

## Chapitre 2

# La recherche des processus cognitifs caractéristiques de l'intelligence

L'intelligence dont il sera question dans ce chapitre est celle qui est évaluée par les tests d'intelligence mis au point dans le cadre de l'approche psychométrique (cf. chapitre 1). Ces tests mesurent les différences de performance (nombre de bonnes réponses ou temps de résolution) dans diverses sortes de tâches intellectuelles. L'analyse factorielle des corrélations entre les performances dans ces différents tests a mis à jour quelques grandes dimensions de l'intelligence, sur lesquelles les individus se différencient de façon stable. On distingue notamment (Carroll, 1993) un facteur général de variation des performances (facteur G), qui rend compte de la variance commune à l'ensemble des tests d'intelligence, et de grands facteurs de groupe, qui rendent compte de parts de variance plus spécifiques, communes à de larges ensembles de tests, les plus étudiés étant les facteurs d'intelligence fluide (Gf), cristallisée (Gc), et visuo-spatiale (Gv) (voir chapitre 1 pour plus de détails). On peut supposer que les tests qui sont saturés par un même facteur de variation font appel aux mêmes processus de traitement de l'information, mais l'approche corrélationnelle des performances dans ces tests est impuissante à identifier ces processus. C'est le développement de la psychologie cognitive qui a donné naissance, dans les années soixante-dix, à un courant de recherche qui s'est appuyé sur ses modèles et ses méthodes (chronométrie mentale, analyse des mouvements du regard, analyse des erreurs, etc.) pour inférer les processus à l'œuvre lorsque les sujets résolvent un test d'intelligence.

Le propos de ce chapitre est de faire le bilan de ces travaux. Nous distinguerons deux grandes orientations dans ces recherches. La première a consisté à chercher l'explication des différences de performances cognitives dans les différences d'efficacité de certains processus élémentaires de traitement de l'information. La seconde a consisté à chercher cette explication dans les différences d'efficacité des processus exécutifs<sup>2</sup>.

## **2.1. La recherche des processus élémentaires caractéristiques de l'intelligence**

Trois approches assez différentes ont été employées pour traquer « les particules élémentaires » de l'intelligence. La première s'est appuyée sur des tâches aussi élémentaires que possible pour explorer les relations entre l'intelligence et la vitesse de traitement de l'information, la seconde a cherché dans l'arsenal des paradigmes de la psychologie cognitive les tâches susceptibles d'isoler tel ou tel des processus supposés caractéristiques du facteur de l'intelligence visé, la troisième a cherché à décomposer les tâches utilisées dans les tests pour isoler les différents processus que ceux-ci sollicitent. Il n'est pas question ici de passer tous ces travaux en revue, mais seulement de présenter ces trois approches en illustrant chacune par un exemple. Pour des revues plus détaillées, voir Huteau et Lautrey (1999) et Juhel (1991).

### **2.1.1. Temps de réaction et vitesse de traitement**

Certains auteurs ont avancé l'hypothèse que la « vitesse mentale », considérée comme une caractéristique de bas niveau affectant tous les processus cognitifs, pourrait expliquer les différences de performance sous-jacentes au facteur g. Les deux principaux paradigmes expérimentaux qui ont été utilisés pour mettre cette hypothèse à l'épreuve sont le temps d'inspection (cf. Deary et Stough, 1996) et le paradigme de Hick (Jensen, 1987). Les deux tâches correspondantes sont on ne peut plus élémentaires du point de vue cognitif, du moins en apparence. Seul le paradigme de Hick sera présenté et discuté ici.

Il s'agit d'une tâche conçue pour mesurer le temps de réaction de choix. Le dispositif expérimental est une console comportant en bas un bouton de départ sur lequel le participant doit positionner son doigt au début de chaque essai. Au-dessus de ce bouton de départ et à distance égale, huit boutons cibles sont disposés en demi-

---

<sup>2</sup> Les processus exécutifs sont ceux qui assurent la supervision du fonctionnement cognitif, notamment la planification des opérations de traitement de l'information, leur vérification, l'allocation des ressources attentionnelles, l'activation des informations jugées pertinentes et l'inhibition des informations interférentes ou jugées inappropriées.

cercle, chacun étant placé en dessous d'une petite lampe. A chaque essai, de façon aléatoire, une des lampes s'allume et la tâche du participant est d'aller frapper le plus vite possible le bouton cible situé sous cette lampe pour l'éteindre. Ce dispositif permet d'enregistrer deux temps à chaque essai : le temps de réaction (TR) est celui qui s'écoule entre le moment où une lampe s'allume et le moment où le doigt du participant quitte le bouton de départ. Le temps moteur (TM) est celui qui s'écoule entre le départ du doigt et le moment où celui-ci appuie sur le bouton cible. Les processus cognitifs visés sont ceux qui se déroulent pendant le TR, essentiellement la perception d'une lumière, la décision concernant la lampe qui en est l'origine et la programmation du mouvement du doigt dans cette direction.

Le dispositif permet de faire varier le nombre de lampes susceptibles de s'allumer. Dans le premier bloc d'essais, une seule lampe est utilisée. Il n'y a donc pas d'incertitude sur sa localisation et le temps mesuré dans ce bloc est le TR simple. Dans le second bloc, les deux lampes les plus centrales sont utilisées. Il existe donc une incertitude entre deux éventualités. Le TR mesuré à partir du deuxième bloc est un TR de choix à  $n$  éventualités (ici  $n = 2$ ). Dans le troisième bloc, les quatre lampes les plus centrales sont utilisées et, dans le quatrième bloc, l'ensemble des huit lampes est découvert. L'angle visuel à surveiller est alors d'environ  $30^\circ$ . Les quatre blocs comportent chacun au moins quinze essais et ils sont donnés dans l'ordre indiqué ci-dessus.

On sait depuis longtemps que le TR de choix est plus long que le TR simple, mais on doit à Hick d'avoir montré que ce temps croît linéairement, comme le logarithme à base 2 du nombre d'éventualités. Hick a interprété cette fonction logarithmique dans le cadre de la théorie de l'information, en considérant que chaque doublement du nombre d'éventualités augmente d'un bit la quantité d'information à traiter. Dans cette modélisation, la pente de la fonction reliant le temps de réaction au nombre d'éventualités correspond au temps de traitement d'un bit d'information (loi de Hick).

Le choix de tâches comme celle-ci, extrêmement élémentaires du point de vue cognitif, est privilégié par les chercheurs qui veulent écarter, dans l'interprétation des différences individuelles d'intelligence, la possible influence de processus cognitifs de haut niveau ou de facteurs motivationnels ou sociaux. Jensen et Vernon (1986) présentent en effet le paradigme de Hick comme étant « la tâche la plus simple, étant donné ses exigences cognitives minimales et l'absence de tout contenu qui pourrait être considéré comme intellectuel ». La recherche de corrélations entre les tâches de ce type et les tests de facteur G est une stratégie orientée vers la quête de caractéristiques biologiques – souvent implicitement interprétées comme génétiquement déterminées – susceptibles d'expliquer les différences d'intelligence.

Dans la méta-analyse publiée par Jensen (1987), qui porte sur 33 expériences totalisant 2317 sujets, la corrélation moyenne entre la pente du temps de réaction de choix dans le paradigme de Hick et le QI ou le score en facteur g est de  $-.28$ . Cette corrélation est intrigante parce qu'il est assez paradoxal que les différences dans l'exécution d'une tâche en apparence aussi simple (appuyer sur le bouton dont la lampe s'allume) soient liées avec les différences dans des tâches aussi complexes que les tests d'intelligence. La corrélation est certes faible, mais elle est bien établie. C'est son interprétation qui fait question.

Jensen a privilégié les interprétations physiologiques de la vitesse de traitement. Une des hypothèses avancées est que – compte tenu de la simplicité de la tâche – les différences de temps de réaction reflètent assez directement la vitesse de conduction de l'influx nerveux. Les diverses tentatives de vérification expérimentale de cette hypothèse ont donné des résultats contradictoires et elle n'a toujours pas, à ce jour, de support empirique solide (pour une étude récente, voir McRorie et Cooper, 2004).

Les critiques ont notamment porté sur l'analyse des processus en jeu dans cette tâche en apparence simple. Plusieurs expériences ont montré qu'elle sollicite probablement des processus de haut niveau comme l'apprentissage, le choix de stratégies ou la capacité d'attention. En voici deux exemples. On se souvient que les blocs d'essais sont donnés dans l'ordre de complexité (nombre de lampes) ascendant. L'ordre de passation des blocs est donc confondu avec l'ordre de complexité. Si l'on dissocie ces deux variables en faisant passer les blocs d'essais dans un ordre aléatoire, la loi de Hick est bien retrouvée, mais la pente est plus importante et elle n'est plus corrélée au facteur G (Widaman et Carlson, 1989). Ce résultat est compatible avec l'hypothèse selon laquelle, lorsque les blocs d'essais sont donnés en allant du moins au plus complexe, l'entraînement procuré par les premiers permet d'être plus rapide dans les suivants. Les différences dans cette capacité d'apprentissage pourraient donc être à l'origine de la corrélation entre la pente et le facteur g. Mais que peuvent donc apprendre les sujets dans une tâche en apparence aussi simple? Peut-être des stratégies d'exploration du champ de vision à surveiller. Dans le mode de passation standard du paradigme en effet, l'écart angulaire entre les lampes à surveiller augmente avec le niveau de complexité. Ces deux variables sont donc confondues. Lorsqu'elles sont dissociées, comme cela a été fait dans une expérience réalisée par Bors, MacLeod et Forrin (1993) la loi de Hick est retrouvée mais, là aussi, la corrélation entre la pente et le facteur G disparaît. Ce dernier résultat est compatible avec l'hypothèse qu'une des composantes de la pente tient à l'apprentissage de stratégies d'exploration oculaire plus efficaces lorsque l'écart angulaire entre les stimuli possibles augmente.

La tâche de Hick n'est donc simple qu'en apparence. L'illusion de simplicité vient de ce que l'on décrit la tâche du sujet dans un essai, comme si la répétition des essais n'était qu'une mesure technique, destinée à éliminer les erreurs

en retenant la valeur moyenne ou la médiane, mais sans conséquence sur les processus cognitifs mis en œuvre. En fait, la tâche n'est pas simplement d'appuyer sur le bouton de la lampe qui s'allume, mais de parvenir à faire cela le plus vite possible un grand nombre de fois. La répétition des essais introduit des possibilités d'apprentissage et aussi de nouvelles sources de difficulté, notamment la difficulté à maintenir les ressources attentionnelles nécessaires pour réagir le plus rapidement possible à chacun des essais. Les sautes d'attention font augmenter la variabilité intraindividuelle et le temps de réaction moyen. Cette interprétation est compatible avec le fait que dans la méta-analyse citée plus haut, le paramètre le plus lié au facteur g ( $r = -.48$ ) soit précisément l'écart-type des TR (Lautrey, 1996)<sup>3</sup>.

La vitesse de traitement dans les tâches cognitives élémentaires n'est donc probablement pas une caractéristique élémentaire des processus de traitement, mais un indicateur global de performance qui – au même titre que le nombre de bonnes réponses – dépend d'un grand nombre de paramètres (Stankov & Roberts, 1997).

### ***2.1.2. La recherche de corrélations avec des paradigmes expérimentaux de la psychologie cognitive.***

Une seconde stratégie pour identifier les processus caractéristiques des différents facteurs de l'intelligence est celle qui a parfois été qualifiée de corrélationnelle. La démarche passe par les étapes suivantes : a) sélectionner un test fortement saturé par le facteur ciblé et analyser les tâches qui le composent, b) formuler un modèle théorique des processus supposés à l'œuvre dans ces tâches, c) chercher dans l'arsenal de la psychologie cognitive, pour chacun des processus figurant dans ce modèle, un paradigme expérimental réputé l'avoir isolé, d) faire passer à un même échantillon de participants le test représentatif du facteur ciblé et le paradigme expérimental isolant le processus hypothétiquement mis en œuvre, e) calculer la corrélation entre les deux épreuves. Si une corrélation significative est trouvée, elle renseigne sur la part de variance dont le processus est susceptible de rendre compte dans les scores au test.

Voici, à titre d'exemple, quelques-uns des paradigmes expérimentaux dont Hunt (1985) a étudié la corrélation avec le facteur verbal : le paradigme de Posner<sup>4</sup>, qui évalue en principe la vitesse d'accès au code phonologique, le paradigme de Peterson et Peterson, conçu pour évaluer la capacité à maintenir les informations

---

<sup>3</sup> Pour expliquer ce résultat inattendu, Jensen a interprété la variabilité intraindividuelle comme une manifestation du bruit neuronal (Jensen, 1992).

<sup>4</sup> Il n'est pas possible de faire ici une présentation détaillée de tous ces paradigmes expérimentaux. Une description précise de chacun d'eux peut être trouvée ailleurs (Huteau et Lautrey, 1999, p. 192).

entrées en mémoire de travail dans l'ordre où elles sont entrées (cette capacité est supposée importante pour le traitement des informations syntaxiques), le paradigme de Clark et Chase, évaluant en principe la vitesse de manipulation des propositions. Avec le paradigme de Posner par exemple, Hunt a montré que le processus de codage phonologique prend en moyenne environ 25 millisecondes de moins chez les participants forts (les 25% de scores les plus élevés) que chez les participants faibles (25% les moins élevés) en facteur verbal.

Les résultats des recherches de ce type peuvent être résumés en disant que les corrélations trouvées ont en général été assez faibles. Hunt a parlé à ce sujet de « la barrière des .30 » comme d'une limite supérieure difficile à dépasser. Les processus élémentaires qui ont été ciblés dans ces recherches ne peuvent donc expliquer qu'une faible part de la variance des performances dans les tests d'intelligence.

Est-ce que la barrière des .30 tient à la mauvaise qualité psychométrique des tâches expérimentales utilisées pour évaluer l'efficacité des processus ou à des raisons plus profondes ? Rosnowski (1993) a étudié les qualités métriques des mesures effectuées avec plusieurs de ces tâches expérimentales, couvrant une assez grande variété de processus cognitifs. La fidélité des mesures a été évaluée en estimant pour chaque tâche l'homogénéité des items et la stabilité (corrélation test-retest à deux semaines d'intervalle). L'homogénéité est tout à fait satisfaisante (coefficients  $\alpha$  de l'ordre de .90). La stabilité est moins bonne : les coefficients varient de .43 à .87 avec une moyenne de .66. La stabilité de ces mesures est certes moins importante que celle des tests psychométriques, qui est de l'ordre de .80, mais pas au point que cela suffise à expliquer la faiblesse des corrélations généralement observées entre ces deux types d'épreuves.

Dans une étude complémentaire, Rosnowski et Smith (1993) ont fait de l'un de ces paradigmes expérimentaux, une analyse plus fouillée. Il s'agit du paradigme de Sternberg, une tâche censée évaluer la vitesse de recherche en mémoire à court terme (MCT). Cette tâche<sup>5</sup> a été administrée avec quatre contenus différents: les éléments à mémoriser pouvaient être des nombres, des lettres, des symboles (par ex. %, &) ou des noms de trois lettres. La stabilité des mesures a par ailleurs été étudiée pour différents paramètres : la pente, la hauteur à l'ordonnée et le temps de réponse

---

<sup>5</sup> Les participants doivent mémoriser des éléments qui leur sont présentés un à un, par exemple une liste de nombres, et aussitôt après l'expérimentateur lui présente un item sonde (ici un nombre) dont il faut déterminer le plus vite possible si celui-ci fait ou non partie de la liste mémorisée. En faisant varier systématiquement de 1 à 7 le nombre d'éléments de la liste, Sternberg (1966) a montré que le temps de réponse est une fonction linéaire du nombre d'éléments en MCT. L'interprétation usuelle de ce résultat est que la recherche d'un élément en MCT est un processus séquentiel au cours duquel l'item sonde est comparé successivement à tous les éléments mémorisés.

global. Les corrélations test-retest moyennes étaient respectivement de .22, .52, et .64. Le point important ici est que le paramètre interprétable, du point de vue des processus cognitifs en jeu, est la pente de cette fonction linéaire : celle-ci correspond au temps nécessaire pour comparer l'item sonde à un élément supplémentaire. La hauteur à l'ordonnée évalue le temps pris par d'autres processus, sans rapport avec la recherche en MCT, comme le codage et la réponse. Quant au temps de réponse global, il mêle toutes ces composantes de façon indifférenciée. Ce résultat montre que plus le paramètre retenu est interprétable du point de vue de la modélisation cognitive, plus sa fidélité est mauvaise (la fidélité de la pente est seulement de .22 ici)<sup>6</sup> et donc moins il a de chances de corrélérer avec d'autres variables.

Par ailleurs, les corrélations calculées entre ces quatre versions du même paradigme ont été moins élevées qu'attendu, les variations de contenu rendant compte en moyenne de 41% de la variance. Ceci indique que les différences individuelles dans l'efficacité du processus de recherche en MCT varient considérablement selon le contenu sur lequel porte ce processus. On ne peut donc pas considérer qu'un paradigme expérimental réputé isoler un processus donné, permette d'évaluer son efficacité chez un individu indépendamment du contexte dans lequel il est mis en œuvre (contenu sur lequel il porte, processus avec lesquels il interagit dans la tâche complexe où il intervient, etc.).

### **2.1.3. La décomposition des tâches utilisées dans les tests d'intelligence.**

Une des critiques faites à l'approche corrélationnelle est d'avoir évalué l'efficacité des processus en utilisant des paradigmes expérimentaux issus du laboratoire et donc très éloignés des tâches qui constituent les tests. L'approche composantielle, qui consiste à décomposer la tâche complexe ciblée en sous-tâches dont chacune isole une partie des processus en œuvre échappe à cette critique. Les premières étapes de la démarche sont comparables à celles de l'approche corrélationnelle. Elles consistent là aussi à choisir un test fortement saturé par le facteur de l'intelligence qui est ciblé, à en analyser les tâches et à formuler un modèle hypothétique des processus en jeu. La différence réside dans la façon dont on cherche ensuite à isoler ces processus. Plutôt que de recourir à l'arsenal des

---

<sup>6</sup> La faible fidélité de la pente s'explique par le fait qu'elle est assimilable à un score de différence. Or la fidélité de la différence A-B entre deux scores bruts A et B dépend de la corrélation  $r_{AB}$  et des fidélités respectives des scores A et B. Plus la valeur de  $r_{AB}$  s'approche de la valeur des fidélités de A et de B, plus la fidélité du score A-B diminue (car la soustraction retire la variance commune et ne laisse subsister que la variance spécifique et la variance erreur). Comme la corrélation entre blocs d'essais de complexité croissante est généralement élevée, même si la fidélité des mesures de chaque bloc est satisfaisante, la fidélité de la pente est souvent médiocre.

paradigmes expérimentaux de la psychologie cognitive, la stratégie suivie consiste à décomposer la tâche complexe en sous-tâches plus élémentaires qui vont permettre d'isoler les différents processus prévus par le modèle.

Sternberg (1977) a été le premier à utiliser cette méthode pour identifier les composantes du traitement de l'information dans les tests de raisonnement analogique. La forme générale des tâches à résoudre dans ces tests est de type  $A : B :: C : ?$ , dans laquelle le problème est de trouver un élément  $D$  qui ait avec l'élément  $C$  la même relation que l'élément  $B$  avec l'élément  $A$ . Voici un exemple de problème dans lequel les éléments sont de nature verbale (ils peuvent aussi avoir un contenu figural ou numérique) : « arbre est à forêt comme soldat est à ? ».

Le modèle hypothétique de raisonnement analogique proposé par Sternberg comporte cinq composantes : le codage (recherche en mémoire des attributs de chacun des termes), l'inférence (recherche des relations entre les attributs de  $A$  et ceux de  $B$ , ici la relation d'appartenance partitive qui lie « arbre » à « forêt »), l'homologie (recherche des relations entre les termes  $A$  et  $C$ , ici « arbre » et « soldat » font tous deux partie d'un ensemble plus vaste), l'application (application au terme  $C$ , ici « soldat », de la relation d'appartenance partitive inférée entre  $A$  et  $B$ ), et la réponse (ici donner le terme « armée »). Le modèle est de type additif et séquentiel, en d'autres termes, il postule que ces différents processus se déroulent les uns après les autres et que leurs temps s'ajoutent.

La méthode de décomposition suivie dans cette expérience consistait à présenter l'information en deux temps. Un indice ne fournissant qu'une partie des données du problème était d'abord présenté. Lorsque le participant estimait avoir traité cet indice, il appuyait sur un bouton pour avoir la suite du problème. Les temps de traitement de la partie indice (temps entre la présentation de l'indice et l'appui sur le bouton) et de la partie solution (temps entre l'appui sur le bouton et la résolution du problème) étaient enregistrés. En faisant varier systématiquement la quantité d'information donnée dans la partie indice, ce dispositif permet de décomposer la tâche en sous-tâches qui isolent les différents processus ciblés. Lorsque le terme  $A$  (« arbre » dans l'exemple ci-dessus) est présenté seul dans la partie indice, les processus qui ont lieu ensuite dans la partie solution (donc après que les deux autres termes du problème, « forêt » et « soldat », ont été présentés) sont ceux qui ont lieu lorsque le problème est posé en entier, *moins le codage de  $A$*  qui a déjà été fait dans la partie indice. Si les termes  $A$  et  $B$  sont présentés dans la partie indice (ici « arbre » et « forêt »), le temps mis dans la partie solution est supposé correspondre au temps total *moins le codage de  $A$ , le codage de  $B$  et l'inférence de la relation entre  $A$  et  $B$* . Ainsi de suite...

La méthode de décomposition repose donc sur une logique soustractive, intimement liée au caractère séquentiel et additif du modèle testé. Cette logique est

appliquée en effectuant une analyse de régression multiple dans laquelle les prédicteurs sont les temps mis dans les différentes sous-tâches et la variable dépendante le temps total de résolution. Les pentes des différentes composantes correspondent au temps moyen nécessaire pour exécuter chacune des composantes prévues par le modèle, la hauteur à l'ordonnée correspondant à un temps résiduel extérieur à ces composantes. La validité externe du modèle est ensuite testée en calculant la corrélation entre le temps d'exécution de chacune des composantes et le score en facteur de raisonnement (les participants ont passé par ailleurs différents tests dont l'analyse factorielle a permis d'extraire un facteur de raisonnement).

Les principaux résultats de cette recherche ont été les suivants : 1) les corrélations entre le temps d'exécution des composantes de codage, inférence, homologie et application d'une part et le facteur de raisonnement d'autre part étaient respectivement de .63, -.48, -.40, et -.14. Seule la corrélation – positive- avec le temps de codage était significativement différente de zéro (mais l'effectif de l'échantillon de participants -  $n = 16$  - était faible) ; 2) la corrélation la plus importante (-.77) était trouvée avec la hauteur à l'ordonnée de la fonction de régression, 3) si le temps absolu passé dans chaque composante ne corrélait pas significativement avec le score en facteur de raisonnement, on trouvait par contre une corrélation significative entre le temps relatif (proportion du temps total) passé dans chaque composante et le facteur de raisonnement. Plus précisément, les composantes de codage et d'inférence corrélaient alors significativement, entre elles (-.56) et avec le facteur de raisonnement (respectivement .72 et -.56). Selon Sternberg, ce dernier résultat indique que les participants ayant les meilleurs scores en facteur de raisonnement sont ceux dont la stratégie est de passer plus de temps dans le codage pour effectuer ensuite plus vite l'inférence.

Les problèmes rencontrés dans cette première recherche (faiblesse des corrélations entre composantes du modèle et scores en facteur, meilleure corrélation avec la hauteur à l'ordonnée qu'avec les composantes) ont été souvent retrouvés dans les recherches qui ont adopté par la suite cette approche en composantes. Le fait que le temps capturé par les composantes du modèle (évalué par les pentes des droites de régression) corrèle moins bien avec les facteurs de l'intelligence que le temps résiduel (correspondant à la hauteur à l'ordonnée) peut s'expliquer par un artefact méthodologique (voir note 5 et Lohman, 1994). Sternberg (1977) a par contre fait l'hypothèse, que le temps capturé par la hauteur à l'ordonnée correspondait à la mise en œuvre de processus de supervision des composantes élémentaires, non pris en compte par son modèle initial. Comme nous allons le voir maintenant, l'hypothèse d'une relation étroite entre les processus exécutifs et le facteur g a été explorée avec plus de succès avec d'autres approches.

## 2. 2. Intelligence fluide et efficience des processus exécutifs

Les tests les plus fortement saturés par le facteur d'intelligence fluide (Gf) sont ceux de raisonnement et plus particulièrement ceux de raisonnement inductif. Les tests de raisonnement inductif les plus saturés par le facteur Gf sont ceux qui demandent aussi peu de connaissances préalables que possible, mais font appel à l'efficience « brute » des processus d'inférence pour trouver la ou les lois de série qui organisent les éléments présentés. Le test des Matrices Progressives de Raven en est l'exemple le plus représentatif (un exemple d'item de ce test est présenté en figure 2.1).

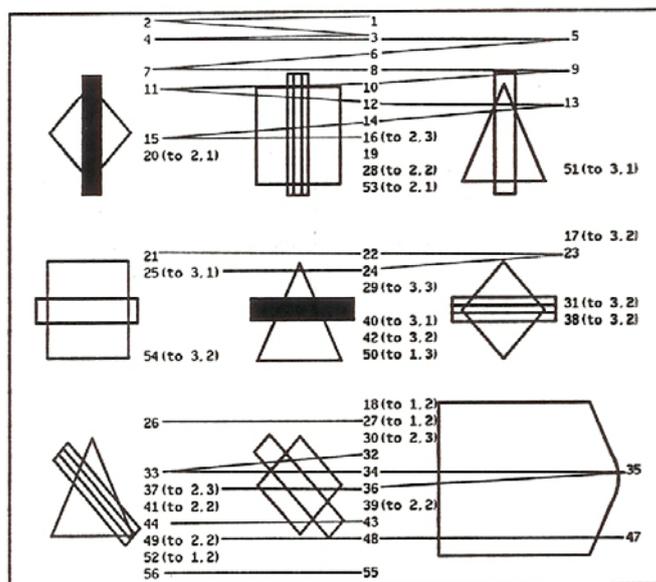
Deux sortes de recherches ont conduit à penser que les différences de performance dans ces tests proviennent pour une bonne part de l'efficience des processus exécutifs et notamment de la capacité de la mémoire de travail<sup>7</sup>. L'une a porté sur l'analyse en temps réel du processus de résolution d'items de tests fortement saturés par le facteur Gf, l'autre a consisté à faire passer des épreuves de mémoire de travail et des tests d'intelligence, puis à s'appuyer sur les méthodes de modélisation structurale pour analyser les relations entre ces deux types d'épreuves.

### 2.2.1. *L'analyse du déroulement des processus de traitement au cours de la résolution d'un test d'intelligence fluide.*

Carpenter, Just et Shell (1990) ont étudié les processus mis en œuvre dans la résolution des items des Matrices Progressives de Raven en s'appuyant simultanément sur l'analyse des mouvements du regard, les verbalisations, et la simulation. La figure 2.1 présente un exemple de protocole. Il s'agit d'un item sur lequel a été superposée la séquence des fixations du regard d'un participant, chacune étant représentée par son numéro d'ordre, placé près de l'élément de la matrice sur lequel elle a porté.

---

<sup>7</sup> La mémoire de travail est une forme de mémoire à capacité limitée dont la fonction est de gérer simultanément le traitement en cours et le stockage temporaire des informations nécessaires à ce traitement (résultats intermédiaires, buts et sous buts poursuivis, etc.). Dans la tâche 'Operating Span' par exemple (Engle, Tuholski et al, 1999), on présente aux participants des séries, de longueur croissante, dans lesquelles alternent des opérations arithmétiques simples à effectuer mentalement et des mots à retenir. A la fin de chaque série, les participants doivent rappeler tous les mots rencontrés, dans l'ordre où ils ont été rencontrés. Ceci exige de maintenir stocké en mémoire chacun des mots rencontrés, tout en effectuant les opérations intercalées entre ces mots. La capacité de la mémoire de travail est ici évaluée par le nombre maximal de mots qui peuvent être rappelés dans ces conditions.



**Figure 2.1.** Exemple d'item sur lequel ont été superposées les fixations successives du regard au cours de la résolution (d'après Carpenter, Just & Shell, 1990). Par exemple, 16 (to 2.3) signifie qu'après la fixation 16, la fixation suivante (17) a été effectuée vers la figure située ligne 2 colonne 3. Dans ce test, la tâche des participants est de compléter des matrices comme celle-ci. Ils doivent pour cela inférer les lois de progression organisant les éléments en ligne et en colonne pour trouver l'élément manquant, à l'intersection de la troisième ligne et de la troisième colonne. Ici, un carré avec une bande noire en position oblique

Voici les verbalisations de ce participant (le numéro figurant entre parenthèses indique là où était fixé le regard au moment de cette verbalisation, ce qui permet de voir quelles fixations ont été faites entre deux verbalisations) :

« OK... » (7), « Il y a losange, carré, triangle... » (14), « et ils contiennent des lignes à l'intérieur... » (22), « avec des hachures différentes... » (29), « allant de vertical, à horizontal, oblique... » (34), « et le troisième devrait être... » (40), « OK, ça devrait être un carré... » (56), « et il devrait avoir la ... » (59) « ...ligne noire à l'intérieur et la réponse est la 5 » (60).

Carpenter et al soulignent le caractère incrémentiel du processus de résolution. Le problème est décomposé en une multitude de petits sous-problèmes qui sont résolus chacun à leur tour. Les mouvements du regard permettent de cerner les processus qui ont lieu dans des durées de l'ordre de la centaine de millisecondes. Ils

montrent que de multiples comparaisons entre éléments précèdent l'identification d'un attribut pertinent. Les verbalisations, de leur côté, renseignent sur les processus se déroulant dans des durées plus longues, allant de quelques secondes à quelques minutes. Elles montrent que les règles progressivement abstraites à partir de l'observation de ces attributs sont énoncées une à la fois, chacune étant séparée de la précédente par de longs silences. Ce fractionnement du problème en de multiples petits sous-problèmes résolus chacun à leur tour est retrouvé chez tous les participants. Il a pour conséquence qu'une bonne partie de la difficulté de la tâche est de parvenir simultanément, d'une part à rechercher et abstraire les règles pas encore trouvées, d'autre part à maintenir activés en mémoire pendant ce temps les résultats intermédiaires (attributs déjà sélectionnés, règles déjà trouvées) ainsi que les buts et sous-butts auxquels obéit cette activité de recherche. En s'appuyant sur cette analyse Carpenter et al. ont avancé l'hypothèse que les performances dans le test de Raven dépendaient pour une bonne part de la capacité de la mémoire de travail.

Les tentatives de simulation des comportements des participants conduisaient à la même conclusion. La première tentative reproduisait honorablement les comportements des participants obtenant des scores moyens dans ce test, mais pas celui des participants les plus performants. De nombreux conflits survenaient entre les règles de production dans les items les plus difficiles. Pour parvenir à simuler le comportement des participants capables de résoudre ces items, les auteurs ont dû ajouter à leur programme une quinzaine de règles de production destinées à renforcer la planification et le contrôle des buts et sous-butts et à augmenter les possibilités d'abstraction du système.

Par ailleurs, une analyse de régression dans laquelle le prédicteur était le nombre de règles à découvrir dans chaque item et la variable dépendante le pourcentage d'erreurs dans différents items, montrait que le nombre de règles à découvrir expliquait 57% de la variance du nombre d'erreurs.

L'ensemble de ces éléments a conduit Carpenter et al. à conclure que la performance dans la résolution des Matrices Progressives de Raven repose sur trois aptitudes fondamentales : l'aptitude à décomposer un problème en petites unités et à extraire des régularités de ces petites unités par itérations successives, l'aptitude à gérer les nombreux buts et sous-butts engendrés par cette décomposition, et l'aptitude à former, à partir des régularités découvertes, des abstractions d'un niveau de généralisation suffisamment élevé.

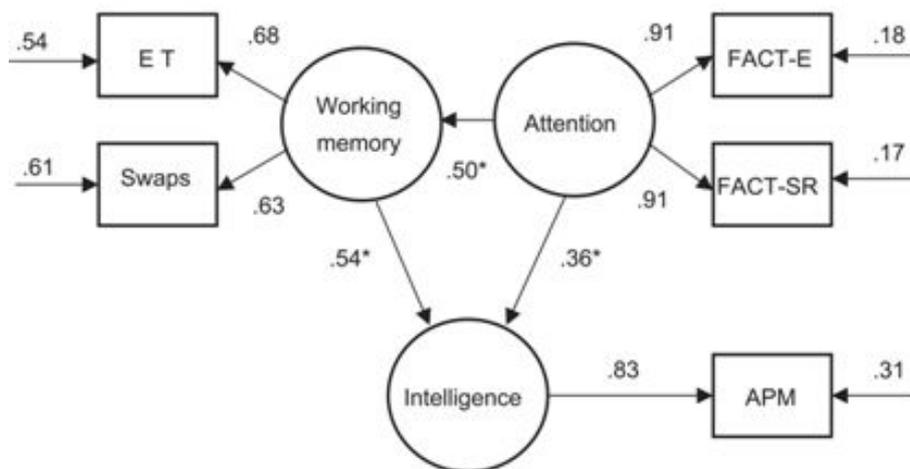
### ***2.2.2. L'utilisation des modèles structuraux pour explorer les relations entre la mémoire de travail et le facteur d'intelligence fluide.***

Le point de départ de ce courant de recherche est une étude dans laquelle Kyllonen et Christal (1990) ont fait passer à de larges échantillons de participants des tâches variées de mémoire de travail et de raisonnement. Les analyses factorielles confirmatoires effectuées sur ces données ont permis d'extraire un facteur commun aux tests de raisonnement et un facteur commun aux épreuves de mémoire de travail. La corrélation entre ces deux variables latentes variait entre .80 et .88 selon les expériences, ce qui avait amené ces auteurs à se demander si l'aptitude au raisonnement ne correspond pas, à peu de choses près, à la capacité de la mémoire de travail.

Cette question a été reprise ces dernières années avec les mêmes méthodes, mais dans une autre optique. L'objectif est maintenant d'utiliser cette relation pour identifier les processus sous-jacents à la capacité de la mémoire de travail. La problématique consiste à faire entrer dans une même modélisation structurale des épreuves évaluant les différences dans la capacité de la mémoire de travail, des épreuves évaluant tel ou tel des processus dont on pense qu'il pourrait contribuer à la capacité de la mémoire de travail, et des tests d'intelligence fluide (le plus souvent le test de Raven). Les techniques de modélisation structurale sont utilisées pour extraire les variables latentes correspondant à ces différents groupes d'épreuves et pour tester des modèles hypothétiques sur les relations causales qu'entretiennent ces variables.

Dans ces réseaux de relations, le facteur d'intelligence fluide a la fonction d'un réactif : parmi les variables qui covarient avec la capacité de la mémoire de travail, seules celles dont la variance spécifique est liée à celle du facteur d'intelligence fluide sont considérées comme jouant un rôle dans les activités cognitives complexes. Orientées sur l'identification des différents processus en jeu dans la mémoire de travail, ces recherches éclairent du même coup les processus en jeu dans l'intelligence fluide. Elles ont notamment montré que le simple stockage des informations, tel qu'il est requis dans les épreuves de mémoire à court terme, ne contribue que faiblement à la relation de la mémoire de travail avec l'intelligence fluide (Engle, Tuholski et al., 1999) et que la vitesse cognitive ne joue pas non plus de rôle causal important (Conway, Cowan et al., 2002). Elles ont aussi montré que, parmi les processus exécutifs liés à l'intelligence fluide, il fallait faire une distinction entre ce qui relève en propre de la capacité de la mémoire de travail (et détermine le nombre d'éléments pouvant être maintenus activés simultanément pendant le traitement, comme l'ont montré Carpenter et al pour le test de Raven) et ce qui relève de l'attention). Ce second type de processus n'est pas obligatoirement lié au niveau de complexité de la tâche, mais à l'exigence de maintien d'une

concentration soutenue pendant une durée importante (Embretson, 1995 ; Unsworth et Engle, à paraître).



**Figure 2.2.** *Modèle structural des relations entre l'attention, la mémoire de travail et l'intelligence fluide. Les variables représentées dans les carrés sont les variables observées. ET et Swaps sont les deux épreuves de mémoire de travail, FACT-E et FACT-SR les deux épreuves d'attention soutenue, et APM est le test des Matrices Progressives de Raven. Les variables représentées dans les ronds sont les variables latentes (facteurs) qui rendent compte de la variance des scores dans ces variables observées.*

La figure 2.2 présente le modèle des relations entre capacité de la mémoire de travail, attention et intelligence fluide qui s'ajuste le mieux aux données dans l'étude de Schweizer et Moosbrugger (2004). Les pistes causales à considérer ici sont celles qui relient les trois variables latentes représentées dans les ronds : la capacité attentionnelle et la capacité de la mémoire de travail influencent toutes deux directement l'intelligence évaluée par le test de Raven (avec des coefficients de piste qui sont respectivement de .36 et de .54), mais l'attention intervient aussi indirectement en contribuant, pour une part (coefficient de .50), à la capacité de la mémoire de travail.

### 2.3 Conclusion

La recherche des processus élémentaires susceptibles de rendre compte des différences individuelles de performance dans les tests d'intelligence s'est avérée assez décevante. D'une part les corrélations entre l'efficacité de ces processus et les

facteurs ciblés ont rarement dépassé la barrière des .30, d'autre part, il s'est avéré que les tâches simples censées les isoler faisaient probablement aussi appel à d'autres processus que ceux qui étaient ciblés. Reste à expliquer que le temps de réaction dans des tâches très élémentaires puisse corrélérer, même faiblement, avec le facteur d'intelligence. Nous y reviendrons à la fin de la conclusion.

Les recherches qui ont porté sur le rôle des processus exécutifs dans l'explication du facteur général d'intelligence ont donné des résultats plus prometteurs. Elles ont mis en évidence l'influence conjointe, avec des poids variables selon les tâches, de deux types de processus exécutifs sur les performances dans les tests d'intelligence. Le premier, qui correspond à la capacité de la mémoire de travail, a un rôle déterminant lorsque la tâche exige de maintenir l'activation d'un nombre important d'informations intermédiaires pendant le traitement. Ce type de processus est d'autant plus impliqué que la tâche est complexe. Le second, qui correspond à la capacité attentionnelle, a un rôle déterminant dans les tâches qui demandent une mobilisation importante des processus de contrôle. Ce second type de processus est d'autant plus impliqué que la tâche exige une attention soutenue sur une durée assez longue. Cette seconde source de difficulté peut être indépendante de la complexité de la tâche.

Ce dernier point peut expliquer le paradoxe de la corrélation entre le temps de réaction dans des tâches très élémentaires et le facteur général d'intelligence (cf. plus haut le passage consacré au paradigme de Hick). Dans la mesure où toutes ces tâches exigent un grand nombre d'essais, le temps de réaction moyen pourrait refléter, pour une part au moins, l'efficacité des processus attentionnels, et ce d'autant plus que le nombre d'essais est important.

#### 2.4. Bibliographie

- Bors, D. A., MacLeod, C. M., & Forrin, B. (1993). Eliminating the IQ-RT correlation by eliminating an experimental confound. *Intelligence*, 17(4), 475-500.
- Carpenter, P.A., Just, M.A., & Shell, P. (1990). What one intelligence test measures: A theoretical account of the processing in the Raven Progressive Matrices test. *Psychological Review*, 97, 404-431.
- Carroll, J.B. (1993). *Human Cognitive Abilities. A Survey of Factor-analytic Studies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Conway, A., Cowan, N., Buntig, M.F., Theriault, D.J., & Minkoff, S.R. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, 30, 163-183.
- Deary, I.J., & Stough, C. (1996). Intelligence and inspection time: Achievements, prospects, and problems. *American Psychologist*, 51, 599-608.

- Embretson, S.E. (1995). The role of working memory capacity and general processes in intelligence. *Intelligence*, 20, 169-189.
- Engle, R.W., Tuholski, S.W., Laughlin, J.E. & Conway, A.R.A. (1999). Working memory, short-term memory and general fluid intelligence: a latent variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128, 309-331.
- Huteau, M., & Lautrey, J. (1999). *Evaluer l'Intelligence. Psychométrie Cognitive*. Paris: PUF.
- Jensen, A. R. (1987). Individual differences in the Hick paradigm. In P. A. Vernon (Ed.), *Speed of information processing and intelligence*(pp. 101-175). Norwood, NJ: Ablex.
- Jensen, A.R. (1992). The importance of intraindividual variation in reaction time. *Personality and individual differences*, 13, 869-882.
- Jensen, A. R., & Vernon, P. A. (1986). Jensen's reaction-time studies: A reply to Longstreth. *Intelligence*, 10, 153-179.
- Juhel, J. (1991). Relations ships between psychometric intelligence and information processing speed indexes. *European Bulletin of Cognitive Psychology*, 11, 73-105.
- Kyllonen, P.C., & Christal, R.E. (1990). Reasoning ability is (little more than) working-memory capacity?!. *Intelligence*, 14, 389-433.
- Lautrey, J. (1996). La recherche des particules élémentaires de l'intelligence : une impasse ? *Psychologie Française*, 41, 23-33.
- Lohman, D.F. (1994). Component scores as residual variations (or why the intercept correlates best). *Intelligence*, 19, 1-11.
- McRorie, M. & Cooper, C. (2004). Synaptic transmission correlates of general mental ability. *Intelligence*, 32, 263-275.
- Roznowski, M. (1993). Measures of cognitive processes: Their stability and other psychometric and measurement properties. *Intelligence*, 17, 361-388.
- Roznowski, M., & Smith, M. L. (1993). A note on some psychometric properties of Sternberg task performance: Modifications to content. *Intelligence*, 17, 389-398.
- Schweizer, K., & Moosbrugger, H. (2004). Attention and working memory as predictors of intelligence. *Intelligence*, 32, 329-347.
- Stankov & Roberts (1997). Mental speed is not the basic process of intelligence. *Personality and individual differences*, 22, 69-84.
- Sternberg R. J. (1977). *Intelligence, information processing and analogical reasoning*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Unsworth, N., & Engle, R. (à paraître). Working memory capacities and fluid abilities : Examining the correlation between Operation Span and Raven. *Intelligence*.
- Widaman, K. F., & Carlson, J. S. (1989). Procedural effects on performance on the Hick paradigm: Bias in reaction time and movement time parameters. *Intelligence*, 13(1), 63-85.