

ou

Recherche et reconnaissance de patterns chez les experts

Fernand Gobet

*School of Psychology
University of Nottingham
Nottingham NG7 2RD
United Kingdom
frg@psyc.nott.ac.uk*

RÉSUMÉ. Ce papier va d'abord donner un bref aperçu des recherches de Simon en psychologie, et va ensuite se concentrer sur ses travaux concernant la psychologie des experts. Les rôles respectifs de la recherche et de la reconnaissance de patterns, ainsi que leur interaction, seront investigués, en particulier avec ses travaux sur les joueurs d'échecs, et des implications pour l'intelligence artificielle seront tirées.

ABSTRACT.

MOTS-CLÉS : Herbert Simon, reconnaissance de patterns, recherche, résolution de problème, perception, mémoire, modélisation par ordinateur, expertise, réseau de discrimination, système de production

KEY WORDS:

ou

1. Introduction

Bien que ses recherches se soient poursuivies dans une douzaine de disciplines différentes, Simon avait coutume de dire que, en fait, il était obsédé par une seule idée (Simon, 1989): la manière dont les humains, malgré leurs nombreuses limitations cognitives et l'information limitée qu'ils possèdent sur l'environnement, prennent des décisions adaptatives dans un grand nombre de domaines. Tout au long de sa carrière, il proposa une double solution à cette question (p. ex.,(Simon, 1969). D'abord, les humains ne trouvent pas des solutions optimales, mais se satisfont de solutions suffisamment bonnes. Ensuite, la complexité apparente d'un organisme reflète en grande partie la complexité de l'environnement, qui va à son tour être reflétée dans les connaissances acquises par cet organisme.

Ces deux intérêts essentiels de Simon—rationalité limitée et rôle de l'environnement—ressortent clairement dans ses recherches en intelligence artificielle (voir autres articles dans ce numéro spécial), mais aussi en psychologie, une discipline qui avait occupé la majorité de son temps depuis les années soixante. La rationalité limitée est au centre de ses travaux sur la prise de décision dans les organisations et de la résolution de problème en psychologie. Le rôle de l'environnement joue un rôle clé dans ses travaux sur l'apprentissage et la mémoire. Dans les deux cas, ces travaux ont mené au développement de systèmes de simulation par ordinateur.

Bien que ces deux intérêts aient souvent mené à des publications indépendantes, il est important de rappeler que, dans l'esprit de Simon, ils formaient les deux facettes d'un même problème. Peut-être l'étude des experts, où ces deux questions jouent un rôle central, est l'un des domaines où leur intime relation est le plus évident. Quoi qu'il en soit, nous allons utiliser cette dichotomie comme schème organisateur de cet article. Après une brève revue de la littérature, nous présenterons d'abord les contributions empiriques de Simon, et ensuite ses travaux de modélisation.

2. Pourquoi étudier les experts?

Il y a plusieurs raisons pour lesquelles Simon a été fasciné par l'étude des experts. Premièrement, il a été lui-même expert dans toute une série de domaines, et il a été toujours été intrigué par les mécanismes cognitifs lui permettant d'acquérir de nouvelles compétences (Simon, 1989, 1991). Deuxièmement, les experts offrent une perspective intéressante sur la rationalité limitée des humains, en particulier sur les structures et mécanismes cognitifs en jeu: Quelles sont les limites qui peuvent être dépassées par les experts? Quelles sont les limites impitoyables que même les meilleurs ne peuvent transcender? Quelles sont les stratégies employées par les experts pour aller au-delà de ces limites? Troisièmement, il y a des applications d'ordre pratique. D'une part, en comprenant mieux la manière dont les experts opèrent, nous serons en mesure d'améliorer leurs performances, mais, surtout, d'améliorer l'éducation de la majorité. Celle-ci restera certes non-experte, mais obtiendra un niveau de performance meilleur, et cela plus rapidement que ce n'est le cas actuellement. Les liens serrés entre les recherches de Simon sur l'expertise et sur l'éducation apparaissent clairement dans sa collaboration à un projet visant à améliorer l'enseignement des mathématiques en Chine

ou

(Zhu & Simon, 1988; Zhu, Lee, Simon, & Zhu, 1996) . D'autre part, il existe la possibilité de développer, basée sur nos connaissances de la manière dont les experts humains fonctionnent, des systèmes artificiels (par exemple, systèmes experts) capables de performances égales ou même supérieures à celles des humains. Ce dernier sujet a particulièrement intéressé Simon dans le cadre des organisations (Simon, 1965).

3. Recherches classiques sur la psychologie des experts

En commençant avec Galton (Galton, 1869), la plus grande partie des travaux effectués en psychologie sur l'expertise—un domaine qui regroupe des sujets tels que performances exceptionnelles, talent, génie, créativité, et intuition—a été faite de manière corrélative, c'est-à-dire en étudiant comment ces performances covarient avec d'autres facteurs tels que niveau d'éducation, intelligence, âge, ou avec des caractéristiques parentales telles que niveau socio-économique ou intelligence. Un des objectifs à peine voilés de cette tradition scientifique, qui partage des liens étroits avec la recherche sur le Quotient Intellectuel, est de montrer que les performances exceptionnelles sont dues à un talent inné et sont peu sensibles à l'influence de l'environnement.

La recherche expérimentale sur les experts a longtemps souffert de la concurrence de l'approche corrélative, et ce n'est pas avant les travaux effectués à Carnegie Mellon par Simon et ses collègues dans les années 60 et 70 que ce type de recherche a acquis ses lettres de noblesse en psychologie. Parmi les rares travaux antérieurs proprement expérimentaux, on peut mentionner ceux de Binet (Binet, 1894) sur l'habileté des maîtres d'échecs de jouer à l'aveugle et sur les exploits des calculateurs mentaux. Il faut également mentionner la thèse de De Groot (De Groot, 1946, 1965), publiée en 1946 en hollandais, qui anticipe plusieurs des idées modernes sur l'expertise. Cet ouvrage, que Simon rencontra par hasard, l'impressionnera au point qu'il organisera sa publication en anglais, en 1965, se chargeant lui-même d'en traduire de larges portions. L'influence de De Groot sur les recherches de Simon est double. D'une part, De Groot utilise la théorie peu connue de Selz (Selz, 1922), qui anticipe, certes de manière informelle, certaines idées de l'approche du traitement de l'information de Newell et Simon, tels que la description de la cognition sous forme de processus, l'emploi de productions (paires conditions-actions), l'importance des stratégies, et le rôle des structures hiérarchiques dans la pensée humaine (Newell & Simon, 1972). D'autre part, les deux tâches expérimentales utilisées par De Groot, qui produisirent des résultats surprenants, vont être reprises par le groupe de Carnegie Mellon.

Dans la première tâche, les joueurs doivent réfléchir à voix haute en même temps qu'ils cherchent un bon coup dans une position donnée. La surprise fut que de très forts maîtres—et De Groot avait un échantillon unique comprenant plusieurs champions du monde et candidats au titre mondial—ne peuvent pas être différenciés des joueurs plus faibles sur la base de la structure de leurs protocoles. En particulier, ils ne visitent pas davantage de positions ou ne cherchent pas plus profondément. Tous les joueurs sont très *sélectifs* dans leur recherche, n'accordant leur attention qu'à une portion infime des coups et séquences de coups possibles—ce que laissait d'ailleurs prévoir la théorie de la rationalité limitée. La différence porte sur le contenu de la pensée, et, évidemment, sur le choix du coup.

ou

Dans la seconde tâche, une tâche de mémoire dans laquelle les joueurs doivent reconstruire une position présentée durant quelques secondes, De Groot trouva une différence majeure entre des joueurs de niveaux différents. Dans ces conditions, les maîtres étaient capables de mémoriser presque l'ensemble de la position, alors que même de bons amateurs ne pouvaient reproduire qu'environ 50% des pièces correctement. Ces résultats ont mené De Groot à souligner le rôle essentiel joué par la perception, affinée par des années d'expérience. Cette habileté de *voir* tout à la fois le sens de la position, le bon coup et le bon plan explique que les maîtres peuvent choisir de bons coups sans trop de recherche et qu'ils peuvent mémoriser une position rapidement présentée.

4. Travaux empiriques

Dans leur étude de divers domaines d'expertise¹ (échecs, physique, mathématiques, et économie), Simon et ses collaborateurs ont utilisé plusieurs approches empiriques : protocoles verbaux, analyse de données naturelles, et techniques expérimentales. L'analyse de protocoles verbaux a joué un rôle essentiel dans l'approche de Simon, en particulier pour le développement de modèles informatiques. Cette technique a souvent été critiquée par les psychologues, qui la considèrent incorrectement comme étant semblable à l'introspection, et il a fallu dans le livre classique d'Ericsson et de Simon (Ericsson & Simon, 1993) pour que l'analyse des protocoles trouve une nouvelle popularité en psychologie.

Pour ce qui est des techniques expérimentales, on mentionnera que, bien que Simon ait parfois utilisé les techniques standard de la psychologie (grands échantillons et statistiques inférentielles), il a montré un net penchant pour l'étude très détaillée des processus en jeu et l'emploi d'échantillons très petits, n'hésitant pas à employer un seul sujet—parfois lui-même! Dans le but de comprendre ces processus, il a popularisé une autre méthodologie, qui consiste à comparer le comportement des experts avec celui des débutants. Finalement, Simon a souvent employé ces données empiriques comme point de départ pour développer des modèles informatiques, un sujet qui sera traité en détail dans la deuxième partie de cet article.

Bien que relativement neutre sur la question des composantes innées du talent, Simon était également d'avis que c'est bien l'assimilation de l'environnement propre à un domaine d'expertise qui joue le rôle essentiel: l'analyse de biographies montre qu'il faut au moins 10 ans d'étude intensive et de pratique soutenue pour devenir un expert de niveau mondial (Simon & Chase, 1973). La question est alors de savoir comment les créateurs et les experts de haut niveau acquièrent et utilisent leurs connaissances pour contrebalancer leurs limites de traitement d'information.

Physiciens, médecins ou joueurs d'échecs ont tous à prendre des décisions au sein d'espaces de problème gigantesques. Selon Simon, ils le font en utilisant des configurations qu'ils ont rencontrées auparavant dans leur domaine, et ainsi apprises. A ces configurations, ils ont associé de l'information qui peut être utilisée pour résoudre des problèmes. L'idée est simple, mais le génie de Simon est d'avoir développé toute une série de techniques expérimentales pour identifier le détail des mécanismes en jeu.

¹ On pourrait y ajouter le domaine de la découverte scientifique, traité en détail par Ganascia dans ce numéro.

ou

Pour simplifier la présentation des travaux empiriques sur l'expertise, il est possible de les grouper en deux catégories: ceux portant sur la résolution de problème et la prise de décision, et ceux portant sur la perception, la mémoire, et l'apprentissage. Ce groupement, très souvent employé en psychologie et reflétant une division semblable en intelligence artificielle (recherche vs. connaissance), ne doit cependant pas nous faire oublier que les mécanismes mis en jeu dans les deux cas sont intimement liés; cette interdépendance sera le sujet de la dernière partie de cette section.

4. 1. Résolution de problème et prise de décision

Comme nous l'avons vu, De Groot avait montré que la recherche des joueurs est très sélective. Analysant de manière exhaustive le protocole verbal de l'un de leurs sujets, Newell et Simon ont essayé de caractériser plus en détail les mécanismes de génération rendant possible cette sélectivité (Newell & Simon, 1965, 1972). En général, l'analyse de chaque coup de base (coup à partir de la position initiale) est indépendante des autres coups de base. Les premiers épisodes utilisent des coups normaux, alors que pour les épisodes suivants sélectionnent des coups de plus en plus inusuels. Si l'évaluation d'un épisode donne un résultat favorable, l'analyse du coup de base est continuée. Dans le cas contraire, elle est abandonnée. Finalement, l'analyse d'un coup de base est abandonnée en faveur d'un autre coup, qui, découvert durant l'épisode, semble plus profitable au sujet ou à son adversaire (cette idée est maintenant couramment utilisée dans les programmes d'échecs sous la forme de « killer heuristics »). A l'intérieur des épisodes, il est frappant de constater que, la plupart du temps, un seul coup est produit à la fois. La génération peut être effectuée par l'emploi de relations d'attaque et de défense, d'heuristiques, ou de plans.

Durant la résolution, les joueurs tentent périodiquement de réévaluer le problème. Cette évaluation peut provenir de la découverte d'un nouvel aspect de la position ou de la constatation que l'analyse d'un coup donné a amené des résultats différents que ceux qui étaient attendus.

En physique, Simon et ses collègues ont comparé la manière dont experts et débutants résolvent des problèmes, en utilisant la méthode de l'analyse de protocoles verbaux (Bhaskar & Simon, 1977; Larkin, Mc Dermott, Simon, & Simon, 1980; Simon & Simon, 1978). Ils ont trouvé que les débutants ont tendance à partir du but et à travailler en arrière en direction des données, alors que les experts partent plutôt des données pour se diriger vers le but. Les experts parlent en termes de principes de base de physique (par exemple, forces), ce qui leur permet de générer les quantités inconnues en partant des données. Simon et ses collègues soulignent également l'importance du type de représentation (représentation diagrammatique) employé par les experts. Simon a également recueilli des données en économie montrant l'emploi aisé de représentations multiples par les experts, et les difficultés que les débutants ont d'intégrer plusieurs représentations (Tabachnek-Schijf, Leonardo, & Simon, 1997).

Comme de Groot, Simon parvient à la conclusion que la force des experts dépend surtout de la puissance et de l'efficacité des concepts et des règles heuristiques utilisées et de la faculté de condenser l'analyse à un strict minimum. Leur habileté de reconnaître de larges configurations leur permet d'approcher certains problèmes sans beaucoup de

ou

calcul pur. Le détail des mécanismes de reconnaissance fut affiné grâce à l'étude de la perception et de la mémoire des experts, qui fut un sujet majeur d'étude pour Simon.

4.2. La perception et la mémoire des experts

L'importance de la recherche sélective ayant été bien établie, se pose alors la question des processus cognitifs permettant une rapide identification des éléments essentiels d'une situation. Chase et Simon (Chase & Simon, 1973a, 1973b; Simon & Chase, 1973) adressèrent cette question par une série d'expériences élégantes, dont certaines élaborèrent la tâche de rappel développée par De Groot. Cette recherche est typique du style simonien : les expériences sont analysées en détail, à la fois quantitativement et qualitativement, pour affiner des points théoriques, et la taille l'échantillon est minime (seulement trois sujets : une débutante, un amateur, et un maître). Il n'est pas possible de donner ici un aperçu complet de cette recherche très riche. Nous nous contenterons de l'illustrer par l'analyse que font Chase et Simon du concept de chunk.

Un *chunk* est une unité perceptive et significative qui peut être récursivement utilisée pour créer d'autres chunks durant l'apprentissage. Pour mieux cerner ce concept, Chase et Simon ont analysé en détail la manière avec laquelle des joueurs d'échecs replacent les pièces sur l'échiquier dans deux conditions: (a) une tâche de copie (les joueurs peuvent voir la position stimulus); (b) une tâche de mémoire (la position stimulus n'est présentée que pour une durée de 5 secondes). Ils ont trouvé que les joueurs replacent les pièces par groupes séparés par des pauses. Dans la tâche de copie, les pièces replacées après une même fixation sur l'échiquier possèdent des patterns de relations (attaque, défense, proximité, et couleur) différents que les pièces placées entre deux fixations. Une analyse statistique montre que plus de la moitié de ces groupements consistent en structures de pions, un trait de position relativement permanent. Les mêmes résultats sont trouvés dans la tâche de mémoire, où les chunks sont définis par les temps entre le placement des pièces, une durée de deux secondes étant utilisée comme valeur critique. Ces résultats importants, qui supportent l'hypothèse que les joueurs d'échecs mémorisent les positions en employant des chunks, ont été récemment répliqués (Gobet & Simon, 1998), avec un échantillon beaucoup plus grand que dans l'étude originale.

4.2.1. La théorie du chunking

Pour expliquer leurs données empiriques, Chase et Simon (Chase & Simon, 1973a, 1973b; Simon & Chase, 1973) proposent que, durant la pratique et l'étude de leur art, les joueurs d'échecs acquièrent une grande quantité de chunks. Ces chunks sont organisés en mémoire à long-terme (MLT) sous la forme d'un réseau de discrimination, qui permet un accès rapide à l'information. Les experts, comme le commun des mortels, sont entravés par une mémoire à court-terme limitée (7 items) et par le temps relativement long nécessaire pour encoder de l'information en mémoire à long-terme (8 secondes pour créer un nouveau chunk). Lorsqu'ils perçoivent une position, les joueurs placent en mémoire à court-terme (MCT) des symboles pointant en MLT. Comme les maîtres ont davantage de chunks et que certains de ces chunks sont plus grands que ceux de joueurs plus faibles, il leur est plus facile de mémoriser une position. Cette partie de la théorie a été implémenté sous forme de programme d'ordinateur (voir plus bas).

ou

Chase et Simon expliquent également comment la reconnaissance perceptive des patterns appris est utilisée durant des tâches de résolution de problème. Les patterns sont représentés en MLT par un nom interne associé à un ensemble d'instructions permettant de reconstituer en imagination le pattern comme une image interne, et contiennent de l'information sur les coups plausibles. Ainsi, les patterns échiquiers placés en MLT sont activés par les constellations présentes sur l'échiquier et déclenchent en même temps les coups adéquats (par exemple, aux échecs, la présence d'une colonne ouverte dans une position pourrait activer une production comme: « Si une colonne est ouverte, alors essayer de l'occuper avec une tour »), qui seront par la suite placés en MCT pour être davantage examinés. Ce processus se répète de manière récursive, c'est-à-dire que des patterns peuvent être reconnus dans la position construite en imagination, ce qui mène à l'activation de coups ou plans possibles. Le choix d'un coup ne dépend alors non pas d'une recherche approfondie au travers de l'ensemble des possibilités, mais est avant tout basé sur une reconnaissance de pattern et à une recherche sélective. La théorie est comparable à un système de production (Newell & Simon, 1972); chaque pattern familier en MLT sert de *condition*, qui peut être satisfaite par la reconnaissance de ce pattern sur l'échiquier, et l'*action* revient à évoquer un coup associé avec ce pattern.

La théorie a été appliquée à divers domaines d'expertise et a eu un impact important sur la psychologie de l'expertise en particulier et sur la psychologie cognitive en général, générant un nombre important de travaux (pour des revues de littérature, voir (Gobet, 1993; Holding, 1985)). Comme nous allons le voir, les diverses composantes de la théorie ont subi des destins divers. L'hypothèse d'une MCT limitée et d'un encodage lent en MLT n'a pas été supportée par les données, en tout cas pas dans sa forme originale. L'hypothèse que l'information est codée en chunks est partiellement supportée par les données, qui suggèrent cependant que d'autres structures existent en MLT. Finalement, l'idée d'un système de production est généralement supportée par les données, quoique de manière indirecte.

La théorie du chunking a dominé la recherche sur l'expertise durant plus de deux décades. Même « réfutée » à plusieurs reprises, elle a continué à être le point de référence, peut-être du fait de sa simplicité et du fait qu'elle rend compte de plusieurs phénomènes empiriques de manière élégante. Comme il n'est pas possible de passer en revue tous les résultats obtenus dans cette ligne de recherche, nous nous contenterons de mentionner quelques résultats particulièrement illustratifs de la force théorique du concept de chunk.

4.2.2. Identification des chunks

Les résultats décrits par Chase et Simon sur le chunking étaient basés sur un seul paradigme expérimental—la comparaison du remplacement de pièces durant une tâche de mémoire et une tâche de copie. Depuis lors, la plausibilité du concept de chunk a été investiguée avec d'autres méthodologies. Dans une expérience de Charness (Charness, 1974), les pièces étaient ou bien groupées en chunks, selon les relations proposées par Chase et Simon, ou bien présentées par colonnes, ou finalement dictées avec un ordre aléatoire. Charness a trouvé une meilleure performance de rappel lorsque les pièces étaient groupées en chunks que lorsqu'elles étaient présentées par colonnes. L'ordre de présentation aléatoire donna lieu à la plus faible performance. Les mêmes résultats furent trouvés lorsque les pièces étaient présentées visuellement (Charness, 1974; Frey & Adelman, 1976).

ou

Plusieurs auteurs (Holding, 1985; Reitman, 1976) ont suggéré que l'opérationnalisation du concept de chunk par Chase et Simon contenait quelques faiblesses, telles que difficulté de déterminer le groupement en employant des temps de placement; difficulté d'identifier des chunks organisés en hiérarchies ou se chevauchant; et hypothèse que les chunks sont rappelés complètement en un seul groupe. Plusieurs techniques ont été proposées pour pallier ces faiblesses. Déjà dans les années quarante, de Groot (De Groot, 1946) avait demandé aux sujets de donner des commentaires rétrospectifs après la présentation de la position et d'indiquer, entre autre, quels groupes de pièces ils avaient perçus. Chi (Chi, 1978) et Reitman (Reitman, 1976) ont employé la technique du partitionnement. Dans cette technique, les sujets reçoivent le diagramme d'une position, et leur tâche est de dessiner les frontières des groupes de pièces qu'ils perçoivent. Finalement, Gold et Opwis (Gold & Opwis, 1992) ont utilisé une analyse hiérarchique de groupes pour identifier les structures de mémoire des joueurs d'échecs.

En général, ces techniques indiquent que les joueurs organisent le matériel en unités plus grandes que celles proposées par Chase et Simon. De manière intéressante, une réplique (Gobet & Simon, 1998) de l'étude originale de Chase et Simon a montré que les maîtres replacent les pièces en chunks plus grands que ce qui avait été originellement proposé (une moyenne de 19 pièces pour leur maîtres, contre les 5 ou 6 pièces proposées par Chase et Simon). Une différence importante entre le design des deux expériences est que la première a utilisé un échiquier et des pièces standards, alors que la seconde a employé une présentation par ordinateur. Il semblerait que les chunks plus petits trouvés par Chase et Simon soient un artefact du nombre limité de pièces que la main humaine peut contenir. De fait, la présence de grands chunks est supportée par les protocoles verbaux, dans lesquels les joueurs clairement emploient des concepts de haut niveau, certainement plus grands que les chunks proposés par Chase et Simon.

Au delà du jeu d'échecs, le concept de chunk a été corroboré dans d'autres domaines, tels que l'apprentissage verbal (Feigenbaum & Simon, 1984; Zhang & Simon, 1985), le bridge (Charness, 1989), la tour de Hanoi (Kotovsky, Hayes, & Simon, 1985), l'électronique (Egan & Schwartz, 1979), et la musique (Sloboda, 1991).

4.2.3. Perception

Deux conséquences de la théorie du chunking sont que, d'une part, les experts doivent être capables de traiter l'information très rapidement, et que, d'autre part, les mouvements oculaires des experts doivent être différents de ceux des amateurs. Ces deux prédictions sont largement supportées par les données. Non seulement les experts peuvent reconnaître les aspects critiques d'une position très rapidement, comme cela avait déjà été montré par De Groot, mais ils peuvent également mémoriser une position même avec un temps de présentation aussi court qu'une seconde (Gobet & Simon, 2000). Pour ce qui est des mouvements oculaires, on a trouvé que ceux des maîtres étaient plus rapides que ceux des amateurs, et qu'ils étaient plus variables (De Groot & Gobet, 1996). Les maîtres avaient aussi tendance à visiter l'ensemble de l'échiquier, alors que les amateurs ne visitaient qu'une portion de celui-ci. Les maîtres visitaient également plus souvent les cases importantes, même en corrigeant pour le nombre total de cases fixées. Finalement, ils avaient davantage tendance à fixer à l'intersection des cases, ce qui supporterait l'idée de chunk.

ou

4.2.3. *Nombre de chunks*

Chase et Simon, se basant sur des simulations par ordinateur (voir plus bas), avaient estimé qu'au moins 50,000 chunks devaient être engrangés en MLT pour atteindre le niveau d'expertise d'un maître d'échecs. Holding (Holding, 1985) a argué que ce nombre est beaucoup trop grand, et qu'il n'est pas nécessaire d'avoir plus de 2,500 chunks pour expliquer les résultats obtenus par les maîtres d'échecs dans les expériences portant sur la mémoire. Son raisonnement est que, si les relations sémantiques entre les pièces sont encodées, et non pas leur location exacte, chaque chunk en MLT peut encoder plusieurs patterns sur l'échiquier (par exemple: patterns de pièces blanches et noires, et patterns qui ont été déplacés d'une ou de plusieurs cases). L'instantiation de ces schémas n'encodant pas l'emplacement des pièces se ferait durant la perception de la position. Cependant, la proposition de Holding n'est pas supportée par les données empiriques. La modification de positions en décalant des patterns ou en prenant l'image en miroir de la position diminue la performance de rappel (F. Gobet & H. A. Simon, 1996; Saariluoma, 1994). On peut donc conclure que l'estimation de 50,000 chunks n'est pas exagérée ; l'encodage de la location exacte des pièces au sein d'un chunk a l'avantage de rendre possible une recherche de coup efficace et rapide, car il n'est pas nécessaire d'instancier des variables.

4.2.4. *Importance du sens*

La plupart des manuels de psychologie, se basant sur les résultats de Chase et Simon, mentionnent que la supériorité des experts disparaît lorsque le matériel est réorganisé aléatoirement. Cependant, Gobet et Simon (F. Gobet & H. A. Simon, 1996; F. Gobet & H. A. Simon, 1996) ont récemment montré que les maîtres d'échecs maintiennent leur supériorité lorsqu'ils ont à mémoriser des positions aléatoires présentées brièvement, bien que cette supériorité soit moins marquée que dans le rappel de positions tirées de parties. Ce résultat est théoriquement important, car il est une conséquence directe de la théorie du chunking: plus le nombre de chunks est grand, plus il est probable que certains de ces chunks vont être reconnus, par hasard, même dans une position aléatoire.

4.2.5. *Capacité de la MCT et temps d'encodage en MLT*

Plusieurs travaux ont adressé la manière dont la MCT et la MLT sont conceptualisées dans la théorie du chunking. Dans une expérience critique (Charness, 1974; Frey & Adesman, 1976), on a intercalé des tâches entre la présentation de positions d'échecs et leur rappel. D'après la théorie du chunking, il devrait y avoir une perte importante d'information, car la tâche interférente devrait éliminer les pointeurs en MCT. Cependant, les résultats montrent que les tâches interférentes, même si elles ont rapport aux échecs, ne causent qu'une perte minimale d'information (environ 10%) pour le rappel de positions. On a également trouvée que de forts joueurs peuvent mémoriser plusieurs positions présentées rapidement l'une après l'autre (Cooke, Atlas, Lane, & Berger, 1993; F. Gobet & H. Simon, 1996). Bien qu'il semble y avoir une limite autour de 5 échiquiers, cette performance est nettement supérieure à ce que prédit le modèle de Chase et Simon. Ces résultats questionnent sérieusement l'hypothèse que l'information est encodée uniquement dans une MCT de capacité limitée durant une tâche de rappel.

Bien que le concept de chunk ait en général été bien corroboré par les données empiriques que nous avons présentées, plusieurs résultats questionnent l'hypothèse que, durant une tâche de rappel, l'information est encodée uniquement dans une MCT de

ou

capacité limitée et que le temps d'encodage en MLT est lent. Comme nous le verrons dans la discussion des modèles computationnels, ces résultats ont conduit Simon et ses collègues à modifier la théorie du chunking, pour en particulier expliquer le rapide encodage en MLT montré par les experts.

4.3. La reconnaissance de patterns guide la recherche sélective

Un but de la recherche de Simon—parfois mal compris par certains observateurs qui n'ont considéré qu'un aspect de ses travaux—est d'identifier les mécanismes permettant aux connaissances perceptives de faciliter la recherche dans une tâche donnée. Dès lors, il a été particulièrement sensible, dans le domaine de l'expertise, aux données qui mettaient en lumière les rapports étroits en reconnaissance de patterns et recherche.

Une première donnée importante est que les experts sont capables de reconnaître rapidement, en quelques secondes, les caractéristiques principales d'une position (De Groot, 1946; De Groot & Gobet, 1996). De plus, la qualité de leur solution ne diminue que peu lorsqu'ils ont peu de temps à disposition. Par exemple, des maîtres d'échecs choisissent des coups presque aussi bons lorsqu'ils ont 5 secondes de réflexion par coup que lorsqu'ils ont 3 minutes (Calderwood, Klein, & Crandall, 1988). Et un joueur comme Kasparov peut jouer en simultanée contre une demi-douzaine de grands-maîtres et obtenir des performances qui le placeraient encore parmi les 5 meilleurs joueurs du monde (Gobet & Simon, 1996). Des résultats semblables ont été obtenus dans des situations telles que pompiers luttant contre un incendie ou militaires en condition de combat (Zsombok & Klein, 1997). Ces cas-là, où les experts n'ont que peu de temps à disposition, soulignent l'importance de la reconnaissance de patterns, de la recherche sélective, et de l'aspect « satisfaisant », et non optimal, des solutions.

L'importance accordée à la reconnaissance de patterns ne signifie pas pour autant que la recherche est sans importance. Même si les experts sont capables de cerner rapidement les éléments essentiels d'un problème, il est clair qu'ils doivent encore entreprendre une recherche, tout à la fois pour vérifier que leur choix est correct, pour compléter leur solution, ou pour explorer d'autres possibilités. Le point essentiel est que, comme l'avait montré De Groot, la structure de la recherche (nombre de positions considérées, profondeur de calcul, etc.) ne différencie que peu joueurs de classe mondiale et amateurs.

Sans invalider cette conclusion générale, les travaux de ces dernières décades ont précisé les résultats de De Groot de deux manières. D'une part, les maîtres d'échecs cherchent légèrement davantage que des joueurs plus faibles (Charness, 1981; Gobet, 1998a; Saariluoma, 1995). D'autre part, des différences structurelles existent dans d'autres domaines d'expertise. En particulier, comme l'a montré Simon en physique (Simon & Simon, 1978), et comme cela a été répliqué dans d'autres domaines tels que la médecine (Patel & Groen, 1986) ou la géométrie (Koedinger & Anderson, 1990), les experts ont tendance à chercher en partant des données en direction du but, et les novices ont tendance à chercher en partant du but en direction des données. La règle n'est pas sans exceptions, cependant. En programmation, tant les experts que les novices opèrent une recherche arrière. Et dans tous les domaines, lorsque les problèmes deviennent complexes et que les connaissances spécifiques font défaut, les experts retournent à une recherche orientée par but et se rabattent sur des méthodes faibles.

ou

Jusqu'à présent, les explications théoriques de Simon sur l'expertise sont restées simples (comme nous allons le voir, la plupart de ces mécanismes ont été réalisés sous forme de programmes d'ordinateur). Une élucidation complète de la psychologie des experts requiert cependant davantage de complexité, en particulier pour montrer comment la mémoire sémantique se développe et quelles sont les relations avec la mémoire procédurale et les mécanismes de reconnaissance. Quelques possibilités sont envisagées par Greeno et Simon (Greeno & Simon, 1988). Ils proposent que la connaissance des experts inclut des schémas généraux qui leur permettent de décomposer les problèmes et de former progressivement des sous-problèmes bien définis, avec des techniques spécifiques utilisables pour certains des sous-problèmes rencontrés. Dans des domaines comme la physique, les experts parviennent à une intégration de leurs connaissances spécifiques avec des concepts et des processus de raisonnement généraux (Larkin et al., 1980; Simon & Simon, 1978). Les experts possèdent une structure de connaissance bien intégrée dans laquelle les patterns associés aux divers traits du problème sont mis en relation avec des concepts possédant des degrés de généralité variables. Plus les problèmes sont mal définis, plus ils exigent un travail coordonné dans plusieurs espaces de problème disparates. Finalement, les processus automatiques basés sur des indices perceptifs permettent non seulement de générer des actions et des stratégies, mais également de choisir une représentation adéquate. Comme l'ont démontré Larkin et Simon (Larkin & Simon, 1987), la présence d'une bonne représentation permet parfois de simplifier un problème de manière drastique.

Si la caractérisation de l'expertise proposée par Simon est correcte, il s'en suit que les experts effectuent une recherche très sélective en raison des connaissances qu'ils ont acquises. S'il est difficile d'apprendre la structure d'un domaine, peut-être en raison de son caractère imprédictible ou du manque de feedback immédiat, il va être difficile de devenir un expert. L'expertise clinique semble être l'un de ces domaines : de nombreux travaux (Camerer, 1991; Meehl, 1954) ont montré que les experts obtiennent des performances inférieures à celles de simples modèles mathématiques, tels que régression linéaire simple. Des résultats similaires ont été trouvés dans d'autres domaines, tels que la prédiction dans les marchés de change ou la sélection de futurs étudiants universitaires. Il est probable que, dans ces cas, les « experts » n'ont pas été capable d'apprendre suffisamment de patterns prédictifs. Ces résultats, qui soulignent le caractère limité de notre cognition, peuvent être rapprochés des travaux sur le raisonnement en logique et en probabilité. Il est bien connu que, comparés à des modèles normatifs, les humains proposent souvent des solutions qui sont loin des solutions optimales et font preuve de plusieurs biais cognitifs typiques (Kahneman, Slovic, & Tversky, 1982), biais auxquels même les experts ne semblent pas pouvoir échapper (Dawes, 1988).

5. Modèles computationnels du comportement des experts

Une des contributions essentielles de Simon en psychologie en général et en psychologie de l'expertise en particulier est d'avoir développé des modèles rigoureux, réalisés sous la forme de programmes d'ordinateur, quand la plupart se satisfaisaient de théories vagues et informelles. Bien que la modélisation par ordinateur ne soit pas sans problèmes (temps de développement des programmes et des simulations, difficultés techniques de comparer données humaines et données produites par les simulations), il

ou

semblerait que ceux-ci soient largement compensés par les avantages de cette technique: grande précision des théories, possibilité de faire des prédictions claires et quantitatives, possibilité de capter l'environnement de l'expert dans les simulations portant sur l'apprentissage. Cependant, de manière surprenante à notre avis et au grand chagrin de Simon, seule une minorité des psychologues l'ont suivi sur la voie de la modélisation.

Simon et ses collègues ont effectué des simulations dans divers domaines d'expertise, qui en général reflètent ses investigations expérimentales: échecs, mémoire de chiffres, physique, et économie. La plupart des simulations emploient ou bien des systèmes de production (Newell & Simon, 1972) ou des réseaux de discrimination du type EPAM (Feigenbaum & Simon, 1984).

5.1. Modèles de la recherche heuristique

Une question essentielle du programme simonien est de savoir comment les êtres humains, malgré leur rationalité limitée, deviennent des experts dans des tâches combinatoires. Ses recherches sur la modélisation de la prise de décision aux échecs, effectuées dans les années 50 et 60, vont lui permettre de formaliser plusieurs concepts clés de la rationalité limitée, tels que présence de buts, ajustement dynamique des attentes, recherche heuristique, et caractère satisfaisant des solutions (Simon, 1955, 1956, 1976). Simon développa plusieurs programmes d'ordinateur jouant (partiellement) aux échecs. Ces programmes sont beaucoup plus ancrés sur la pensée humaine que ne le sont la plupart des autres programmes d'échecs en intelligence artificielle ; typiquement, leur recherche a été comparée à celle de sujets humains, telle qu'on peut l'inférer de protocoles verbaux.

NSS, le programme de Newell, Simon et Shaw (Newell, Shaw, & Simon, 1958a, 1958b), est caractérisé par la présence de buts, tels que le maintien de l'équilibre matériel ou le contrôle du centre. En tenant compte de ceux-ci, deux générateurs de coups opèrent séparément, que les coups soient des coups de base ou des coups intervenant lors de l'analyse. L'acceptabilité des coups proposés est ensuite évaluée par une analyse indépendante. Enfin, l'idée du *satisficing* est incorporée dans le système: le programme choisit le premier coup qui atteint une valeur donnée. NSS, même s'il est resté à un niveau relativement faible, a néanmoins démontré qu'il était possible de trouver des coups raisonnables en n'analysant qu'un arbre de recherche minimale (pas plus de 100 noeuds). MATER (Baylor & Simon, 1966) est un autre programme évoluant dans un espace de recherche limité. Une des caractéristiques de ce programme est qu'il restreignait sa recherche à des coups forcés et qu'il donnait la priorité aux variantes qui limitaient le plus le nombre de réponses de l'adversaire. Redoutable dans les positions comprenant une combinaison de mat, MATER n'a cependant pas été suffisamment développé pour s'adapter à l'ensemble de la complexité du jeu d'échecs.

En compagnie de collègues, Simon a développé plusieurs systèmes de production rendant compte de la manière dont experts et étudiants résolvent des problèmes dans différents domaines. En physique, Simon s'est intéressé à modéliser un domaine sémantiquement riche, la thermodynamique telle qu'est enseignée pour les futurs ingénieurs (Bhaskar & Simon, 1977). Une contribution importante de cette recherche est le développement de SAPA, un système semi-automatique de codage des protocoles verbaux. Toujours en physique, Larkin et Simon (Larkin & Simon, 1981) ont développé

ou

un système de production (ABLE), qui comprend des mécanismes simulant le passage de débutant à expert, et en particulier le changement de stratégie de recherche, la recherche dirigée par les données remplaçant chez les experts la recherche dirigée par buts. ABLE peut également utiliser des énoncés déclaratifs pour effectuer la dérivation de nouveaux résultats, résultats qu'il pourra utiliser par la suite pour résoudre de nouveaux problèmes. Les processus par lesquels les sujets comprennent les instructions d'un problème et les utilisent pour construire une représentation interne du problème ont également été modélisés par Simon et Hayes (Hayes & Simon, 1974) dans une variété de domaines. En particulier, ils ont montré comment différentes instructions mènent à différentes représentations.

Dans le domaine de l'économie, Simon et ses collègues se sont intéressés au rôle du raisonnement visuel, et, en particulier, à la manière dont les experts coordonnent plusieurs types de représentation (Tabachnek-Schijf et al., 1997). Leur modèle, CaMeRa, est un hybride combinant un système parallèle implémentant la vision de bas niveau, un système de production, et un réseau sémantique. Le modèle est capable d'interagir avec une représentation externe.

5.2. Modèles de la perception et la mémoire des experts

Plusieurs modèles informatiques ont formalisé les mécanismes perceptifs et mnésiques proposés par Simon dans la théorie du chunking. La plupart de ces modèles sont affiliés à EPAM (Elementary Perceiver and Memoriser) (Feigenbaum & Simon, 1962; Feigenbaum & Simon, 1984), une théorie générale de l'apprentissage. EPAM, qui emploie un réseau de discrimination (un réseau séquentiel de tests portant sur les caractéristiques des objets à apprendre), considère l'apprentissage comme la création de nouveaux nœuds et l'élaboration des nœuds existants. Une des caractéristiques de la théorie est que le processus de localisation d'un stimulus s'effectue de manière aussi économique que possible, seules les propriétés nécessaires à l'identification des stimuli étant prises en compte. EPAM comprend en outre des postulats sur le fonctionnement et les limitations de la MCT et sur les stratégies attentionnelles utilisées par les sujets. Une caractéristique d'EPAM est que chaque opération cognitive a un coût temporel, ce qui permet d'effectuer des simulations détaillées des tâches.

EPAM a expliqué avec succès une grande variété de phénomènes mis en évidence par les recherches sur l'apprentissage verbal (l'apprentissage de syllabes dénuées de sens) (Feigenbaum & Simon, 1962; Feigenbaum & Simon, 1984) (Gregg & Simon, 1967). EPAM a également simulé l'apprentissage de l'épellation (Simon & Simon, 1973), l'effet de contexte sur la perception de lettres (Richman & Simon, 1989), et les processus de formation de concepts (Gobet, Richman, Staszewski, & Simon, 1997).

5.2.1. PERCEIVER

Simon et Barenfeld (Simon & Barenfeld, 1969) proposent un programme de simulation, PERCEIVER, capable de reproduire les mouvements oculaires d'un joueur d'échecs. Ce programme peut être considéré comme un ajout perceptif à EPAM. Construit à partir de MATER (Baylor & Simon, 1966), PERCEIVER déplaça ses yeux simulés de la même façon qu'un joueur humain. Selon Simon et Barenfeld, les résultats obtenus vérifient leur hypothèse que l'information rassemblée durant la phase perceptive est une information portant sur des relations entre des pièces (habituellement des paires

ou

de pièces) ou sur des relations entre des pièces et des cases. Un des buts de cette recherche était de montrer que des mécanismes simples et locaux peuvent expliquer des comportements que certains—comme l'école de la Gestalt en psychologie—considèrent comme holistiques.

5.2.2. MAPP

MAPP (Memory-aided Pattern Perceiver) (Simon & Gilmarin, 1973) implémente certains aspects de la théorie du chunking. Comme nous l'avons vu, cette théorie propose que, durant les années de pratique et d'entraînement, les experts développent une large banque de données de chunks (configurations de perception qui sont familières et reconnaissables), dont l'accès en MLT est organisé sous forme d'un réseau de discrimination et qui permet un retrait rapide de l'information.

MAPP postule que le système de traitement d'information humain possède des limites plutôt strictes qui sont valables pour tous les individus, quel que soit leur niveau d'expertise: capacité de la MCT limitée à environ 7 items, et temps d'encodage en MLT nécessitant environ 8 secondes par chunk. Les chunks sont appris en élaborant un réseau de discrimination, et, une fois appris, ils sont accédés en employant des indices perceptifs. Durant une tâche de rappel, MAPP essaie d'identifier des chunks et, si cela est possible, place en MCT un symbole pointant vers eux. Durant la phase de reconstruction, MAPP « déballe » l'information contenue par les chunks dénotés par les pointeurs en MCT.

Les simulations montrent que MAPP peut obtenir le résultat d'un fort amateur, mais non pas d'un maître—des limites en partie dues au hardware utilisé. Des extrapolations à partir de ces simulations mènent à la conclusion que de 10,000 à 100,000 chunks (50,000 est souvent cité comme première approximation) sont nécessaires pour obtenir une haute performance de rappel aux échecs, comme dans d'autres domaines. Une limite de MAPP est que les chunks étaient sélectionnés par ses créateurs, et non identifiés automatiquement, par exemple à l'aide de mouvements oculaires.

5.2.3. EPAM-IV

En général, la théorie du chunking a bien résisté aux tests empiriques (Gobet, 1998b), bien que certains détails de la mémoire des experts soient plus compliqués que ce qui avait été anticipé. Les points forts de la théorie sont (a) une explication de divers aspects du comportement des experts—perception, mémoire et des mécanismes de résolution de problème—au sein d'une seule théorie; (b) prédictions d'aspects qualitatifs aussi bien que d'aspects quantitatifs de l'expertise; et (c) présence de modèles computationnels implémentant de larges parties de la théorie. Ses points faibles sont principalement liés à une sous-estimation de la vitesse d'accès en MLT. Cette faiblesse a été corrigée dans deux récentes modifications de la théorie, toutes deux implémentées sous forme de programme d'ordinateur.

Richman, Staszewski et Simon (Richman, Staszewski, & Simon, 1995) étaient avant tout intéressés de montrer comment les experts parviennent à compenser les limites de la MCT, en particulier lorsqu'ils emploient des procédés mnémotechniques. Alors que la plupart d'entre nous ne peuvent retenir que quelques chiffres dictés rapidement, certains sujets ont été entraînés à en mémoriser une centaine (Chase & Ericsson, 1982). En plus d'une bonne connaissance sémantique des nombres, ces sujets employaient également des « structures de retrait », c'est-à-dire des structures de mémoire consciemment

ou

appries facilitant l'encodage de l'information (la « méthode des piquets », un procédé mnémotechnique bien connu, en est un exemple classique).

Le modèle informatique détaillé qu'ils proposent, EPAM-IV, est une extension d'EPAM qui incorpore l'idée de structures de retrait. La MCT est modélisée de manière plus détaillée que dans les versions antérieures; elle est divisée en compartiments visuels et auditifs; le compartiment visuel combine un nombre limité de chunks avec une représentation visuo-spatiale et le compartiment auditif combine un nombre limité de chunks avec le concept de la boucle articulatoire (Baddeley, 1986). Finalement, la MLT comprend une composante sémantique et une composante procédurale. Les structures de retrait, que le modèle apprend de manière délibérée, sont considérées comme des schémas en MLT. Les mécanismes d'apprentissage des chunks, de construction des structures de retrait, et de construction de liens entre les différents types de mémoire sont spécifiés en grand détail. Comme dans les versions précédentes d'EPAM, des paramètres temporels sont utilisés pour chacun des processus cognitifs. EPAM-IV rend compte du comportement de l'un des mnémonistes spécialisés dans le rappel de chiffres de manière détaillée, tout aussi qualitativement que quantitativement.

5.2.4. CHREST

La première motivation derrière CHREST (Chunk Hierarchy & REtrieval Structures) (Gobet, 1993; F. Gobet & H. A. Simon, 1996; Gobet & Simon, 2000) était d'améliorer et de fusionner PERCEIVER et MAPP. Par la suite, d'autres mécanismes furent ajoutés, en particulier pour permettre le développement automatique des mémoires sémantiques et procédurales. CHREST offre le complément d'EPAM-IV dans les domaines dans lesquels il n'y a pas d'intention délibérée d'améliorer la mémoire. Comme EPAM-IV, CHREST joint le mécanisme du chunking avec l'idée de structure de retrait—avec la différence que la création et l'utilisation de ces structures n'est plus sous contrôle conscient. CHREST propose que certains chunks, qui sont rencontrés souvent dans un domaine, mènent à des structures de données plus complexes, appelées « chablon », qui sont semblables à des *schémas*. Ces structures contiennent des variables (slots) encodant l'information qui se présente souvent dans le domaine avec de petites variations. Par exemple, dans un chablon acquis pour les positions d'échecs, un slot peut être créé pour une case qui est importante dans un type de position et sur laquelle différents types de pièces peuvent être placées. Les chablon permettent ainsi d'encoder des classes de situations de manière efficace. De plus, les chablon donnent, « gratuitement », de l'information (le « noyau » du chablon, semblable aux chunks de Chase et Simon). Une différence importante est à noter entre les structures de retraits d'EPAM-IV et les chablon de CHREST, différence qui provient du domaine simulé : si les structures de retrait peuvent toujours être appliquées dans le domaine d'expertise pour lequel elles ont été créées, il y a des situations (par exemple, des positions aléatoires aux échecs), dans lesquelles aucun chablon ne peut être accédé, même si ces situations appartiennent au domaine d'expertise.

CHREST simule avec succès le comportement de joueurs d'échecs (de débutant à grand-maître) dans toute une série d'expériences sur la mémoire (Gobet, 1993; F. Gobet & H. A. Simon, 1996; Gobet & Simon, 2000), reproduit leurs mouvements oculaires durant les 5 premières secondes de la présentation d'une position (De Groot & Gobet, 1996), et reproduit certains phénomènes de la résolution de problème aux échecs (Gobet, 1997). Au-delà de l'expertise, les mécanismes de chunking caractéristiques de CHREST

ou

et d'EPAM ont expliqué avec succès des données provenant d'une variété de domaines, en particulier: apprentissage explicite et implicite, formation de concept, acquisition de la langue maternelle, et résolution de problème (pour des revues, voir (Gobet, (in press); Gobet et al., 2001; Richman, Gobet, Staszewski, & Simon, 1996)).

6. Impact pour l'intelligence artificielle

Les travaux de Simon sur l'expertise s'inscrivent dans son projet général de comprendre les mécanismes de prise de décision des humains. La plupart de ses idées ont été élaborées simultanément dans plusieurs disciplines, le fruit d'une fertilisation croisée peut-être unique au 20^{ème} siècle. Dès lors, il est peu probable que les concepts dont a profité l'intelligence artificielle ne proviennent que d'une seule discipline, comme la psychologie de l'expertise.

On peut cependant mentionner quelques idées qui ont influencé l'IA et qui ont joué un rôle particulièrement important dans son étude des performances extraordinaires. L'idée de recherche sélective, présente dans plusieurs des programmes qu'il a développés, a inspiré de nombreux chercheurs en IA, bien que nous soyons encore loin d'un système artificiel hautement sélectif capable d'opérer dans plusieurs domaines. Il en est de même de l'idée de la reconnaissance de patterns perceptifs. Des systèmes comme Soar (Newell, 1990) (un descendant de GPS) ou ACT-R (Anderson, 1993), implémentés sous forme de systèmes de production, utilisent des patterns symboliques, quoiqu'ils sont encore incapables d'émuler l'aspect perceptif (en particulier visuel) de l'expertise humaine.

Le formalisme de réseau de discrimination n'a guère eu d'impact en IA, quoique d'autres méthodes similaires, telles que ID3, aient mené à des résultats intéressants (Quinlan, 1986). En général, l'apprentissage, un sujet important dans l'œuvre de Simon, a été poursuivi par d'autres techniques dans la communauté de l'IA: aux réseaux de discrimination et aux systèmes de production adaptatifs, on a préféré les réseaux de neurones et les techniques basées sur la logique. Il n'en reste pas moins qu'il y a très peu de systèmes actuels qui combine résolution de problème ou prise de décision avec des méthodes d'apprentissage, typiques ou non de celles des experts humains—l'exception la plus marquante étant le système de production Soar, qui certainement trahit l'influence de Simon.

L'influence de Simon est très claire également sur les recherches informatiques portant sur les jeux. L'idée de recherche sélective a influencé le développement de programmes tels que ceux de Pitrat (Pitrat, 1977) ou Wilkins (Wilkins, 1980), qui limitent leur arbre de recherche à un strict minimum. L'idée de lier de l'information à certains patterns a été utilisée dans plusieurs programmes (p. ex., (Levinson & Snyder, 1991) ou (Finkelstein & Markovitch, 1998)). Finalement, l'importance de la perception dans la résolution de problème a mené Epstein et ses collègues à développer un programme apprenant des patterns spatiaux pour améliorer ses performances dans divers jeux (Epstein, Gelfand, & Twersky Lock, in press).

Finalement, une influence indirecte de Simon est d'avoir démystifié certains concepts, tels que ceux de l'intuition et de la créativité, de sorte qu'ils puissent devenir des sujets d'études pour les chercheurs en IA. A son avis, la reconnaissance de patterns et les mécanismes derrière EPAM offrent une explication *suffisante* pour le phénomène

ou

de l'intuition —la rapidité avec laquelle les experts perçoivent les aspects critiques d'un problème et choisissent le comportement à adopter dans une telle situation (Simon & Chase, 1973). D'une certaine façon, l'intuition n'est qu'une méthode parmi d'autres pour réduire l'espace des possibilités. De manière ironique, Dreyfus (Dreyfus & Dreyfus, 1986) emploie l'intuition des experts comme une des raisons pour laquelle l'intelligence artificielle classique est vouée à l'échec, ignorant le travail empirique et théorique de Simon qui justement montre que de simples mécanismes de reconnaissance expliquent ce phénomène. Quant à la créativité des experts, Simon a également proposé qu'elle peut être expliquée par des mécanismes de recherche et de reconnaissance de patterns, ouvrant ainsi la porte à la création de systèmes artificiels créateurs (voir l'article de Ganascia).

7. Conclusion

Simon s'est trouvé au centre de toute une série de travaux portant sur l'expertise, qu'ils soient empiriques, méthodologiques, ou théoriques. De fait, il est probable qu'il a été le scientifique qui a individuellement le plus contribué et le plus influencé ce domaine de recherche—une conclusion remarquable quand l'on pense que, après tout, l'étude des experts n'a été qu'un seul parmi ses nombreux domaines de recherche.

Pour Simon, l'étude des performances exceptionnelles était une voie royale pour cerner le concept de rationalité limitée, et, en particulier, les rôles respectifs de l'environnement et des mécanismes menant à des solutions satisfaisantes. Ce double intérêt l'a mené à des recherches sur l'apprentissage et la mémoire, d'une part, et sur la résolution de problème et la prise de décision, d'autre part. Cette division (artificielle) du travail a parfois conduit à des confusions sur l'interprétation des théories de Simon, certains auteurs lui reprochant de par trop ignorer le rôle de la recherche (p. ex., (Holding, 1985)), et d'autres lui reprochant d'y donner trop d'importance et d'ignorer le rôle de l'intuition (Dreyfus & Dreyfus, 1986). C'est dans le concept de système de production adaptatif (Newell & Simon, 1972) que l'indissociabilité de ces mécanismes est peut-être le plus apparent: les productions, qui sont acquises durant l'apprentissage d'un domaine en fonction de son environnement, sont utilisées par la suite pour résoudre des problèmes et prendre des décisions. L'indissociabilité de ces mécanismes est également claire dans la théorie du chunking, qui est en fait une sorte de système de production.

Pour Simon, les résultats sur l'expertise renforçaient certaines convictions qu'il avait à cœur, en particulier le caractère limité de la cognition humaine et la sérialité de l'attention : même un champion du monde d'échecs effectue une recherche sélective, ne visitant qu'un état du problème à la fois. Ces résultats ont également renforcé ses doutes sur la manière dont les modèles connexionnistes, quand bien même ils sont adéquats pour expliquer les mécanismes de perception et de mémoire, peuvent rendre compte des mécanismes de prise de décision et de résolution de problème. A cet égard, il est symptomatique que le connexionnisme, qui a eu un impact certain en psychologie cognitive durant ces quinze dernières années, n'a jusqu'à présent contribué que de manière discrète à l'étude des experts, très peu de modèles effectifs ayant été développés (pour un des rares exemples, voir (Raufaste, Eyrolle, & Mariné, 1998).

ou

La validation des modèles proposés a varié d'un domaine à l'autre. Un travail considérable a été effectué dans le domaine du jeu d'échecs, sur le lequel il a travaillé avec de nombreux collègues pendant plus de cinquante ans, entrecoupés il est vrai par de longues pauses. Dans d'autres domaines, tels que l'expertise en économie, les modèles n'ont été comparés avec les données empirique de manière plutôt informelle. Il y a également des différences dans le degré de généralité des modèles. Un modèle comme ABLE n'a d'ambition que d'expliquer l'expertise en physique, alors que MAPP, et en particulier la théorie du chunking et la théorie d'EPAM dont il dérive, produisent ensemble une explication très générale des processus cognitifs.

Simon avait amassé une quantité effrayante de connaissances dans un nombre non moins effrayant de domaines. Ces connaissances lui ont permis, grâce à une motivation et une énergie physique hors du commun, mais probablement en dépit des mêmes limites cognitives qui affectent la capacité de mémoire et la vitesse d'apprentissage de la plupart d'entre nous, d'effectuer des travaux fondamentaux dans plus d'une dizaine de disciplines scientifiques, de créer certaines de ces disciplines, de mener une vie active dans l'administration de son université et de participer à nombre de comités organisés par le gouvernement américain. Les idées de base contenues dans ses modèles de l'expertise sont-elles suffisantes, avec évidemment beaucoup d'élaboration, pour simuler le parcours scientifique d'Herbert Simon ? Je pense qu'il aurait répondu à cette question par l'affirmative.

8. Remerciements

9. Bibliographie

- Anderson, J. R. (1993). *Rules of the Mind*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon Press.
- Baylor, G. W., & Simon, H. A. (1966). *A chess mating combinations program*. Paper presented at the 1966 Spring Joint Computer Conference, Boston.
- Bhaskar, R., & Simon, H. A. (1977). Problem solving in semantically rich domains : An example from engineering thermodynamics. *Cognitive Science*, 1, 193-215.
- Binet, A. (1894). *Psychologie des grands calculateurs et joueurs d'échecs*. Paris: Hachette.
- Calderwood, B., Klein, G. A., & Crandall, B. W. (1988). Time pressure, skill, and move quality in chess. *American Journal of Psychology*, 101, 481-493.
- Camerer, C. F. J., E. J. (1991). The process-performance paradox in expert judgment: How can experts know so much and predict so badly? In K. A. Ericsson & J. Smith (Eds.), *Studies of Expertise : Prospects and Limits*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Charness, N. (1974). *Memory for chess positions: The effects of interference and input modality*. Unpublished Doctoral dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- Charness, N. (1981). Search in chess : Age and skill differences. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 7(2), 467-476.
- Charness, N. (1989). Expertise in chess and bridge. In D. Klahr & K. Kotovski (Eds.), *Complex Information processing, the impact of Herbert A. Simon*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Ass.

ou

- Chase, W. G., & Ericsson, K. A. (1982). Skill and working memory. *The psychology of learning and motivation*, 16, 1-58.
- Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973a). The mind's eye in chess. In W. G. Chase (Ed.), *Visual information processing* (pp. 215-281). New York: Academic Press.
- Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973b). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81.
- Chi, M. T. H. (1978). Knowledge structures and memory development. In R. S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* Hillsdale, N.J: Erlbaum.
- Cooke, N. J., Atlas, R. S., Lane, D. M., & Berger, R. C. (1993). Role of high-level knowledge in memory for chess positions. *American Journal of Psychology*, 106, 321-351.
- Dawes, R. M. (1988). *Rational choice in an uncertain world*. Orlando, FL: Harcourt Brace Jovanovich.
- De Groot, A. D. (1946). *Het denken van den schaker*. Amsterdam: Noord Hollandsche.
- De Groot, A. D. (1965). *Thought and choice in chess* (1st ed.). The Hague: Mouton Publishers.
- De Groot, A. D., & Gobet, F. (1996). *Perception and memory in chess. Heuristics of the professional eye*. Assen: Van Gorcum.
- Dreyfus, H., & Dreyfus, S. (1986). *Mind over machine*. New York: Free Press.
- Egan, D. E., & Schwartz, E. J. (1979). Chunking in recall of symbolic drawings. *Memory & Cognition*, 7, 149-158.
- Epstein, S. L., Gelfand, J., & Twersky Lock, E. (in press). Learning game-specific spatially-oriented heuristics. *Constraints*, 3, 239-253.
- Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1993). *Protocol analysis. Verbal reports as data* (2nd ed.). Cambridge, MA: MIT Press.
- Feigenbaum, E. A., & Simon, H. A. (1962). A theory of the serial position effect. *British Journal of Psychology*, 53, 307-320.
- Feigenbaum, E. A., & Simon, H. A. (1984). EPAM-like models of recognition and learning. *Cognitive Science*, 8, 305-336.
- Finkelstein, L., & Markovitch, S. (1998). Learning to play chess selectively by acquiring move patterns. *ICCA Journal*, 21, 100-119.
- Frey, P. W., & Adesman, P. (1976). Recall memory for visually presented chess positions. *Memory and Cognition*, 4, 541-547.
- Galton, F. (1869). *Hereditary genius: An inquiry into its laws and consequences*. London: MacMillan.
- Gobet, F. (1993). *Les mémoires d'un joueur d'échecs*. Fribourg: Editions universitaires.
- Gobet, F. (1996). *Roles of pattern recognition and search in expert problem solving* (42). University of Nottingham, UK: Department of Psychology, ESRC Centre for Research in Development, Instruction and Training.
- Gobet, F. (1997). A pattern-recognition theory of search in expert problem solving. *Thinking and Reasoning*, 3, 291-313.
- Gobet, F. (1998a). Chess thinking revisited. *Swiss Journal of Psychology*, 57, 18-32.
- Gobet, F. (1998b). Expert memory: A comparison of four theories. *Cognition*, 66, 115-152.
- Gobet, F. ((in press)). Réseaux de discrimination en psychologie: L'exemple de CHREST. *Swiss Journal of Psychology*.
- Gobet, F., Lane, P. C. R., Croker, S., Cheng, P. C.-H., Jones, G., Oliver, I., & Pine, J. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(6), 236-243.

ou

- Gobet, F., Richman, H., Staszewski, J., & Simon, H. A. (1997). Goals, representations, and strategies in a concept attainment task: The EPAM Model. *The Psychology of Learning and Motivation*, *37*, 265-290.
- Gobet, F., & Simon, H. (1996). Templates in chess memory: A mechanism for recalling several boards. *Cognitive Psychology*, *31*, 1-40.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (1996). Recall of random and distorted positions. Implications for the theory of expertise. *Memory & Cognition*, *24*, 493-503.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (1996). Recall of rapidly presented random chess positions is a function of skill. *Psychonomic Bulletin & Review*, *3*, 159-163.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (1998). Expert chess memory: Revisiting the chunking hypothesis. *Memory*, *6*, 225-255.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (2000). Five seconds or sixty? Presentation time in expert memory. *Cognitive Science*, *24*, 651-682.
- Gold, A., & Opwis, K. (1992). Methoden zur empirischen Analyse von Chunks beim Reproduzieren von Schachstellungen. *Sprache & Kognition*, *11*, 1-13.
- Greeno, J. G., & Simon, H. A. (1988). Problem solving and reasoning. In R. C. Atkinson & R. Herrnstein & G. Lindzey & R. D. Luce (Eds.), *Stevens' handbook of experimental psychology (rev. ed.)*. New York: Wiley.
- Gregg, L. W., & Simon, H. A. (1967). An information-processing explanation of one-trial and incremental learning. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *1967*(6), 780-787.
- Hayes, J. R., & Simon, H. A. (1974). Understanding written instruction. In L. W. Gregg (Ed.), *Knowledge and cognition* (pp. 167-200). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Holding, D. H. (1985). *The psychology of chess skill*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kahneman, D., Slovic, P., & Tversky, A. (Eds.). (1982). *Judgments under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Koedinger, K. R., & Anderson, J. R. (1990). Abstract planning and perceptual chunks: Elements of expertise in geometry. *Cognitive Science*, *14*, 511-550.
- Kotovsky, K., Hayes, J. R., & Simon, H. A. (1985). Why are some problems so hard? Evidence from Tower of Hanoi. *Cognitive Psychology*, *17*, 248-294.
- Larkin, J. H., Mc Dermott, J., Simon, D. P., & Simon, H. A. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, *208*, 1335-1342.
- Larkin, J. H., & Simon, H. A. (1981). Learning through growth of skill in mental modeling. *Proceedings of the Third Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Berkeley: Cognitive Science Society.
- Larkin, J. H., & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth 10,000 words. *Cognitive Science*, *11*, 65-99.
- Levinson, R., & Snyder, R. (1991). Adaptive pattern-oriented chess. *Proceedings of the AAAI*, 601-606.
- Meehl, P. E. (1954). *Clinical versus statistical prediction: A theoretical analysis and a review of the evidence*. Minneapolis: University of Minneapolis Press.
- Newell, A. (1990). *Unified theories of cognition*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Newell, A., Shaw, J. C., & Simon, H. A. (1958a). Chess-Playing Programs and the Problem of Complexity. *IBM Journal of Research and Development*, *2*, 320-335.
- Newell, A., Shaw, J. C., & Simon, H. A. (1958b). Elements of a theory of human problem solving. *Psychological Review*, *65*, 151-166.
- Newell, A., & Simon, H. A. (1965). An example of human chess play in the light of chess-playing programs. In N. Weiner & J. P. Schade (Eds.), *Progress in Biocybernetics*. Amsterdam: Elsevier.

ou

- Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Patel, V. L., & Groen, G. J. (1986). Knowledge based solution strategies in medical reasoning. *Cognitive Science*, *10*, 91-116.
- Pitrat, J. (1977). A chess combinations program which uses plans. *Artificial Intelligence*, *8*.
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning*, *1*, 81-106.
- Raufaste, E., Eyrolle, H., & Mariné, C. (1998). Pertinence generation in radiological diagnosis: Spreading activation and the nature of expertise. *Cognitive Science*, *22*(4), 517-546.
- Reitman, J. S. (1976). Skilled perception in go: deducing memory structures from inter-response times. *Cognitive Psychology*, *8*, 336-356.
- Richman, H. B., Gobet, F., Staszewski, J. J., & Simon, H. A. (1996). Perceptual and memory processes in the acquisition of expert performance: The EPAM model. In K. A. Ericsson (Ed.), *The road to excellence*. Mahwah: Erlbaum.
- Richman, H. B., & Simon, H. A. (1989). Context effects in letter perception: Comparison of two theories. *Psychological Review*, *3*, 417-432.
- Richman, H. B., Staszewski, J., & Simon, H. A. (1995). Simulation of expert memory with EPAM IV. *Psychological Review*, *102*, 305-330.
- Saariluoma, P. (1994). Location coding in chess. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *47A*, 607-630.
- Saariluoma, P. (1995). *Chess players' thinking: A cognitive psychological approach*. London: Routledge.
- Selz, O. (1922). *Zur Psychologie des produktiven Denkens und des Irrtums*. Bonn: Friedrich Cohen.
- Simon, D. P., & Simon, H. A. (1973). Alternative uses of phonemic information in spelling. *Review of Educational Research*, *43*, 115-137.
- Simon, D. P., & Simon, H. A. (1978). Individual differences in solving physics problems. In R. S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* Hillsdale, N.J: Erlbaum.
- Simon, H. A. (1955). A behavioral model of rational choice. *Quarterly Journal of Economics*, *69*, 99-118.
- Simon, H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological Review*, *63*, 129-138.
- Simon, H. A. (1965). *The Shape of Automation for Men and Management*. New York: Harper Torchbooks.
- Simon, H. A. (1969). *The sciences of the artificial*. Cambridge: MIT Press.
- Simon, H. A. (1976). *Administrative Behavior*. New York: The Free Press.
- Simon, H. A. (1989). The Scientist as Problem Solver. In D. Klahr & K. Kotovski (Eds.), *Complex Information processing, the impact of Herbert A. Simon*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Ass.
- Simon, H. A. (1991). *Models of my life*. New York: Basic Books.
- Simon, H. A., & Barenfeld, M. (1969). Information processing analysis of perceptual processes in problem solving. *Psychological Review*, *7*, 473-483.
- Simon, H. A., & Chase, W. G. (1973). Skill in chess. *American Scientist*, *61*, 393-403.
- Simon, H. A., & Gilmarin, K. J. (1973). A simulation of memory for chess positions. *Cognitive Psychology*, *5*, 29-46.
- Sloboda, J. (1991). Musical expertise. In K. A. Ericsson & J. Smith (Eds.), *Studies of Expertise : Prospects and Limits*. Cambridge: Cambridge University Press.

ou

- Tabachnek-Schijf, H. J. M., Leonardo, A. M., & Simon, H. A. (1997). CaMeRa: A computational model of multiple representations. *Cognitive Science*, *21*(3), 305-350.
- Wilkins, D. (1980). Using patterns and plans in chess. *Artificial Intelligence*, *14*, 165-203.
- Zhang, G., & Simon, H. A. (1985). STM capacity for Chinese words and idioms: Chunking and acoustical loop hypothesis. *Memory and Cognition*, *13*, 193-201.
- Zhu, D., & Simon, H. A. (1988). Learning mathematics from examples and by doing. *Cognition and Instruction*, *4*, 137-166.
- Zhu, X., Lee, Y., Simon, H. A., & Zhu, D. (1996). Cue recognition and cue elaboration in learning from examples. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*, 1346-1351.
- Zsombok, C. E., & Klein, G. A. (1997). *Naturalistic decision making*. Mahwah, N.J.: Erlbaum.