

Modélisation du contrôle temporel du comportement sous contingences de renforcement : Une revue

*(Modeling the temporal control of Behavior under contingencies of reinforcement:
A review)*

Céline Clément*, Jean-Claude Darcheville, Vinca Rivière****

Université Charles de Gaulle, Lille 3

Il est banal de constater que le comportement humain, mais aussi animal, est sensible aux propriétés temporelles de son environnement. La vérification de l'hypothèse d'un principe universel se heurte chez l'humain aux interférences possibles avec des processus cognitifs propres à l'espèce. S'intéresser à la compréhension de ce phénomène chez l'animal devrait permettre d'échapper à cette difficulté. L'étude expérimentale chez ce dernier a privilégié les méthodologies issues des différentes formes de conditionnement. Les modélisations qui ont été proposées ont donc tenté de rendre compte des données obtenues dans ces environnements expérimentaux.

Deux approches majeures peuvent être distinguées en ce qui concerne la modélisation et l'analyse des données dans les programmes temporels opérants. La première approche se donne pour objectif de modéliser les propriétés molaires des états stables des comportements. Les modèles se distingueront essentiellement par le degré avec lesquels leurs auteurs infèrent l'existence de processus cognitifs. La seconde approche, sur laquelle nous insisterons plus particulièrement, modélise quant à elle l'acquisition de la régulation temporelle et son état stable. Il s'agit de comprendre comment la régulation temporelle s'opère en temps réel. Ces modèles peuvent être qualifiés de dynamiques puisqu'ils doivent rendre compte du comportement moment par moment. Nous distinguerons les modèles dynamiques linéaires et non linéaires, ces derniers s'inscrivant désormais dans le champ de la psychologie.

On peut s'interroger sur la coexistence de ces deux approches. Est-il envisageable

* Céline Clément. Université Louis Pasteur Strasbourg. Faculté de Psychologie et des sciences de l'éducation. 12, Rue Goethe. F 67 000 Strasbourg

** URECA - Université de Lille 3

qu'elles puissent à terme se réduire en un seul modèle général ? Afin de réussir cette tâche nous pensons qu'il est nécessaire de rendre compte de l'installation de cette propriété du comportement. Nous tenterons de justifier ce que nous considérons comme une nécessité en montrant qu'elle peut fournir des solutions aux difficultés des modèles à priori molaires. Il ne s'agira donc pas d'explicitier les différences entre les modèles, mais plutôt d'exposer leurs caractéristiques, celles-ci étant à l'origine des difficultés qu'ils rencontrent.

LES MODÈLES QUASI-DYNAMIQUES

Les modèles présentés ci-après doivent rendre compte des propriétés molaires des comportements. Les deux propriétés mises en exergue sont la précision moyenne et la stabilité du coefficient de variation lors de l'augmentation de l'intervalle de temps à estimer (Gibbon, 1977). Il s'agit de préciser comment le temps estimé est transformé en comportement. Ces modèles sont considérés comme « quasi-dynamiques » (Staddon, 1988). En effet, ils permettent de discuter de l'équilibre d'un comportement, mais pas des courbes d'apprentissage, des statistiques séquentielles ou encore des réponses qui suivent des changements de conditions expérimentales. Les deux procédures habituellement utilisées sont le programme à intervalle fixe (Fixed Interval Schedule ; FI) (Skinner, 1938) et la procédure du pic (Peak Interval Procedure ; PI) (Catania, 1970 ; Roberts, 1981). En FI, une réponse n'est renforcée que si elle est émise après qu'un intervalle de temps fixé par l'expérimentateur se soit écoulé de puis le précédent renforcement. En situation de peak procédure, des essais tests sont mêlés aux essais FI. Ils durent plus longtemps que les essais FI et s'arrêtent automatiquement sans présentation du renforçateur. Qu'il s'agisse du FI ou de la peak procédure, les changements de la variable dépendante sont analysés en fonction de son niveau moyen et non essai par essai.

Les auteurs invoquent tous l'hypothèse selon laquelle un oscillateur serait à la base des phénomènes de discrimination temporelle. Ceci n'est pas nouveau : Treisman (Treisman, 1963) avait évoqué cette hypothèse dans le cadre de la perception du temps et Ashton (Ashton, 1976) dans celui du contrôle moteur, arguant du fait qu'il est improbable que l'environnement puisse donner au sujet apprenant une base de temps ou un système de marqueur. Par ailleurs, ces modèles infèrent - à divers degrés - des structures cognitives sans lesquelles il ne pourrait être rendu compte des propriétés mathématiques observées. Les deux modèles les plus aboutis sont la Scalar Expectancy Theory (SET) et la théorie comportementale du temps (Behavioral theory of Timing ; BeT).

SCALAR EXPECTANCY THEORY

Le modèle du traitement de l'information temporelle postule qu'au moins trois processus cognitifs indépendants constitueraient le système permettant le traitement de l'information temporelle : une horloge, une mémoire, un comparateur (Church, 1984). La « durée » est donc considéré ici comme tout autre paramètre d'un stimulus (taille, intensité, couleur)(Michon J.A., 1975).

Parmi les modèles postulant l'existence de mécanismes chronométriques internes afin de traiter l'information temporelle, le modèle de la SET développé par Church et ses collaborateurs (Church, 1984 ; Church, Miller, Meck, et Gibbon, 1991 ; Gibbon et Church, 1990) constitue la référence contemporaine (Monfort, Perbal, Ferrandez, et Pouthas, 1998). Le modèle de traitement de l'information de Church (figure 1) est une interprétation du processus de temps scalaire (Gibbon, 1977) qui répondrait aux quatre objectifs que doit, selon lui, se fixer une théorie du temps : développer une seule théorie du temps pour l'humain et toute autre espèce animale (1), qu'il s'agisse de la perception ou de la performance (2), pour toutes les échelles de temps (3), et pour des durées fixes ou aléatoire (4)(Church, 1997).

Lors de la première étape - qui se déroule au niveau de l'horloge - l'apparition d'un stimulus provoque la fermeture d'un interrupteur qui envoie les impulsions générées par un oscillateur vers un accumulateur. Celui-ci stocke les impulsions générées depuis la mise en route de l'interrupteur. Ce processus permettrait la transformation du temps physique en temps psychologique et l'on postule une relation directe entre le nombre d'impulsions comptabilisées et la durée subjective de l'intervalle de temps. La relation entre le temps stocké et le temps réel est linéaire. Le temps psychologique est en mesure d'être traité lors des étapes ultérieures par des instances telles que la mémoire et un preneur de décision analogues à ceux des modèles classiques de traitement de l'information. La seconde étape met donc en jeu les processus mnésiques. Les jugements temporels sont réalisés en comparant le nombre d'impulsions stockées en mémoire à court terme avec le temps de référence stocké en mémoire à long terme. Ce temps de référence correspond à une valeur pour laquelle une réponse a été renforcée précédemment. La troisième étape concerne l'application d'une règle particulière de décision, construite à partir de l'histoire du sujet. Quand la différence entre le temps passé et une valeur extraite de la mémoire (ou sa différence relative) dépasse un seuil fixé, l'animal passe alors d'un état de « non-réponse » à un état de « réponse ».

Ainsi, pour que la comparaison entre temps passé et temps présent soit toujours possible trois processus parallèles au moins interviennent de façon concurrente : la recherche en mémoire, l'interception du temps à mesurer et la sélection d'un seuil de réponse (Gibbon et Church, 1992). Prenons l'exemple de la peak procédure. La SET prédit que le temps subjectif augmente de façon linéaire pendant un essai. Les sujets commencent à répondre avec un débit de réponse élevé lorsque la représentation subjective

du temps qui s'écoule depuis le début de l'intervalle est assez proche de l'intervalle de temps stocké en mémoire et précédemment renforcé. Le débit élevé persiste jusqu'à ce que cette représentation excède la durée stockée en mémoire.

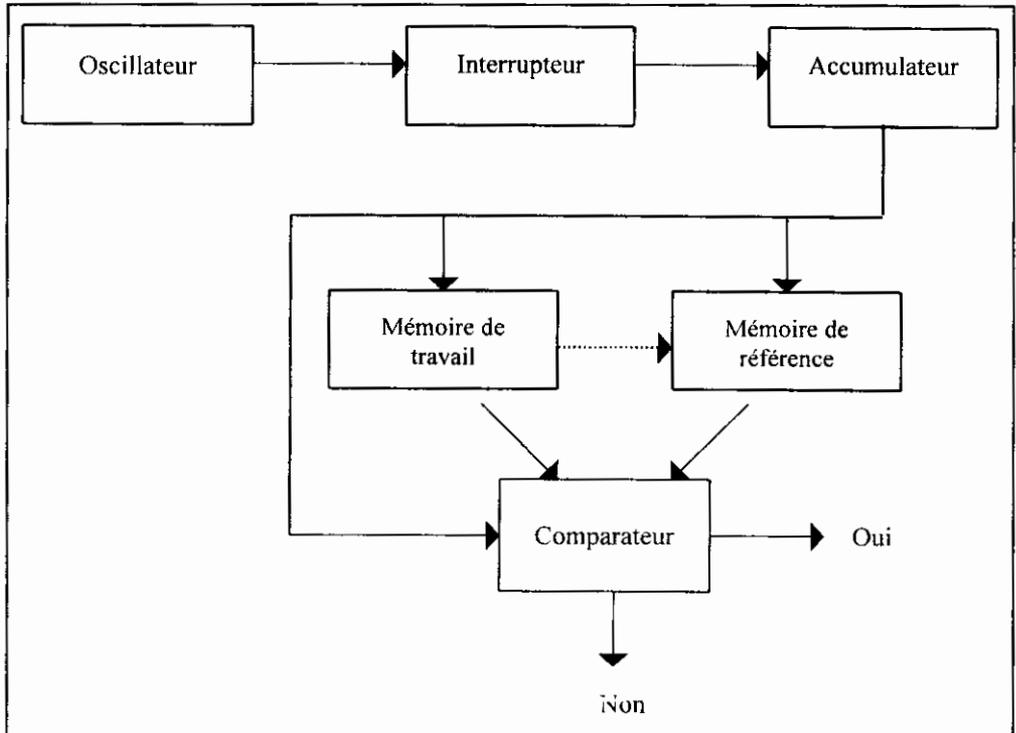


Figure 1. Modèle de traitement de l'information temporelle. D'après Gibbon, Church & Meck (1984).

Il existe une variabilité potentielle du débit oscillateur (à l'intérieur d'un essai ou entre ceux-ci), dans la latence de l'interrupteur pour démarrer et arrêter l'oscillateur, dans la translation du nombre d'impulsions stockées dans l'accumulateur vers la mémoire de référence, et enfin dans le seuil lui-même (Gibbon, Church, et Meck, 1984). Par un souci de commodité, ces variations sont supposées suivre une distribution normale. La propriété scalaire proviendrait des différentes sources de variance de ces différents processus (Gibbon et al., 1992).

Plusieurs versions ont été développées ultérieurement (Gibbon, 1991) ; elles n'ajoutent rien de fondamental à la version de Church (Church, 1984) à l'exception de la version connexionniste (Church et Broadbent, 1990 ; Church et Broadbent, 1991).

Celui-ci a été développé afin de résoudre certains des problèmes rencontrés par le modèle de traitement de l'information. Certaines des activités cognitives, postulées par ce modèle, telles que l'accumulation du temps, sont difficilement conciliables avec les mécanismes biologiques connus. Par ailleurs, l'information devant être stockée en mémoire au fur et à mesure des essais demanderait une mémoire à la capacité extrêmement importante.

Le modèle connexionniste est un développement de la théorie du temps scalaire qui a de nombreuses propriétés structurelles communes avec le modèle de traitement de l'information. Tout comme lui, il est constitué d'une horloge, d'une mémoire de travail, d'une mémoire de référence et d'un comparateur. Il existe trois différences essentielles entre ces deux modèles.

En premier lieu, l'horloge interne n'est pas constituée d'un oscillateur, d'un accumulateur et d'un interrupteur, comme c'est le cas dans le modèle de traitement de l'information. L'oscillateur est remplacé par une série de onze oscillateurs. Chacun d'entre eux détermine une période de temps différente (0,2 ; 0,4 ; 0,8 ; 1,6 ; 3,2 ; 6,4 ; 12,8 ; 25,6 ; 51,2 ; 102,4 ; 204,8 secondes). Le temps écoulé est représenté par les états des oscillateurs sous forme de vecteur. Celui-ci permet d'estimer des durées allant de la seconde à plusieurs minutes. L'accumulateur est remplacé par une série d'indicateurs, également au nombre de 11 (figure 2). Chacun d'entre eux ne compte pas le nombre de cycles mais enregistre simplement la phase de l'oscillateur qui lui est associé.

La mémoire de travail et la mémoire de référence sont remplacées par des matrices de poids. Bien qu'elles aient une taille finie, celles-ci sont en mesure d'accumuler un nombre infini d'informations à propos des différentes valeurs du temps.

La dernière différence entre les modèles est le processus engendrant la décision concernant le temps à estimer. Dans le modèle connexionniste, le vecteur représentant le temps actuel est comparé avec le vecteur de la matrice de la mémoire.

Le modèle connexionniste proposé n'est pas strictement parallèle puisque certaines propriétés sérielles persistent. En fait, la nature du stockage de l'information est modifiée sans que les processus par lesquels le temps est estimé ne le soient. Il y a toujours les mêmes étapes de stockage, de comparaison, de prise de décision. Ce n'est pas non plus un véritable réseau de neurones car, comme le soulignent les auteurs, aucune hypothèse n'est émise sur les bases neurologiques sous-jacentes (Church et al., 1990).

Bien que le gain économique soit évident, en terme de mémoire, cela pourrait se traduire par une perte de la précision de l'estimation du temps (Wearden et Doherty, 1995) : le modèle peut engendrer des représentations du temps identiques alors que les temps mesurés sont différents. Pour pallier à cette difficulté, les auteurs proposent l'ajout de règles génératrices de réponses qui auraient selon eux l'avantage théorique de rendre compte des règles de réponses observées sous FI et dans d'autres programmes.

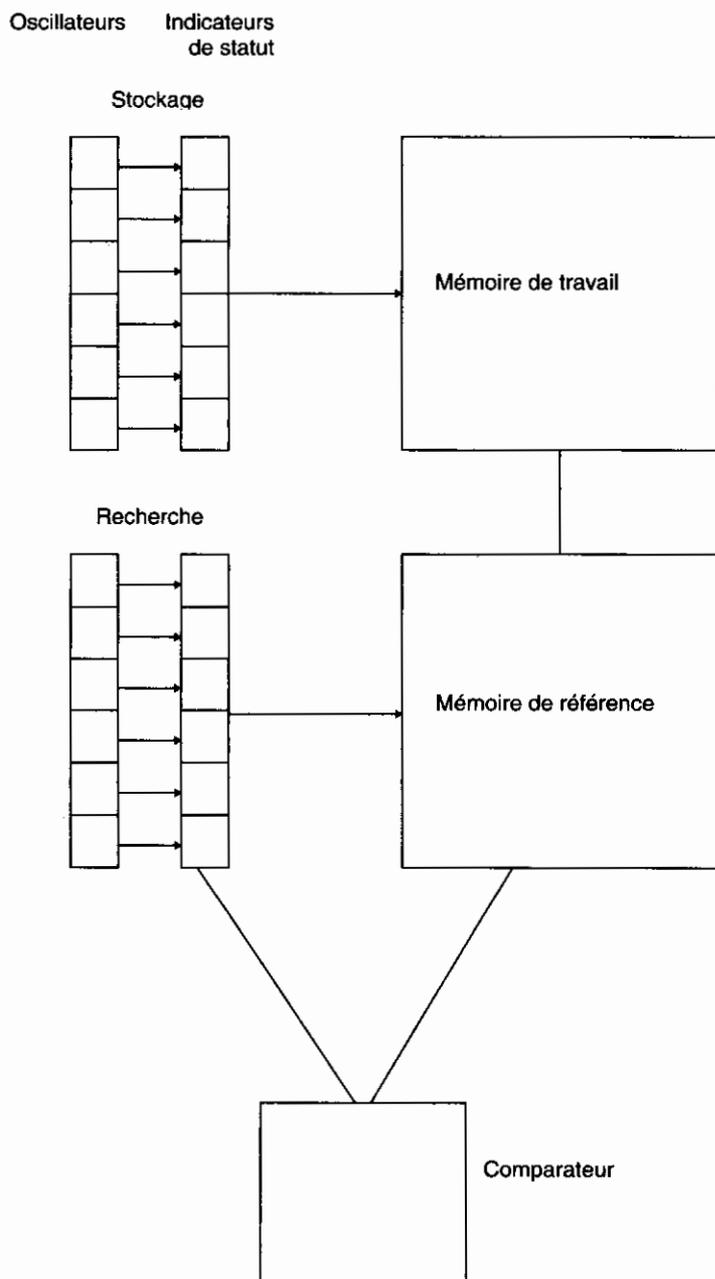


Figure 2. Modèle connexionniste du traitement de l'information temporelle. D'après Church & Broadbent (1990).

Bien qu'ayant pallié l'une des difficultés fondamentales du modèle de traitement de l'information temporelle, la capacité mnésique, on peut penser que ce modèle tombe dans les travers habituel des modèles cognitifs. Lorsque les structures cognitives inférées se révèlent insuffisantes afin de rendre compte du comportement, comme le soulignent Wearden et Doherty, une nouvelle structure est ajoutée au modèle.

THÉORIE COMPORTEMENTALE DU TEMPS.

A la différence de la SET, la BeT va renoncer aux comparaisons entre des durées, aux représentations mnésiques et aux transformations subjectives. Si ce modèle est plus parcimonieux, il admet néanmoins l'existence d'un horloge interne. Un oscillateur se situerait à l'intérieur de l'organisme et le compteur, serait la propre capacité de l'animal à utiliser divers états d'action (Killeen et Fetterman, 1988). Alors que la SET s'est développée dans l'esprit des modèles de traitement de l'information en psychologie cognitive, la théorie comportementale du temps s'est développée dans celui des théories quantitatives du comportement (Church, 1997). Aussi, l'accent est-il mis sur les comportements et les stimulus observés, en particulier les comportements adjoints (Killeen et al., 1988). Sont définis ici comme comportements adjoints les comportements intérimaires ou terminaux, émis ou déclenchés (i.e. répondants).

Dans un intervalle inter renforcement (IRI), différents comportements peuvent être observés, ce qui est décrit comme une « cascade de comportements » (Killcen, 1975). Ceux-ci peuvent être classés en comportements intérimaires et comportements terminaux (Staddon et Simmelhag, 1971). Les comportements intérimaires peuvent apparaître dès l'obtention du renforçateur et persister dans toute la première partie de l'intervalle. Les comportements terminaux apparaissent dans la partie plus tardive de l'intervalle et persistent jusqu'à l'obtention du renforcement.

La théorie comportementale du temps s'appuie sur ces observations et postule que l'animal s'engage dans une séquence de comportements adjoints (i.e., marche, sauts, coups de becs en dehors de la clé) qui serviraient de stimulus discriminatifs aux réponses ultérieures. Les comportements seraient médiateurs du contrôle temporel. Prenons l'exemple du programme de renforcement différentiel des débits de réponse lent (Differential Reinforcement of Low Rate ; DRL) où une réponse n'est renforcée que, si et seulement si, elle suit la réponse précédente d'un intervalle de temps minimal. La précision de la performance dans ce programme est améliorée, chez l'animal, si celui-ci est en mesure d'engager des comportements médiateurs (Laties, Weiss, et Weiss, 1969)(pour une discussion générale voir Richelle et Lejeune, 1980), mais en aucun cas ils n'émergeraient parce qu'ils aident à l'estimation du temps (Killeen et al., 1988).

Les impulsions d'un oscillateur - situé à l'intérieur de l'organisme - seraient la cause efficiente du comportement puisqu'elles sont la cause des transitions entre les états comportementaux. Ces états correspondent à chaque classe des réponses adjointes. Chacun d'entre eux peut être de durée variable et les réponses associées avec l'état

peuvent apparaître à différents débits, y compris un débit de zéro. Le temps entre les impulsions devrait dans le cas le plus défavorable être exponentiellement distribué (Fetterman et Killeen, 1991 ; Killeen, 1991), ce qui implique que la probabilité d'être dans un état particulier au temps t est décrite par la fonction de densité de la distribution de Poisson :

$$p[N(t) = n] = \frac{[(t/\tau)^n e^{-t/\tau}]}{n!} \quad \text{Equation 1}$$

où $p[N(t) = n]$ est la probabilité que le nombre d'impulsions enregistrées au temps t soit égal à n et τ est le temps moyen entre les impulsions. Cette fonction donnerait une bonne description de la distribution des comportements adjoints tout au long de l'intervalle entre les renforcements (Hanson et Killeen, 1981). Dans l'une des versions ultérieures de la BeT (Killeen et Fetterman, 1993), une période de latence est insérée lors de la transition entre états (figure 3), afin de répondre aux critiques selon laquelle la BeT ne parvenait pas à rendre compte des corrélations négatives observées, en situation de peak procédure, entre le début d'une activité et la durée de celle-ci (Gibbon et al., 1992).

La période de l'oscillateur t est directement proportionnelle au temps moyen entre les renforçateurs, T (Killeen et al., 1988):

$$\tau = kT \quad \text{Equation 2}$$

Cette propriété permet à la moyenne et l'écart-type de la distribution de varier proportionnellement avec l'intervalle de temps à estimer (Hanson et al., 1981). De fait, la propriété scalaire est vérifiée puisque le coefficient de variation est stable quelque soit l'intervalle de temps à estimer. L'une des questions essentielle à propos du modèle concernera donc le débit de cct oscillateur ($1/\tau$). Celui-ci dépendrait en particulier du débit du renforcement : l'augmentation de ce dernier augmente la vitesse de l'oscillateur (Killeen et al., 1988). De nombreuses études ont montré que la densité du renforçateur affecte la vitesse de l'oscillateur (Bizo et White, 1994a ; Bizo et White, 1994b ; Fetterman et al., 1991 ; Fetterman et Killeen, 1995 ; Killeen, 1991 ; MacEwen et Killeen, 1991 ; Morgan, Killeen, et Fetterman, 1993 ; Raslear, Shurtleff, et Simmons, 1992). A l'augmentation de la densité du renforçateur répond une augmentation du débit de l'oscillateur sans qu'une relation strictement proportionnelle ne soit trouvée, contrairement à ce que prédit la théorie (Bizo et al., 1994a ; Bizo et al., 1994b ; Fetterman et al., 1991). Les résultats d'autres travaux divergent complètement de la théorie puisque les périodes de l'oscillateur augmenteraient alors que le débit de renforcement est constant (Bizo et White, 1997). Enfin, notons que le niveau d'activation modifierait également la vitesse de l'oscillateur (Killeen, Fetterman, et Bizo, 1997).

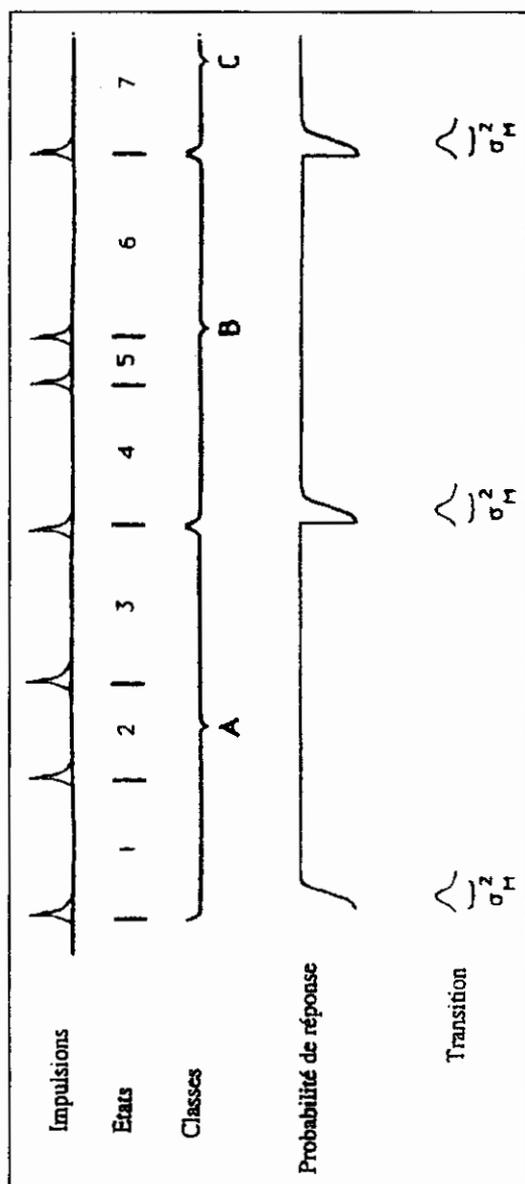


Figure 3. Schéma des versions simples et augmentées de la BeT. Chaque impulsion de l'oscillateur fait passer l'animal d'un état à un autre. Plusieurs de ces états peuvent être associés avec des variantes du même comportement. Les trois premiers sont ainsi associés avec une classe de réponses A, etc.. Dans la version la plus simple, la transition est considérée comme instantanée. La version modifiée considère que cette transition prend du temps, ce qui amène une nouvelle source de variance (ligne inférieure) (Killeen & Fetterman, 1993).

A propos des états comportementaux qui devraient permettre la discrimination du temps, Machado (Machado, 1997) souligne que rien ne permet de justifier qu'en situation de FI et de peak procédure il puisse être considéré qu'un état ou parfois un sous-ensemble d'états deviennent conditionnés à la réponse opérante (Killen et al., 1997).

Ce modèle est par ailleurs confronté à une difficulté commune aux modèles de processeurs temporels supposant l'existence d'un oscillateur générant des impulsions périodiques. Les fréquences de ceux-ci varient sous l'action de divers facteurs dont le niveau d'activation, la motivation, la quantité d'attention allouée aux paramètres temporels de la tâche, etc. (Church, 1984 ; Fetterman et al., 1991 ; MacEwen et al., 1991 ; Meck, Komeily-Zadeh, et Church, 1984). S'il n'est pas question d'horloge biologique mais d'horloge interne le plus souvent constituée d'un oscillateur, d'un chronomètre et d'un compteur, il est évident que l'on recherche un substrat cérébral particulier à l'oscillateur (Gibbon et al., 1984 ; Haight et Killen, 1991 ; Killen et al., 1988). Des études comportementales, lésionnelles et pharmacologiques chez l'animal et des études neuropsychologiques chez l'humain (Malapani, Rakitin, Levy, Meck, Deweer, Dubois, et Gibbon, 1998) ainsi que l'imagerie cérébrale (Monfort et al., 1998) auraient permis de préciser les zones cérébrales impliquées dans le traitement de l'information temporelle (Hinton et Meck, 1997) et seraient autant de preuves empiriques des processus postulés. Cela permettrait de préciser le modèle initial. Ainsi, l'étude du comportement d'un patient amnésique suggère que « les systèmes de mémoire impliqués dans l'estimation de durées seraient fonction, à la fois du type de tâche temporelle employée (reproduction ou production) mais également des durées à évaluer (courtes, longues, fréquemment employées ou arbitraires) » (Monfort et al., 1998).

Les modèles tels que la SET ou BeT permettent une description du comportement après une exposition prolongée de l'animal aux programmes de renforcements basés sur la composante temporelle. Bien qu'un ensemble de travaux montre que la discrimination temporelle puisse apparaître rapidement (Higa, 1996 ; Higa, 1997b) (Darcheville, Rivière, et Clément, 1999 ; Meck et al., 1984), les modèles quasi-dynamiques se focalisent sur une patron de réponse stable qui se développerait lentement. Ainsi, il n'est pas rare que les sujets soient exposés à plus de 30 sessions par condition (Cheng et Westwood, 1993 ; Meck et Church, 1984 ; Schneider, 1969). Il s'agit également pour la BeT et la SET de modéliser la propriété scalaire, sachant que la portée de celle-ci semble limitée à la fois chez l'animal (Zeiler, 1999 ; Zeiler et Powell, 1994) et chez l'humain (Darcheville, Rivière, et Wearden, 1992 ; Darcheville, Rivière, et Wearden, 1993 ; Rivière, 1992 ; Zeiler, Scott, et Hoyert, 1987). De même, bien que la SET permette des prédictions essai par essai en situation de peak procédure (Gibbon et al., 1992), celles-ci restent médiocres. Pour rester en cohérence avec les données, le modèle doit être systématiquement modifié (Staddon et Higa, 1999). Enfin, des auteurs,

(Higa, Wynne, et Staddon, 1991 ; Machado, 1997 ; Staddon et al., 1999) s'accordent à dire que ces modèles ne permettent pas de rendre compte des processus d'acquisition du contrôle temporel, ni de résoudre le problème de l'assignement du crédit, c'est à dire comment le système identifie les marqueurs temporels. Ne serait-ce pas le postulat de base, l'existence d'un oscillateur qui est la cause des faiblesses de ces modèles ?

LES MODÈLES DYNAMIQUES LINÉAIRES DE L'ACQUISITION DU CONTRÔLE TEMPOREL

Des modèles permettant de rendre compte de l'acquisition de ce contrôle temporel chez l'animal vont donc être développés. Machado (Machado, 1997) s'attache à développer un modèle dynamique de l'acquisition du contrôle temporel en insistant sur le processus renforcement-extinction qui module l'association entre les états et la réponse opérante. Quant à Higa, Staddon et leurs collaborateurs (Higa et Staddon, 1997 ; Higa, Thaw. et Staddon, 1993 ; Higa et al., 1991), ils s'intéressent particulièrement à la description et à la modélisation de la dynamique de l'acquisition du contrôle temporel, particulièrement lorsque celui-ci est rapide ou inhabituel. Les modèles développés vont néanmoins s'accorder sur un point important : une horloge n'est pas nécessaire à l'estimation du temps.

MODÈLE DE L'APPRENTISSAGE DU CONTRÔLE TEMPOREL (LEARNING TEMPORAL CONTROL ; LET)

Selon Machado (Machado, 1997) les défis que doit relever un modèle de l'apprentissage du contrôle temporel sont au nombre de trois : (1) décrire le comportement en temps réel, ce qui signifie parvenir à établir comment le renforcement joue son rôle puisqu'il est admis que le renforçateur est une des variables permettant de contrôler le comportement dans les programmes temporels opérants (Ferster et Skinner, 1957) ; (2) spécifier comment les processus de régulation temporelle se traduisent sur le comportement observable ; (3) décrire correctement l'état stable qui devrait vérifier la propriété scalaire. Le modèle développé est directement issu des travaux de Killeen et Fetterman (Killeen et al., 1988 ; Killeen et al., 1993). Il s'agit de donner à la BeT une règle d'apprentissage explicite et préciser la façon dont la régulation temporelle se traduit sur le débit de réponse ou sur la probabilité de réponse.

La figure 4 présente la structure de base du modèle où l'on distingue trois composantes principales : une organisation sérielle des comportements, des liens d'association vectoriels des états comportementaux à la réponse opérante, et la réponse opérante elle-même. La structure sérielle est envisagée parce qu'elle est intuitivement la plus simple.

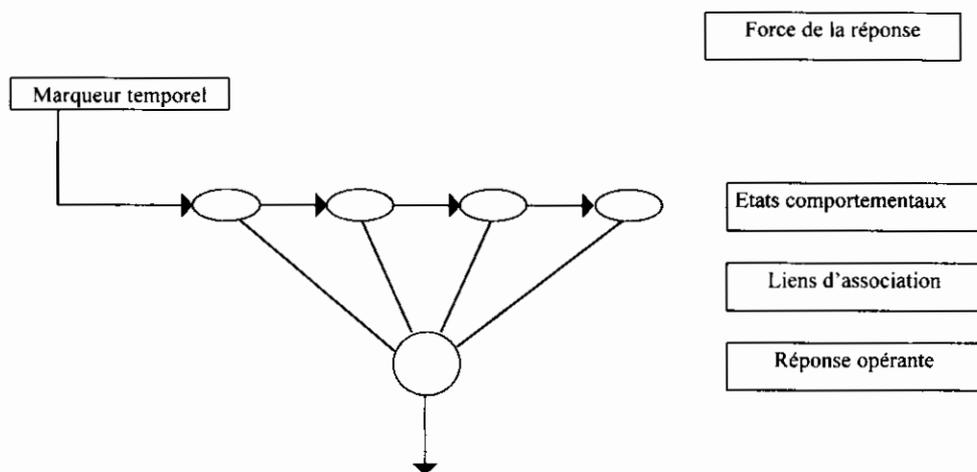


Figure 4. Composants du modèle LeT. Un marqueur temporel initie une diffusion de l'activation au travers des états comportementaux. Chaque état est associé avec un certain degré à la réponse opérante. L'activation des états multipliée par leurs liens associatifs détermine la force de la réponse opérante. D'après Machado (1997).

Comme le fait la BeT, il est postulé que chaque marqueur temporel, généralement de la nourriture, active une série d'états comportementaux. Ces états englobent les concepts des classes de comportements provoqués, adjacents, intermédiaires et terminaux (Killeen et al., 1988 ; Staddon et al., 1971). Reprenant l'hypothèse selon laquelle ces modes phylogénétiquement évolués sont sous-jacent à l'organisation temporelle et séquentielle du comportement (Timberlake, 1994), Machado postule une relative invariance de l'ordre sériel de ces états comportementaux. L'activation de chaque état comportemental est une variable dépendant du temps qui suit la dynamique suivante :

$$\frac{d}{dt} X(t,0) = -\lambda X(t,0)$$

Equation 3

$$\frac{d}{dt} X(t,n) = \lambda X(t,n-1) - \lambda X(t,n) \quad n \geq 1$$

Equation 4

où $X(t,n)$ est l'activation ou la force de l'état au temps t , et $\lambda > 0$, un paramètre de débit qui contrôle la rapidité avec laquelle l'activation se diffuse au travers des états. Le débit de diffusion de l'activation à travers ces derniers est équivalent au débit de l'oscillateur dans la BeT et la SET. Initialement les conditions sont :

$$X(0,0) = 1 \tag{Equation 5}$$

$$X(0,n) = 0, \quad n > 0 \tag{Equation 6}$$

A $t=0$ immédiatement après l'apparition du marqueur temporel, l'état zéro a une force maximale alors que les autres états ont une force nulle. Pour mieux comprendre, l'analogie d'une cascade d'eau peut être utilisée (figure 5).

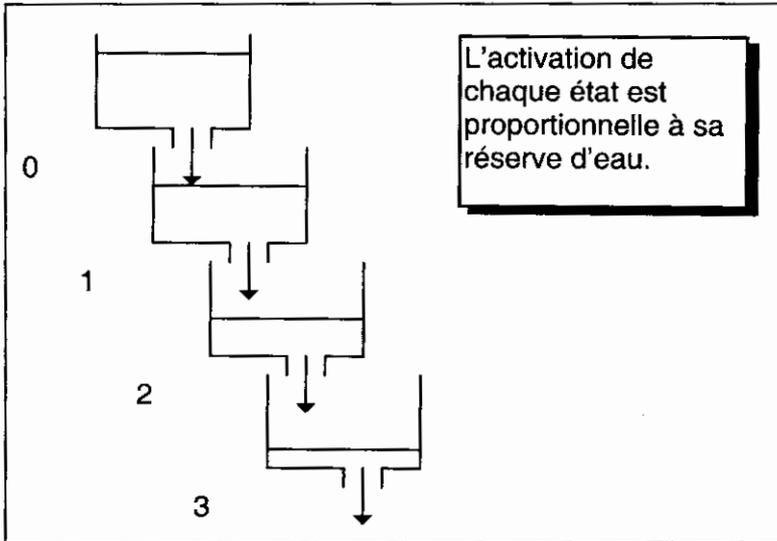


Figure 5. Modèle de compartiment pour illustrer les dynamiques des états comportementaux. Chaque compartiment correspond à un état comportemental et sa quantité d'eau correspond au degré d'activation de l'état. L'eau coule au travers des compartiments suivant les équations 3 à 6. D'après Machado, 1997.

Les équations différentielles de 3 et 4 ont un ensemble de solutions finies

$$X(t,n) = \frac{\exp(-\lambda t)(\lambda t)^n}{n!} \tag{Equation 7}$$

qui correspond à la fonction de densité gamma - à l'exception de la constante λ - « pierre angulaire » comme le dit Machado de la BeT. Bien qu'il n'y ait pas d'oscillateur de type Poisson comme dans la BeT, l'activation des états comportementaux suit la même fonction que dans la BeT : le modèle lui est mathématiquement équivalent.

Comment les états comportementaux en arrivent à réguler la réponse opérante ? Pour faciliter l'analyse, l'auteur postule que tous ces états suivent les mêmes règles de conditionnement bien que pour certains états contigus temporellement avec la nourriture, l'apprentissage pourrait être différent. En fait, chaque état serait associé à un certain degré avec la réponse opérante. Pendant la période d'extinction, les liens associatifs entre un état et la réponse opérante s'affaiblissent - et le peuvent jusqu'à une valeur de zéro - à un débit proportionnel à l'activation courante de l'état. Pendant le renforcement le lien d'association augmente - jusqu'à son asymptote - à un débit proportionnel à l'activation de l'état au moment où le renforçateur est délivré. Les états peuvent être fortement actifs sans pour autant être fortement associés à la réponse opérante. C'est le cas, par exemple, des comportements intérimaires ayant lieu en milieu d'intervalle.

Enfin, les états comportementaux fortement actifs et fortement associés à la réponse opérante exercent davantage de contrôle sur cette dernière que certains états moins actifs ou moins « conditionnés ». L'équation décrivant ce contrôle sur la réponse opérante permet d'expliquer comment certains états comportementaux peuvent être fortement actifs, contrôler l'activité générale et les comportements adjacents sans pour autant influencer la réponse opérante. L'ensemble du système d'équations différentielles permettrait donc de résoudre le problème de l'assignement du crédit. Prenons par exemple, un marqueur temporel présent à $t=0$, suivi de 30s d'extinction et enfin de 3s de renforcement. Arbitrairement toutes les forces d'association sont supposées être au départ égales à 0.8 (figure 6).

L'exemple proposé permet de montrer comment les états davantage activés lors de l'occurrence du renforçateur reçoivent davantage de crédit que les états apparus plus tôt (i.e. : les liens d'association avec la réponse opérante augmentent davantage) et exercent plus de contrôle sur la réponse opérante. Les régularités temporelles spécifiques de la réponse opérante résultent du contrôle exercé par les différents états comportementaux qui sont actifs à un niveau maximum à différents moments depuis l'apparition du marqueur temporel.

La pertinence du modèle est examinée grâce aux données recueillies dans quatre procédures : le FI, la peak procédure, la bissection et le FI mixte. Ces procédures ne balayent pas toutes les procédures opérantes utilisées afin de mettre en évidence les phénomènes de discrimination temporelle. Ceci pose le problème de la façon dont sont envisagés les phénomènes de conditionnement au temps. Relèvent-ils d'un même processus ou plusieurs processus doivent-ils être envisagés afin de rendre compte des diverses performances obtenues par l'animal ?

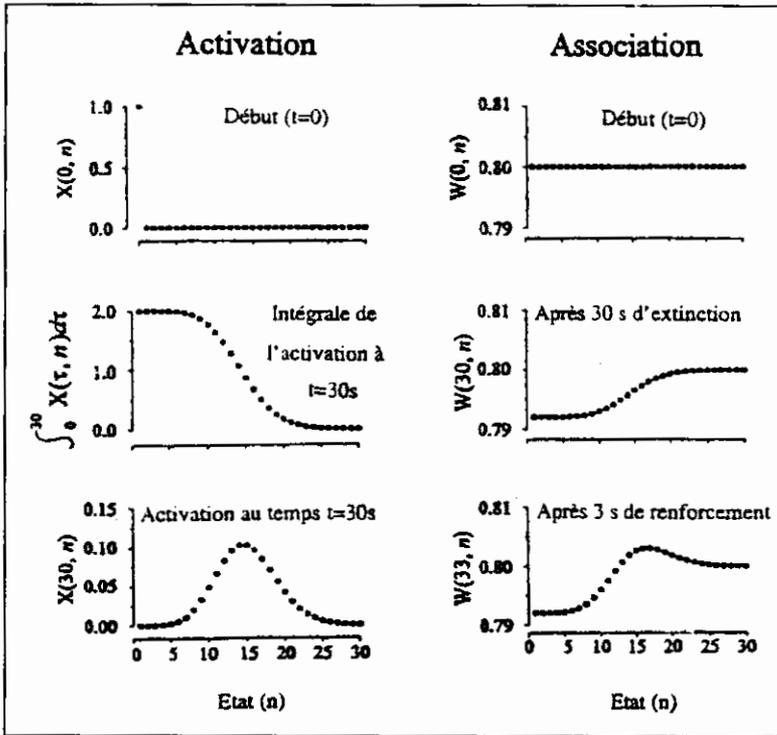


Figure 6. Graphiques supérieurs : conditions initiales pour l'activation des états (à gauche) et force de l'association avec la réponse opérante (à droite). Graphiques centraux : après 30 sec d'extinction, la force des liens d'association baisse (à droite) en fonction de l'intégrale de l'activation des états (à gauche). Graphiques inférieurs : après 3 sec de renforcement, les liens d'association augmentent (à droite) en proportion de l'activation des états au début du renforcement (à gauche). Les états les plus actifs reçoivent plus de crédit pour l'occurrence du renforcement. D'après Machado (1997).

L'auteur relève lui même un certain nombre d'insuffisances au modèle. Si 95% de la variance est expliquée dans 30 des 33 séries de données, ceci n'est rendu possible que par la construction d'hypothèses *ad hoc*. Par exemple, une relation directe est nécessaire, entre le débit de renforcement et λ le paramètre de diffusion afin de vérifier la propriété scalaire. Si certaines études ont effectivement montré cette relation, elle n'est pourtant pas proportionnelle comme nous l'avons relevé précédemment. En ce qui concerne la peak procedure, il doit être supposé dans la moitié des cas que l'intervalle effectif depuis le marqueur temporel jusque le renforçateur suivant est inférieur à l'intervalle réel. Dans la bissection, un paramètre δ de sensibilité doit être ajouté au modèle. Pour

autant les manipulations ne permettent pas systématiquement de rendre compte des données. Ainsi, dans le programme FI mixte, le modèle ne parvient à générer ni d'un point de vue quantitatif, ni d'un point de vue qualitatif le débit de réponse des sujets lorsque la probabilité du plus court des intervalles est élevée. L'origine de cette difficulté rencontrée par le modèle proviendrait de sa structure en série, alors que l'animal pourrait estimer deux intervalles indépendamment et simultanément.

Machado considère son modèle comme dynamique puisqu'il doit permettre de rendre compte de la façon dont le renforcement parvient à contrôler la réponse opérante. Bien que minoré par son auteur, le défaut majeur du modèle semble résider dans son incapacité à décrire la dynamique du comportement moment par moment puisqu'il permet seulement de rendre compte des comportements moyens à l'état stable, en particulier en FI et en peak procédure. Ainsi le « break and run » (i.e. : une pause post-renforcement suivie d'un débit de réponses élevé et constant jusqu'à l'obtention du renforcement) ne peut être expliqué par ce modèle de part sa constitution, déterministe et linéaire.

HIGA, STADDON ET COLLABORATEURS

Higa, Staddon et l'ensemble de leurs collaborateurs s'intéressent particulièrement à des procédures permettant la mise en évidence de la dynamique des comportements. Puisque la pause post-renforcement (PRP) chez l'animal est proportionnelle à la durée de l'IRI (Dews, 1970 ; Gibbon, 1977 ; Richelle et Lejeune, 1980), c'est cette variable qui sera pertinente. Le FI et un second programme où le délai est initié par la réponse (Response Initiated Delay ; RID). L'objectif est de mesurer et contrôler expérimentalement la relation PRP et IRI. Le programme RID (figure 7) sera utilisé parce qu'il permet un meilleur contrôle de l'IRI que dans le programme FI : le temps d'attente est sous le contrôle du sujet alors que le délai de renforcement est sous le contrôle de l'expérimentateur (Higa, 1996 ; Higa et al., 1997).

En effet, la première réponse après un renforçateur permet de définir le temps d'attente (t) ; cette réponse est accompagnée d'un changement de couleur de la clé qui passe du rouge au vert ; les réponses suivantes sont relevées mais ne modifient pas la durée de l'IRI, en effet, le délai jusqu'au renforçateur (T) suivant la première réponse est calculé afin que $(t+T)$ égale une durée programmée. C'est à dire que $T=IFI-t$.

Les procédures utilisées consisteront à modifier une (Higa et al., 1993) ou plusieurs fois (Higa, 1996) la durée de l'IRI au cours d'une session expérimentale et rendre ainsi permanente ou non cette modification. Les données qui en résultent ne peuvent être expliquées ni par la SET ni par la BeT (Higa et al., 1997).

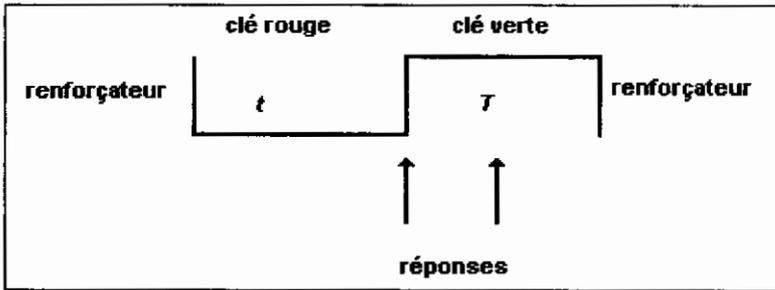


Figure 7: Illustration d'un programme RID.

MODÈLE D'ATTENTE LINÉAIRE.

Lors d'une première série d'expériences, un modèle markovien d'attente linéaire est élaboré afin de rendre compte de la dynamique temporelle observée dans des programmes RID (Wynne et Staddon, 1988). L'hypothèse du modèle d'attente linéaire est que le temps d'attente est fonction de la durée de l'intervalle précédent (IRI_N) :

$$t_{N+1} = AI_N \quad \text{Equation 8}$$

où t_{n+1} est le temps d'attente lors de l' IRI_{N+1} , I_n est la valeur de l' IRI_N et A une constante de proportionnalité qui serait égale environ à 0.25

Certaines expériences corroborent ce modèle. Ainsi Higa, Wynne et Staddon (Higa et al., 1991), utilisant des pigeons placent un IRI d'une durée de 5 s. dans une longue séquence d' IRI_s de 15 s.. Comme prédit par le modèle, le temps d'attente baisse lors de l'IRI suivant et cette baisse est localisée : les temps d'attente lors des IRIs ultérieurs retrouvent le niveau d'avant l'IRI de 5 s. De même, chez les pigeons, l'ajustement du temps d'attente suite à une baisse imprévisible de la durée de l'IRI (de 15 à 5 s.) est effectif après un seul IRI (Higa et al., 1993).

Néanmoins, le modèle d'attente linéaire n'est pas en mesure de rendre compte de la dynamique de certains comportements. Lorsque les IRIs changent fréquemment, les pigeons commencent par suivre la séquence : leur temps d'attente est fonction de la durée de l'IRI précédent. Au fur et à mesure de l'apprentissage, l'ajustement peut éventuellement disparaître pour laisser place à un patron de réponse habituellement observé dans les programmes à intervalles variables. Le temps d'attente à la suite du renforcement est approprié à la plus petite valeur des IRIs (Higa et al., 1993). Par ailleurs, l'ajustement du temps d'attente suite à une augmentation imprévisible de l'IRI (de 15 à 45 s.) est plus lent (une dizaine d'intervalles) et graduel que lors d'une baisse

de celui-ci (de 15 à 5 s) (Higa, 1996 ; Higa, 1997b ; Higa et al., 1993).

Le temps d'attente ne semble pas dépendre d'un processus d'attente linéaire plus ou moins complexe (Wynne, Staddon, et Delius, 1996) et le modèle d'attente linéaire pourrait être une approximation d'un processus plus général (Higa, 1996) (Higa et al., 1997). La discrimination temporelle dépendrait de la fréquence des IRIs, de leur récence, et du sens de leur modification. Une série de travaux montre en effet que les temps d'attente seraient affectés, de façon disproportionnée par le nombre d'intervalles courts dans un passé récent (Wynne et al., 1996), plus précisément, au cours d'une session expérimentale (Higa et al., 1991). Enfin, le développement du contrôle temporel serait affecté par la direction de la transition : les temps d'attentes s'ajustent plus rapidement en condition de baisse qu'en condition d'augmentation de l'IRI (Higa, 1997b ; Higa et al., 1993).

Par ailleurs, tout comme la SET et la BeT, le modèle d'attente linéaire ne permet pas de spécifier comment et dans quelle mesure la discrimination temporelle peut être affectée par la fréquence des IRIs, leur récence, ou la direction de la transition puisqu'ils mettent l'accent sur la distribution des débits de réponses, les intervalles rappelés et les taux moyens de renforcement (Higa, 1996 ; Higa, 1997b ; Higa et al., 1997). Le modèle de diffusion-généralisation (Staddon et Higa, 1991) a été développé afin de pallier ces insuffisances.

MODÈLE DE DIFFUSION-GÉNÉRALISATION

L'objectif est de développer un modèle en temps réel basé sur l'hypothèse de la généralisation du stimulus. Ainsi, la représentation en mémoire des événements passés serait un processus dynamique qui change avec le passage du temps (Staddon et Reid, 1990). Utilisant les données recueillies précédemment, le modèle prend en compte le fait que le temps d'attente est déterminé par la fréquence et la récence des précédents IRIs. Trois hypothèses fondent ce modèle : (1) le temps post-renforcement est représenté en mémoire, comme tout autre dimension du stimulus, par un continuum discret et linéaire d'unités i ; (2) pour tout temps post-renforcement, t , il existe une force d'activation interne X_i , associée à chaque unité i ; (3), la force de la réponse au temps t est $V_i(t)$, valeur de X_i pour i tendant vers t .

X_i évolue dans le temps selon l'équation suivante :

$$X_i(t) = \alpha X_i(t-1) + [(1-\alpha)/2] \cdot [X_{i-1}(t-1) + X_{i+1}(t-1)] + S_i(t)$$

Equation 9

avec $X_i(t)$, l'intensité d'activation d'une unité i au temps t ; $X_{i-1}(t-1)$,

l'intensité d'activation de l'unité précédent i au temps $t-1$; $X_{i-1}(t-1)$ l'intensité d'activation de l'unité suivant i au temps $t+1$; $S_i(t)$ égal à 0 ou 1 et α , le paramètre du débit de diffusion.

Lorsque le renforçateur apparaît, ceci s'ajoute à la force $X_i(t)$ d'activation au temps post-renforcement. $S_i(t)$ est incrémenté de 1. Lorsque le temps réel s'écoule, la force d'activation s'étend aux temps de réponses adjacents $i+1$, $i-1$, $i+2$, $i-2$. Comme le montre la figure 8, l'intensité d'activation d'une unité se diffuse et se généralise aux autres unités, en fonction de cette équation selon un processus dynamique.

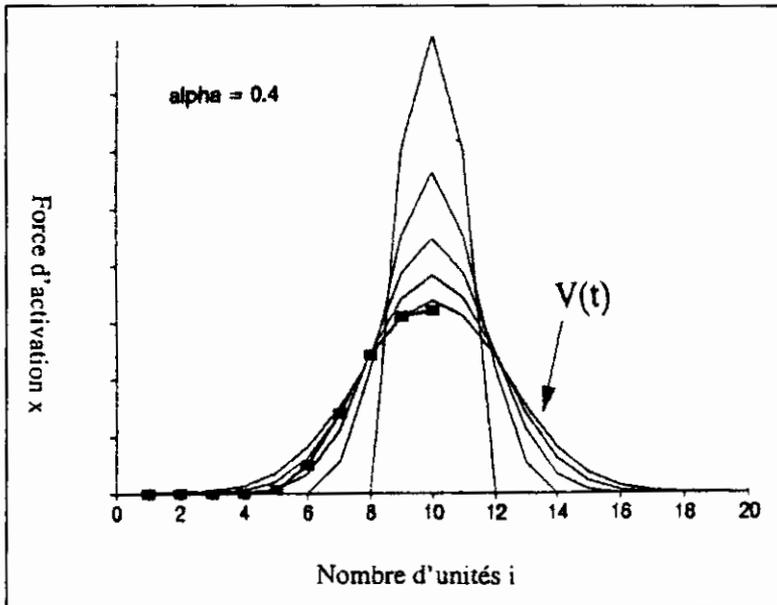


Figure 8. Illustration du mécanisme du modèle de diffusion-généralisation. Force d'activation x_i en fonction du temps réel (itérations) après la présentation du renforçateur à $t=10$. Le gradient d'activation est à zéro à l'origine ($i=0$) et le débit de diffusion est de une unité par itération. Les lignes fines montrent $x_i(t)$ pour $t = 1, 3, 5, 7$ et 9 . La ligne en gras est le résultat de la fonction de la force de la réponse $V(t)$. (D'après Staddon et Higa, 1991).

L'intensité de réponse - la sortie du système - est nommée $V_i(t)$. A chaque itération, ne correspond qu'une unité. $V_i(t)$ dépend non seulement de la probabilité d'activation de l'unité i , mais aussi d'un seuil en deçà duquel l'unité i ne peut être activée.

La différence majeure de ce modèle avec les modèles de la SET ou la BeT est de ne pas se baser uniquement sur les propriétés molaires des comportements. Ainsi, il prend en compte les propriétés des IRIs particuliers et peut rendre compte de plusieurs patrons dans plusieurs types de programmes de renforcement (Staddon et al., 1991).

La dynamique du comportement dépendrait donc de la fréquence et de la récence des IRIs particuliers :

- le niveau d'activation du gradient augmente après chaque renforcement : la forme générale de ce gradient dépend donc de la fréquence de renforcement à un intervalle post-renforcement particulier ;

- la forme générale du gradient va dépendre du temps écoulé depuis le précédent renforcement.

Des insuffisances du modèle ont été relevées par les auteurs (Staddon et al., 1991). Notons tout d'abord qu'un nombre minimum de valeurs des paramètres libres a été testé. De plus, la représentation linéaire du temps en mémoire ne va pas sans poser de problème : les délais longs qui ont pourtant l'impact le plus faible sur le temps d'attente prennent une place importante en mémoire. Par ailleurs, rien n'est dit à propos de l'inhibition - i.e., gradient négatif - associée à l'omission du renforçateur qui devrait permettre de rendre compte des données, par exemple, dans les programmes cycliques. Enfin, si le modèle de diffusion-généralisation rend compte de plusieurs propriétés des dynamiques temporelles, il ne parvient pas à saisir les effets à l'intérieur des sessions et entre les sessions. Un modèle de l'habituation en mesure d'intégrer plusieurs échelles de temps est proposé comme nouvelle base d'un modèle du contrôle temporel (Higa et al., 1997).

MODÈLE À MULTIPLES ÉCHELLES DE TEMPS (MULTIPLE TIME SCALE MODEL ; MTS)

Le modèle proposé a comme caractéristique majeure de ne reposer sur aucun oscillateur et constitue « un départ pour d'autres approches - modélisant les régularités temporelles du comportement sans horloge » (Higa et al., 1997). L'accent est mis sur les processus mnésiques déjà abordés dans le modèle de diffusion-généralisation. Ils avancent une hypothèse intuitive afin de défendre l'hypothèse selon laquelle le contrôle temporel pourrait se développer sans un système d'oscillateur :

« Quoiqu'il en soit, étant donné la prédominance du contrôle temporel, et de la sensibilité aux propriétés temporelles de l'apprentissage, chez un nombre important d'espèces aux structures cérébrales différentes (i.e., invertébrés, mammifère, et oiseaux montrent tous une sensibilité comportementale aux événements temporels), il semble également raisonnable d'envisager les processus qui montrent des patrons temporels sans un oscillateur » (Higa et al., 1997)(p.31).

Le MTS est basé sur cinq idées principales, une à propos de l'estimation du temps, les quatre autres concernant l'habituation : (1) l'apprentissage temporel est possible grâce à l'utilisation de traces mnésiques comme stimulus discriminatifs ; (2) les propriétés de la mémoire à court terme peuvent être comprises au travers des

mécanismes de l'habituation ; (3) l'habituation est un processus dans lequel la réponse est inhibée par à un système d'intégrateur actionné grâce à un stimulus ; (4) les unités d'habituation sont en cascade ; (5) plus les unités en périphérie sont rapides plus lentes seront celles situées en aval.

Le modèle mnésique de l'estimation du temps sera donc basé sur un modèle de l'habituation. Le phénomène de l'habituation, baisse de la réponse réflexe à la suite de présentations successives d'un stimulus, pourrait être pertinent dans le cas de l'estimation du temps puisqu'on l'observe avec un nombre important de réponses, de stimulus et chez de nombreuses espèces. Par ailleurs, l'habituation a une propriété dynamique importante : la sensibilité au débit. L'habituation est d'autant rapide et effective que les présentations du stimulus sont peu espacées, et le retour au niveau de base est également plus rapide après des intervalles inter stimulus courts. Ceci pourrait être modélisé par un processus où la force de la réponse est la différence entre un effet constant du stimulus et la charge cumulée en mémoire à court terme, mémoire sous la forme d'un intégrateur (figure 9).

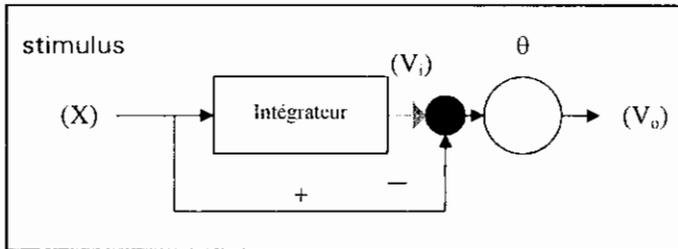


Figure 9. Modèle d'habituation à une unité. Les effets intégrés des stimuli passés, V_i , correspondent aux soustractions des effets directs, X , et la différence du seuil supérieur, $X - V_i - q$, détermine la force de la réponse V_o (D'après Staddon et Higa, 1999).

La charge cumulée de l'intégrateur augmente au fur et à mesure de la présentation des stimulus tandis que la force de la réponse se réduit. Si l'intervalle entre les présentations du stimulus est trop important l'intégrateur se décharge, « oublie » et l'habituation n'est pas possible. Afin de modéliser la propriété de sensibilité au débit, deux intégrateurs au moins sont nécessaires (Staddon, 1993), ce qui n'entre pas en contradiction avec les principes du modèle puisque ce modèle peut être étendu à n'importe quel nombre d'intégrateurs (Higa et al., 1997). Enfin, la force de la trace mnésique correspond à la somme de tous les effets intégrés.

Ce modèle de l'habituation est donc à la base du MTS. L'idée principale est que ce qui est appris dans les programmes temporels opérants ce sont les valeurs des traces

mnésiques associées ou non avec le renforcement. De par sa constitution dynamique, il permettrait de rendre compte d'un ensemble important de phénomènes tels que la propriété scalaire, les effets persistants et temporaires de l'omission d'un renforçateur, les données en procédure de bissection, les discriminations des durées relatives et absolues. Le problème de l'assignement du crédit serait résolu par ce modèle : il n'y a pas ici nécessité d'identifier le marqueur temporel puisque chaque événement discernable dans l'environnement aurait sa propre trace (Staddon et al., 1999). Les valeurs renforcées mémorisées sont alors en compétition pour contrôler la réponse (pour une discussion sur ce sujet voir également Dragoi et Staddon (Dragoi et Staddon, 1999)).

Le modèle se veut plus général que peuvent l'être la SET, la BeT ou le LeT puisqu'il a pour objectif d'expliquer d'autres données que celles respectant la propriété scalaire. Si la généralité semble démontrée et si des études physiologiques semblent s'accorder, selon les auteurs, avec les données, tous les problèmes ne sont pas résolus. L'ensemble des travaux précédemment évoqués avaient pour objectif d'étudier la dynamique du contrôle temporel. Or, si le modèle développé semble avoir des implications dans le domaine de la dynamique - par exemple dans les programmes cycliques - cette analyse est différée, de même que certains problèmes liés à l'apprentissage, en particulier la façon dont sont « apprises » les valeurs des traces mnésiques. Ces lacunes ne permettent donc pas d'expliquer comment le comportement des sujets est affecté dans les expériences où un contrôle temporel rapide peut être observé. Enfin, si les processus cognitifs inférés dans ce modèle sont, moins nombreux que dans la SET, ou d'un autre type que l'oscillateur postulé dans la BeT, le principe même de l'utilisation d'une entité telle que la mémoire pose un problème d'ordre épistémologique (Donahoe et Burgos, 1999 ; Donahoe et Palmer, 1994).

L'objet de l'ensemble des recherches menées par Machado, Higa et cols. est d'étudier la dynamique du comportement de l'ajustement temporel. Or, force est de constater que les données sont présentées quasi systématiquement comme le résultats de moyennes : moyennes des temps d'attentes sur plusieurs sessions expérimentales ou pour le même type d'essai dans une même session (Higa, 1997a ; Higa, 1997b). Parfois le modèle insiste volontairement sur les comportements moyens des animaux (Machado, 1997).

Si l'on souhaite délaissier les états stables et les modèles quasi-dynamiques, il nous faut nous intéresser aux comportements individuels des sujets comme l'admettent eux-mêmes Staddon et Higa (Staddon et al., 1999). L'utilisation des moyennes nous prive de données essentielles à l'étude du comportement alors que la variabilité comportementale est essentielle à nos propos. Par exemple, si le temps d'attente des animaux ne varie pas suite à l'introduction d'un nouvel IRI (Higa, 1996), c'est sans doute parce que ceux-ci ne sont pas en mesure de détecter le changement : leur pause

post-renforcement est trop brève. Une telle variabilité interindividuelle ne permet en aucun cas de conclure que le processus d'ajustement observé dans les expériences réalisées chez l'animal (Higa, 1997b) et l'humain (Darcheville et al., 1999) sont identiques pour chaque sujet. Il nous faut donc délaissier les moyennes. Par ailleurs les modèles développés sont linéaires alors que ceux-ci constituent une minorité des systèmes rencontrés dans l'environnement (Stewart, 1989). Ces modèles ne permettent pas d'expliquer comment le système passe d'un état comportemental à un autre.

L'utilisation d'équations linéaires semble avant tout pratique (Gleick, 1987 ; Stewart, 1989). Selon Machado celles-ci permettent - puisqu'elles ont des solutions finies - de mieux comprendre les propriétés et prédictions du modèle, les comparer plus facilement avec des modèles alternatifs ; enfin celles-ci seraient des approximations commodes des fonctions non linéaires (Machado, 1997). Ainsi, on linéarise des équations non linéaires afin de les résoudre plus facilement. La procédure habituelle consiste à négliger les termes « bizarres » de l'équation. On suppose - les termes négligés étant petits - que la différence entre la solution de l'équation linéaire et celle de la véritable équation est petite ; cela reste pourtant à démontrer (Stewart, 1989). Néanmoins, la question posée est de savoir ce que pourrait apporter la théorie des systèmes dynamiques, dont la théorie des systèmes dynamiques non linéaires, à l'étude du comportement.

LA THÉORIE DES SYSTÈMES DYNAMIQUES NON LINÉAIRES

Les théories des systèmes dynamiques traitent de grands types de comportements ou d'évolutions, sans référence directe aux éléments matériels qui constituent ces systèmes, et leur permet de présenter un haut degré de généralité et d'universalité (Berger, Pomeau, et Vidal, 1984). Les concepts peuvent paraître séduisants et relativement efficaces en physique (Abraham et Gollub, 1984 ; Ruelle, 1980 ; Swinney, 1983) ou en biologie (Glass et Mackey, 1988). Il n'en reste pas moins que théories et concepts semblent bien éloignés d'une discipline telle que la psychologie et difficiles à appliquer. Pourtant, quelques auteurs se sont intéressés à l'application de ces théories à la psychologie, dont la psychologie comportementale (Marr, 1992 ; Metcalf et Allen, 1995) et, plus précisément, la discrimination temporelle (Hoyert, 1992). Les enjeux semblent importants, en particulier en ce qui concerne la conception de la variabilité comportementale. Les méthodes d'analyse issues de la dynamique non linéaire devraient permettre de redécouvrir ce champ, largement délaissé jusqu'à présent. Comme le souligne Richelle (Richelle, 1992), une analyse satisfaisante du comportement doit reposer à la fois sur l'étude de la sélection et sur celle de la variation comportementale. De la même façon, il semble que la dynamique inter et intra session, enjeu important (Higa et al., 1997 ; Hoyert, 1992), puisse être d'avantage saisie par la non linéarité d'un système.

L'analogie évolutionniste est constamment utilisée afin de rendre compte de l'émergence des comportements nouveaux et des processus d'apprentissage (Boulanger, 1995 ; Richelle, 1992). L'analyse de ces derniers devrait mettre en évidence l'apparition des variations comportementales et les contraintes sélectives de l'environnement. En psychologie, l'accent a été porté sur les contraintes de l'environnement, les états stables - la répétition de comportements acquis - plutôt que sur leur changement et leur acquisition, sur la sélection plutôt que sur la variation (Boulanger, Ingebos, Lahak, Machado, et Richelle, 1987 ; Richelle, 1992). L'objectif devrait être de cerner la nature et les sources des variations afin de préciser les processus dynamiques du conditionnement (Staddon et al., 1971).

La variabilité comportementale peut être considérée comme un opérant (Page et Neuringer, 1985). A partir de cette constatation, Boulanger (1990 ; cité par Richelle, 1992) a analysé la variabilité comportementale au cours du développement. Dans tous les cas, les contingences renforçant la variabilité comportementale sont efficaces. Néanmoins cette efficacité est fonction de l'âge des sujets : les contingences sont moins efficaces chez les sujets les plus jeunes (i.e. 5 ans). Selon Richelle (1992) ces résultats montrent que la variabilité n'est pas un simple sous-produit des conditions du milieu (Machado, 1989) mais une propriété du fonctionnement psychologique du sujet modulée par les conditions de son environnement.

Pourtant, la variabilité est souvent envisagée comme le produit de variables inconnues et/ou incontrôlées et le recours au hasard (Wearden, 1985) traduit sans doute notre perplexité face au phénomène. L'objectif de l'expérimentateur est donc de minimiser la variabilité, d'identifier les variables qui affectent de façon essentielle la performance et de comprendre comment elles agissent seules et ensemble. Ainsi envisagée, la variabilité, considérée comme du bruit, n'est quasiment pas étudiée pour elle même (Richelle, 1992). L'usage des statistiques est inhérente à cette approche. Il s'agit, en appliquant la théorie des probabilités de trouver des régularités dans le comportement moyen de grands systèmes dont le comportement détaillé ne peut être connu (Stewart, 1989). Celles-ci permettent de révéler ce qui semble être les événements significatifs, avec un degré de précision satisfaisant, sur un fond de bruit constitué de causes considérées souvent comme non pertinentes. Richelle (1992) rappelle que le recours à la statistique n'est possible que parce que l'on considère par convention que la valeur de tendance centrale de la distribution des mesures réelles répétées chez un même sujet (ex : seuil absolu) ou chez un groupe de sujets (cas classique en psychologie cognitive) traduit le phénomène que l'on cherche à cerner. On ne s'intéresse de façon quasi exclusive qu'aux états stables alors même que l'on sait que la stabilité comportementale parfaite n'existe pas (Hoyert, 1992).

L'émergence des modèles dynamiques non linéaires amène à envisager la variabilité

comportementale sous un nouveau jour. Les variations comportementales trouvent leur origine dans les propriétés dynamiques des systèmes complexes que sont les organismes vivants. Cet apport n'a de sens que si le comportement est envisagé dans une perspective sélectionniste. Mais ici « l'évolution est envisagée comme le résultat de l'auto-organisation et des processus de sélection, les variations trouvant leur sources dans les propriétés dynamiques des systèmes complexes » (Boulangier, 1990 - cité par Richelle, 1992). Tout comme l'approche classique, la théorie des systèmes dynamiques non linéaires, déterministe, considère le comportement comme le résultat d'une série de variables combinées. Néanmoins, ces deux approches divergent fondamentalement en ce sens que dans cette perspective, le changement, même minime, d'une des variables affecte toutes les autres, et est ainsi en mesure de modifier toute la dynamique du système. La non linéarité implique que celui-ci est en mesure de prendre des trajectoires indépendantes et largement divergentes. Les variations sont ici inhérentes au système et peuvent avoir une fonction dans sa structuration, sa dynamique. Il s'agit alors d'identifier, mesurer et comprendre les interactions de toutes les variables, ce qui semble pour le moins difficile lorsque l'objet d'étude est le comportement d'un système vivant.

Selon Ayers (Ayers, 1997), trois formes d'application de la théorie du chaos - nous préférons parler de la théorie de la dynamique non linéaire - peuvent être repérées en psychologie. L'application métaphorique qui n'assume pas de similarité entre les systèmes physiques et psychologiques, propose une perspective différente pour *décrire* les phénomènes afin de les comprendre. L'application analogique offre une explication et postule l'analogie entre les systèmes physiques et les systèmes psychologiques. Enfin, l'application pratique se décline en deux axes : d'une part extraire des signes de non linéarité dans les phénomènes observés et, d'autre part, développer des systèmes non linéaires afin de modéliser les systèmes comportementaux. C'est ce qui a été entrepris dans le cadre du contrôle temporel chez le pigeon (Hoyert, 1992).

LES TRAVAUX D'HOYERT.

Dans le programme FI, largement utilisé pour l'étude des phénomènes de régulation temporelle (Skinner, 1938) le patron de réponse observé le plus souvent chez l'animal est le « scallop ». Il s'agit d'une pause post-renforcement suivie d'une accélération du débit de réponse jusqu'à l'obtention du renforçateur. Néanmoins l'observation des enregistrements cumulés met en évidence une forte variabilité dans ce patron de réponse. En fait, quatre types de variabilité seraient mises en jeu : inter-session, inter-intervalle, intra-intervalle, et la tendance observée dans tous les programmes de renforcement au groupement des réponses.

En utilisant les résultats reconnus comme majeurs (Dews, 1970 ; Skinner, 1938),

Hoyert s'attache à identifier les variables qui contrôlent le comportement de l'animal dans les programmes FI et développe un système d'équations déterministes simplifié qui devrait décrire ce comportement :

Le débit de réponse B est fonction de la probabilité d'émission des comportements liés à la nourriture et de la probabilité d'émission d'autres réponses :

$$B = (S_r - S_a) p \quad \text{Equation 10}$$

où p est une constante qui transforme la probabilité de réponse en une quantité mesurable, S_a est l'intensité d'émission d'un autre comportement que la réponse opérante, S_r est l'intensité actuelle d'émettre la réponse opérante.

L'intensité de la réponse alternative (autre que la réponse opérante) au moment t est égale à :

$$S_a = \frac{S_{a \max}}{1 - f e^{-(g S_{a \max} t)}}$$

Equation 11

où f est une constante relative à la force du comportement alternatif,

$S_{a \max}$ est l'intensité maximum de réponse pour l'intervalle,

g est une constante relative au débit de baisse de cette réponse au cours de l'intervalle.

L'intensité d'émission de la réponse opérante au temps t est égale à :

$$S_a = 1 - S_r = j \{ \sin(k\pi (Mi + SI + TR)) \} + 1, \quad \text{Equation 12}$$

où

$$T(R) = f(R+m+n) \text{ et } T_{n,m}(R) = \begin{cases} 1, 0 + o(m+n) < R < m+o(m+n), o = 0, 1, 2, \dots \\ 0, m+o(m+n) < R < (o+1)(m+n), o = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

et j, k, l, m et n sont des constantes,

MI est la moyenne de la force de la réponse au cours des trois derniers intervalles ;

SI est la somme de toutes les précédentes forces de réponses au cours de tous les

intervalle précédents ;

$T(R)$ est une fonction en signal carré relative au nombre de renforçateurs obtenus dans la session ;

R est le nombre cumulé de renforçateurs ;

la variable o est un entier qui suit 4 cycles de présentation de nourriture.

Les deux variables S_a et S_r sont macroscopiques et regroupent de nombreux degrés de liberté, fonctions de la nature de la réponse opérante (appuyer sur un levier, ou se poser sur un perchoir) ou de la variation de l'amplitude du renforçateur au cours de l'expérience. La non linéarité du système est introduite par la fonction sinus de l'équation 12.

A la différence des approches quasi-dynamiques, la variabilité n'est pas intégrée en tant que telle au système. Pourtant, le système hypothétique génère des données qualitativement et quantitativement équivalentes à celles obtenues antérieurement chez l'animal. Ainsi, une dynamique inter-intervalles et intra-intervalle peut être observée (figure 10). Un système construit avec un petit nombre de variables relativement simples et déterministes produit de la variabilité. Celle-ci ne peut donc plus être envisagée comme du bruit, gommé par l'analyse statistique (Stewart, 1989).

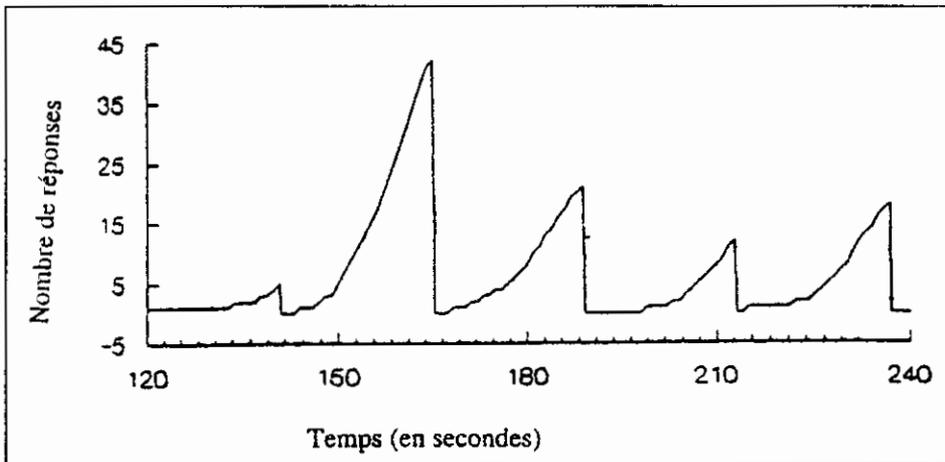


Figure 10. Exemple d'enregistrement cumulé des réponses générées par le système hypothétique dans un programme FI 20 sec. Le graphique supérieur présente 21 intervalles complets entre les renforçements (Hoyert, 1992).

La théorie des systèmes dynamiques permet de traiter des données afin de faire émerger de l'ordre dans un désordre apparent grâce à des outils tels que l'espace des phases, la section de Poincaré, l'application de premier retour.

1. L'espace des phases permet de connaître de façon complète un système dynamique, d'observer la position de celui-ci à chaque moment de son évolution. Le portrait de phase du système hypothétique présenté au-dessus est reconstruit (figure 11) à partir des trois variables qui interagissent pour déterminer la position du système (i.e., débit de réponse observable, intensité maximum de la réponse, intensité de la réponse). Les points ainsi déterminés ne sont pas dispersés dans la totalité de l'espace des phases. Au contraire, il y a une convergence des trajectoires, en termes dynamiques, il y a contraction des volumes à l'intérieur de l'espace des phases, ce qui signe la présence d'un attracteur (Thelen et Smith, 1994).

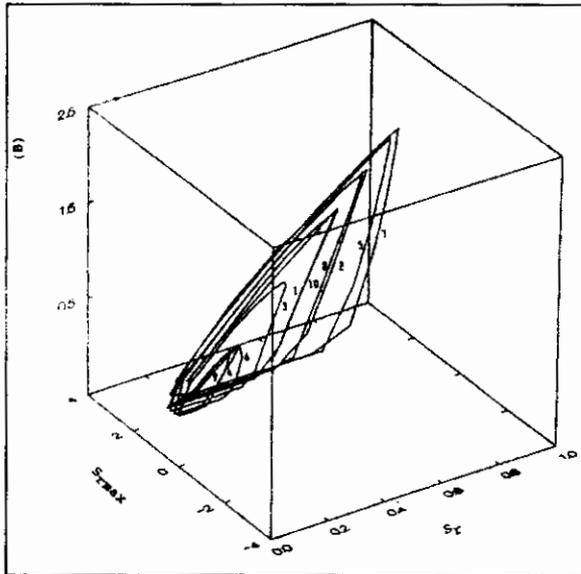


Figure 11: Portrait de phase du système hypothétique. Les axes représentent les états des trois variables qui interagissent pour déterminer la position du système : intensité de la réponse, intensité maximum de la réponse, et débit de réponse observé. Les 10 orbites représentent les réponses dans chacun des 10 premiers intervalles présentés figure 10 (Hoyert, 1992).

2. Néanmoins, la dynamique de l'attracteur est plus clairement identifiable si l'on construit la section de Poincaré. Il s'agit de remplacer la description en temps continu par une application à intervalles de temps discrets en tranchant le portrait de phase, ce qui ici revient à l'étudier en deux dimensions. Celui-ci conserve ses propriétés topologiques, sensibilité aux conditions initiales et invariance d'échelle dans le cas d'un attracteur étrange. Ainsi, figure 12, la section de Poincaré du système hypothétique est reconstruite, ce qui permet de déterminer les coordonnées des points (x, y) et l'ordre dans lequel ceux-ci apparaissent dans le plan.

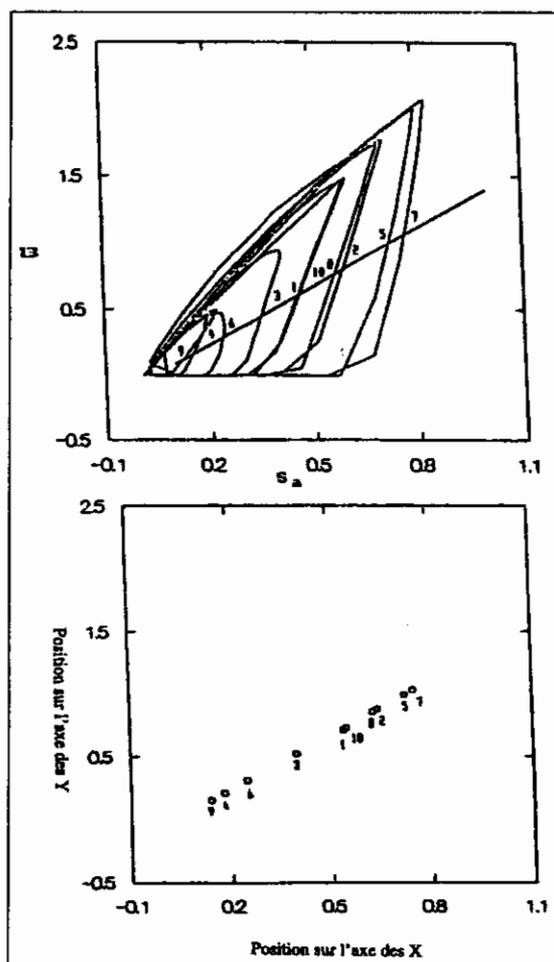


Figure 12. Portrait de phase et section de Poincaré du système hypothétique. Le portrait de phase est coupé transversalement par un plan. Les orbites de l'espace dans l'espace des phases traversent ce plan. La section de Poincaré enregistre l'emplacement et l'ordre dans lequel ces orbites coupent le plan. Le graphique supérieur présente une projection en deux dimensions du portrait de phase en trois dimensions présenté à la figure 11. La diagonale montre approximativement la localisation du plan qui tranche le portrait de phase. Le graphique inférieur présente la section de Poincaré (Hoyert, 1992).

3. L'application de premier retour, est construite en utilisant les ordonnées des points de la section de Poincaré. Selon Hoyert, le système hypothétique serait gouverné par un attracteur étrange de type elliptique (figure 13). Cette interprétation peut prêter

à discussion. En effet, Metcalf & Allen (Metcalf et al., 1995) utilisent également les applications de premier retour afin de montrer la présence de chaos dans les programmes induisant un comportement de polydipsie (traduction de « schedule-induced polydipsia »). Ces derniers considèrent que si l'attracteur est périodique, une série de points en cercle ou en ellipse apparaît sur l'application de premier retour ; si l'attracteur est chaotique, une forme irrégulière mais descriptive apparaît (Figure 14). L'attracteur qui gouverne le système d'Hoyert serait donc un attracteur périodique et non chaotique.

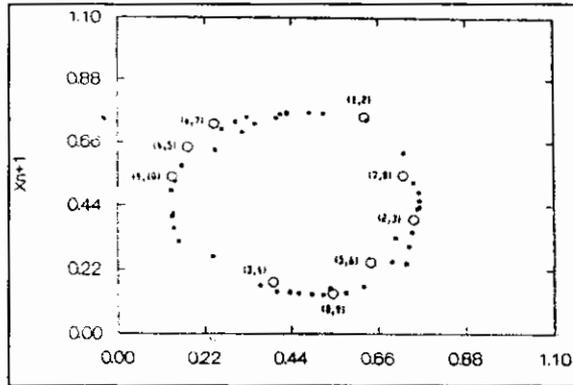


Figure 13. Application de premier retour du système hypothétique. Celle-ci est construite en posant les ordonnées successives de la section de Poincaré. Les cercles vides ont été recueillis à partir des points d'intersection présentés dans le graphique inférieur de la figure 12, les cercles pleins ont été recueillis lors de la simulation complète (Hoyert, 1992).

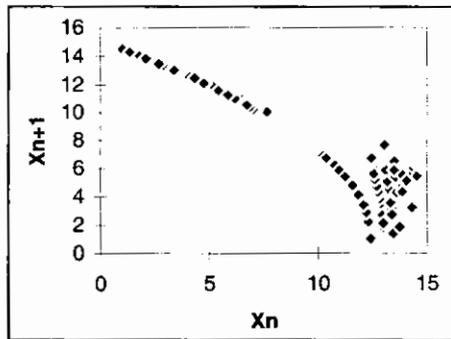


Figure 14. Application de premier retour de l'attracteur de Lorenz

La perspective théorique développée est ensuite confrontée à la réalité. Quatre pigeons sont ainsi placés dans un programme FI 20s.. Les données recueillies sont représentatives des résultats de l'animal sous FI (variabilité inter-sujet, variabilité inter-

essai...). N'étant pas en mesure de mesurer toutes les variables gouvernant le système, le portrait de phase du système est reconstruit grâce à la méthode des délais : une variable du système est mesurée à intervalles réguliers et cette série temporelle permet de récupérer toute l'information sur la dynamique globale du système dans l'espace des phases (Takens, 1981). Lorsque l'on utilise la méthode des délais, l'état du système à un instant t est représenté par un point dans l'espace des phases R^n dont les coordonnées sont les valeurs de la variable $y(t)$ prises à des instants régulièrement espacés : $y = (y(t), y(t + \tau), \dots, y(t + (n - 1)\tau))$. La variable mesurée est le débit de réponse au temps t (moyenne du débit de réponse au temps t , $t-1$ et $t+1$). Soulignons que le choix du délai temporel τ - ici égal à 3 s. - a été réalisé par « essais-erreurs » : l'intervalle a été augmenté jusqu'à ce qu'une organisation de la figure puisse être détectée visuellement.

La difficulté de l'utilisation des séries temporelles réside effectivement dans le choix de ce délai. En effet, les séries temporelles ont une taille finie et sont plus ou moins entachées de bruit. Dans certains cas, la caractérisation qualitative (i.e. la dimension fractale) des attracteurs étranges peut dépendre de manière critique du délai, en particulier lorsque le nombre de données est limité (Lefranc, 1992). Il s'agit de déterminer la valeur optimale pour laquelle les propriétés de l'attracteur reconstruit avec N points reproduisent le plus fidèlement celles de l'attracteur réel.

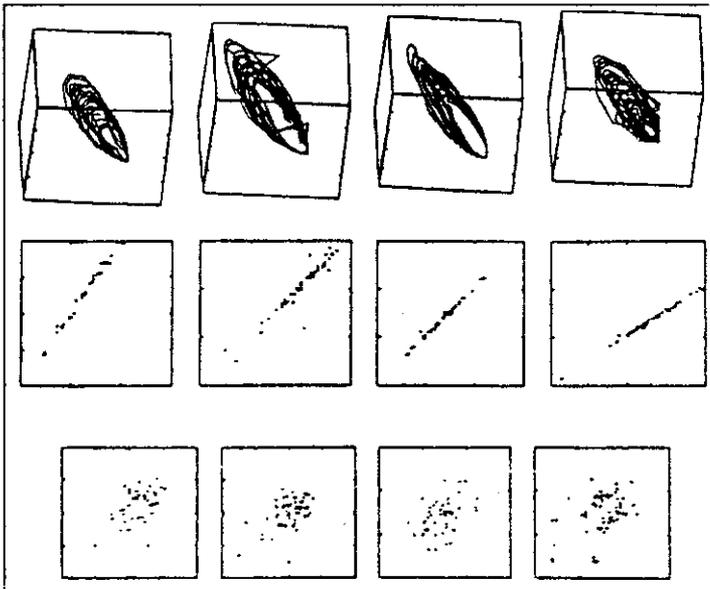


Figure 15. En haut : portraits de phase reconstruits pour la session 20. Seul le comportement des intervalles 15 à 39 est présenté. Les axes représentent le débit de réponse au temps t , $t+3$ et au temps $t+6$. Au milieu : sections de Poincaré pour la session 20. Celles-ci ont été construites en passant un plan au travers du centre des orbites présentées au-dessus et en notant la position des points d'intersection. En bas : applications de premier retour pour la session 20, reconstruites à partir des sections de Poincaré présentées au-dessus

(Hoyert, 1992).

Les portraits de phases ainsi reconstruits (figure 15) montrent qu'il existe un attracteur dans l'espace des phases, dont la forme est ellipsoïde. Il est ainsi difficile d'en observer les propriétés. C'est pourquoi à partir des portraits de phase des séries temporelles, on peut reconstruire les sections de Poincaré (figure 15) puis les applications de premier retour (figure 15). Celles-ci ne sont pas si concluantes que l'espérait l'auteur, mais l'organisation de forme elliptique qu'on peut y trouver (points répartis autour d'une diagonale et concentration faible ou absente de points autour du centre) permet d'affirmer que les données ne sont pas le résultat d'un phénomène aléatoire.

La question posée est de savoir si les applications de premier retour peuvent être utilisées comme des outils afin de prédire les comportements ultérieurs du système. Ainsi cinq types d'analyses sont effectuées : une analyse chaotique basée sur l'hypothèse selon laquelle l'attracteur qui gouverne le système est de forme elliptique, une analyse avec une fonction linéaire, une fonction exponentielle, une fonction sinusoïdale, et deux fonctions de second degré. Celles-ci permettent de réaliser quatre séries de prédictions à propos du débit de réponse à la seconde suivante ou lors de l'intervalle suivant. Dans chaque cas, les constantes peuvent être estimées à partir des données de la session précédente (à priori) ou à partir des données de la session en cours (à posteriori).

Les résultats des analyses sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Prédictions	Modèle chaotique	Autres modèles
	Pourcentage de variance expliquée	
A posteriori seconde suivante	89 à 98 %	67 à 95 %
A priori seconde suivante	83 à 98 %	51 à 90 %
A posteriori intervalle suivant	50 à 76 %	14 à 65 %
A priori intervalle suivant	41 à 72 %	13 à 60 %

Les résultats sont mitigés. Si dans tous les cas de figure l'analyse à partir du modèle chaotique rend compte d'un fort pourcentage de la variance observée, la qualité des prédictions seconde par seconde reste forte pour tous les types d'analyse. La seule situation où l'analyse non linéaire semble nettement supérieure concerne les prédictions du débit de réponse à l'intervalle suivant. Ce type d'analyse permettrait davantage de saisir la variabilité inter-intervalles. Par ailleurs, remarquons que l'analyse non linéaire est plus performante lorsqu'il s'agit de prédire le débit de réponse à la seconde suivante plutôt qu'à l'intervalle suivant. Ceci rend compte d'une des caractéristiques des

attracteurs étranges : la sensibilité aux conditions initiales. Deux trajectoires de l'attracteur qui sont à l'origine quasiment confondues s'écartent systématiquement l'une de l'autre et cet écart s'amplifie de façon exponentielle au cours de l'évolution du système. Dans le cas des systèmes vivants étudiés, il est impossible de connaître avec une précision infinie les conditions initiales. Sachant ceci, il est aisé de comprendre que plus les prédictions expérimentales sont réalisées à court terme, plus justes elles sont.

Que conclure de ces travaux, et plus généralement, quelles sont les perspectives offertes par la théorie des systèmes dynamiques dans l'étude des programmes temporels opérants ? Afin de modéliser les états stables plusieurs modèles tels que la SET et la BeT ont été développés. Néanmoins, ceux-ci sont incapables de modéliser l'acquisition du contrôle temporel. Par ailleurs, les données recueillies chez le jeune humain ne respectent pas la propriété scalaire (Darcheville et al., 1992 ; Darcheville et al., 1993 ; Rivière, 1992) sur laquelle repose ces modèles. Il semble donc difficile d'utiliser les modèles développés chez l'animal à l'humain. Les travaux développés par Higa et collaborateurs mettent en avant l'importance de regarder les données essai par essai. Appliquée aux jeunes humains, cette méthode met en évidence les signes de non linéarité lors de l'ajustement aux contraintes temporelles (Darcheville et al., 1999). Comment développer dès lors une théorie unitaire de la psychologie permettant de décrire - chez l'animal ou l'humain - l'acquisition du comportement et ses propriétés à l'état stable ? La modélisation non linéaire semble intéressante. Celle-ci permet en effet de représenter la complexité et les propriétés fondamentales des systèmes évoluant dans le temps. Si nous envisageons de travailler dans cette optique, il est évident que des implications épistémologiques et méthodologiques fortes devraient modifier les conceptions habituelles en psychologie (Howe et Rabinowitz, 1994 ; Marr, 1992). Si la dynamique des systèmes comportementaux est non linéaire, alors la démarche classique qui vise à analyser indépendamment tout une série de variables pourrait se révéler inadéquate pour élaborer une théorie unifiée du comportement (Hoyert, 1992). En effet, la variation de l'une d'entre elles, même minime, est en mesure de modifier l'ensemble du système. Ce qui signifie que seule une connaissance infinie des conditions initiales permettrait de prédire le comportement du système. Néanmoins, les outils de la théorie de la dynamique non linéaire (ex : séries temporelles) permettent d'envisager des prédictions à court et moyen termes. D'autre part, il ne s'agit pas de déclarer la démarche classique comme nulle. La dynamique non linéaire permet d'observer l'évolution d'un système dans son ensemble et l'analyse classique peut aider à identifier les variables de celui-ci et la façon dont elles varient. Enfin, les paradigmes expérimentaux ne deviennent pas obsolètes si ils permettent d'étudier la variation qui redevient l'objet premier de l'analyse du comportement.

RÉFÉRENCES

- Abraham, N.B., & Gollub, J.P. (1984). Testing nonlinear dynamics. *Physica*, *11D*, 252-264.
- Ashton, R. (1976). Aspects of timing in child development. *Child Development*, *47*, 622-626.
- Ayers, S. (1997). The application of chaos theory to psychology. *Theory and Psychology*, *7*, 373-398.
- Berger, P., Pomeau, Y., & Vidal, C. (1984). *L'ordre dans le chaos. Vers une approche déterministe de la turbulence*. Paris: Hermann.
- Bizo, L.A., & White, K.G. (1994a). Pacemaker rate in the behavioral theory of timing. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, *20*, 308-321.
- Bizo, L.A., & White, K.G. (1994b). The behavioral theory of timing : Reinforcer rate determines pacemaker rate. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *61*, 19-33.
- Bizo, L.A., & White, K.G. (1997). Timing with controlled reinforcer density : Implications for models of timing. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, *23*, 44-55.
- Boulanger, B. (1995). Au bord du chaos. In H. Lejeune, F. Macar, & V. Pouthas (Eds.), *Des Animaux et des Hommes*. (pp. 239-254). Paris: PUF.
- Boulanger, B., Ingebos, A.M., Lahak, M., Machado, A., & Richelle, M. (1987). Variabilité comportementale et conditionnement opérant chez l'animal. *L'année Psychologique*, *87*, 417-434.
- Catania, A.C. (1970). Reinforcement schedules and psychophysical judgements : A study of some temporal properties of behavior. In W.N. Schoenfeld (Ed.), *The theory of reinforcement schedules*. (pp. 1-42). New-York: Appleton Century-Crofts.
- Cheng, K., & Westwood, R. (1993). Analysis of single trials in pigeons' timing performance. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, *19*, 56-67.
- Church, R.M. (1984). Properties of the internal clock. In J. Gibbon & I.G. Allan (Eds.), *Timing and time perception*. (pp. 566-582). New-York: New-York Academy of Sciences.
- Church, R.M. (1997). Timing and temporal search. In C.M. Bradshaw & E. Szabadi (Eds.), *Time and behaviour : Psychological and neurobehavioural analyses*. (pp. 41-78). Amsterdam: Elsevier.
- Church, R.M., & Broadbent, H.A. (1990). Alternative representations of time, number, and rate. *Cognition*, *37*, 55-81.
- Church, R.M., & Broadbent, H.A. (1991). A connectionist model of timing. In M.L. Commons, S. Grossberg, & J.E.R. Staddon (Eds.), *Neural Network Model of Conditioning and Action*. (pp. 225-240). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Church, R.M., Miller, K.D., Meck, W.H., & Gibbon, J. (1991). Symmetrical and asymmetrical sources of variance in temporal generalization. *Animal Learning & Behavior*, *19*, 207-214.
- Darcheville, J.C., Rivière, V., & Clément, C. (1999). Dynamical properties of infants responses to unpredictable transitions in fixed-interval schedules. *Behavioural Processes*.
- Darcheville, J.C., Rivière, V., & Wearden, J.H. (1992). Fixed-interval performance and self-control in children. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *57*, 187-199.
- Darcheville, J.C., Rivière, V., & Wearden, J.H. (1993). Fixed-interval performance and self-control in infants. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *60*, 239-254.
- Dews, P.B. (1970). The theory of fixed-interval responding. In W.N. Schoenfeld (Ed.), *The theory of reinforcement schedules*. (pp. 43-61). New-York: Appleton Century-Crofts.
- Donahoe, J.W., & Burgos, J.E. (1999). Timing without a timer. A commentary on Staddon & Higa's «Time and memory : Towards a pacemaker-free theory of interval timing». *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *71*, 257-263.
- Donahoe, J.W., & Palmer, D.C. (1994). *Learning and complex behavior*. Needham Heights, Massachusetts: Allyn and Bacon.
- Dragoi, V., & Staddon, J.E.R. (1999). The dynamics of operant conditioning. *Psychological Review*,

106, 20-61.

- Ferster, C., & Skinner, B.F. (1957). *Schedules of reinforcement*. New-York: Appleton-Century-Crofts.
- Fetterman, J.G., & Killeen, P.R. (1991). Adjusting the pacemaker. *Learning and Motivation*, 22, 226-252.
- Fetterman, J.G., & Killeen, P.R. (1995). Categorical scaling of time : Implications for clock-counter models. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, 21, 43-63.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 279-325.
- Gibbon, J. (1991). Origins of scalar timing. *Learning and Motivation*, 22, 3-38.
- Gibbon, J., & Church, R.M. (1990). Representation of time. *Cognition*, 37, 23-54.
- Gibbon, J., & Church, R.M. (1992). Comparison of variance and covariance patterns in parallel and serial theory of timing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 57, 393-406.
- Gibbon, J., Church, R.M., & Meck, W.H. J. Gibbon & L.G. Allan. (1984). Scalar timing in memory. New-York: New-York Academy of Sciences. 52 p.
- Glass, L., & Mackey, M.C. (1988). *From clocks to chaos*. Princeton: Princeton University Press.
- Gleick, J. (1987). *Chaos : Making a new science*. New-York: Viking Press (Traduction française (1989) : La théorie du chaos : vers une nouvelle science. Paris : Flammarion).
- Haight, P.A., & Killeen, P.R. (1991). Adjunctive behavior in multiple schedules of reinforcement. *Animal Learning & Behavior*, 19, 257-263.
- Hanson, S.J., & Killeen, P.R. (1981). Measurement and modeling of behavior under fixed-interval schedules of reinforcement. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, 7, 129-139.
- Higa, J.J. (1996). Dynamics of time discrimination : II. The effects of multiple impulses. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 66, 117-134.
- Higa, J.J. (1997a). Dynamics of temporal control in rats : The effects of a brief transition in interval duration. *Behavioural Processes*, 40, 223-229.
- Higa, J.J. (1997b). Rapid timing of a single transition in interfood interval duration by rats. *Animal Learning & Behavior*, 25, 177-184.
- Higa, J.J., & Staddon, J.E.R. (1997). Dynamic models of rapid temporal control in animals. In C.M. Bradshaw & E. Szabadi (Eds.), *Time and behaviour : Psychological and neurobehavioural analyses*. (pp. 1-40). Amsterdam: Elsevier.
- Higa, J.J., Thaw, J.M., & Staddon, J.E.R. (1993). Pigeons' wait-time responses to transitions in interfood-interval duration : Another look at cycle schedule performance. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 59, 529-541.
- Higa, J.J., Wynne, C.D.L., & Staddon, J.E.R. (1991). Dynamics of time discrimination. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, 17, 281-291.
- Hinton, S.C., & Meck, W.H. (1997). How time flies : Functional and neural mechanisms of interval timing. In C.M. Bradshaw & E. Szabadi (Eds.), *Time and behaviour : Psychological and neurobehavioural analyses*. (pp. 409-458). Amsterdam: Elsevier.
- Howe, M.L., & Rabinowitz, F.M. (1994). Dynamic modeling, chaos, and cognitive development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 58, 184-199.
- Hoyert, M.S. (1992). Order and chaos in fixed-interval schedules of reinforcement. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 57, 339-363.
- Killeen, P.R. (1975). On the temporal control of behavior. *Psychological Review*, 82, 89-115.
- Killeen, P.R. (1991). Behavior's time. In G.H. Bower (Ed.), (pp. 295-334). New-York: Academic Press.
- Killeen, P.R., & Fetterman, J.G. (1988). A behavioral theory of timing. *Psychological Review*, 95, 274-295.

- Killeen, P.R., & Fetterman, J.G. (1993). The behavioral theory of timing : Transitions analyses. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 59, 411-422.
- Killeen, P.R., Fetterman, J.G., & Bizo, L.A. (1997). Time's Causes. In C.M. Bradshaw & E. Szabadi (Eds.), *Time and behaviour : Psychological and neurobehavioural analyses*. (pp. 79-139). Amsterdam: Elsevier.
- Laties, V.G., Weiss, B., & Weiss, A.B. (1969). Further observations on overt «mediating» behavior and the discrimination of time. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 12, 43-57.
- Lefranc, M. (1992). Thèse de doctorat. Caractérisation du chaos dans les lasers CO₂. Université des Sciences et Technologies de Lille.
- MacEwen, D., & Killeen, P.R. (1991). The effects of rate and amount of reinforcement of the speed of the pacemaker in pigeons timing behavior. *Animal Learning & Behavior*, 19, 164-170.
- Machado, A. (1989). Operant conditioning of behavioral variability using a percentile reinforcement schedule. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 52, 155-166.
- Machado, A. (1997). Learning the temporal dynamics of behavior. *Psychological Review*, 104, 241-265.
- Malapani, C., Rakitin, B.C., Levy, R., Meck, W.H., Deweer, B., Dubois, B., & Gibbon, J. (1998). Coupled temporal memories in Parkinson's disease : A temporal dopamine-related dysfunction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 316-331.
- Marr, M.J. (1992). Behavior dynamics : One perspective. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 57, 249-266.
- Meck, W.H., & Church, R.M. (1984). Simultaneous temporal processing. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, 10, 1-29.
- Meck, W.H., Komeily-Zadeh, F.N., & Church, R.M. (1984). Two-step acquisition : Modification of an internal clock's criterion. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, 10, 297-306.
- Metcalf, B.R., & Allen, J.D. (1995). In search of chaos in schedule-induced polydipsia. In F.D. Abraham & A.R. Gilgen (Eds.), *Chaos theory in psychology*. (pp. 73-86). Westport, CT: Greenwood Press.
- Michon J.A. (1975). Time experience and memory processes. In J.T. Fraxe & N. Lawrence (Eds.), *The study of time II*. (pp. 302-313). New-York: Springer-Verlag.
- Monfort, V., Perbal, S., Ferrandez, A.M., & Pouthas, V. (1998). Estimation de durées et systèmes de mémoire : Une étude neuropsychologique et électroencéphalographique. In ARC (Ed.), *VII^o Colloque de l'Association pour la Recherche en Psychologie*. (pp. 104-113). Villetaneuse:
- Morgan, L., Killeen, P.R., & Fetterman, J.G. (1993). Changing rates of reinforcement perturbs the flow of time. *Behavioural Processes*, 30, 259-272.
- Page, S., & Neuringer, A. (1985). Variability is an operant. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 11, 429-452.
- Raslear, T.G., Shurtleff, D., & Simmons, I. (1992). Intertrial-interval effects on sensitivity (A') and response bias (B'') in a temporal discrimination by rats. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 58, 527-535.
- Richelle, M. (1992). Le modèle sélectionniste : Convergences dans la pensée scientifique moderne. *Acta Comportementalia*, 215-235.
- Richelle, M., & Lejeune, H. (1980). *Time in animal behaviour*. Oxford: Pergamon.
- Rivière, V. (1992). Thèse de doctorat. Ontogenèse de la régulation temporelle et impulsivité. Université Charles de Gaulle Lille 3;
- Roberts, S. (1981). Isolation of an internal clock. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, 7, 242-268.
- Ruelle, D. (1980). Les attracteurs étranges. *La Recherche*, 11, 132-144.
- Schneider, B.A. (1969). A two-state analysis of fixed-interval responding in the pigeon. *Journal of the*

Experimental Analysis of Behavior, 12, 677-687.

- Skinner, B.F. (1938). *The behavior of organisms*. New-York: Appleton-Century-Crofts.
- Staddon, J.E.R. (1988). Quasi-dynamic choice models : Melioration and ratio invariance. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 49, 303-320.
- Staddon, J.E.R. (1993). On rate-sensitive habituation. *Adaptive Behavior*, 1, 421-436.
- Staddon, J.E.R., & Higa, J.J. (1991). Temporal learning. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation*. (pp. 265-294). San Diego: Academic Press.
- Staddon, J.E.R., & Higa, J.J. (1999). Time and memory : Towards a pacemaker-free theory of interval timing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71, 215-251.
- Staddon, J.E.R., & Reid, A.K. (1990). On the dynamics of generalization. *Psychological Review*, 97, 576-578.
- Staddon, J.E.R., & Simmelhag, V.L. (1971). The «superstition» experiment : A reexamination of its implications for the principles of adaptative behavior. *Psychological Review*, 78, 3-43.
- Stewart, I. (1989). *Does God play dices? The new mathematics of chaos*. London: Penguin Books (Traduction française (1992) : Dieu joue-t-il aux dés? Les mathématiques du chaos. Paris, Flammarion).
- Swinney, H.L. (1983). Observations of order and chaos in nonlinear systems. *Physica*, 7D, 3-15.
- Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In D.A. Rand & L.S. Young (Eds.), *Lecture notes in mathematics*. (pp. 366-381). New-York: Springer-Verlag.
- Thelen, E., & Smith, L.B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Timberlake, W. (1994). Behavior systems, associationism, and Pavlovian conditioning. *Psychonomic Bulletin and Review*, 1, 405-420.
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval : Implications for a model of the «internal clock». *Psychological Monographs*, 1-31.
- Wearden, J.H. (1985). The power law and Weber's law in fixed-interval postreinforcement pausing : A scalar timing model. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 37B, 191-211.
- Wearden, J.H., & Doherty, M.F. (1995). Exploring and developing a connectionist model of animal timing : Peak procedure and fixed-interval simulations. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, 21, 99-115.
- Wynne, C.D.L., & Staddon, J.E.R. (1988). Typical delay determines waiting time on periodic-food schedules : Static and dynamic tests. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 50, 197-210.
- Wynne, C.D.L., Staddon, J.E.R., & Delius, J.D. (1996). Dynamics of waiting in pigeons. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 65, 603-618.
- Zeiler, M.D. (1999). Time without clocks. A commentary on Staddon & Higa's «Time and memory : Towards a pacemaker-free theory of interval timing». *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71, 288-291.
- Zeiler, M.D., & Powell, D.G. (1994). Temporal control in fixed-interval schedules. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 61, 1-9.
- Zeiler, M.D., Scott, G.K., & Hoyert, M.S. (1987). Optimal temporal differentiation. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 47, 191-200.

RÉSUMÉ

La modélisation et l'analyse des données dans les programmes temporels opérants tient une place essentielle dans l'analyse du comportement. Les caractéristiques importantes de ces modèles seront

présentées en distinguant deux approches majeures. La première se donne pour objectif de modéliser les propriétés molaires des comportements et insiste particulièrement sur les processus cognitifs mis en jeu. La seconde approche modélise les états stables du comportement mais aussi l'acquisition de ceux-ci. Ces modèles, dynamiques, insistent davantage sur les propriétés des liens entre réponse et renforcement. L'accent sera particulièrement porté sur l'approche de la variabilité comportementale sous-jacente au modèle dynamique non linéaire et la mise en perspective de cette approche en psychologie.

Mots-clés : contrôle temporel ; SET ; BeT ; LeT ; dynamique ; variabilité ; non linéarité

SUMMARY

Timing behaviour is a major concern in behavioural analysis and many models have been developed. Two kinds of models can be distinguished. The first view is originally of models with a common characteristic, the determination of the time stimulus dimension with at least one internal clock. These first one postulates the existence of an internal clock and focuses on asymptotic properties of behaviour, like scalar timing property. These models differ from each other by the nature of the cognitive processes they used to explain timing. One second view, by considering the dynamics of behaviour, is interested in the acquisition of the temporal control. These models do not require an internal clock to adjust to temporal regularities. Linear, and nonlinear models have been proposed. A few concepts of the nonlinear approach will be specified, specially about variability, and methods will be clarified. Our purpose is to discuss the interest of this approach in the analysis and the modeling of behaviour in reinforcement schedules.

Key-words : temporal control ; SET ; BeT ; LeT ; dynamical systems ; nonlinear dynamics ; variability.

CRÉDITS:

La Figure 1 a été reproduite et adaptée avec l'autorisation de *Annals of the New York Academy of Sciences*.

La Figure 2 a été reproduite et adaptée de *Cognition*, 37, Church, R. M., Broadbent, H. A., "Alternative representations of time, number, and rate," 55-81, copyright (1990), avec la permission de *Elsevier Science*.

Les figures 4, 5 et 6 ont été reproduites et adaptées avec la permission de *American Psychological Association* (Copyright 1997, *American Psychological Association*). Ni les originaux ni ces adaptations ne peuvent être reproduits ou distribués de quelque forme que ce soit, ou enregistrés dans une base de données, sans la permission écrite préalable de *American Psychological Association*.

La Figure 8 a été reproduite et adaptée avec l'autorisation de *Academic Press*.

Les figures 3, 9, 10, 11, 12, 13 et 15 ont été reproduites et adaptées avec l'autorisation de *Society for the Experimental Analysis of Behavior*.