AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique

Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 16, printemps 2017

La représentation face à l'explosion des données

Res-Systemica, volume 16, article 07

Robert Vallée et la boucle épistémo-praxéologique

Olivier Maurice

contribution reçue le 03 août 2017

17 pages

AFSCET

Res-Systemica
Revue Française de Systémique
Fondée par Evelyne Andreewsky

Robert Vallée et la boucle épistémo-praxéologique

Olivier MAURICE[a]

[a] *AFSCET, ENSAM, 151 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France.*
olivier.maurice@gmx.fr

11 Avril 2016

Résumé.
Robert Vallée a présenté dans son ouvrage *Cognition et Système*[1] dont le sous-titre est *Essai d'Épistémo-Praxéologie* son étude de la relation entre les systèmes et leurs environnements. L'approche est systémique et propose des modèles mathématiques sur la relation entre la connaissance et la coordination, vue comme suite d'actions en réponse à des sollicitations diverses. En découle la "boucle Épistémo-Praxéologique" imaginée par Vallée, reliant dans un cycle orienté perception, décision et action. Nous discutons ici de la proposition de Vallée, en hommage à ses travaux fondamentaux pour la communauté des systémiciens.

The Epistemo-Praxeological loop of Robert Vallée

Abstract
Robert Vallée has presented in his book *Cognition et Système* which subtitle is *Essai d'Épistémo-Praxéologie* his study about the relation between systems and their environments. Vallée's approach is a systemic one and Vallée submits mathematical models on the relation between the knowledge and the movement, seen as a suite of excitations and actions. A consequence is the "épistémo-Praxéologique" loop imagined by Vallée. This loop is an oriented cycle including perception, decision and action. We discuss here of Vallée's proposal in memory of his fundamental works for the systemicians community.

Mots-clés : Épistémo-Praxéologie, Vallée, cognition et systèmes, systémique.

1. L'interdisciplinaire. Collection Système(s) dirigée par J.-P. Algoud. 480 rue de la Glande, 69760 Limonest.

Localité versus globalité

Robert Vallée débute ses réflexions sur les systèmes par la discussion incontournable sur la localité ou la globalité du périmètre attaché à un système. Comme dans beaucoup de domaine, opposer les concepts "cartésiens" et "systémiciens" serait simpliste. Il est clair qu'il faut laisser la liberté des approches comme le souligne Vallée. Cependant la question de la localité est incontournable parce que l'analyse d'un système, même si elle prétend être globale, ne pourra de façon effective n'être que locale. Reste à définir l'extension de la localité ...

Mais déjà dans ces réflexions, Vallée précise les termes et donne des exemples mathématiques illustrant avec force la simplicité des catégorisations entre systémisme et cartésianisme. Nous pouvons ainsi étudier les propriétés d'un ensemble au voisinage d'un point particulier, et de cette étude locale, généraliser son application pour décrire une propriété globale. Certes souvent, l'impact du global est oublié par une trop grande focalisation sur le local. Pour autant, croire que toute approche doit être globale n'a pas forcément de sens. Et Vallée de rappeler que les deux attitudes sont également nécessaires à une systémique cohérente avec les axes de la pensée que constituent :

— la synthèse du global ;
— l'analyse du local ;
— et la systémique exploitant les deux aspects.

Finalement, Vallée était un systémicien de tous les instants, cherchant continûment à ne pas réduire la complexité des interactions à tout niveau sans faire de l'approche pour le tout plutôt que les parties une règle sectaire, qui d'ailleurs dans bien des cas tient plus de l'annonce que de la pratique.

Au-delà de ces catégorisations, Vallée appliquait la systémique au-travers d'hypothèses mathématiques claires. Ainsi Vallée était convaincu du fait que système et environnement devaient être toujours considérés comme un seul. Mais un point important dans ses réflexions portait sur l'impossibilité pour un système d'englober complètement cet environnement, ne pouvant se regarder lui-même. L'étude de l'observabilité et de la perception des systèmes est le premier point auquel Vallée s'attache après avoir donné quelques basiques sur les notions de système. Sur ce dernier point nous allons rappeler les réflexions de Vallée portant sur les systèmes dynamiques, qui sont à la source de la représentation de la boucle que Vallée établit ensuite.

Systèmes dynamiques

Les systèmes dynamiques impliquent non pas les seules observables de position, charge, température, etc., mais aussi leurs dérivées temporelles. Le système dynamique est caractérisé en ce sens que l'équation qui le modélise est soit une équation différentielle d'ordre 2, soit une équation intégro-différentielle. La résolution courante de ces systèmes utilise les différences finies temporelles ou bien des techniques plus sophistiquées comme les transformations de Laplace. La notion de délai ou de retard n'apparaît pas explicitement dans l'équation de l'évolution du système, mais elle est cachée dans les dérivations temporelles qui font appels implicitement au passé des valeurs des variables. Cet aspect apparaît très bien dans un diagramme de bloc (classique en automatique, matière première de Vallée) donné par Vallée dans son ouvrage "Cognition et Système" [2]. Nous partons du système d'équations :

$$(1) \qquad \begin{cases} \frac{d}{dt}x = A.x + B.u \\ \\ y = C.x + D.u \end{cases}$$

où A, B, C, D sont des matrices et x, y, u des vecteurs (classiquement et respectivement variables système, observable du système et environnement). Le diagramme de blocs correspondant est représenté (figure1).

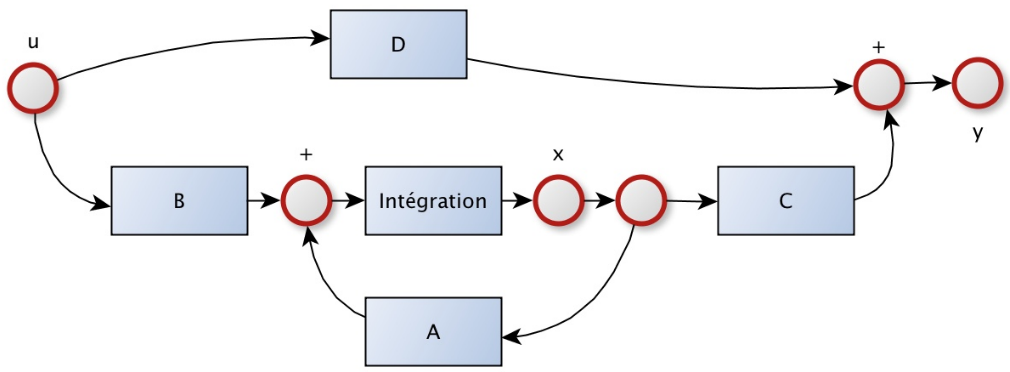

Figure 1 – Diagramme de bloc

Nous voyons clairement sur cette figure que, alors que nous faisons appel à la dérivée de x dans l'équation découplée, nous utilisons un bloc d'intégration dans le diagramme. Cela vient des différentes possibilités existantes pour définir l'espace de configuration du problème. La démarche générale part d'une équation d'ordre quelconque, par exemple

$$(2) \qquad m\frac{d^2x}{dt^2} + k\frac{dx}{dt} - mgx = 0$$

(il n'est pas utile ici de détailler le sens des cœfficients et paramètres de cette équation) où l'on va définir une nouvelle variable :

$$(3) \qquad v = \frac{dx}{dt}$$

pour obtenir un nouveau système de deux équations :

2. page 22, figure 1

$$\left\{ \begin{array}{l} mgx = kv + m\frac{d}{dt}v \\ \\ \frac{d}{dt}x = v \end{array} \right. \tag{4}$$

En regardant le diagramme de bloc figure 1, nous voyons que le passé de l'évolution du système est impliqué via la boucle utilisant l'opérateur A, puisque celui-ci renvoie la valeur actuelle de x vers une somme impliquant la prochaine valeur de x. Par ailleurs, le système mémorise tous ses états présents et passés par l'opérateur d'intégration sur x. Cette opération de mémorisation n'apparaît pas dans le système d'équations 4 qui a cet avantage de n'impliquer que des dérivées temporelles du premier ordre. Cette forme étant obtenue à partir de la relation 3 nous pourrions l'appeler "hamiltonienne". D'autres possibilités existent non évoquées par Vallée sans doute car non usitées dans la communauté des automaticiens. Nous voulons l'introduire ici car la comparaison des expressions nous permettra de compléter notre lecture des travaux de Vallée. Nous pourrions effectivement définir deux transformations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt}x = v \\ \\ mgx = \int_x dx\, mg = f \end{array} \right. \tag{5}$$

L'équation du problème s'écrit alors :

$$m\frac{d}{dt}v + kv = f \tag{6}$$

L'écart peut sembler anodin mais est essentiel. La force f provenant d'une influence externe g apparaît clairement ici. Elle résulte d'une forme appliquée à l'espace et pourrait être appelée "lagrangienne".

Reconsidérons le système 1, il est classique pour les automaticiens et en positionnant les dérivées temporelles de la variable d'état x comme membre de gauche, nous pouvons en différences finies temporelles calculer l'évolution du système (démarche récurrente contrairement aux démarches différentielles ne discrétisant pas le temps). A contrario l'environnement u est un état particulier mais non différencié dans sa nature des autres états.

Réécrivons ce système en plaçant comme membres de gauche ceux qui font intervenir l'environnement :

$$\left\{ \begin{array}{l} B.u = \frac{d}{dt}x - A.x \\ \\ D.u = -C.x + y \end{array} \right. \tag{7}$$

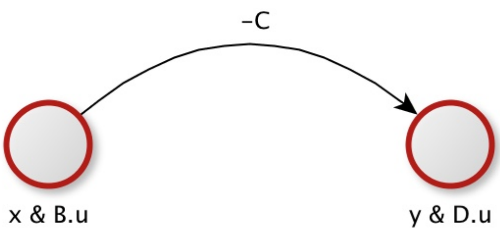

Figure 2 – Graphe du système 1

Ce nouveau système pourrait être représenté par le nouveau diagramme qui est cette fois un graphe donné figure 2.

Ce graphe est de nature et constitutions très différentes du diagramme de blocs. Les nœuds du diagramme de bloc deviennent ici des cercles qui portent différents objets, dont les sources $B.u$, $D.u$ et des opérateurs $(p - A)$, 1 où p est l'opérateur de Laplace, alors qu'une corde porte l'opérateur $-C$. Les blocs du diagramme de bloc deviennent des cordes dans cette nouvelle représentation. La première représentation conduit aux matrices :

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt}x \\ \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \\ u \end{bmatrix} \tag{8}$$

La seconde représentation conduit aux matrices :

$$\begin{bmatrix} B.u \\ \\ D.u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p - A & 0 \\ \\ -C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \\ y \end{bmatrix} \tag{9}$$

Nous pouvons appeler la première représentation "ABCD" en faisant référence aux opérateurs de la matrice reliant les variables de sorties et les dérivées temporelles des variables d'état aux états et environnement, alors que la seconde représentation que nous pouvons appeler "lagrangienne" se base sur la création d'un espace dual qui porte l'environnement, un vecteur naturel qui porte les variables d'état et sorties et un opérateur reliant ces deux premiers vecteur et covecteur, que nous appellerons opérateur d'impédance. Cette seconde représentation découle d'une opération de géométrisation du problème. Travaillant personnellement sur cette recherche, je devais en parler avec Robert Vallée, mais pour mon grand malheur, le temps nous a manqué dans le délai qu'il a bien voulu laisser à ce grand chercheur. Cette seconde représentation va me permettre de décrire les idées de Vallée sous un formalisme qu'il ne connaissait pas et qui met en valeur ses idées majeures que nous développerons. En particulier, et nous pourrions faire le parallèle avec un autre grand chercheur, Gabriel Kron [3], Vallée va inventer un opérateur *pragmatique* qu'il appelle *impédance pragmatique* et qui s'apparente à un foncteur très particulier basé sur la théorie des jeux. Cette invention est complétée par deux autres : un opérateur effecteur $\mathcal{A}_s$ et un opérateur de dynamique environnementale $\mathcal{A}_e$.

Ayant jeté les bases d'un système dynamique, regardons maintenant comment nous pouvons l'observer, le contrôler, et l'identifier comme système cybernétique (qui engendrera les systèmes cyber-physiques d'aujourd'hui).

Systèmes cybernétiques gouvernables et observables

Le système cybernétique est un système, suivant Mesarović que cite Vallée, où intervient l'information et la téléonomie [4]. La téléonomie y est donc vue ici au second degré, faisant référence à une autonomie comme une capacité à agir pour atteindre une finalité. Les sujets abordés par Vallée n'incluent pas le processus de reproduction, bien qu'elle ne l'en exclut pas non plus explicitement. La capacité de fabrication atomique, moléculaire et cellulaire peut être modélisée par des bilans bio-chimiques mais implique des mécanismes de transformations qui n'apparaissent pas dans les équations manipulées par Vallée. La cybernétique telle que Vallée l'a en partie étudiée, sur les fondements écrits par Robert Wiener [5], aborde finalement assez succinctement le phénomène de la reproduction. Robert Wiener se pose la question de savoir si les mécanismes de capacité de reproduction d'une boîte blanche à même d'adopter n'importe quelle caractéristique d'un transducteur ne sont pas similaires philosophiquement à ceux de la reproduction ("Cybernétique", R.Wiener, page 313). La réflexion est somme toute assez laconique mais ne pose pas le problème complexe de la mitose cellulaire, ni philosophiquement, ni mathématiquement. Pour cette dernière science il faut a minima poser le bilan des transformations, de la forme :

$$A + \epsilon \rightarrow 2A \tag{10}$$

Où A est une certaine substance et ϵ une forme d'énergie. Ce type de réaction biochimique appliquée à des bactéries fait même intervenir d'autres quantités, des substrats, de la température, etc. Ni Vallée, ni Wiener ne développent ces équations dans leurs modèles. Par contre Vallée propose une définition d'un système cybernétique comme une synthèse simple et qui se suffit à elle-même il me semble :

Ceci nous conduit à ce que nous proposons d'appeler "systèmes cybernétiques". [...] Un tel système sera dit cybernétique s'il est possible de distinguer, métaphoriquement ou non, une chaîne observationnelle (liée à l'entrée) suivie d'une chaîne décisionnelle aboutissant aux organes d'effection (liés à la sortie), étant entendu que la chaîne observationnelle

3. Génie électricien, Gabriel Kron a travaillé à la General Electric comme concepteur de machines électriques. Décédé en 1939 il est l'auteur du formalisme de l'analyse tensorielle des réseaux sur lequel je base mes travaux de recherche

4. Suivant le dictionnaire Hachette, *Propriété qu'a la matière vivante de matérialiser une finalité.*

5. Dont il participera à la traduction de l'œuvre majeure pour la cybernétique : *Cybernétique - information et régulation dans le vivant et la machine*, éditions du Seuil, 2014

permet au système d'observer son environnement et de s'observer lui-même, tandis que les organes d'effection modifient et l'environnement et le système. [6]

Quelle merveilleuse définition ! Depuis l'automate entièrement mécanique en passant par le robot munit d'une capacité informatique, le système cybernétique est capable de décisions. Qui dit décision dit sous une certaine évolution, apprentissage. L'apprentissage est beaucoup plus longuement disserté par Robert Wiener. Et l'évolution des réseaux de communication modernes mène aux systèmes cyber-physiques, qui peuvent échanger leurs décisions ou commander des actionneurs à distance via un réseau qui peut être à l'échelle mondiale.

Mais n'y a-t-il pas contradiction ici lorsque nous posons qu'un système cybernétique peut s'observer lui-même, alors que nous disions cette opération impossible ? Il faut en fait préciser de quelle observation nous parlons. Nous ne pouvons pas nous regarder en face, mais nous pouvons voir nos jambes, etc., sentir la douleur et ainsi de suite. Un système est donc pourvu d'un ensemble de capteurs propres qui lui communiquent une partie de son état. D'autres capteurs indiquent la relation entre le système et son environnement : perceptions de chaleur, vent, position, vitesse, etc. Se pose de cette façon la question de l'observabilité.

A un moment donné, l'univers visible a un périmètre fini. Des événements qui se sont déroulés à grande distance ne seront éventuellement perceptibles qu'après un délai de propagation de l'information qui les rend inaccessibles en-deçà de cette durée. Par ailleurs un organe sensoriel ne peut pas se voir lui-même. Et si nous disposons deux de ces organes pour qu'ils puissent se regarder l'un l'autre, la connaissance de l'état de l'un ne sera accessible qu'après un instant de traitement par l'autre, et donc l'état instantané d'un organe sensoriel est de manière générale en dehors du périmètre visible à l'instant courant. Vallée parlait de *territoire épistémologique*. Ce territoire est également limité du fait qu'aucun système n'est pourvu de capteurs universels sensibles à l'ensemble des spectres d'excitations, mais plutôt de capteurs optimisés pour l'adaptation du système dans son environnement.

Les signaux perçus par les capteurs observables sont une partie des composantes du covecteur des sources que nous noterons u_α. Vallée notait lui ces entrées comme les composantes d'un vecteur u. Dans tous les cas la spécificité de ces signaux est leur caractère exogène. Les signaux véhiculés dans le système proviennent eux de transformations des sources externes par l'intermédiaire de couplages ou transformations internes. Leur nature est de fait radicalement différente et je les considère pour ma part comme les composantes d'un vecteur x^σ alors que Vallée les voit comme d'autres composantes d'un vecteur d'entrée x complétant u. Nous pourrions penser que les composantes de u dans le modèle "ABCD" ou u_α en lagrangien sont implicitement observables et ce dans le respect de la causalité. Ce n'est pas si évident et Vallée explique bien les conditions d'observabilité. Par exemple le corps humain perçoit le rayonnement X, mais il ne sait pas l'interpréter

6. "Cognition et Système", page 26.

et ses capteurs sensoriels ne remontent aucune information vers le système nerveux à leur contact. Il y a donc perception physique mais pas cognitive.

En général on entend par "observable" une perception perçue et interprétée par le système nerveux ; une perception cognitive et ensuite épistémologique par apprentissage. La dimension cognitive peut d'ailleurs inverser l'idée que nous nous faisons de la perception. Ainsi nous sommes capables d'élaborer une perception abstraite d'un espace avec quatre dimensions alors que nos sens ne nous permettent pas de nous la représenter concrètement.

Vallée propose la création d'un **opérateur d'observation** θ permettant le passage du "signifié" au "signifiant". Cela revient à considérer comme observable une grandeur non seulement perceptible, mais en plus interprétable. Mais plus encore, nous sommes capables d'écrire une chronique de l'observable, c'est à dire d'en connaître les dérivées temporelles successives comme l'intégration, conditions de résolution du système d'équations représentant le système étudié.

Le système d'équation 9 peut être écrit, en usant de la convention de l'indice muet d'Einstein :

$$v_\alpha = \zeta_{\alpha\sigma} x^\sigma \tag{11}$$

v_α relate les excitations exogènes provenant de l'environnement et x^σ contient toutes les variables d'état du système, y compris les sorties et celles non accessibles. L'opérateur ζ relie les excitations du système à ses réponses et adaptations x^σ. Nous avons vu déjà dans le cadre de l'écriture classique 8 que $v_1 = B.u$, $v_2 = D.u$. B et D apparaissent ici comme des opérateurs d'observation qui rendent les signaux de l'environnement intelligibles par le système. Cet opérateur peut agir sur les valeurs passées de u, et v_1 peut être un développement sur u de la forme $B_k u^k$ [7] (idem pour D). Mais comment introduire les influences "cachées" de l'environnement ? L'écriture "ABCD" dans ce cas n'est pas facile car elle ne permet pas cette distinction, pas plus d'ailleurs que de préciser les intervalles de valeurs de ces influences.

Nous pouvons développer les composantes de l'opérateur d'impédance ζ sur un ensemble de fonctions de partitions $\mathcal{D}$ telles que :

$$\sum_i \mathcal{D}_i = 1 \tag{12}$$

A chaque paramètre caché d'environnement q est associé une fonction de partition $\overset{q}{\mathcal{D}}_i$. Nous pouvons alors écrire :

$$\zeta_{\alpha\sigma} = \overset{q_1}{\mathcal{D}}_1 \overset{q_2}{\mathcal{D}}_1 \dots \zeta_{\alpha\sigma}^{11\dots} + \overset{q_1}{\mathcal{D}}_1 \overset{q_2}{\mathcal{D}}_2 \dots \zeta_{\alpha\sigma}^{12\dots} + \dots \tag{13}$$

L'ensemble du système d'équations 11 et des définitions d'intervalles des fonctions de domaines pouvant être vu comme une variété.

7. "Cognition et Système" page 53

Ayant défini l'observabilité, il nous reste à aborder la contrôlabilité ou gouvernabilité en lien avec la prise de décision.

Vallée cite les techniques de commande optimale pour gouverner un système. Nous avons là une des clés de la boucle épistémo-praxéologique (BEP) de Vallée à savoir les processus de prise de décision. Dans le diagramme de blocs, la contrôlabilité intervient en partie par la boucle de rétroaction utilisant l'opérateur A comme en partie les opérations de sommation entre les termes. Nous pouvons discerner ici les processus de contrôles "automatiques" comme la rétroaction A des processus de contrôles impliquant un post-traitement plus ou moins complexe sous forme de jeux et une prise de décision. Vallée met clairement en avant ce second processus, le premier apparaissant trivial dans son mécanisme, même si sa mise en œuvre peut être compliquée. Notons entre parenthèse que parmi les processus de contrôles automatiques nous avons l'inertie des systèmes. A ce titre, 9 peut être réécrit :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \\ v_2 \end{bmatrix} - p \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{11} & 0 \\ & \\ 0 & \mathcal{L}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A & 0 \\ & \\ -C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \\ y \end{bmatrix} \tag{14}$$

Où $\mathcal{L}_{ij}$ est un tenseur d'inertie dont nous voyons qu'il s'oppose à l'impulsion imprimée par v_α.

C'est ici qu'apparaît tout l'intérêt de séparer et différencier les variables d'environnement v, q de celles d'états du système x. Car si nous pouvons influencer les variables propres x, nous ne pouvons pas en général influencer celles de l'environnement v, q, en tout cas pas dans la même dynamique. Même si le système influence son environnement, il est clair que ce n'est pas suivant les mêmes mécanismes que ceux suivant lesquels il peut influencer son propre fonctionnement. Ainsi l'humanité influence le climat sur la Terre, mais sans contrôler son influence ni sans doute même la comprendre encore, et sans en maîtriser l'impact en retour.

Sur le contrôle, il y a d'abord l'influence de la précision de l'observation et de la connaissance du bruit et des erreurs. Vallée aborde ce point dans le cadre de la commande optimale [8]. C'est vrai que les systèmes, surtout les systèmes naturels, optimisent leurs commandes de façon à utiliser au mieux les capacités de la machine biologique.

Prise de décision

Pour Vallée, les systèmes cybernétiques sont doués d'une chaîne observationnelle suivie d'une chaîne décisionnelle. Mais convaincu que les deux chaînes sont subtilement imbriquées, Vallée préfère parler d'une *chaîne pragmatique* incluant observation et décision. Nous avons déjà établi l'existence d'un opérateur d'observation θ. Celui-ci se complète alors d'un opérateur de décision δ qui s'applique à $\theta(\epsilon)$, ϵ étant un vecteur basé sur l'état x et l'environnement u, et ce dans la représentation "ABCD". Dans la représentation lagrangienne, l'opérateur d'observation agit sur des variables d'environnement observables

8. "Cognition et Système", page 24

u ou cachées q lesquelles modifient un opérateur d'impédance ζ qui agit sur les états x. Les états s'influençant eux-mêmes par l'intermédiaire de cordes d'interactions directes. L'opérateur d'observation rend les observables u effectives : v. Il s'agit dans ce formalisme d'une matrice : $v_\alpha = \theta_\alpha^k u_k$. Les variables cachées interviennent directement mais ne sont pas observables directement. Néanmoins leur rôle est toujours effectif. Comment va opérer en détail l'opérateur de décision ?

Pour Vallée, gouvernance, commande du système et prise de décision sont intimement liées. Les deux opérateurs θ et δ agissant sur la chaîne pragmatique $\delta\left[\theta\left(\epsilon\right)\right]$ induisent la commande du système et la prise de décision qui la précède k. Or Vallée rappelle que la prise de décision se base sur une observation dont nous avons vu qu'elle était imparfaite et qu'elle-même comporte une part de subjectivité qui fait que la correspondance entre mesure et décision n'est ni implicite ni complètement rationnelle. Nous incorporons ici les concepts de la théorie de la décision, vue comme théorie des jeux. Un point remarquable est que la décision tend à "lisser" des détails de la chaîne pragmatique. Cela se traduit par le fait qu'une même décision va résulter d'un ensemble de couples ϵ_α dont les différences sont trop à la marge pour engendrer des décisions différentes. C'est ici qu'il me semble que considérer les décisions comme des commandes issues du système, jointes aux commandes provenant de l'environnement (et de sa perception) est une considération légitime. Et si cela reformule les modèles proposés par Vallée, cela ne remet pas en question les mécanismes qu'il décrit. Nous allons voir que nous pouvons peut-être leur apporter une dimension supplémentaire.

La décision émerge d'un jeu. L'environnement en contact avec le système (quel qu'il soit) peut agir sur ce dernier suivant n interactions regroupées dans un ensemble de $\{n\}$ perceptions du système. Ce regroupement constitue déjà une discrétisation en classes de perceptions qui ne considère pas tous les détails des différentes sollicitations que peut provoquer l'environnement. Par exemple une main sur une surface trop chaude va se retirer, sans détailler la température exacte de la surface. Et que cette dernière fasse 60° ou 120° ne changera pas la décision et l'action.

Soit $v_1, v_2, \ldots, v_a$ les actions de l'environnement encore appelé "nature" dans le jeu ; à ces actions répondent les réactions possibles du système $y_1, y_2, \ldots, y_a$. Les actions sont issues des perceptions interprétées : $v_x = \theta\left(u_x\right)$. Les réactions sont des états visibles du système $y_x \in x^\sigma$. Pour chaque couple action-réaction (v_x, y_x) nous pouvons définir un gain du système, c'est à dire une conséquence positive ou négative pour le système vis à vis d'un certain objectif que veut atteindre le système, consciemment ou pas. Nous appelons G_v^y la matrice qui répertorie les couples actions-réactions et le gain associé (appelée *matrice des payoff* en théorie des jeux). Une fois cette matrice établie, nous cherchons à comprendre comment le système peut maximiser son gain. Dans le cadre du jeu un système dit "rationnel" veut maximiser son gain ce qui peut revenir à optimiser une commande, un effort, la sécurité, ou tout à la fois, etc.

La notion de rationalité pose que le joueur - ici le système - ne voudra pas perdre volontairement, c'est à dire agir pour minimiser son gain au lieu de le maximiser. Mais cette hypothèse touchant au psychisme est parfois très ambiguë et complexe à définir. En psychologie, la théorie des processus opposants peut par exemple expliquer les choix d'un joueur, choix qui pourraient ne pas paraître rationnels en première analyse. Pour illustrer cela considérons une personne choisissant des plats. Elle peut opter pour des plats très épicés qui à terme pourraient lui procurer des douleurs, mais la présence d'épices provoque physiologiquement l'émission par le corps d'une endorphine puissante. Ce sont ces endorphines qui provoquent la réaction opposée à celle que l'on aurait pu considérer comme "rationnelle", la personne étant inconsciemment "accro" à ces endorphines. Plutôt que de parler de personne ou de système rationnels, nous poserons que nous associons les choix du joueur à un profil psychologique identifié [9]. Nous pouvons sous l'hypothèse de cette connaissance, associer à chaque réponse du système une probabilité d'occurrence. Mais cette probabilité est bayésienne. Elle dépend de la connaissance du joueur système, de son vécu, de ses objectifs, de ses émotions, de ses capacités informatiques, etc., et elle dépend des actions de la nature. Il s'agit donc d'une probabilité du type :

$$P(y)_v \left[y_x \middle| \, v_x, \ldots \right] \tag{15}$$

Nous pouvons établir l'espérance de gain E_y du joueur système pour chacun de ses choix y :

$$E_y = G^v_y P(y)_v \left[y_x \middle| \, v_x, \ldots \right] \tag{16}$$

De toutes ces espérances de gains, le système va choisir une réaction (prendre une décision) k par l'intermédiaire d'un opérateur χ tel que :

$$k^w = \chi^{wy} E_y \tag{17}$$

cette réaction k étant associable à une commande v par l'intermédiaire d'un "opérateur pragmatique" ζ tel que :

$$v_\beta = \zeta_{\beta w} k^w \tag{18}$$

Lorsque nous comparons alors les deux expressions, sous la forme "ABCD" $\delta\left[\theta\left(\epsilon\right)\right]$ et lagrangienne $\zeta_{\beta w}\chi^{wy}G^v_y P(y)_v$, cela invite à considérer l'opérateur d'observation θ appliqué à la fonction $\epsilon = f\left(v_\alpha,\, y^\sigma\right)$ comme étant la probabilité bayésienne $P(y)_v \left[y_x \middle| \, v_x, \ldots \right]$, l'opérateur $\delta[\,]$ étant alors associé au produit $\zeta_{\beta w}\chi^{wy}G^v_y$.

9. parler de psychologie pour tout système peut sembler infondé. Certes pour un système cybernétique même doué d'une unité centrale très puissante, nous serons loin de l'étude du psychisme d'un être vivant. Mais nous pouvons accepter l'extension en considérant que si ce système est doué de décision face à des situations difficiles, c'est qu'il dispose de la capacité d'apprentissage et de raisonnements logiques. Ces raisonnements qui peuvent être en partie probabilistes peuvent s'apparenter à une pensée et nous pouvons alors parler en ce qui la concerne de psychisme. L'idée finalement est de pouvoir admettre que pour une même mission, deux algorithmes et unités centrales différents peuvent avoir deux réactions différentes. Les profils psychologiques pourraient être liés a minima aux réactions différentes des deux machines.

Cette identification me semble plus que légitime. Elle renvoie les couples ϵ vers des décisions k^w par l'intermédiaire d'une opération $\chi^{wy} G_y^v P(y)_v \, [\epsilon]$ que Vallée appelait "commande" $\mathcal{P}$ [10]. Le fait que l'environnement et l'action se retrouve synthétisés en une probabilité bayésienne montre bien leur lien inséparable. D'ailleurs nous avons parlé du gain du système, mais l'influence du système sur l'environnement apparaît explicitement via le gain de la nature. Le jeu n'est sûrement pas à somme nulle, la relation nature - système est beaucoup plus compliquée que cela. Mais nous voyons au travers de l'impact sur le climat que le gain de l'homme n'a pas été sans conséquences sur le gain de la nature. Nous traduisons ici exactement (du moins je l'espère) la pensée de Vallée qui était convaincu de cette action indissociable de l'environnement avec le système. Ce couplage va d'ailleurs au-delà de la simple inter-influence des deux systèmes à un instant donné. Cette influence se construit sur la durée et sur la co-évolution des deux joueurs.

La boucle Épistémo-Praxéologique

L'état du système peut finalement être identifié via un covecteur $\mathbf{V}$ dans le co-espace $(u_\alpha, \, \zeta_{\alpha\nu} x^\nu, \, \zeta_{\alpha w} k^w)$. L'inverse de l'opérateur $\zeta_{\alpha\nu}$ est appelé par Vallée *opérateur d'effection* et noté $\mathcal{A}_s$. Mais cet opérateur qui agit sur l'état courant et les états passés doit engendrer à son tour la chronique x^ν de l'évolution du système. Cet opérateur de plus, correspond aux écarts entre commandes et actions. Il renvoie le covecteur d'état $\mathbf{V}$ vers l'état x. Or la composante de $\mathbf{V}$ liée à x est $\zeta_{\alpha\nu}$ c'est pourquoi $\mathcal{A}_s = (\zeta_{\alpha\nu})^{-1}$. En notant de façon plus explicite maintenant $u_e = u_\alpha$ la direction liée à l'environnement et la perception, $u_a = \zeta_{\alpha\nu} x^\nu$ celle liée à l'action et $u_d = \zeta_{\alpha w} k^w$ celle liée à la décision nous aboutissons à la représentation figure 3 donnée par Vallée dans "Cognition et Système" page 89.

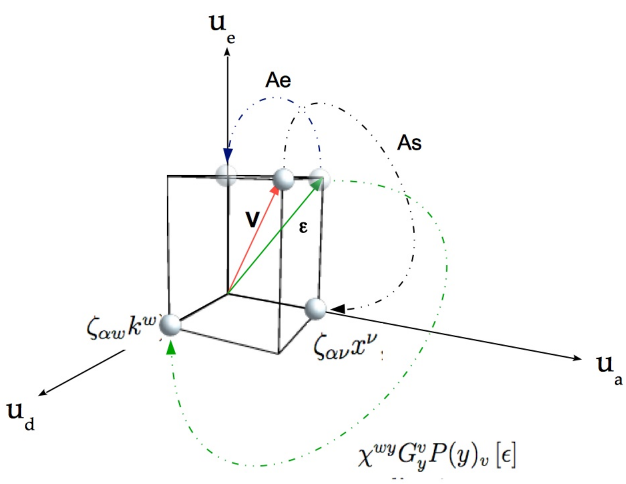

Figure 3 – Dessin de la boucle épistémo-praxéologique

10. "Cognition et Système", page 87

Robert Vallée avait bien noté la nécessité de faire apparaître la rétro-action du système sur l'environnement. Suite à une première représentation de la BEP sans l'opérateur $\mathcal{A}_e$ il complète le dessin avec l'ajout de cet opérateur. Nous avons vu que la nature en sortie de jeu peut aussi essayer de maximiser son gain. Elle va réagir en conséquence et une décision h^w de la nature pourrait modéliser sa réaction. Elle ne sera pas forcément du même ordre de réactivité ou intervenir via les variables cachées q. Mais nous aurions pu aussi décrire une décision de la nature via un opérateur $g_{\beta w}$ appliqué à h^w engendrant par suite une action. Nous aurions pu rajouter une direction au dessin pour faire apparaître cette nouvelle décision. Mais la BEP décrite par Vallée se situe dans le référentiel du système et non dans un référentiel global. Ainsi précise-t-il en conclusion [11] après avoir rappelé les trois chaînes observationnelle, décisionnelle et d'effection : *[...]. Ces trois chaînes n'en forment finalement plus qu'une, refermée sur elle-même, sans pour autant clore le système qui reste ouvert à l'environnement, c'est la boucle que nous avons appelé épistémo-praxéologique.* Nous présentons une nouvelle fois cette boucle figure 4.

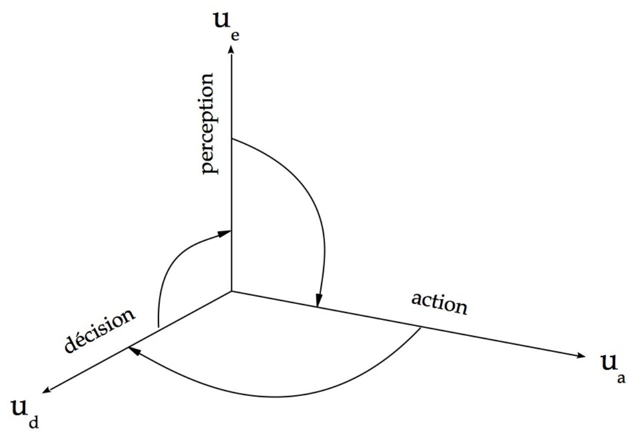

Figure 4 – La boucle épistémo-praxéologique

Robert Vallée avait bien noté la difficulté de l'usage des chaînes comme il les avait définies, entre autre les problèmes d'auto-référencement. L'observation-action ϵ pose le paradoxe de mélanger l'univers U avec le système via ses actions x, ce système faisant partie de l'univers U. La difficulté vient effectivement de la mise au même niveau des perceptions exogènes et des actions endogènes sous le formalisme "ABCD". Cette difficulté est levée dans le formalisme lagrangien. L'univers est bien la réunion de nombreuses variétés qui constituent chacune un système. Tous ces systèmes sont couplés et les perceptions conscientes ou inconscientes ne sont que les reports des énergies issues de ces couplages sur les systèmes qui les reçoivent. Tout couplage ayant sa réaction, le système

11. §7 dans "Cognition et Système", page 100

émetteur reçoit en retour une part de l'énergie réémise par le récepteur. Ces couplages sont des opérateurs qui relient actions et perceptions. De fait il n'y a plus de paradoxe car actions et perceptions ne se situent plus sur le même niveau de description. La causalité et l'entropie finissent de définir les contours de ces interactions qui sont forcément d'énergie et d'information finies.

La réunion en un vecteur commun de l'action et de la perception découlait de la culture d'automaticien de Vallée. Il est en effet usuel d'écrire les équations des systèmes dans le format ABCD où action et perception sont des variables de natures non différenciées.

Parenthèse sur la perception du temps

Je n'ai volontairement pas abordé en détail l'aspect temporel des processus. Vallée y consacre 6 pages dans "Cognition et Système" pour affiner la notion de perception. Un point important à mon sens est l'analyse probabiliste de l'existence d'un état à un instant t_0 quelconque. Du fait de bruits, de défauts dans la perception, la connaissance de la présence d'un état $x^{(p)}$ particulier à un moment donné est une probabilité, ou une densité de probabilité $\rho(x^{(p)})$. Vallée fait référence aux travaux de Wiener-Neumann (page 75) mais aurait pu aussi faire référence aux travaux de Kalman. Si nous associons une distribution gaussienne à ρ, l'écart type en est une image de la connaissance sur l'état comme une image de la capacité de perception ou d'observation de l'état. C'est donc une composante de la fonction d'observation. En poussant à la limite cette interprétation de la distribution, nous pouvons dire qu'un écart-type infini engendre une probabilité nulle en même temps qu'une présence toujours vraie de l'état considéré quel que soit l'instant d'observation. Cette répartition de la connaissance sur l'état en fonction du temps rejoint pour moi la notion *d'attention* que Vallée aborde plus tôt dans l'ouvrage mais aussi page 58 avec l'introduction d'un facteur d'attention b qui n'est autre que la fonction d'observation appliquée au temps. Les variables cachées, elles, ne sont de toute façon pas directement perçues. Elles obéissent à cette distribution d'intégrale unitaire, mais d'écart-type infini. Les variables exogènes observées ont un écart-type d'autant plus étroit que le système porte son attention sur leurs mesures. Nous obtenons ainsi une sorte de spectre des distributions associées à chacune des observations, image de la capacité du système à intégrer de multiples perceptions simultanément (ce que nous appellons aujourd'hui pour les systèmes cyber-physiques la "fusion de données"), à les filtrer (en retirer le bruit) et à les interpréter (fonction d'observation). Nous détaillons là des aspects intégrés dans les modèles précédents via des opérateurs complexes.

Parmi les perceptions il y a celle du temps. Cette perception particulière est intéressante car elle permet de comprendre l'évolution de la perception et de son influence comme il peut en être pour d'autres sens.

La perception de la durée du temp vue comme un paramètre d'une évolution est d'autant meilleure que cette perception est récente. Je cite ici Vallée *Le souvenir des perceptions passées s'estompe avec le temps*. Nous pouvons le comprendre en supposant que la mémoire retient les fonctions d'observations $\theta(\delta t)$ appliquées aux intervalles de temps, et que cette mémoire qui intègre ces événements perd de fait leur valeur absolue. Instantanément nous percevons la durée entre deux allers-retours d'une balle de tennis quand nous jouons au tennis. Mais le temps précédent est intégré avec tous les précédents. Si nous acceptons que cette fonction suit une équation différentielle du premier ordre (et je reprends ici en la modifiant, forçant le paramètre b à zéro, la démonstration de Vallée, "Cognition et Système", page 67) :

$$\frac{1}{\alpha}\frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = 0 \tag{19}$$

alors, si α est indépendant du temps (ce que nous pouvons supposer vrai au moins dans un intervalle pas très éloigné de l'instant courant) :

$$\theta(t) = e^{-\alpha t} \tag{20}$$

La fonction d'observation tend rapidement vers 0 suivant α. Or que signifie le cœfficient α ? Nous posons en 19 que la variation de la perception du temps est proportionnelle à la perception instantanée. La mémorisation de l'instant précédent s'ajoute à celle de l'instant courant avec une influence qui décroît suivant un paramètre τ. Au tennis, nous nous attendons à un temps de retour de la balle similaire à celui du coup précédent. Pour autant nous n'avons déjà pratiquement plus en mémoire le coup 2 temps en arrière. Voilà ce que veut traduire cette équation. Le temps objectif n'est pas mesurable. La perception du temps que nous exploitons est une perception événementielle, qui court d'intervalles en intervalles de temps. Mais notre physiologie perçoit elle d'autres temps dont celui du vieillissement, etc.

Dans l'équation 19 j'ai forcé le terme $b(t)$ à zéro parce que la fonction d'observation ici notée b, si elle change la loi sur θ, ne modifie pas par contre le principe du raisonnement. Elle est juste vue comme une condition initiale à un moment d'observation.

La perception du temps et la vitesse d'action vont bien sûr intervenir également pendant le jeu. C'est même un paramètre majeur du jeu. En situation de risque, le joueur va prendre des décisions sous la pression d'un temps de réflexion imposé et court, et peut de fait augmenter des probabilités de gains négatifs sous l'effet de cette pression. La probabilité bayésienne tient compte ainsi du temps perçu. Mais ce paramètre supplémentaire ne modifie pas l'expression du lagrangien que je propose et sur la base duquel j'ai analysé la recherche de Vallée.

J'ai cité Kalman car les systèmes vivants anticipent les évolutions de l'environnement sur la base de leur connaissance de son histoire et des chroniques passées. Et nous avons là une autre illustration pragmatique peut-être de la déformation de la perception du temps. Les plantes réagissent rapidement à des variations de température, pensant arriver la nouvelle saison. Elles n'ont pas, pas plus que nous, mémorisé le temps réel écoulé pour interpréter un passage temporaire de variation comme effectivement anormal et ne remettant pas en cause la saison courante. Elles ne développent pas de stratégie de "tenues" dans un état courant pour attendre le "vrai" changement de saison. La durée absolue des saisons n'est pas perçue. Seule sont perçues les ambiances associées à ces saisons et la durée apparente des saisons en est déduite.

Un point remarquable, mais qui avait déjà été fortement développé par Wiener, est que les raisonnements avancés sont applicables aux systèmes cyber-physiques récents. Nous pourrions penser qu'un tel système, pouvant dater ses données, garde la perception du temps sans être sensible à l'effet d'estompe dont parle Vallée. Mais avoir une capacité de mémorisation non volatile ne signifie pas garder la perception du vécu. Ainsi ce système pourrait revenir en arrière pour se souvenir d'écart de temps dans une situation de trajectoire et d'environnement donnés, mais sa trajectoire étant très probablement différente de la précédente, sa perception en sera modifiée. Le retour au souvenir pourra constituer une aide dans le calcul de corrections, de régulations, etc., mais pour autant la perception connue dans le passé ne pourra pas être retrouvée.

Conclusion

Robert Vallée a abordé de très nombreux points de la modélisation des systèmes dans son ouvrage "Cognition et Système - essai d'épistémo-praxéologie". Chaque page renferme une réflexion profonde sur les notions fondamentales de perception, action, décision, interprétation, modélisation, information, communication, etc. Vallée a posé de grands principes mathématiques qui sont autant de briques indispensables à fonder à terme une théorie systémique robuste. Inspiré par Wiener, mais aussi par de très nombreux auteurs montrant par là sa très large culture du sujet, Vallée construit sa réflexion autour de raisonnements d'automatique clairs qui débouchent sur sa conception d'une boucle épistémo-praxéologique. Il enrichit la construction de cette boucle au fur et à mesure des pages pour arriver à une première définition comme une conclusion. Comme tout grand chercheur Robert Vallée liste les difficultés, les paradoxes et les progrès restant à faire autour du concept qu'il propose. C'est en hommage et respect pour ce fondateur que j'ai tenté dans cet article de respecter sa pensée, en réalisant l'exercice difficile qui consiste à prolonger ses réflexions pour faire mûrir sa proposition innovante. Le sujet de recherche abordé par Vallée est d'un très haut niveau et réclame beaucoup d'expérience pour complètement appréhender toutes ses analyses. Je ne pense pas qu'il soit possible de s'accaparer la pensée d'un chercheur, de revivre la succession de ses raisonnements. Mais il faut se les approprier pour les intégrer de façon personnelle et modestement tenter de continuer de gravir la pente dont le chemin a été indiqué par ce précurseur. Il me semble que le livre de Robert Vallée devrait constituer une référence de lecture pour tous les automaticiens qui s'intéressent à la systémique.

La boucle épistémo-praxéologique de Vallée invite à une réflexion fondamentale sur la façon dont les systèmes construisent leur stratégies d'actions. Le fait d'introduire la décision comme composante de la boucle est une proposition qui me semble majeure, même si, touchant à des sujets très intimistes de la recherche, son retentissement restera discret. Usuellement, nous identifions dans un système les capteurs, les actionneurs et l'unité centrale. Vallée remplace l'unité centrale par la décision. Or cette décision, il le montre dans ses raisonnements, est l'aboutissement du travail d'une unité centrale avec sa mémoire, ses erreurs, son attention, etc. Elle apparaît comme la synthèse d'une quantité d'organes incluant l'unité centrale, mais dépassant de loin cette seule entité. Et nous voyons bien aujourd'hui l'aspect fondamental de la décision, bien au-delà des calculs, de la mémoire et des théories. Ces derniers ne sont que des éléments qui conduisent à une décision.

Robert Vallée nous démontre que les systèmes cybernétiques sont capables de décision, mais que cette décision va bien au-delà de simples algorithmes de choix plus ou moins automatisés et a priori et que, de plus, cette décision est intrinsèquement liée à la perception et à l'action. En cette démonstration réside toute la beauté de sa boucle épistémo-praxéologique.

Espérons que les étudiants en automatique ou en biologie, pour ne citer que les premiers intéressés dans les cursus classiques, soient sensibles à cette synthèse. Il est en tout cas un domaine qui progresse énormément ces dernières années et semble suivre les réflexions de Vallée : la biologie et les études sur le comportement animal. Nous ne regardons plus les poissons rouges en supposant que parce qu'il ne font pas de signes évidents de reconnaissance, il n'ont pas de mémoire. La mesure d'émission d'hormones dans leur environnement à démontré qu'ils avaient une mémoire de plusieurs jours, minimum ... Nous ne pensons plus que les gorilles sont incapables de s'auto-identifier, car dans leur environnement ils ne doivent pas regarder en face leurs congénères. Le test très humain du miroir n'est pas pertinent à leur égard. Etc. Les réactions, les évolutions des animaux, incluant l'homme, sont d'une incroyable diversité. Et si l'on ne prête pas une attention toute particulière et systémique à l'analyse de l'objet de la recherche et de ses couplages avec l'environnement, les conclusions de cette recherche seront erronées. D'une part parce que l'interprétation des perceptions sera incomplète voire totalement dépourvue de sens, ne considérant pas l'impact de l'environnement. D'autre part parce que l'interprétation des actions restera trop anthropocentrée, et qu'elle négligera le couplage fondamental entre l'objet et son environnement ; l'action pouvant porter sur l'environnement et non en direct vers l'interlocuteur.

Robert Vallée avait bien compris cette intrication naturelle et ses propositions resteront comme de premières tentatives significatives pour traduire ce couplage majeur entre perception, action et décision : couplages de la boucle épistémo-praxéologique. Le rôle majeur de la décision se pose en disant que le but de l'automatique n'est plus la commande optimale, mais la maximisation du gain dans le jeu qui conduit à la décision et donc à la commande. Le système n'est plus centré sur une unité de traitement qui cherche à optimiser ses commandes, mais sur un système plus grand et couplé au sein duquel le système cherche à maximiser ses gains. L'unité centrale n'est plus qu'une composante des tactiques qui permettront d'essayer d'atteindre ce but.