fasses rapport dans (disons) 10 minutes ».

Dans le cas du régulateur centrifuge, au contraire, tout est contraint par le temps. Il n'y a aucun événement dont la synchronisation, la vélocité ou l'accélération soit arbitraire relativement au fonctionnement de la machine. Tout comportement du régulateur centrifuge se produit à l'intérieur du même cadre temporel réel que la vitesse et le changement de vitesse du volant. On peut résumer ce point de la manière suivante : le profil temporel des deux espèces de régulateurs diffère fondamentalement: la temporalité du régulateur centrifuge est essentiellement celle de la machine elle-même.

Enfin, il va sans dire que le régulateur centrifuge n'est pas un système homonculaire. Il possède des parties, soit, et son comportement global est le résultat direct de leur interaction organisée. La différence tient au fait que ces parties ne sont pas des modules interagissant en communiquant; elles ne sont pas comme des agents bureaucratiques qui se transmettent des représentations pendant que le système accomplit la tâche globale.

3. CADRES CONCEPTUELS

Dans la section précédente, j'ai défendu l'idée que les différences essentielles entre les deux régulateurs sont beaucoup plus profondes que leurs différences manifestes de construction mécanique. Il n'est donc pas surprenant que ces différences essentielles se reflètent dans l'appareillage conceptuel nécessaire pour comprendre leur fonctionnement. Autrement dit, **pour comprendre comment chacun fonctionne comme régulateur - comment chacun parvient à contrôler son environnement -, chaque type de régulateurs requiert un cadre conceptuel bien particulier.**

Dans le cas du régulateur computationnel, tous les détails pertinents de son comportement sont saisis par un algorithme, et le cadre conceptuel général que nous produisons suit la tendance générale en sciences informatiques. Les informaticiens s'intéressent en général à ce qui peut être accompli en enfilant un ensemble d'opérations fondamentales dans l'ordre approprié, qu'il s'agisse pour eux de déterminer la meilleure façon d'enfiler les

opérations pour accomplir un but particulier (programmation, théorie des algorithmes), ou ce que l'on peut en principe accomplir ainsi (théorie computationnelle).

On conçoit ainsi le régulateur computationnel comme un dispositif capable d'exécuter un ensemble d'opérations fondamentales (mesurer, soustraire, et ainsi de suite) et dont le comportement sophistiqué résulte uniquement de la séquence complexe de ces opérations fondamentales. Notons que les éléments du régulateur (les étapes fondamentales de traitement effectuées) sont en correspondance directe avec les éléments de l'algorithme décrivant son fonctionnement (les instructions fondamentales).

Le régulateur centrifuge de Watt, par contre, ne peut nullement être compris de cette manière. Il ne se prête en rien à un algorithme. Plutôt, on a toujours utilisé un appareillage conceptuel très différent. Les termes dans lesquels nous l'avons décrit plus haut et dans lesquels il a effectivement été décrit par Watt et ses pairs sont clairement mécaniques : rotation, fuseau, leviers, déplacements, forces. Au siècle dernier, des descriptions plus précises et plus puissantes ont vu le jour, mais ces dernières n'ont rien à voir non plus avec l'informatique. En 1868, le physicien James Clerk Maxwell a innové en mettant les ressources mathématiques de la dynamique au service des dispositifs de régulation. Depuis, l'approche générale qu'il a instaurée constitue la norme. Bien qu'elle soit connue des physiciens et des ingénieurs, elle l'est moins des chercheurs en sciences cognitives et des philosophes de l'esprit, et il vaut donc la peine de la décrire en détail.

L'élément essentiel du comportement du régulateur est l'angle que décrivent les bras, car c'est cet angle qui détermine à quel point la valve s'ouvre ou se ferme. **Pour comprendre le comportement du régulateur, on doit ainsi comprendre les principes de base qui gouvernent la variation de l'angle des bras en fonction du temps.** Évidemment, l'angle des bras dépend de la vitesse de la machine; il faut donc comprendre que la variation de l'angle des bras est fonction de la vitesse de la machine. Si on suppose pour l'instant que le régulateur n'est pas connecté à la valve, alors ce changement est donné par, l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = (n\omega)^2 \cos\theta \sin\theta - \frac{g}{l} \sin\theta - r \frac{d\theta}{dt}$$

où θ est l'angle des bras, n une constante d'engrenage, ω la vitesse de la machine, g une constante pour la gravité, l la longueur des bras et r une constante de friction aux charnières.

Cette équation différentielle non linéaire de second ordre nous donne l'accélération instantanée des bras comme fonction de l'angle actuel des bras (désigné par la variable d'état θ), de la vitesse actuelle du changement dans l'angle des bras (la dérivée de θ à l'égard du temps, $d\theta/dt$) et de la vitesse actuelle de la machine (ω).

Autrement dit, l'équation nous dit **quel changement connaît l'angle des bras selon l'angle actuel des bras, la manière dont il est déjà en train de changer et la vitesse de la machine.** Notons que dans le système défini par cette équation, seul l'angle des bras, θ (et ses dérivées), varie avec le temps. Les autres quantités (ω , n , g , l et r) sont présumées fixes et sont appelées paramètres. La valeur particulière des paramètres détermine la forme précise du changement que connaît θ . Pour cette raison, on dit que **le réglage des paramètres fixe la dynamique du système.**

Cette équation différentielle est parfaitement générale et très concise : c'est une façon de décrire le comportement du régulateur pour tout angle et pour toute vitesse de la machine. Cette généralité et cette concision ont toutefois un prix. S'il s'avère qu'on connaît la vitesse actuelle de l'angle des bras, la vitesse de son changement et la vitesse de la machine, tout ce qu'on peut tirer de cette équation est l'accélération instantanée courante. Si on désire savoir quel sera l'angle des bras dans une demi-seconde, par exemple, on doit trouver une solution à l'équation générale, c'est-à-dire l'équation qui nous dira quelle valeur prend ω

en fonction du temps. Il existe évidemment de nombreuses solutions correspondant aux différentes trajectoires comportementales que le régulateur peut manifester, mais ces solutions ont souvent en commun d'importantes propriétés générales. **Ainsi, tant que les paramètres n'excèdent pas certaines limites, les bras aboutiront toujours, éventuellement, à un angle d'équilibre particulier selon la vitesse de cette machine ; cet angle est connu sous le nom d'attracteur**

Jusqu'à maintenant, j'ai parlé du régulateur sans prendre en considération ses effets sur la machine et donc, indirectement, sur lui-même. Ici, la situation se complique un peu, mais les mêmes ressources mathématiques s'appliquent. Supposons que nous concevions la machine à vapeur elle-même comme un système dynamique gouverné par un ensemble d'équations différentielles dont l'une nous donne une dérivée de la vitesse de la machine en fonction de sa vitesse actuelle et d'un certain nombre d'autres variables et paramètres :

$$\frac{d^n \omega}{dt^n} = F(\omega, \dots, \tau, \dots)$$

Un de ces paramètres est la position actuelle de la valve, τ , laquelle dépend directement de l'angle des bras du régulateur, θ . On peut donc concevoir comme un paramètre de la machine, de la même manière que la vitesse de la machine ω est un paramètre du régulateur. (Ou encore, on peut concevoir le régulateur et la machine à vapeur comme formant un seul système dynamique au sein duquel l'angle des bras et la vitesse de la machine sont tous les deux des variables d'états).

Cette relation de couplage est particulièrement intéressante et subtile. **Un changement dans l'un des paramètres du système dynamique change sa dynamique totale** (c'est-à-dire la manière dont change la valeur de ses variables d'état en fonction de leurs valeurs actuelles, à travers le domaine de leurs valeurs possibles). **Ainsi, tout changement de la vitesse de la machine, si minime soit-il, ne modifie pas directement l'état du régulateur mais bien plutôt la manière dont l'état du régulateur change, et toute modification de l'angle des bras ne modifie pas directement la vitesse de la machine, mais la manière dont la vitesse de la machine change.** Encore une fois, néanmoins, le système entier (la machine et le régulateur, couplés l'un à l'autre) se stabilise rapidement en atteignant un attracteur-point, c'est-à-dire que la vitesse de la machine et l'angle des bras demeurent constants, ce qui est précisément ce qu'on souhaitait. En fait, ce que ce système a de remarquable c'est que, dans une grande variété de conditions, **il se stabilise toujours rapidement dans des états où la machine fonctionne à une vitesse particulière.**

Dans cette discussion, deux ensembles de ressources conceptuelles générales et étroitement liés ont été (de manière très modeste) mises en jeu. La première est la modélisation dynamique, cette branche des mathématiques appliquées cherchant à décrire les changements dans des systèmes réels en décrivant numériquement les états d'un système et en formulant par la suite des équations saisissant la variation de ces états numériques en fonction du temps.

On a également fait appel à la théorie des systèmes dynamiques, soit l'étude générale des systèmes dynamiques considérés comme des structures mathématiques abstraites. Grosso modo, la modélisation dynamique tente de comprendre les phénomènes naturels comme le comportement de réalisations dans le monde réel de systèmes dynamiques abstraits, tandis que la théorie des systèmes dynamiques étudie les systèmes abstraits eux-mêmes. Il n'y a pas de distinction très nette entre ces deux ensembles de ressources, et pour nos fins, elles peuvent être mises ensemble sous le titre général de dynamique.

4. QUELLES MORALES TIRER

De cette discussion du problème, les sciences cognitives pourraient tirer plusieurs leçons intimement liées. **Premièrement**, plusieurs espèces de systèmes distincts, de nature fondamentalement différente et exigeant, pour leur compréhension, des instruments conceptuels tout à fait distincts, peuvent exécuter des opérations sophistiquées - y compris l'interaction avec un environnement changeant - ce qui peut sembler exiger initialement que le système ait une connaissance de son environnement et raisonne sur cette base.

Deuxièmement, notre impression, dans un cas donné, qu'une opération cognitive spécifique doit être exécutée par un système (génétiquement) computationnel peut dépendre de préconceptions trompeuses mais irrésistibles touchant la façon dont doivent fonctionner les systèmes exécutant des tâches complexes. Il est possible que la forme en gros computationnelle des modèles cognitifs prévalents ne résulte pas tant de la nature de la cognition elle-même que de l'appareillage conceptuel que les chercheurs en sciences cognitives utilisent pour l'étude de la cognition.

Troisièmement, il se peut que les systèmes cognitifs soient des systèmes dynamiques. **Autrement dit, peut-être est-il davantage pertinent de comparer les systèmes cognitifs au régulateur centrifuge qu'au régulateur computationnel ou à cet archétype fameux de la catégorie générale des systèmes computationnels, la machine de Turing.**

Dans ce qui suit, cette troisième suggestion sera développée en une conception spécifiquement dynamique de la cognition à partir d'une explication de la notion clé de système dynamique. Un exemple illustrera ensuite comment même des performances cognitives de « haut niveau » peuvent être comprises en des termes entièrement dynamiques. La dernière section défendra brièvement la viabilité de la conception dynamique comme programme de recherche pour les sciences cognitives contemporaines.

5. TROIS ESPÈCES DE SYSTÈMES

Que sont les systèmes dynamiques? En quoi sont-ils différents non seulement des ordinateurs mais aussi des réseaux connexionnistes, à ce jour le principal concurrent des modèles computationnels en sciences cognitives ?

Commençons avec le concept de système. Le terme « système » est souvent employé d'une manière plutôt vague pour désigner à peu près, n'importe quelle chose complexée dont nous désirons parler (par exemple un système de pari à la roulette). Toutefois, pour nos fins immédiates, un système est mieux défini comme un ensemble de variables (choses, aspects, propriétés, etc.) qui changent avec le temps, de sorte que les modifications que subit une variable à un moment donné dépendent des états des autres variables du système au même moment. Pris ensemble, les états de toutes les variables constituent l'état du système en entier. Les systèmes peuvent aussi être influencés par des facteurs externes, lesquels sont habituellement appelés paramètres lorsqu'ils sont relativement fixes et influencent seulement la manière dont les variables interagissent; ils sont appelés inputs lorsqu'ils sont occasionnels et déterminent directement les états actuels de certaines variables.

On peut classer les systèmes de différentes manières. Les classifications les plus utiles ne sont ni trop larges, ni trop étroites. Par exemple, on décrit parfois les ordinateurs comme des systèmes qui calculent, les systèmes dynamiques comme des systèmes qui changent et les réseaux connexionnistes tout simplement comme une variété de systèmes dynamiques. Toutefois, des définitions aussi larges atténuent les contrastes les plus importants pour comprendre ce qui se passe au sein des sciences cognitives. Dans ce qui suit, nous adopterons comme guide des spécifications informelles, mais plus restrictives : les ordinateurs sont des manipulateurs de symboles, les systèmes dynamiques des ensembles de grandeurs couplées et les systèmes connexionnistes des réseaux d'unités neuronales. On peut formuler la différence entre ces idées en se

concentrant sur quatre points : le type de variables impliquées, la façon dont les états changent, les instruments qui servent à décrire les changements et les propriétés plus générales qui assurent à chaque type de systèmes son caractère distinctif (voir tableau 1).

	Systèmes computationnels	Systèmes dynamiques	Systèmes connexionnistes
Description informelle	Manipulateurs de symboles	Ensembles de grandeurs couplées	Réseaux d'unités neuronales
Exemples classiques	Machine de Turing ; machine LISP	Système solaire ; régulateur de Watt	Perceptron ; réseau de Hopfield
Types de variables	Digitales, souvent syntaxiques	Quantitatives – états et taux	Quantitatives – Niveaux d'activation
Changements d'état	Par étapes discontinues (séquentielles)	Interdépendants en temps réel	Interaction propagée
Outils descriptifs	Règles de transition (« programmes »)	Équations différentielles	Équation à sommes pondérées
Caractère général	Interprétables comme des représentations	Couplées – aussi avec l'environnement	Homogènes et à haute dimension

Tableau 1 Différences entre les types de systèmes

Ainsi, les ordinateurs (au sens pertinent) ont toujours des variables digitales. Pour qu'une variable soit digitale, il doit exister un ensemble de valeurs discontinues, telle que pour tout moment donné, la variable prend sans équivoque l'une ou l'autre de ces valeurs. Ainsi, dans un ordinateur électronique ordinaire, une position en mémoire (bit) est soit active (on), soit inactive (off); la tige d'un boulier compte un nombre défini de boules à chaque bout; la case du ruban d'une machine de Turing est soit vide, soit occupé par un « 1 »; et ainsi de suite.

Par contraste, les variables dans un système dynamique ne sont pas essentiellement digitales (ou non); il importe surtout qu'il s'agisse de choses quantifiables, c'est-à-dire de variables pour lesquelles il est sensé parler de quantités ou de distance entre leurs valeurs. Les quantités et distances se prêtent à la mesure, c'est-à-dire qu'elles se prêtent à l'usage d'un «étalon» pour assigner systématiquement des nombres aux valeurs et différences. Ainsi, la hauteur d'un objet qui tombe peut être mesurée en mètres, et la distance entre deux hauteurs quelconques peut être déterminée par soustraction pour donner la distance de la chute. En revanche, dans le cas des ordinateurs, il y a une différence critique mais pas de distance pertinente entre les valeurs d'une variable (comme être vide par opposition à être occupée par un « 1 »). Puisque les variables dans un système dynamique sont des choses quantifiables, un simple recours aux mathématiques permet de parler de distance entre états entiers. Ainsi, l'ensemble des états d'un système dynamique est, en un sens intéressant, un espace au sein duquel tout état est une position et tout comportement une trajectoire. Ces dernières notions ouvrent la voie à d'autres notions dynamiques puissantes et importantes, telles que attracteur, bifurcation, stabilité et équilibre.

Les réseaux connexionnistes ont des choses quantifiables pour variables et diffèrent donc aussi des ordinateurs à cet égard. En quoi diffèrent-ils des systèmes dynamiques? Un trait essentiel des réseaux connexionnistes consiste en ceci que leurs variables sont modélées, de manière très générique, sur les neurones biologiques; par conséquent, ils présentent une forme distinctivement «neurologique» du changement interactif. Chaque variable possède un certain niveau d'activité (sa valeur) et peut être influencée par certains sous-ensembles d'autres variables. Cette influence, que l'on conçoit comme circulant ou se propageant le long d'une «connexion», est modulée par un paramètre qu'on appelle poids. Les modifications subies par les valeurs d'activité des unités

dans un réseau connexionniste sont spécifiées par une fonction simple (habituellement une simple sommation) des activités pondérées de toutes les unités ayant une influence sur elle¹.

Cela dit, les conditions des systèmes dynamiques peu vent se modifier de manière neurologique, mais pas nécessairement (pensons au régulateur centrifuge, qui n'a ni connexion, ni poids). C'est plutôt une exigence orthogonale qui fait qu'un changement est dynamique au sens fort du terme: celui-ci survient en temps réel. Qu'est-ce que cela veut dire ?

En un sens, évidemment, tout système qui se modifie le fait « avec » le temps. Mais considérons une machine de Turing abstraite, entité mathématique se situant hors du temps présent et des événements quotidiens. **Cette machine possède des états et « se modifie » d'un état à un autre. Cependant, on ne saurait dire qu'elle passe du temps dans un état quelconque ou qu'elle met du temps à se modifier. Le « temps » n'est ici rien d'autre qu'une série ordonnée de points discontinus (t_1, t_2, \dots).** Ces points n'ont pas de durée ; rien ne s'écoule. Les nombres entiers sont une façon commode d'indexer ces points temporels, puisque les nombres entiers ont un ordre qui nous est familier. Mais leur emploi peut être trompeur puisqu'il suggère faussement que des quantités de temps sont impliquées. Abstraction faite de considérations d'ordre pratique, on pourrait tout aussi bien employer des noms propres, en ordre alphabétique, pour indexer les points temporels.

Or, le temps réel (présent, quotidien, mondain) possède deux propriétés qui manquent aux simples séquences. **Premièrement, le temps réel est au moins dense** (entre deux points temporels quelconques, il y en a un autre) ; **deuxièmement, le temps réel est une chose quantifiable** (il y a des quantités de temps et des distances entre des moments distincts). Ces deux propriétés donnent naissance à un sens distinctif dans lequel un processus peut survenir dans le temps (réel ou autre). À tout point temporel, le système doit être dans un état ou un autre ; par conséquent, si le temps est dense, les états du système et leurs modifications doivent eux-mêmes être ordonnés densément dans le temps.

Un système qui est temporel en ce sens peut se modifier constamment. De plus, quand le temps est une chose quantifiable, il est possible de décrire les événements se produisant dans le système en termes de quantité de temps; on peut par exemple parler du temps qu'ils mettent à se dérouler et (si les variables sont des choses quantifiables) du taux de changement. Ce dernier fait est particulièrement important. Car si le temps et les variables du système sont continus, on peut parler de taux de changement instantané, d'accélération, et ainsi de suite, et donc de systèmes où le taux de changement dépend des états actuels, et même des taux de changement actuels, des variables du système (par exemple le système solaire et le régulateur centrifuge). Pour décrire de tels systèmes, il nous faut des instruments mathématiques capables d'établir le lien entre les taux de changement de certaines variables et ces variables elles-mêmes, c'est-à-dire que nous avons besoin d'équations différentielles.

Mais, dans tout système réel - y compris les ordinateurs -, une modification ne survient-elle pas en temps réel, et donc avec le temps au sens pertinent? Oui et non. Prenons la théorie classique de la computation et de la complexité, soit l'étude des capacités des ordinateurs en tant que tels. **Cette théorie repose sur l'idée que les questions de synchronisation ne sont pas pertinentes; le temps se mesure simplement en étapes ou opérations.** Mais la théorie se transpose entièrement aux ordinateurs physiques et concrets tels que mon Macintosh. C'est dire que pour comprendre le comportement de l'ordinateur usuel en tant qu'ordinateur, on peut faire abstraction de la nature quantitative et dense du temps réel. De ce point de vue, les ordinateurs n'évoluent avec le temps que de manière accidentelle ; changer les détails de synchronisation n'influerait en rien leurs calculs. Par contre, personne ne pourra jamais comprendre le comportement du système solaire s'il ignore comment ses composantes se synchronisent. C'est là l'une des différences les plus importantes entre les ordinateurs et les systèmes authentiquement dynamiques, au sens où nous employons ce terme.

Que peut-on dire de plus positif au sujet des changements d'états dans un ordinateur? Eh bien, les variables sont digitales et, par conséquent, toute modification doit se faire d'un état digital à un autre. Cela implique que les transitions sont essentiellement discontinues : **il n'existe pas de temps théoriquement pertinent entre un moment quelconque et le suivant, et il n'existe pas non plus d'état théoriquement pertinent entre un état quelconque et le suivant.** Ces propriétés se reflètent dans la nature des règles qui décrivent le comportement des ordinateurs. Ces règles (« programmes ») spécifient toujours quel sera le prochain état, habituellement en spécifiant une opération discontinue qui transforme l'état courant en l'état suivant. De plus, ces règles sont toujours exprimées en termes de propriétés digitales des variables : par exemple, passer d'une case vide à une case occupée par un « 1 ».

Jusqu'à maintenant, les ordinateurs ont été décrits selon la nature de leurs variables, la modification de leurs états et la manière dont ces modifications d'états sont spécifiées - en fait, comme des systèmes formels automatiques. Pourtant, rien ne saurait être un ordinateur, dans le sens qui nous occupe, sans computation. En termes très généraux, la computation requiert un ordinateur, un domaine externe et une correspondance systématique entre les deux telle que les états et transitions de l'ordinateur soient sensées par rapport au domaine. En d'autres termes, **les ordinateurs sont des systèmes formels automatiques dont la structure entretient une correspondance et sensée à un domaine quelconque** (tel que l'arithmétique, le baseball ou ce que l'on voudra). Notons que la nature digitale des ordinateurs soutient en général un type plus précis de computation, notamment celle où le domaine lui-même possède une structure distincte et bien ordonnée. Les états pertinents du système sont des configurations structurées d'occurrences interprétables comme des représentations symboliques du domaine, et qui dit modifications d'état dit inférences d'une représentation symbolique à une autre.

Or, **il est clair qu'il n'est pas nécessaire qu'un système dynamique soit interprétable de manière systématique et sensée à l'égard d'un certain domaine externe.** Les astrologues auront beau faire, il n'existe pas de bonne interprétation du mouvement des planètes qui renvoie à quelque autre domaine. Mais cela ne veut pas dire que les systèmes dynamiques ne peuvent être interprétés ; ils le peuvent parfois, ce qui peut nous permettre de les comprendre comme manifestant des fonctions cognitives. Mais, le cas échéant, l'interprétation est toujours postérieure au fait ; elle ne fait pas partie du système dynamique en tant que tel. Un système est dynamique en vertu d'autres propriétés. On a déjà traité de la nature de leurs variables et de leurs changements d'états, mais - comme pour les ordinateurs - l'histoire ne se termine pas là.

Le cachet propre aux systèmes dynamiques tient beaucoup à l'idée de couplage. Comme nous l'avons expliqué plus haut, deux variables sont couplées lorsque la façon dont l'une change à un moment donné dépend directement de l'état de l'autre à ce moment, de ce que l'autre est à ce moment. En d'autres termes, des variables couplées co-évoluent simultanément et de façon interdépendante, comme l'angle des bras et la vitesse de la machine dans le cas du régulateur centrifuge. **Des systèmes authentiquement dynamiques manifestent un degré élevé de couplage; chaque variable est en changement constant et, directement ou indirectement, toute paire de variables détermine mutuellement la forme que prendra leur modification respective.** Dans le système solaire, par exemple, la position et la vitesse de tout corps doté d'une masse changent perpétuellement, et chaque variable influence toutes les autres.

Dans un ordinateur, par contre, la plupart des variables à chaque étape demeurent inchangées, et les changements qui s'opèrent sont influencés tout au plus par quelques autres valeurs. Il est intéressant de noter qu'il s'agit là aussi d'un point d'opposition entre les réseaux connexionnistes et les systèmes dynamiques. Certains réseaux (par exemple les réseaux entièrement récurrents) sont dynamiques dans le sens où nous l'entendons, mais d'autres - tels que les omniprésents réseaux feed-forward à trois couches (perceptrons généralisés) - ne présentent aucun couplage. Outre les interactions en gros neurologiques, les réseaux connexionnistes se distinguent par le fait qu'ils sont typiquement homogènes et de très haute

dimensionnalité. La première propriété consiste en ceci que toutes les variables changent essentiellement de la même manière ; la seconde consiste en rien de plus que d'avoir un nombre de variables relativement élevé. Les descriptions mathématiques habituelles des réseaux connexionnistes n'impliquent qu'un seul schéma d'équation avec des indices pour variables et paramètres ; l'homogénéité rend possible cette forme de description, la dimensionnalité élevée la rend nécessaire.

Ceci complète notre brève exploration des ordinateurs, systèmes dynamiques et réseaux connexionnistes comme catégories de systèmes. Deux points sont à noter avant de continuer. Premièrement, notre objectif était de saisir l'idée principale pour chaque cas plutôt que de donner un ensemble de conditions qui fournissent des frontières précises, rigides et mutuellement exclusives. Deuxièmement, il existe plusieurs conceptions des ordinateurs, des systèmes dynamiques, etc., et chacune peut être utile selon les besoins. Celles que nous avons offertes ici n'ont pas la prétention d'être meilleures ou plus adéquates en général mais, au mieux, plus utiles pour la philosophie des sciences cognitives.

6. TROIS CONCEPTIONS DE LA COGNITION

Essentiellement, **la conception dynamique de la cognition est l'idée que les systèmes cognitifs sont des systèmes dynamiques et que la cognition est le comportement de tels systèmes.** Les distinctions que nous avons tirées dans la section précédente peuvent être maintenant combinées à notre discussion du régulateur pour donner plus de chair à cette idée. Il appert que les conceptions dynamique et computationnelle de la cognition engagent chacune à un ensemble d'assertions mutuellement compatibles et se contraignant mutuellement organisées sur trois niveaux. Dans chaque cas, le cœur de la conception est une hypothèse empirique spécifique touchant le type de systèmes que constituent les systèmes cognitifs naturels. À ce noyau s'ajoutent deux postulats supplémentaires, l'un concernant les propriétés de «niveau cognitif» des systèmes cognitifs, l'autre l'appareillage conceptuel approprié pour l'étude de la cognition. Ainsi, les conceptions dynamique et computationnelle constituent toutes deux une vision richement nuancée de la nature de la cognition.

Selon la conception computationnelle, les systèmes cognitifs sont des ordinateurs (des systèmes digitaux, interprétables et gouvernés par des règles) possédant une structure interne modulaire; ils interagissent avec leur environnement selon un procédé cyclique qui débute avec la production de représentations symboliques via des transducteurs d'inputs, et ce en réponse à l'environnement, se poursuit par une computation séquentielle interne sur les structures symboliques et se termine lorsque les transducteurs d'outputs affectent l'environnement en réponse aux spécifications symboliques. Chaque opération interne est spécifiée de manière algorithmique et se produit dans le cadre temporel arbitraire du système; le processus complet peut être considéré indépendamment du corps et de l'environnement sauf dans la mesure où ceux-ci livrent occasionnellement des inputs et reçoivent des outputs. Puisque le système cognitif est un ordinateur fonctionnant par transformations séquentielles de représentations symboliques, la manière la plus éclairante de le décrire consiste à recourir à l'appareil conceptuel des sciences informatiques. Bref, le modèle computationnel conçoit les gens comme des régulateurs computationnels à grande échelle.

Cette conception s'oppose à tous points de vue au modèle dynamique, qui veut que les gens ressemblent davantage au régulateur centrifuge. Les systèmes cognitifs sont considérés comme des ensembles de quantités couplées qui évoluent en temps réel. Ces quantités peuvent être des caractères « cognitifs » abstraits (voir l'exemple ci-dessous) ou des aspects du corps ou de l'environnement. Au niveau supérieur, les systèmes cognitifs sont conçus comme des complexes de changements en train de se dérouler, continus et mutuellement contraignants. Le mode d'interaction fondamental avec l'environnement ne consiste pas à le représenter ni même à échanger avec lui des inputs et des outputs; la relation à l'environnement est mieux saisie au contraire par la notion de couplage. Bien entendu, dans certains cas sophistiqués, la cognition peut impliquer des représentations et des processus séquentiels, mais il vaut mieux concevoir ces phénomènes comme émergeant sur un fond dynamique que comme constituant le

niveau fondamental de la performance cognitive. En tant que complexes de changements en train de se dérouler et continus, il est plus juste de concevoir les systèmes cognitifs au moyen de l'appareillage qui a permis à la science de comprendre les processus de ce type : la modélisation dynamique et la théorie des systèmes dynamiques.

Quelle est la place du connexionnisme dans tout cela ? Etrangement, entre les deux. Certains réseaux connexionnistes sont entièrement dynamiques; d'autres, par contre, tels que les réseaux feed-forward en couche, sont configurés de manière à se comporter à la manière cyclique et séquentielle des systèmes computationnels. Il n'est donc pas surprenant que les connexionnistes empruntent parfois aux sciences informatiques, parfois à la dynamique, et parfois aussi à d'autres domaines, tels que la statistique, lorsqu'ils cherchent à comprendre leurs systèmes. Parfois, les réseaux connexionnistes transforment des représentations statiques d'inputs en représentations statiques d'outputs ; en d'autres occasions, ils s'installent dynamiquement dans des attracteurs, bifurquent, et ainsi de suite. Bref, le connexionnisme est à mi-chemin entre deux conceptions de la cognition dont chacune a une plus grande cohérence théorique lorsque considérée en elle-même. Bien entendu, il pourrait s'avérer que la compréhension de la nature de la cognition nécessite effectivement un mélange éclectique d'éléments en provenance de plusieurs cadres conceptuels. D'autre part, il est aussi possible que le connexionnisme soit un mixte instable, rien de plus qu'une phase temporaire et transitoire, dans l'étude de la cognition, menant d'une approche de type computationnel à une approche de type dynamique.

À ce stade, un exemple peut nous aider à appréhender un peu plus intuitivement comment l'approche dynamique, que nous venons de décrire en des termes très abstraits, peut nous aider à comprendre la nature de la cognition. Considérons le processus par lequel nous prenons une décision parmi diverses options, chacune ayant des avantages et des inconvénients. Voilà bien une opération cognitive de haut niveau, s'il en est. Les psychologues ont étudié maintes fois la manière dont les gens effectuent des choix, et ils ont produit presque autant de modèles mathématiques pour décrire et expliquer ce comportement.

L'approche dominante en modélisation provient de la théorie classique de l'utilité attendue et de la théorie de la décision statistique, telle que développée à l'origine par von Neumann et Morgenstern. **L'idée de base est qu'un agent prend une décision en sélectionnant l'option qui possède la plus grande utilité attendue**, laquelle est calculée en combinant une certaine mesure formelle de l'utilité de chaque résultat possible avec la probabilité de réalisation de ce résultat s'il choisit cette option. D'un point de vue mathématique, le travail effectué dans ce cadre est en grande partie élégant, et il fournit une explication utile des stratégies de raisonnement optimal. Toutefois, en tant qu'explication des décisions que prennent effectivement des personnes, la théorie classique de l'utilité présente de graves imperfections; les sujets humains s'écartent d'habitude de ses recommandations, et de diverses façons. Pour cette raison, on a développé plusieurs théories qui sont des variations à partir du noyau central. En général, celles-ci rejettent certains des présupposés habituels de la théorie, ce qui leur permet de modéliser le comportement réel de décision chez l'humain avec des succès variés.

Néanmoins, presque toutes ces théories présentent d'autres désavantages :

- Elles n'incorporent pas les motivations sous-jacentes qui donnent naissance à l'utilité qu'un objet ou un événement possède à un certain moment.
- Elles conçoivent les utilités elles-mêmes comme des valeurs statiques et ne peuvent offrir une explication adéquate de la manière ou de la raison pour lesquelles celles-ci changent avec le temps, ni de la raison pour laquelle dans les faits les préférences sont souvent mutuellement incompatibles et inconstantes.
- Elles n'offrent aucune explication sérieuse du processus de délibération, avec toutes ses hésitations, ses incohérences et l'angoisse qui l'accompagne, et elles n'ont rien à dire sur

les relations mises au jour entre le temps consacré à la délibération et les choix éventuellement faits.

Curieusement, ces désavantages semblent partager un thème commun : ils concernent tous d'une manière ou d'une autre des aspects temporels du processus décisionnel. Il est donc pertinent de chercher à savoir si ces désavantages découlent de certains traits structurels profonds inhérents au cadre conceptualisant le comportement décisionnel en termes de calcul de l'utilité attendue.

On remarquera que les explications de la procédure décisionnelle humaine reposant sur la théorie de l'utilité se rapprochent intimement de la solution computationnelle au problème du régulateur automatique. Si on considère que ces explications non seulement décrivent le résultat du comportement décisionnel, mais aussi qu'elles servent de guide pour montrer les structures et les processus générant ce comportement, il y a alors des ressemblances structurelles fondamentales avec le régulateur computationnel.

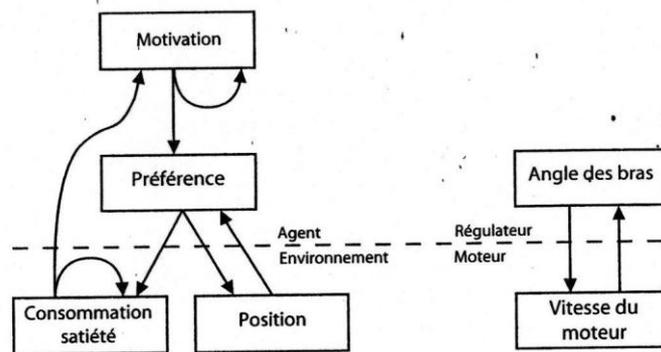
Ainsi, les théories de l'utilité sont franchement computationnelles : elles reposent sur la représentation statique des options, utilités, probabilités et autres choses de ce genre, et le traitement consiste en la manipulation algorithmique interne de ces représentations conduisant à une représentation finale de l'option à choisir. Il s'ensuit que les théories de l'utilité sont strictement séquentielles; elles présupposent une étape initiale au cours de laquelle est acquise l'information pertinente concernant les options, les probabilités et ainsi de suite ; une seconde étape au cours de laquelle l'utilité attendue est calculée; et une troisième au cours de laquelle le choix est effectué dans un comportement concret. Et, tout comme le régulateur computationnel, elles sont essentiellement atemporelles; la synchronisation des diverses opérations internes, que ce soit à l'égard les unes des autres ou à l'égard des modifications de l'environnement, n'est nullement contrainte.

Eh d'autres termes, nous avons un modèle de la cognition humaine qui, d'une part, manifeste les mêmes structures fondamentales que le régulateur computationnel et qui, d'autre part, semble structurellement incapable de rendre compte de certaines dimensions essentiellement temporelles du comportement décisionnel.

À ce stade on pourra se demander quel type général de modèle décisionnel nous obtiendrions si nous prenions au contraire le régulateur centrifuge comme prototype. Il s'agirait d'un modèle comportant relativement peu de variables continues s'influçant mutuellement en temps réel. Son comportement serait déterminé par des équations différentielles non linéaires à faible dimensionnalité. Et il s'agirait d'un modèle où, comme le régulateur et la machine, l'agent et l'environnement où s'effectuent les choix sont étroitement couplés.

Il s'agirait, bref, de quelque chose de semblable au modèle de la « théorie oscillatoire de la motivation » (motivational oscillatory theory -TOM) décrite par le psychomathématicien James Townsend. TOM permet de modéliser diverses propriétés qualitatives du comportement périodique du genre de celui qui se produit lorsque les circonstances permettent d'assouvir des désirs résultant de motivations plus ou moins permanentes. Le fait de se nourrir régulièrement en réponse à la faim naturelle récurrente en est un exemple patent.

TOM est construite autour de l'idée que, dans ces situations, la motivation sous-jacente, le désir transitoire à l'égard de l'objet, la distance de l'objet et sa consommation évoluent continuellement et s'influencent les uns les autres en temps réel; par exemple, si votre désir de nourriture est vif et que vous en êtes éloigné, vous vous en approcherez, ce qui influera sur l'assouvissement de votre désir. Le cadre conceptuel comprend donc des variables pour l'état courant de la motivation, de l'assouvissement, de la préférence et de l'action (mouvement), ainsi qu'un ensemble d'équations différentielles décrivant comment ces variables se transforment avec le temps en fonction de l'état courant du système.



TOM est aux théories de l'utilité ce que le régulateur centrifuge est au régulateur computationnel. Selon TOM, la cognition n'est pas une manipulation de symboles, mais bien plutôt l'évolution de l'espace des configurations d'un système dynamique qui, à certains égards, ressemble au régulateur centrifuge. Il s'agit d'un système exigeant les outils d'analyse propres à la dynamique. TOM produit un comportement qui, si on ne le regarde que du coin de l'œil, ressemble au processus décisionnel : après tout, l'agent posera l'acte qui offre la plus grande récompense, ce qui, dans le cas présent, signifie se déplacer vers la nourriture s'il a suffisamment faim.

En un sens, cependant, le processus décisionnel se déroule sans qu'il y ait décisions, car ce modèle ne contient aucun événement discontinu que l'on pourrait raisonnablement appeler tels. Selon cette approche, le processus décisionnel est mieux compris comme le comportement d'un agent sous l'influence des pulsions et répulsions émanant de résultats désirables et indésirables ainsi que des désirs et motivations internes; quasi à la manière de la gravitation, ces forces agissent sur l'agent avec une puissance variant en fonction de la distance.

Le modèle TOM est un cas spécial du cadre dynamique plus général que Townsend et Jérôme Busemeyer (1993) appellent « théorie du champ décisionnel » (decision field theory). Ce cadre, qui est trop complexe pour être décrit succinctement, modélise une vaste gamme de comportements ressemblant au comportement décisionnel, tel qu'étudié au sein du paradigme traditionnel de la recherche. Les auteurs affirment en effet que la théorie du champ décisionnel « couvre de manière plus détaillée une gamme plus ample de phénomènes » que la théorie classique de l'utilité, et même qu'elle va au-delà de cette dernière en expliquant tout naturellement plusieurs paradoxes importants du comportement décisionnel. Le point important, c'est que la théorie générale du champ décisionnel fonctionne selon les mêmes principes dynamiques fondamentaux que TOM. Il est donc indubitable qu'au moins certains aspects du fonctionnement cognitif de haut niveau chez les humains peuvent être modélisés avec succès au moyen de systèmes dynamiques du genre de ceux qu'a permis de faire ressortir le régulateur centrifuge.

7. LA CONCEPTION DYNAMIQUE EST-ELLE VIABLE ?

Pour réfuter convenablement un argument du type « de-quoi-d'autre-pourrait-il-s'agir »?, il faut que l'option proposée soit viable, c'est-à-dire qu'elle soit suffisamment plausible pour qu'il soit raisonnable de juger ouverte la question empirique de savoir laquelle, de l'approche orthodoxe ou de l'option de recharge, est la plus prometteuse.

Une mesure de la viabilité d'une approche, c'est la possibilité d'y réaliser des recherches de grande valeur. Selon cette mesure, l'approche dynamique est à coup sûr en bonne santé. Des modèles dynamiques ont été développés, ou le sont présentement, pour rendre compte d'aspects très divers du fonctionnement cognitif, allant des aspects (dits) de « bas niveau » ou « périphériques », tels que la perception et le contrôle moteur, aux aspects (dits) « centraux » ou « supérieurs », tels que le langage et le comportement décisionnel, en passant par des secteurs connexes tels que la psychiatrie et la psychologie, sociale.

Comme nous l'avons déjà mentionné, une bonne partie des travaux connexionnistes tombent sous la bannière dynamique, et ces travaux à eux seuls justifient que l'on prenne au sérieux l'approche dynamique. Toutefois, il existe aussi aujourd'hui des modèles dynamiques non connexionnistes de différents aspects de la cognition, et leur nombre augmente. De plus, dans nombre de disciplines appartenant au domaine plus large des sciences cognitives, la dynamique fournit le cadre conceptuel où sont développés des théories et modèles particuliers. Ceux-ci comprennent la modélisation neuronale, les agents autonomes (animât), la psychologie écologique et, de plus en plus, la psychologie du développement '.

Bien entendu, il est tout à fait possible qu'un programme de recherche prospère, bien que, pour des raisons fondamentales, il se montre éventuellement inadéquat, en général ou sur des points particuliers. (Qu'on se rappelle le béhaviorisme). Ainsi, lorsqu'on évalue une option, on doit aussi déterminer si certaines considérations générales connues la soutiennent ou - plus important encore - la minent. Plusieurs considérations générales militent en faveur de la conception computationnelle de la cognition, et les contrastes étant marqués, cela pourra sembler jouer contre l'option dynamique. Il n'est pas possible d'aborder tous ces arguments ici (ou même un seul d'entre eux) de manière satisfaisante, mais je vais commenter brièvement l'un des plus puissants, non pas, cependant, dans le but de le réfuter, mais en m'efforçant plutôt de révéler une partie du potentiel de l'approche dynamique.

On distingue souvent la cognition d'autres types de processus naturels complexes (tels que les orages ou la digestion) en signalant qu'elle dépend de la connaissance. L'un des défis pour le chercheur en sciences cognitives est de comprendre comment le comportement d'un système physique peut manifester une telle dépendance. L'approche habituelle consiste à supposer que le système contient des structures internes qui encodent ou représentent la connaissance. De plus, on présume souvent que la meilleure façon d'encoder ou de représenter la connaissance consiste à utiliser des représentations symboliques manipulées par un système computationnel. Dans la mesure où l'approche dynamique renonce entièrement aux représentations ou offre des substituts représentationnels moins puissants, on pourra la croire condamnée.

Bien que le régulateur centrifuge ne soit clairement pas représentationnel, et quoique (comme nous l'avons soutenu plus haut) les représentations appartiennent à un groupe de traits fondamentaux qui sont conjointement caractéristiques des modèles computationnels, **rien n'empêche en fait les systèmes dynamiques d'incorporer certaines formes de représentations.** En effet, l'approche dynamique a ceci d'excitant qu'elle permet de concevoir la nature de la représentation dans les systèmes cognitifs de manière tout à fait nouvelle, même dans un cadre conceptuel en gros non computationnel. **Une stratégie habituelle en modélisation dynamique est d'assigner une portée représentationnelle à quelques-unes ou toutes les variables d'états et paramètres** (voir, par exemple, le modèle de la théorie du champ décisionnel de Townsend et Busemeyer dont nous avons discuté ci-dessus, ou songer à un réseau connexionniste dont les unités représentent des propriétés du domaine).

Bien qu'il soit possible que des représentations de ce genre soient exactement ce dont nous avons besoin pour certaines fins de modélisation, elles ne possèdent pas le type de structure, combinatoire habituellement jugé nécessaire pour rendre compte d'autres capacités cognitives, de niveau élevé. Cependant, le répertoire

conceptuel de la dynamique contient une vaste gamme d'entités et de structures que l'on peut exploiter dans des rôles représentationnels ; les variables individuelles d'états et les paramètres ne sont que les plus simples d'entre elles. On sait par exemple comment construire des schémas représentationnels où des contenus complexes (tels que des structures linguistiques) sont assignés récursivement à des points dans l'espace des configurations d'un système dynamique, de façon que ces représentations forment des structures fractales dont la profondeur est potentiellement infinie et que le comportement du système puisse être considéré comme transformant les représentations d'une façon qui respecte la structure représentée. Cela dit, ces méthodes effleurent à peine l'ensemble des possibilités ouvertes par l'approche dynamique. Les représentations peuvent être des trajectoires ou des attracteurs de diverses espèces, des trajectoires obtenues par enchaînement séquentiel d'attracteurs, voire des créatures exotiques comme des transformations de la disposition des attracteurs dans l'espace des configurations en fonction de variations dans les paramètres de contrôle du système.

Les partisans de l'approche dynamique explorent activement la façon d'incorporer ces possibilités représentationnelles, et d'autres encore, dans nos modèles cognitifs, sans toutefois devoir accepter le reste de la vision computationnelle du monde. Par conséquent, bien que l'approche dynamique soit encore loin d'avoir trouvé de véritables solutions au problème concret de la représentation de la connaissance, il est clair qu'elle est suffisamment prometteuse pour demeurer une option viable.

Quelles raisons positives permettent de croire que l'approche dynamique est effectivement sur le bon chemin? Encore une fois, l'espace nous manque pour traiter sérieusement la question, mais certains arguments sont dignes de mention. Dans la pratique, l'attrait de l'approche dynamique s'explique en partie par le fait qu'elle apporte à l'étude de la cognition des outils qui ont eu un succès extraordinaire dans plusieurs autres domaines scientifiques. Mais y a-t-il quelque chose concernant la cognition en particulier qui suggère qu'on aurait avantage à la concevoir de manière dynamique ?

Une propriété centrale des processus cognitifs naturels est qu'ils se déroulent toujours en temps réel, ce qui signifie que, comme tout autre processus physique (y compris la computation digitale ordinaire), non seulement ils s'étalent dans le temps, mais que les détails temporels - durées, taux, rythmes, et ainsi de suite - sont cruciaux pour comprendre comment ils fonctionnent dans de vrais environnements ou de vrais corps. Comme nous l'avons vu plus haut, l'approche dynamique s'intéresse tout particulièrement à la manière dont les processus se produisent en temps réel, alors que les questions temporelles sont fondamentalement extrinsèques aux systèmes computationnels. La cognition présente aussi d'autres traits généraux pour lesquels l'approche dynamique paraît tout à fait appropriée.

Par exemple, **la cognition est une forme d'organisation comportementale complexe qui émerge de l'interaction locale d'un très grand nombre d'éléments (relativement) simples et homogènes. Elle est traversée de formes variées de changements tantôt continus, tantôt discontinus. Elle comporte à tous les niveaux des processus multiples, simultanés et interactifs. La dynamique est un cadre conceptuel naturel pour développer des théories qui rendent compte de telles caractéristiques.** De plus, la description des systèmes au sein desquels se produit la cognition (le cerveau, le corps, l'environnement) requiert des outils dynamiques. Une explication dynamique de la cognition promet de minimiser les obstacles dans la voie nous menant à une compréhension de la manière dont les systèmes cognitifs sont de vrais systèmes biologiques entretenant un lien de dépendance constant, intime et interactif avec leur environnement '.

On peut enfin étayer la viabilité de la conception dynamique en la mettant, avec la conception computationnelle, en perspective historique. En tant qu'orthodoxie des sciences cognitives, le computationnalisme n'est au fond qu'une variante sophistiquée d'une conception fondamentalement cartésienne de la nature de l'esprit. L'emprise que cette image exerce sur la manière dont la plupart des gens appréhendent l'esprit et la cognition rend la conception computationnelle intuitivement attrayante. Il n'y aurait pas de quoi fouetter un chat si la conception cartésienne était foncièrement correcte. Toutefois, des évaluations philosophiques

dont on a fait l'objet le cadre conceptuel cartésien depuis trois siècles, et en particulier au cours du siècle présent, il ressort qu'elle appréhende fort mal l'esprit et sa place dans la nature.

Les chercheurs en sciences cognitives ont tendance à penser que la principale erreur de Descartes concernant l'esprit a été de souscrire à un dualisme interactionniste, doctrine voulant que le corps et l'esprit soient deux substances distinctes qui interagissent de manière causale. Toutefois, avant même la fin du xvme siècle, on avait déjà exposé les faiblesses de cet aspect de la doctrine cartésienne et épousé un matérialisme complet fondé sur le cerveau. Certaines des plus grandes réalisations de la philosophie de l'esprit au xxe siècle ont été de mettre au jour différentes idées erronées d'ordre épistémologique et ontologique, celles-là plus subtiles, omniprésentes et pernicieuses, inhérentes à la conception cartésienne. Ces erreurs subsistent souvent, même lorsque le dualisme de substance est rejeté en faveur d'un matérialisme fondé sur le cerveau, comme c'est le cas pour les diverses variétés de fonctionnalisme.

L'un des plus importants mouvements anticartésiens a eu pour fers de lance Ryle, pour la philosophie anglo-américaine et Heidegger, pour la philosophie continentale. Ce mouvement a eu pour cible l'idée d'inspiration cartésienne voulant que l'esprit soit un domaine interne de représentations et de processus et que ce soit celui-ci qui, ainsi conçu, explique causalement le comportement intelligent. Ce mouvement comprend trois volets interreliés.

Le premier est la relocalisation de l'esprit. La tradition cartésienne a tort de croire que l'esprit est un domaine ou une entité interne de quelque ordre que ce soit - substances mentales, états du cerveau, etc. D'un point de vue ontologique, l'esprit se définit plutôt par ce qu'on fait à l'intérieur des possibilités et des limites environnementales et sociales. L'anticartésianisme du xxe siècle fait sortir l'esprit; **en particulier, il le fait sortir du crâne.** L'aspect de l'esprit qui reste au-dedans, et qui est le fondement causal du comportement, est la cognition.

Le second volet consiste à concevoir à nouveaux frais notre relation fondamentale au monde qui nous entoure. D'après le cadre conceptuel cartésien, la relation fondamentale que l'esprit entretient avec le monde consiste à le représenter et le penser, ce à quoi s'ajoutent des interactions occasionnelles et « périphériques » à travers la perception et l'action. On sait depuis Berkeley que ce cadre conceptuel présente des problèmes épistémologiques fondamentaux. Mais plus récemment, on a montré qu'il est impossible d'échapper à ces problèmes si on ne conçoit pas plutôt l'agent humain comme essentiellement enchâssé dans le monde et faisant habilement face à un monde en changement, se représenter et penser le monde n'étant que secondaire et dépendant de cet enchâssement.

Le troisième volet consiste à attaquer la supposition que le type de comportement que nous manifestons (tel que nous sommes enchâssés dans le monde et pouvons être dits avoir un esprit) pourrait s'expliquer de manière causale en n'utilisant que des ressources en gros cartésiennes telles que les représentations, les règles, les procédures, les algorithmes, et ainsi de suite. Une erreur cartésienne fondamentale consiste à supposer, pour reprendre les diverses formulations de Ryle, que l'on peut rendre compte de la pratique par la théorie, que le savoir pratique (know how) peut s'expliquer en termes de savoir propositionnel (know that) ou qu'une habileté est affaire de pensée. En d'autres termes, non seulement l'esprit ne se trouve-t-il pas dans la tête, mais la cognition, le fondement causal interne du comportement intelligent ne peut pas non plus s'expliquer par un recours aux entités fondamentales de la conception cartésienne générale.

Mon but ici n'est pas d'étoffer ces affirmations ou les conceptions post-cartésiennes de la personne qu'elles suggèrent ; il est simplement de retirer à la conception computationnelle de la cognition son air d'inévitabilité en semant le doute sur le cadre conceptuel au sein duquel elle prospère. Les sciences cognitives computationnelles orthodoxes ont tiré certaines des leçons les plus importantes des réactions qu'a suscitées le cartésianisme au xviii siècle, mais, à ce jour, elles ont négligé les critiques plus radicales qu'on lui a adressées au xxe siècle.

Toutefois, si on part d'une approche foncièrement post-cartésienne, l'explication dynamique de la cognition paraîtra immédiatement attrayante à plusieurs égards. La conception post-cartésienne rejette le modèle de l'esprit comme constructeur atemporel de représentations et, à l'instar de l'approche dynamique de la cognition, met plutôt l'accent sur l'interaction continue et en temps réel des agents situés avec un monde en changement. L'agent post-cartésien est essentiellement temporel, puisque son rapport le plus fondamental au monde consiste à s'y débrouiller habilement et en temps réel; le cadre dynamique est donc un choix naturel puisqu'il intègre le temps dès le départ.

L'agent post-cartésien parvient à se débrouiller dans le monde sans nécessairement le représenter. Une approche dynamique suggère comment cela peut être possible en montrant comment les opérations internes d'un système interagissant avec un monde externe peuvent être si subtiles et complexes qu'elles défient toute description en termes représentationnels - comment, en d'autres termes, la cognition peut transcender la représentation. En bref, du point de vue philosophique qui a réussi à surmonter les structures profondes de la conception cartésienne du monde, l'approche dynamique paraîtra tout à fait attrayante ; **le régulateur de Watt est préférable à la machine de Turing comme archétype des modèles de la cognition.**