

LES DIFFERENCES DANS LA FORME DU DEVELOPPEMENT COGNITIF EVALUE AVEC DES EPREUVES PIAGETIENNES : UNE APPLICATION DE L'ANALYSE DES CORRESPONDANCES

Jacques Lautrey*, Anik de Ribaupierre**
et Laurence Rieben**

* Laboratoire de Psychologie Différentielle,
EPHE, 41 rue Gay-Lussac, 75005 Paris, France.

** F.P.S.E., Université de Genève,
24 rue Général Dufour, 1211 Genève 4, Suisse.

Abstract:

Eight operational tasks have been individually administered to 154 children aged six to twelve (22 per age group). Analyses of correspondences have made it possible to assess the multi-dimensional structure of the 39 items and to jointly determine the structure of decalages in the subjects' developmental patterns. Results point both to the existence of a general factor of development and to a relative independence between logico-mathematical and infra-logical notions. They demonstrate that individual differences in operational development cannot be reduced to simple differences of speed along a trajectory that would be identical for all subjects. Rather the findings support a hypothesis of variations in the form of development itself. Theoretical implications of such variations are discussed.

Key words: cognitive development, individual differences, operational theory, piagetian tasks, factorial analysis.

Mots clés : développement cognitif, différences individuelles, théorie opératoire, épreuves piagétienues, analyse factorielle.

La recherche que nous présentons ici porte sur la forme du développement cognitif. Plus précisément, nous nous demandons si le développement opératoire a une forme invariante entre les sujets, ou s'il peut prendre des formes différentes - et jusqu'à quel point - chez des sujets différents. D'éventuelles variations dans la forme du développement cognitif pourraient en effet être intéressantes, aussi bien du point de vue fondamental que du point de vue appliqué. Dans une perspective de recherche fondamentale, elles pourraient offrir un moyen d'identifier et d'étudier les différents processus sous-jacents au fonctionnement cognitif. Dans une perspective d'application, elles pourraient fournir des bases à la mise au point de traitements pédagogiques différenciés.

PROBLEME THEORIQUE

Dans la théorie de Piaget, le développement cognitif est envisagé comme un processus de construction de structures qui d'une part s'étendent à l'ensemble des domaines de la connaissance lorsqu'elles se mettent en place, d'autre part se succèdent dans un ordre invariant. En outre, l'organisation des différents aspects de la connaissance (perception, image mentale, mémoire, langage, etc.) est subordonnée à la mise en place de ces structures opératoires. Sous ces contraintes, le développement cognitif apparaît comme un parcours *unidimensionnel*, le long duquel les seules différences possibles entre les individus sont des différences de vitesse.

Deux sortes d'observations ont contribué à limiter fortement la portée de structures cognitives ainsi définies et, par conséquent, à mettre en question certains aspects de ce modèle du développement. Les premières ont trait à la variabilité de l'âge moyen auquel un même concept est maîtrisé, selon la situation dans laquelle il est opérationnalisé. Piaget et Inhelder eux-mêmes avaient observé que le problème de quantification de l'inclusion était réussi vers 7-8 ans lorsque les enfants étaient interrogés avec des images de fleurs et vers 9-10 ans lorsqu'ils l'étaient avec des images d'animaux. Depuis, cette variabilité en fonction des situations expérimentales a été retrouvée à propos de toutes les notions étudiées, avec une ampleur parfois considérable. Par exemple, un problème de transitivité à trois termes peut être résolu vers 5 ans lorsqu'on fait préalablement mémoriser les prémisses à l'enfant (Bryant et Trabasso, 1971), vers 7 ans dans la situation piagétienne (Piaget, Inhelder et Szeminska, 1948), ou vers 12 ans lorsque la série à laquelle appartiennent les trois termes est de forme circulaire (Botson et Deliège, 1979).

Le second ensemble d'observations a trait à la variabilité du stade de développement opératoire par lequel un même individu peut être caractérisé, selon le domaine notionnel dans lequel ce stade est évalué. Cette variabilité n'est pas apparue tant que la genèse des différentes notions a été étudiée avec des groupes d'enfants différents. La correspondance approximative des âges

moyens auxquels étaient maîtrisées les différentes notions censées relever d'une même structure opératoire paraissait apporter une confirmation empirique à l'hypothèse de l'existence d'une structure d'ensemble, y compris au niveau individuel. Toutefois, observé dans des groupes différents, le synchronisme des âges moyens d'acquisition de notions distinctes ne permet pas de conclure au synchronisme des acquisitions chez chaque individu. En fait, dès que l'on a commencé à examiner les mêmes enfants dans plusieurs épreuves opératoires, les corrélations entre les acquisitions relevant en principe d'une même structure se sont avérées faibles (cf. par exemple Dimitrovsky et Almy, 1975 ; Dodwell, 1960 ; Laurendeau et Pinard, 1968 ; Rieben et al., 1983 ; Tuddenham, 1971).

Piaget n'a pas considéré ces deux ensembles de faits comme contradictoires avec sa théorie et les a attribués à une même cause : la variabilité des résistances que les situations offrent à l'activité structurante du sujet (cf. par exemple Piaget, 1971). Selon cette interprétation, les décalages "horizontaux" auxquels donnent lieu ces résistances expliqueraient tout à la fois la variabilité de l'âge moyen auquel une même notion est maîtrisée, et la variabilité du niveau opératoire d'un même sujet en fonction des situations. Dans ce dernier cas, en effet, rien ne permet d'affirmer que les résistances des situations choisies pour opérationnaliser chaque notion soient comparables. L'interprétation piagétienne des faits place en somme, et de façon paradoxale par rapport au rôle que Piaget a généralement attribué au sujet, la source des écarts au modèle à l'extérieur du sujet : ils sont attribués aux caractéristiques des situations et non à celles de l'enfant. Le rôle des résistances du réel vis-à-vis des lois générales du développement cognitif est comparé à celui des frottements vis-à-vis des lois générales de la physique : ils en déforment l'expression, mais ne les mettent pas en cause (cf. Piaget, 1971).

Cette interprétation ne peut être convaincante - même si elle n'est pas la seule possible - que lorsque les facteurs de situation ont le même effet sur tous les sujets, c'est-à-dire lorsque les décalages qu'ils provoquent sont *collectifs* (de même sens pour tous). Lorsque tel n'est pas le cas - c'est-à-dire lorsque deux situations A et B, opérationnalisant soit un même concept soit deux concepts différents, sont maîtrisées dans l'ordre AB pour certains sujets, et dans l'ordre BA pour d'autres - la source des écarts au modèle ne peut pas être considérée comme entièrement extérieure au sujet. Les décalages de ce second type, qu'à la suite de Longeot (1978) nous appellerons "*individuels*" pour les distinguer des décalages collectifs, témoignent d'une interaction entre les situations et les sujets. Lorsqu'une même situation est source de facilitation relative pour certains sujets et de résistance relative pour d'autres, ceci laisse penser que tous ne la traitent pas de la même manière. S'il existe des décalages individuels stables, ils offrent donc un moyen de mettre en évidence l'existence de processus de traitement distincts et témoignent de différences qui sont irréductibles à des différences de vitesse. La mise en évidence de différences dans la forme du développement suppose que ces deux types de décalages - collectifs et individuels - puissent être distingués, ce qui ne va pas sans poser un sérieux problème méthodologique.

PROBLEME METHODOLOGIQUE

L'analyse de la forme des décalages n'est simple qu'en apparence. En se plaçant dans le cadre structuraliste de la théorie piagétienne, il est en principe possible d'établir des correspondances entre des acquisitions qui ont pourtant trait à des notions différentes, par exemple, entre transitivité et inclusion. On considérera qu'il y a synchronisme si tous les enfants examinés ont atteint le même niveau structural dans l'épreuve de transitivité et dans celle d'inclusion, décalage collectif si tous les cas d'avance dans une des deux épreuves vont dans le même sens, et décalage individuel s'ils ne sont pas tous de même sens. En fait, la variabilité des performances en fonction des situations expérimentales par lesquelles l'une ou l'autre notion est opérationnalisée supprime toute possibilité de généralisation de ces correspondances structurales. A notre connaissance, aucune des recherches s'inspirant du cadre piagétien pour étudier les relations entre acquisitions au cours du développement n'a pris cette difficulté en considération. Or la forme de ces relations, inférée de la répartition des effectifs dans les cases de la table de contingence qui peut être construite pour étudier les relations entre les acquisitions prises deux à deux (cf. Jamison, 1977 ; Wohlwill, 1973), aussi bien que leur intensité, évaluée par des indices de corrélation, dépendent étroitement du choix des dispositifs expérimentaux avec lesquels les différentes notions sont opérationnalisées. Dans la mesure où la variation des performances en fonction des situations n'est pas prise en considération dans la théorie du sujet et reste dans une large mesure imprévisible, il est toujours possible d'expliquer les cas d'asynchronisme par des résistances inattendues des situations, mais les cas de synchronisme peuvent alors, eux aussi, être considérés comme accidentels. Dans ce cas de figure, l'hypothèse du synchronisme et celle de différences dans la forme du développement deviennent tout aussi irréfutables l'une que l'autre. Un problème crucial pour l'étude de la forme du développement, et de ses éventuelles variations, est donc de retrouver une échelle de référence commune, que les structures opératoires ne suffisent pas à définir, pour pouvoir comparer les niveaux de développement d'un même individu dans des domaines notionnels différents. Nous avons discuté ailleurs dans le détail les différentes approches méthodologiques qui pourraient permettre de surmonter cette difficulté très fondamentale (Lautrey et al., 1981). Nous nous contenterons ici de les rappeler succinctement.

Une option méthodologique consiste à chercher si une autre définition de la complexité des situations pourrait permettre de retrouver des correspondances structurales capables de rendre compte des variations situationnelles. Cette approche nous a amenés à analyser les situations en fonction du nombre de "dimensions de transformation" dont elles exigent la mise en oeuvre simultanée par le sujet. Nous y reviendrons plus longuement dans la discussion des résultats.

Une deuxième approche possible consiste à renoncer à établir des correspondances structurales entre les différents niveaux d'acquisition des

notions comparées, pour ne s'appuyer que sur les propriétés ordinales des données. Lorsque les différents items d'une même épreuve donnent lieu à un décalage, il est possible de construire, pour chaque épreuve, une échelle hiérarchique sur laquelle les différents individus peuvent être ordonnés (par exemple, substance, poids, volume, pour la notion de conservation). Il est alors possible d'analyser les relations entre les différentes notions par des méthodes de corrélation ordinale qui n'obligent à postuler aucune correspondance entre les différents niveaux d'acquisition distingués sur chaque échelle. Mais les inférences sur la forme des décalages entre les progressions sur les deux échelles comparées (décalages collectifs ou individuels par exemple) supposent néanmoins un cadre de référence commun qui est ici fourni par les fréquences de réussite. On pourra trouver ailleurs une présentation plus approfondie de cette méthodologie et des résultats auxquels elle a permis d'aboutir (Lautrey et al., 1984, 1985 ; de Ribaupierre et al., 1985).

Une troisième voie enfin consiste à ne s'appuyer au départ ni sur d'éventuelles correspondances structurales, ni sur d'éventuelles propriétés d'ordre entre acquisitions relatives à une même notion, mais sur les seules propriétés nominales des données. C'est à cette dernière approche qu'est consacré cet article.

En prenant les épreuves comme variables élémentaires pour analyser les relations entre acquisitions, les approches précédentes admettent certains postulats dont la validité empirique n'est pas démontrée. L'approche ordinale par exemple admet implicitement que les items correspondant aux différents niveaux de chaque échelle hiérarchique sont homogènes. Or si l'unidimensionalité implique la relation d'ordre, la réciproque n'est pas vraie. Il existe par exemple dans nos données une hiérarchie quasi parfaite entre les items de conservation de la substance, du poids, et du volume. Mais, en les liant dans une même échelle ordinale qui ne peut plus être comparée qu'en bloc à une autre échelle ordinale, on élimine toute possibilité d'observer que tel item de conservation a peut-être moins de ressemblance avec les autres items de conservation qu'avec tel autre item appartenant à une autre échelle ordinale. Une certaine forme de communauté de processus entre les items placés sur une même échelle ordinale est donc admise a priori.

En plaçant la variable élémentaire de l'analyse au niveau de l'item, l'approche nominale évite ce type d'a priori. Elle multiplie les sources de variation liées aux situations et laisse les possibilités de regroupement aussi ouvertes que possible. L'analyse des relations entre les items peut alors confirmer ou non des structures qui avaient statut de postulat dans les approches précédentes.

Dans le cadre de cette approche nominale, nous nous sommes appuyés sur la méthode d'analyse des correspondances (Benzecri, 1973, 1980) qui présente plusieurs caractéristiques intéressantes eu égard aux objectifs poursuivis dans cette recherche :

1) Tout en ne s'appuyant que sur les propriétés nominales des données, elle est susceptible de mettre en évidence une éventuelle structure multidimensionnelle.

2) Elle traite directement le tableau de données sans obliger à passer, comme dans l'analyse factorielle classique, par la matrice des intercorrélations. Le calcul de corrélations sur des données comme les nôtres est en effet problématique. D'une part il s'agit de variables qualitatives, issues d'une théorie structuraliste, pour lesquelles il est difficile d'admettre le postulat de continuité. D'autre part il s'agit de variables développementales, ayant de ce fait des fréquences de réussite très différentes. La dissymétrie qui en résulte, dans les fréquences marginales des tables de contingence où ces variables sont comparées deux à deux, rend la valeur des indices de corrélation ambiguë, y compris lorsque ces indices sont de niveau nominal. En introduisant la distinction entre le profil de réponse et son poids, l'analyse des correspondances permet de mieux dissocier l'effet de la fréquence de réussite (pondération attachée à chaque profil) de la corrélation (l'angle entre les vecteurs correspondant aux profils comparés).

3) Elle offre en outre l'avantage de mettre en correspondance le regroupement des variables et celui des individus. On verra mieux plus loin comment cette possibilité de passage entre l'espace des items et celui des sujets peut être exploitée pour interpréter les différents patterns de développement.

PROCEDURE EXPERIMENTALE

Sujets.

La recherche porte sur un échantillon de 154 enfants de 6 à 12 ans - 22 par tranche d'âge - examinés dans six écoles publiques de la région genevoise. Cet échantillon est représentatif de la population scolaire du canton de Genève du point de vue du sexe, de la catégorie socio-professionnelle du père, et de l'origine (suisse ou étrangère). Les enfants ont été examinés à une date aussi rapprochée que possible de leur anniversaire (l'écart maximum étant de plus ou moins deux mois). Cette étude aura un prolongement longitudinal puisque ce même échantillon est actuellement examiné pour la seconde fois, après un délai de trois ans. Dans le présent article, le développement est analysé par la méthode transversale sur les données du premier examen, seules disponibles pour l'instant.

Epreuves.

Chaque sujet a été examiné à l'aide de huit épreuves opératoires adaptées des situations d'observation utilisées par Piaget et Inhelder. On trouvera une description précise du matériel, des consignes, du questionnement "critique" des sujets, et des critères utilisés pour le codage des conduites, dans

Rieben et al. (1983). Seules les caractéristiques principales des différentes épreuves et de leurs items seront rappelées ici. Une brève description de chaque épreuve sera suivie d'un tableau récapitulatif des items qui la composent, indiquant leur fréquence de réussite, et un indice hiérarchique¹.

1. Épreuves logico-mathématiques :

Les deux épreuves retenues dans ce domaine sont celle de quantification des probabilités (Piaget et Inhelder, 1951) et celle d'intersection de classes (Piaget et Inhelder, 1959).

Quantification des probabilités. Deux collections de jetons sont présentées à l'enfant, chacune étant composée de jetons rouges (considérés comme cas favorables) et de jetons bleus (considérés comme cas défavorables). Il doit décider dans lequel des deux ensembles on aurait le plus de chances de tirer un jeton rouge du premier coup, si les collections étaient cachées chacune dans un sac. Dans les items les plus faciles, les collections ne diffèrent que par les cas favorables (PR1) ou par les cas défavorables (PR2). Dans les autres, elles diffèrent à la fois par les cas favorables et par les cas défavorables, soit dans des rapports de proportionnalité (PR3) et (PR4), soit dans des rapports inégaux (PR5 et PR6). Dans un dernier item, l'enfant doit construire lui-même deux collections, de telle sorte qu'il y ait à la fois égalité des chances et inégalité des cas possibles (PR7). Le codage des réussites s'appuie à la fois sur le choix exprimé et sur les arguments par lesquels il est justifié.

*Tableau 1. Quantification de probabilités :
effectif des réussites (N) aux différents items.*

| Items | PR1 | PR2 | PR5 | PR3 | PR4 | PR7 | PR6 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | 1/5-2/5 | 1/3-1/2 | 1/2-2/5 | 1/2-2/4 | 1/3-2/6 | const. | 3/8-2/6 |
| N | 145 | 127 | 44 | 40 | 18 | 18 | 9 |

Indice hiérarchique : I.A. = .90

*Table 1. Quantification of probabilities:
frequencies of pass scores (N) per item.*

Le tableau 1 présente ces items dans l'ordre des fréquences de réussite. Le nombre figurant dans le symbole de chaque item correspond à sa position dans l'ordre de passation. Les deux fractions figurant en-dessous indiquent les cas favorables (numérateurs) et les cas possibles (dénominateurs) des deux collections présentées dans cet item. L'effectif des réussites, qui figure dans la ligne au-dessous, peut être rapporté à 154, chaque item ayant été proposé à tous les sujets (la distribution des fréquences par âge peut être trouvée dans Rieben et al., 1983). Enfin, les barres verticales figurent les coupures qui peuvent être faites sur la base d'une première inspection des fréquences de réussite, pour distinguer les groupes d'items. L'indice d'amélioration sur le hasard (I.A.) ne porte que sur les relations d'ordre entre les items séparés par des barres verticales. Les tableaux récapitulatifs des items des autres épreuves seront présentés selon les mêmes règles.

Intersection de classes. Après avoir identifié la propriété commune aux images de différentes classes, le sujet doit trouver une nouvelle image susceptible de convenir à plusieurs classes à la fois. Les items varient du point de vue des critères de classification (couleur, taille, nombre, etc.), du nombre de classes à mettre en intersection (2, 3 ou 4) et de la manière de réaliser l'intersection : Anticipation de l'intersection (items AI) ou placement d'une carte d'intersection (items IT). Dans les items AI, les sujets doivent imaginer ce qu'il faudrait dessiner sur une carte blanche pour qu'elle convienne à toutes les classes en présence. Dans les items IT, ils doivent choisir les images qui conviennent à l'intersection parmi plusieurs proposées. Les items étaient donnés en allant du plus petit au plus grand nombre de classes à mettre en intersection et, dans chaque cas, l'item d'anticipation était présenté avant l'item de placement. Les nombres figurant dans les symboles des items se réfèrent ici au nombre de classes à mettre en intersection (par exemple, AI3 signifie Anticipation de l'Intersection à 3 classes).

Tableau 2. *Intersection de classes :
effectif des réussites (N) aux différents items.*

| Items | IT3 | IT4 | IT2 | AI4 | AI2 | AI3 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N | 100 | 98 | 98 | 76 | 69 | 68 |

Indice hiérarchique : I.A. = .56

Table 2. *Intersection of classes:
frequencies of pass scores (N) per item.*

2. Épreuves du domaine physique :

Les deux épreuves retenues dans le domaine physique sont d'une part les conservations (Piaget et Inhelder, 1941) et d'autre part les îles (Piaget, Inhelder et Szeminska, 1948).

Conservations. Cette épreuve est suffisamment connue pour qu'il ne soit pas nécessaire de la présenter. Les items portent sur la conservation de la substance (CS1), du poids (CP1), du volume (CV1), et sur la dissociation poids-volume (CV2). L'ordre de passation est le suivant : CP1, CS1, CV1, CV2 (avec reprise éventuelle de CV1 après CV2). Des items de conservation de l'inégalité ont été donnés en alternance avec les items de conservation de l'égalité pour éviter que la réussite puisse être obtenue par la simple acquisition d'un "set" de réponse. Une analyse des correspondances préalable ayant montré que ces items redoublent ceux de conservation de l'égalité, ils ont été ici retirés de l'analyse pour alléger les graphiques².

Tableau 3. *Conservations : effectifs des réussites (N) aux différents items.*

| Items | CS1 | CP1 | CV2 | CV1 |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| N | 117 | 66 | 28 | 15 |

Indice hiérarchique : I.A. = .93

Table 3. *Conservations: frequencies of pass scores (N) per item.*

Les îles. Cette épreuve est plus spécialement axée sur la conservation du volume intérieur (que sur la place occupée comme dans l'épreuve de conservation du volume) et fait en outre intervenir une activité de mesure. L'enfant doit construire des volumes équivalents à un bloc-modèle (présenté comme étant un immeuble) sur des surfaces différentes (présentées comme étant des îles). Il a pour cela à sa disposition de petits plots-unité. Mesurées en plots-unité, les dimensions du bloc-modèle sont 3x3x4. Les enfants doivent d'abord réaliser la construction d'un volume équivalent sur une île de surface 1x3 (dont on peut remarquer qu'elle a une dimension commune avec la base du modèle). Le fait d'être ou non capable d'une compensation qualitative

conduisant à construire plus haut que le bloc modèle est considéré comme un item préalable (IL0). La construction correcte sur la base 1x3 constitue la réussite de l'item suivant (IL1). On demande ensuite à l'enfant d'anticiper le nombre d'étages qu'aura un volume équivalent sur une île de surface 2x2 (IL2), puis de réaliser la construction (IL3).

Tableau 4. Iles : effectif des réussites (N) aux différents items.

| Items | IL0 | IL1 | IL3 | IL2 |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| N | 96 | 43 | 20 | 14 |

Indice hiérarchique : I.A. = .89

Table 4. Construction of volumes (islands): frequencies of pass scores (N) per item.

3. Epreuves d'espace :

Les deux épreuves retenues ici sont celle de sectionnements de volumes et celle de dépliements de volumes. Dans leur ouvrage sur l'espace, Piaget et Inhelder (1947) considèrent qu'elles relèvent à la fois de la géométrie des objets, c'est-à-dire de la géométrie euclidienne, et de la géométrie des points de vue, c'est-à-dire de la géométrie projective.

Sectionnements de volumes. L'enfant doit se représenter la surface de section obtenue lorsque différents objets sont coupés selon différents plans. Le plan de section est indiqué par une ligne au crayon tracée sur le volume ; de plus, on applique un couteau contre l'objet dans la direction voulue. Le sujet donne sa réponse en dessinant la surface de section (des planches de dessins à choix sont ensuite présentées pour lever d'éventuelles ambiguïtés de la réponse). Les différents items sont donnés dans l'ordre suivant : cube, section carrée (SE1) ; cube, section rectangulaire, c'est-à-dire suivant une diagonale (SE2) ; cône, section triangulaire, c'est-à-dire suivant un plan vertical passant par le sommet (SE3) ; cône, section elliptique (SE4) ; cône, section parabolique (SE5).

Dépliements de volumes. On présente à l'enfant différents volumes faits de carton plié et collé (les arêtes collées sont tracées en rouge). Il doit dessiner ce que l'on verrait si les arêtes tracées en rouge étaient décollées et

*Tableau 5. Sectionnements de volumes :
effectifs des réussites (N) aux différents items.*

| Items | SE1 | SE3 | SE5 | SE4 | SE2 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| N | 124 | 95 | 64 | 59 | 24 |

Indice hiérarchique : I.A. = .64

*Table 5. Sectioning of volumes:
frequencies of pass scores (N) per item.*

les différentes faces dépliées de façon à être rabattues sur le plan de la table. Les items sont donnés dans l'ordre suivant : cylindre construit à partir d'un rectangle et de deux ronds (DE1) ; pyramide à base triangulaire faite d'un seul tenant, dont les quatre faces sont des triangles équilatéraux, les trois arêtes collées étant tracées en rouge (DE2) ; cube fait d'un seul tenant, en forme de T, les 7 arêtes collées étant tracées en rouge (DE3).

*Tableau 6. Déploiements de volumes :
effectif des réussites (N) aux différents items.*

| Items | DE1 | DE3 | DE2 |
|-------|-----|-----|-----|
| N | 86 | 39 | 32 |

Indice hiérarchique : I.A. = .75

Table 6. Unfolding of volumes: frequencies of pass scores (N) per item.

4. Epreuves d'imagerie mentale :

Les deux épreuves retenues pour étudier l'image mentale (plis-trous, et pliage de lignes) portent, selon la classification proposée par Piaget et Inhelder (1966), sur des anticipations de transformations.

Pliage de lignes. L'expérimentateur présente une feuille de papier calque sur laquelle est dessinée une figure faite de lignes de différentes couleurs. Il fait alors observer qu'en pliant la feuille par le milieu (selon un pli nettement marqué), la moitié inférieure de la figure vient se rabattre sur la moitié supérieure, l'ensemble formant ainsi une nouvelle figure. Certaines lignes de la moitié supérieure de la figure restent en effet visibles (puisque le papier calque est transparent), tandis que d'autres sont cachées par des lignes de couleurs différentes (lorsqu'une ligne de la moitié inférieure se superpose à une ligne de la moitié supérieure). Dans les items proposés après cet exemple, le sujet doit anticiper la transformation qui résulte du pliage, sans que celui-ci soit réellement effectué. Les quatre items sont de difficulté croissante selon qu'ils nécessitent ou non de tenir compte d'une inversion droite-gauche en plus de l'inversion bas-haut. Elle varie aussi selon le nombre de segments que comporte la figure.

Tableau 7. *Pliages de lignes : effectif des réussites (N) aux différents items.*

| Items | LI1 | LI2 | LI3 | LI4 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| N | 109 | 80 | 45 | 29 |
| Indice hiérarchique : I.A. = .82 | | | | |

Table 7. *Line foldings: frequencies of pass scores (N) per item.*

Plis et trous. Dans cette épreuve, l'enfant doit prévoir le résultat du dépliement d'une feuille qui a été préalablement pliée en quatre ou en huit, et dans laquelle un trou a été découpé avec des ciseaux. On lui demande de dessiner "comment on verra la feuille lorsqu'elle sera dépliée" (marque des plis et place des trous)³. La feuille est d'abord pliée en quatre (deux plis), puis en huit (trois plis). Chacun de ces deux cas donne lieu à trois items : L'un pour l'emplacement des plis (respectivement PL2 et PL4), les deux autres pour l'emplacement des trous, selon que la découpe a été faite au milieu du dernier pli (respectivement TR2 et TR4) ou à l'intersection des plis (respectivement TR1 et TR3).

Tableau 8. Plis et trous : effectif des réussites aux différents items.

| Items | PL2 | TR1 | TR2 | PL4 | TR4 | TR3 |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N | 109 | 90 | 43 | 39 | 18 | 14 |

Indice hiérarchique : I.A. = .86

Table 8. Folds and holes: frequencies of pass scores (N) per item.

TRAITEMENT DES DONNEES

Pour chacun des items, on n'a retenu ici que deux modalités de réponse : Réussite (R) et Echec (E). Les critères utilisés pour la cotation de chaque item pourront être trouvés dans Rieben et al. (1983).

Comme il y a déjà été fait allusion, les données ont été traitées par l'analyse des correspondances (Benzecri, 1973, 1980). Cette méthode analyse directement le tableau comportant les modalités de réponse aux items en colonne et les sujets en ligne. Dans l'espace support des items, chaque modalité de réponse est définie par son profil sur le support des sujets, et dans l'espace support des sujets, chaque sujet est défini par son profil sur le support des items. Dans l'un et l'autre espace, la métrique utilisée pour calculer les distances entre profils est celle du chi carré. Le chi carré du tableau est décomposé en facteurs selon le principe de l'analyse en composantes principales (facteurs orthogonaux dont chacun explique le maximum de la variance restante).

La méthode conserve les correspondances entre l'analyse des profils des sujets et celle des profils des items. Les deux systèmes d'axes étant relatifs aux mêmes valeurs propres, il est en effet possible d'identifier deux à deux les facteurs de même rang. Ceci permet, moyennant l'utilisation d'une formule de transition entre les deux espaces, la représentation simultanée des profils des items et de ceux des sujets sur un même système d'axes⁴.

Une autre caractéristique de la méthode est liée à la logique du chi carré (un même écart absolu à l'effectif théorique pèse d'autant plus lourd que l'effectif théorique est plus petit) grâce à laquelle la contribution des événements rares à la détermination des facteurs n'est pas écrasée par celle des événements plus fréquents. Ce choix est intéressant dans l'optique développementale, du fait que les items encore rarement réussis sont néanmoins de bons indicateurs des cheminements par lesquels une nouvelle phase de développement s'amorce.

Ces avantages ont bien entendu quelques contreparties. L'analyse des correspondances portant sur la totalité de la variance, y compris celle qui est spécifique à chaque item, il existe un risque qu'un facteur - même extrait parmi les premiers - soit en grande partie créé par la variance spécifique à un item. Ce risque est précisément accru par la prime que l'analyse accorde, dans la détermination des facteurs, à un item rarement réussi. Par ailleurs, la possibilité de prendre l'item comme variable élémentaire s'accompagne de la faible fidélité de cette variable. Enfin la représentation des différentes dimensions de l'activité cognitive par des facteurs orthogonaux et bipolaires est arbitraire. Les épreuves cognitives entretiennent entre elles des corrélations variables, mais généralement positives, et cette propriété serait mieux reflétée par une représentation où les différentes dimensions distinguées seraient corrélées.

Nous indiquons ci-dessous les mesures qui ont été prises pour éviter certains de ces inconvénients. Ceux qui ne peuvent être évités - l'orthogonalité des facteurs notamment - seront rappelés lors de l'interprétation des résultats pour prévenir les contresens qui feraient prendre des caractéristiques de la méthode pour des caractéristiques du fonctionnement cognitif.

Codage.

Le codage qui vient le plus spontanément à l'esprit consiste à faire entrer chaque item dans l'analyse en codant 1 lorsqu'il est réussi ou 0 lorsqu'il est échoué. Ce codage, que nous conviendrons d'appeler "*présence-absence*", a pour résultat de faire jouer un rôle prépondérant, dans la détermination des axes, aux items rarement réussis et aux sujets qui les réussissent. S'il est bon que ces items et ces sujets jouent un rôle dans l'analyse - les raisons en ont été données plus haut - il n'est cependant pas souhaitable qu'ils déterminent les axes à eux seuls. Le caractère arbitraire de ce choix apparaît nettement en faisant l'analyse avec le codage "*absence-présence*" : 1 pour l'échec et 0 pour la réussite. Ce changement a pour effet de retourner le nuage comme un gant, et ce sont alors les items les plus rarement échoués qui déterminent les axes. Bien que les tableaux issus de l'un ou l'autre codage soient complémentaires, les facteurs issus des deux analyses peuvent être différents puisque ce sont des items différents qui jouent un rôle effectif dans chaque cas. Une troisième solution consiste à disjoindre les modalités - ici, réussite et échec - dans le codage, chacune d'elles devenant une variable distincte : par exemple, l'échec à un item I est codé 1 dans la modalité "échec à I" et 0 dans la modalité "réussite à I". L'analyse porte alors simultanément sur les deux nuages correspondant aux codages précédents. Ce dernier codage, que nous conviendrons d'appeler "*disjonctif*", paraît préférable aux deux autres, dans la mesure où il prend mieux en compte l'ensemble de l'information. L'analyse portant sur le codage disjonctif n'a néanmoins un sens clair pour l'utilisateur que si les deux autres codages (présence-absence et absence-présence) admettent les mêmes facteurs. Dans le cas contraire, les axes

auxquels elle aboutit peuvent n'être que le résultat d'un compromis entre deux structures différentes (les mécanismes des échecs aux items rarement échoués pouvant être différents des mécanismes des réussites aux items rarement réussis).

Ces trois codages ont été comparés sur nos données et aboutissent - à quelques variantes mineures près - aux mêmes facteurs. Le codage disjonctif a donc finalement été retenu car les contributions aux différents facteurs sont alors nettement mieux réparties, aussi bien entre les sujets qu'entre les items.

Le recours au codage disjonctif n'élimine cependant pas complètement le risque qu'un item très rarement réussi ou très rarement échoué détermine presque à lui seul un des premiers facteurs. Dans l'analyse avec l'ensemble de l'échantillon, le cas s'est produit avec PR6 qui est l'item le plus rarement réussi. Le problème s'est également posé lorsqu'il s'est agi de faire une analyse séparée des deux tranches d'âge 6-9 ans et 9-12 ans : les items les plus faciles de la batterie ne sont qu'exceptionnellement échoués chez les enfants de 9 à 12 ans, et les plus difficiles ne sont qu'exceptionnellement réussis chez les enfants de 6 à 9 ans. Dans les deux cas, ces éventualités exceptionnelles donnent lieu à des facteurs spécifiques à un item, qui perturbent la mise en évidence des facteurs communs. Ce problème a été résolu en entrant les éventualités rares (de fréquence inférieure à 10%) comme *variables supplémentaires* : elles sont positionnées par rapport aux facteurs grâce aux vecteurs propres issus de l'analyse, mais sans avoir participé à la détermination de ces vecteurs propres (cf. note 4).

Inertie et codage.

L'utilisation du codage disjonctif pose à son tour quelques problèmes lorsqu'il s'agit d'évaluer les parts d'inertie expliquées par les différents facteurs. Tout d'abord, l'inertie totale (la valeur de chi carré) ne dépend pas dans ce cas des données, mais seulement des caractéristiques du tableau (cf. Cibois, 1983, p. 107). Ensuite, le codage disjonctif accroît considérablement la part du premier facteur au détriment des suivants. Ceci peut se comprendre intuitivement : l'analyse simultanée de deux nuages complémentaires (celui des modalités de réussite et celui des modalités d'échec) place le centre de gravité entre ces deux nuages. L'inertie relative à la distinction entre réussite et échec va donc se surajouter, sur le premier axe, à celle qui correspond au premier facteur de chacun des nuages lorsqu'il est analysé séparément. Ces deux artefacts ont une conséquence importante pour l'interprétation : il n'y aurait aucun sens à attribuer aux parts d'inertie expliquées par les différents facteurs la même signification que dans une analyse factorielle classique. Cette comparaison a par contre davantage de sens lorsque l'analyse des correspondances porte sur un tableau de contingence entre variables (dit "*tableau de Burt*"). Il est possible de passer des codages précédents à un codage en tableau de Burt en plaçant les items à la fois en ligne et en colonne, la fréquence des sujets ayant réussi les items i et j figurant alors dans la case ij . L'analyse des corres-

pondances effectuée avec le codage en tableau de Burt aboutit alors aux mêmes facteurs que celle effectuée avec le codage disjonctif (un tableau pouvant être déduit de l'autre), mais les parts de variance expliquées par les facteurs sont plus conformes à celles que l'on trouve d'habitude dans une analyse en composantes principales. Pour tenir compte de ce problème, les analyses ont été effectuées avec le codage disjonctif et avec le codage en tableau de Burt, de façon à pouvoir indiquer les parts de variance expliquées par les facteurs pour chacun des deux codages. Il va de soi que, si le codage en tableau de Burt n'a pas été retenu pour la présentation des résultats malgré l'avantage qu'il présente pour l'estimation des parts de variance expliquées, c'est qu'il fait perdre les correspondances entre l'espace des variables et celui des sujets.

RESULTATS

Les principaux facteurs mis en évidence par l'analyse des correspondances seront d'abord présentés en considérant l'espace support des items. L'utilisation des correspondances entre l'espace support des items et l'espace support des sujets permettra ensuite de situer les profils de développement des enfants par rapport à ces facteurs.

1. L'espace support des items.

L'analyse a d'abord été effectuée sur l'ensemble de l'échantillon, puis répétée sur deux tranches d'âge successives (6-9 et 9-12 ans), pour éprouver la stabilité des facteurs au cours du développement.

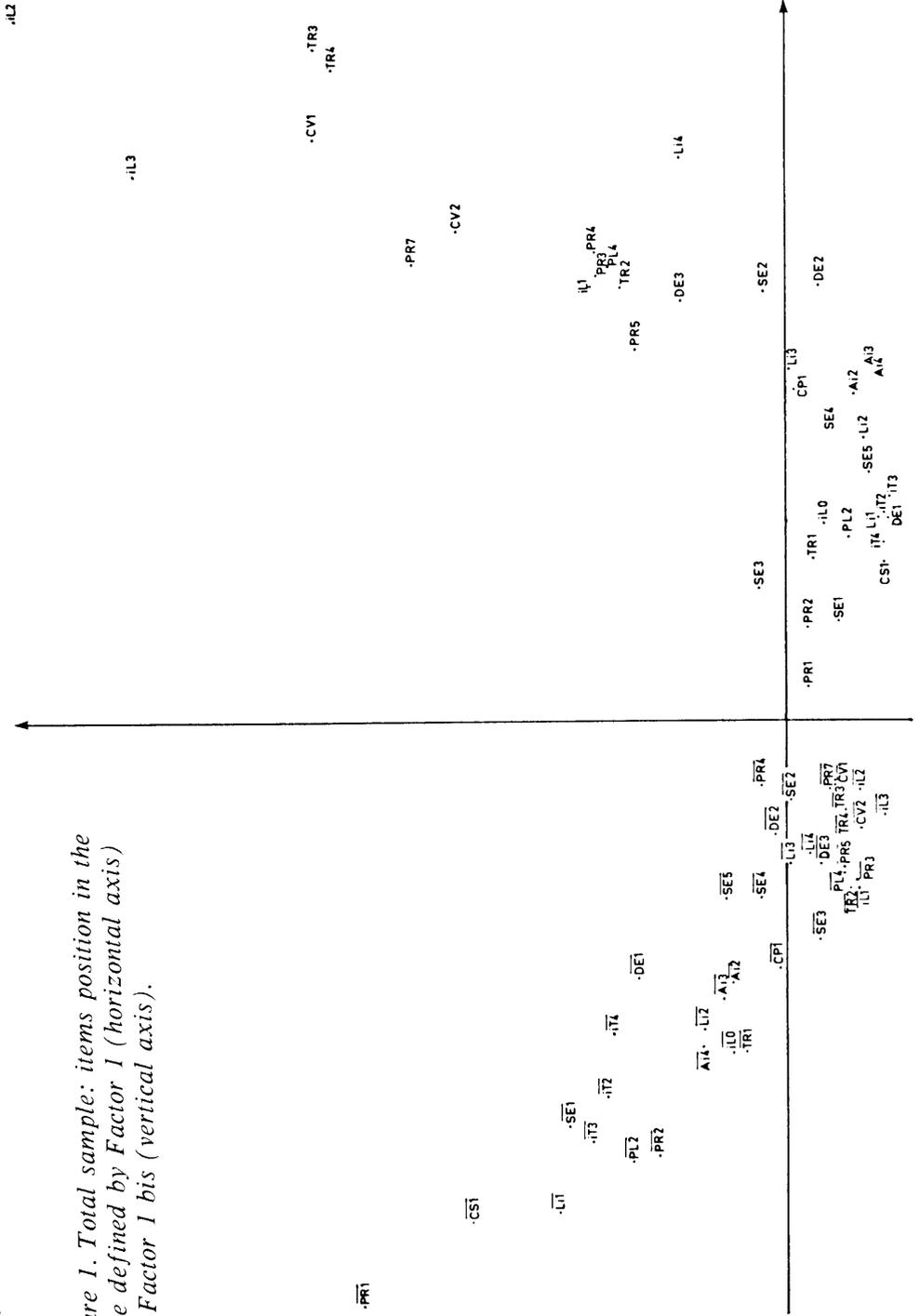
1.1. Ensemble de l'échantillon :

L'analyse porte sur le tableau disjonctif qui comporte 76 modalités de réponse en colonne (38 items à deux modalités : R = réussite, E = échec) et 154 sujets en ligne (22 sujets pour chacune des 7 tranches d'âge de 6 à 12 ans). Les distorsions engendrées par la rareté des réussites à l'un des items (PR6) ont conduit à ne l'entrer dans l'analyse que comme variable supplémentaire.

Le plan des facteurs 1 et 2. Dans la figure 1, les 76 modalités de réponse sont positionnées en fonction de leurs coordonnées sur les deux premiers axes. Les items sont désignés par les mêmes symboles que dans les tableaux 1 à 8. Une barre horizontale sur la modalité E (ex: $\overline{PR1}$) la distingue de la modalité R (ex: PR1).

Figure 1. Ensemble de l'échantillon : position des items dans le plan des facteurs 1 (axe horizontal) et 1 bis (axe vertical).

Figure 1. Total sample: items position in the plane defined by Factor 1 (horizontal axis) and Factor 1 bis (vertical axis).



L'axe 1 (horizontal) oppose, de part et de l'autre de l'origine, les modalités d'échec à celles de réussite. Le nuage formé par l'ensemble a une forme parabolique qui est caractéristique, en analyse des correspondances, d'un "effet Guttman" (Benzecri, 1973, p. 44). Cet effet traduit la tendance des items à se hiérarchiser dans l'ordre de leurs projections sur le premier axe (à l'ordre des modalités R, correspond l'ordre réciproque des modalités E).

Le second facteur (vertical) est une fonction du premier : il exprime la même gradation avec une échelle différente⁵. Etant donné qu'il regroupe indistinctement les modalités R et E à chaque pôle, il n'y aurait pas de sens à en chercher une interprétation psychologique. Il ne joue, dans le cadre de l'effet Guttman, qu'un rôle technique traduisant l'opposition entre modalités rares (R ou E) et modalités fréquentes (R ou E). Nous conviendrons d'appeler ce facteur 1 bis et de réserver l'appellation de facteur 2 au suivant. Cette convention facilitera les comparaisons entre cette analyse et les suivantes où l'on ne retrouve pas l'équivalent du facteur 1 bis.

Le premier facteur peut par contre être interprété, dans l'espace support des items, comme un facteur général de difficulté. Il traduit la tendance des items à se hiérarchiser sur le support des sujets. L'allure parabolique du nuage ne signifie pas pour autant qu'il existe un ordre strict entre tous les items. Les analyses hiérarchiques (cf. tableaux 1 à 8) ont certes montré qu'existait, au sein de la plupart des épreuves, une hiérarchie assez forte entre les items ayant des fréquences de réussite nettement différentes (et on peut vérifier que les items concernés sont placés, sur l'axe 1, dans un ordre qui correspond à cette hiérarchie). Néanmoins, lorsque les 8 épreuves sont réunies dans une même échelle, l'analyse hiérarchique de l'ensemble, effectuée en conservant les découpages en niveaux indiqués dans les tableaux 1 à 8, donne un indice IA = .40. Autrement dit, les erreurs (inversions) par rapport à l'ordre attendu atteignent dans ce cas 60% de ce qu'elles seraient si les sujets répondaient au hasard. La chute de l'indice provoquée par la réunion des épreuves dans une même échelle montre que l'ordre des items sur l'axe 1 n'est sous-tendu par des relations hiérarchiques que pour une partie d'entre eux.

Le plan des facteurs 2 et 3. Pour alléger la figure 2, seules les modalités R figurent ici. Les positions des modalités E peuvent en effet être facilement reconstituées : chaque pôle d'un facteur est saturé par les modalités E des items dont la modalité R figure au pôle opposé. Les symboles figurant sous les noms des items correspondent aux différentes distinctions auxquelles il sera fait allusion dans l'interprétation du graphique : carrés pour les items du domaine Logico-Mathématique (LM) et ronds pour ceux du domaine Infra-Logique (IL)⁶. Ces symboles sont vides lorsque tous les éléments sur lesquels le sujet doit opérer sont accessibles à la perception et pleins lorsque tel n'est pas le cas. Enfin, lorsque la contribution relative (CTR) d'un item à un facteur est supérieure à la moyenne, une flèche désigne le(s) facteur(s)

concerné(s)⁷. Ces règles de présentation seront conservées dans les graphiques suivants afin de permettre au lecteur qui le souhaite de comparer les résultats des différentes analyses sans entrer dans le détail des items.

Figure 2. Ensemble de l'échantillon : position des items dans le plan des facteurs 2 (axe horizontal) et 3 (axe vertical).

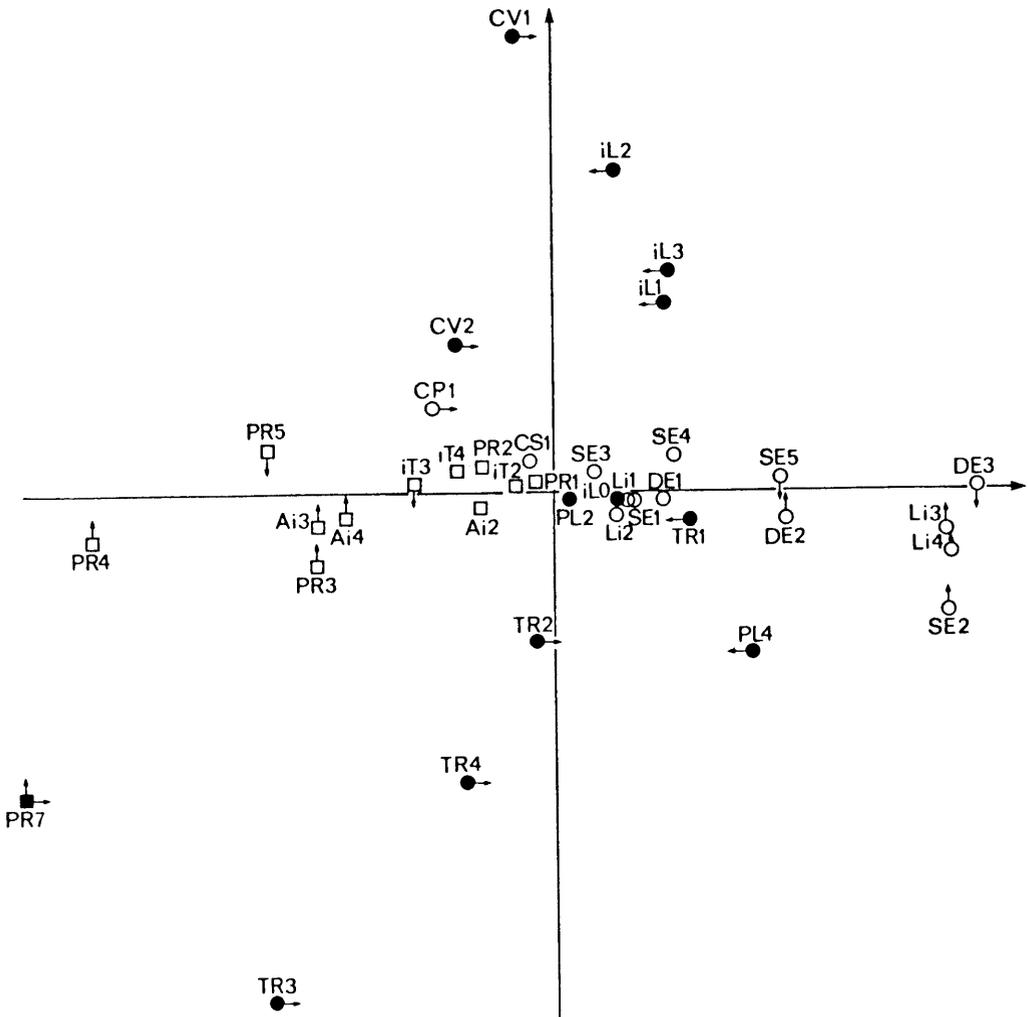


Figure 2. Total sample: items position in the plane defined by Factor 2 (horizontal axis) and Factor 3 (vertical axis).

L'axe 2 oppose les items du domaine LM (quantification de probabilités et intersections de classes) à ceux du domaine IL (plisages de lignes et dépliements de volumes notamment). Dans la quasi-totalité des items qui contribuent plus que la moyenne à cet axe, les objets (sur le pôle LM) ou les parties d'objets (sur le pôle IL) sur lesquels portent les opérations sont accessibles à la perception.

L'axe 3 regroupe les items du domaine infralogique qui étaient mal représentés sur le deuxième axe. Il oppose tous ceux de conservation du volume à ceux d'une des épreuves d'image mentale (plis et trous) et à PR7. Les items qui contribuent à cet axe ont par contre tous en commun d'exiger la représentation de transformations relatives à des éléments qui ne sont pas accessibles à la perception. C'est le cas dans les items de conservation du volume, où le sujet doit tenir compte de l'intérieur de l'objet, mais c'est aussi le cas des items de plis et trous où ni les plis ni les trous ne sont visibles. Enfin, l'item PR7 est le seul dans lequel le sujet ne perçoit pas les deux collections à comparer, mais doit les construire.

Les items de sectionnement de volumes ont une position ambiguë du point de vue de cette distinction. Dans la mesure où il s'agit de se représenter la surface de section d'un volume plein, les éléments sur lesquels le sujet doit opérer ne sont en principe pas accessibles à la perception. Toutefois, pour indiquer plus clairement la position du plan de sectionnement, nous avons tracé la ligne de coupe sur l'extérieur du volume. Il est vraisemblable que, sans l'avoir voulu, nous avons ainsi modifié le sens de l'épreuve, une partie des enfants au moins n'ayant fait que reconstituer la surface de section à partir des différents éléments de la ligne de coupe, tous accessibles à la perception en manipulant le solide (c'est pourquoi les items SE ont été symbolisés par des ronds vides). Sans que nous sachions si cette raison suffit à l'expliquer, le fait est que la répartition des items de sectionnement sur les axes 2 et 3 varie selon les analyses.

Les parts d'inertie expliquées par les différents facteurs. Avec le codage disjonctif, les parts de variance expliquées par les quatre premiers facteurs sont respectivement de 29%, 6%, 5% et 4%. On ne trouve pas l'équivalent du facteur 1 bis avec le codage en tableau de Burt (la tendance à la hiérarchisation que traduit le premier facteur ne donne pas lieu, avec ce codage, à un nuage de forme parabolique). Les parts de variance expliquées par les trois premiers facteurs sont alors respectivement de 30%, 14%, et 9%.

Deux sortes de raisons ont poussé à vérifier la stabilité de ces facteurs. La première est d'ordre technique : on peut se demander si les différences entre les parts de variance des facteurs sont suffisantes pour assurer la stabilité de leur ordre d'apparition. La seconde est plus fondamentale. Il se pourrait que la structure factorielle des tâches opératoires se modifie au cours du développement et que ce phénomène soit masqué lorsque les patterns de réponse de sujets de 6 à 12 ans sont traités ensemble. Ces deux raisons de douter de la stabilité des facteurs ont incité à répéter l'analyse en distinguant

deux sous-échantillons, l'un regroupant les enfants de 6 à 9 ans et l'autre ceux de 9 à 12 ans⁸.

1.2. Le sous-échantillon de 6-9 ans :

L'analyse porte ici sur le tableau disjonctif comportant 88 sujets en ligne (22 sujets pour chacune des quatre tranches d'âge de 6 à 9 ans) et 52 modalités de réponse en colonne (26 items à deux modalités : R et E). En effet, le caractère exceptionnel, dans cette tranche d'âge, de la réussite aux douze items les plus difficiles (PL4, TR3, TR4, LI4, DE2, SE2, IL2, IL3, CV1, CV2, PR4, PR7), a contraint à les traiter comme variables supplémentaires.

Le premier facteur. Il est comparable à celui qui a été trouvé avec l'ensemble de l'échantillon : il oppose les modalités R et E, et ordonne les items de la même manière. Il peut donc également être interprété comme un facteur de difficulté. Toutefois, on ne trouve pas ici la forme parabolique du nuage (et donc pas non plus le facteur 1 bis engendré par cette forme). Ceci signifie qu'en réduisant l'écart entre les âges comparés à trois ans au lieu de six, les relations d'ordre entre items se sont encore affaiblies.

Les coordonnées des items dans le plan formé par les facteurs 2 et 3 sont indiquées dans la figure 3.

Le second facteur. Cet axe (horizontal) oppose ici aussi les items LM (symboles carrés) aux items IL (symboles ronds). Seul l'item de conservation du poids fait exception en contribuant au pôle logico-mathématique. Là encore, ce sont les items de pliage de lignes et de dépliements (LI et DE) qui contribuent le plus au pôle infra-logique.

Le troisième facteur. Neuf des douze items qui ont dû être retirés de cette analyse (parce qu'ils ne sont pratiquement jamais réussis entre 6 et 9 ans) sont précisément ceux qui contribuaient le plus à la définition de l'axe 3 dans l'analyse de l'ensemble de l'échantillon. On ne peut donc espérer trouver l'équivalent du facteur 3 dans cette analyse. Il est cependant remarquable que les items ayant la plus forte contribution à l'axe 3 dans ce sous-échantillon soient les rares items qui ont pu être conservés parmi ceux qui contribuaient à l'axe 3 dans l'analyse précédente : TR2 et TR1 à un pôle et IL1 à l'autre. Mais ces items constituent tout de même une base trop fragile pour affirmer que le facteur 3 a ici la même signification que dans l'analyse de l'ensemble de l'échantillon, d'autant plus que les items de sectionnement de volumes contribuent au pôle plis-trous et que l'item LI3 contribue au pôle correspondant à l'esquisse de la conservation du volume.

Les parts d'inertie expliquées par les trois premiers facteurs. Elles sont respectivement de 25%, 9%, et 6% avec le codage disjonctif, et de 25%, 15%, et 11% avec le codage en tableau de Burt.

Figure 3. Sous-échantillon de 6-9 ans : position des items dans le plan des facteurs 2 (axe horizontal) et 3 (axe vertical).

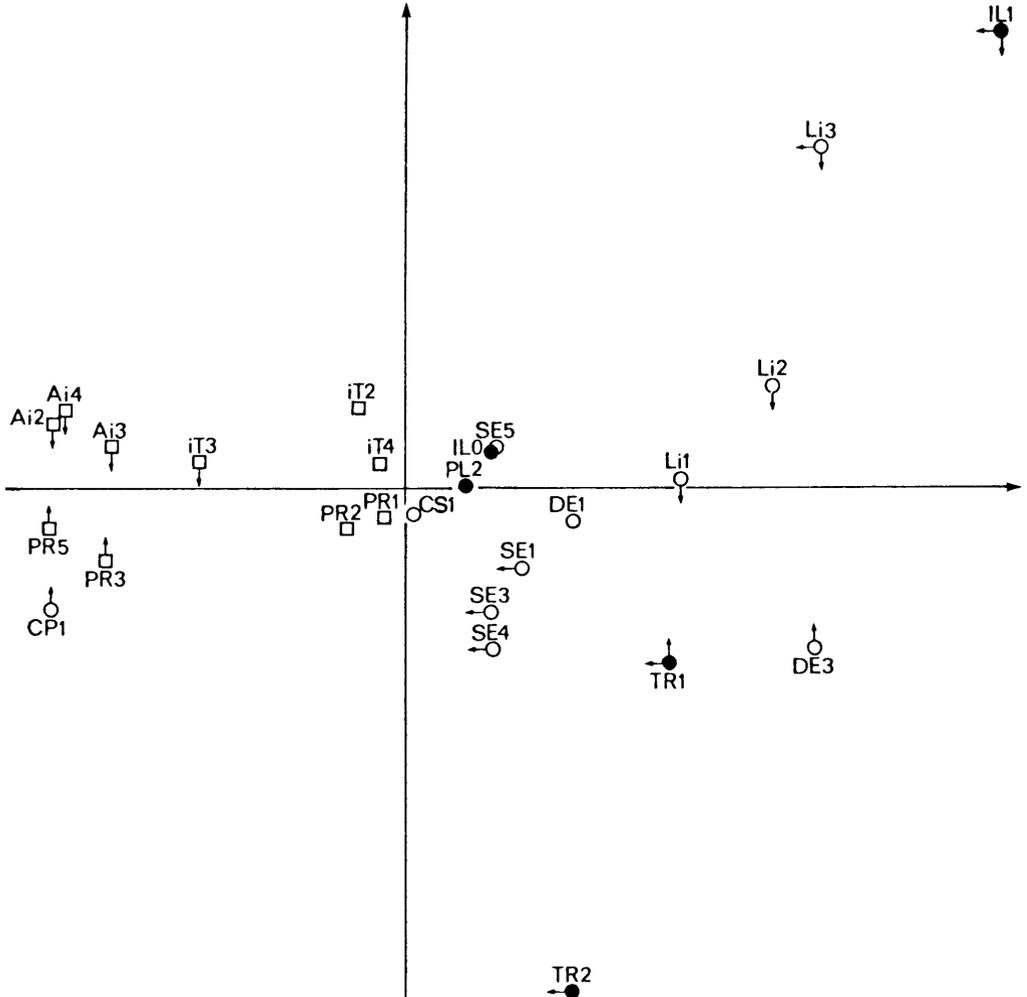


Figure 3. Total sample: items position in the plane defined by Factor 2 (horizontal axis) and Factor 3 (vertical axis).

1.3. Le sous échantillon de 9-12 ans :

Le tableau disjonctif comporte 88 sujets en ligne (22 pour chacune des quatre tranches d'âge de 9 à 12 ans) et 66 modalités en colonne (33 items à deux modalités : R et E). Ici, ce sont les cinq items les plus faciles (LI1, SE1, CS1, PR1, PR2), exceptionnellement échoués, qui ont du être traités comme variables supplémentaires.

Le facteur 1. On retrouve le premier axe correspondant à un facteur général de difficulté, mais le nuage n'a pas, là non plus, la forme parabolique caractéristique de l'effet Guttman. Les 33 items s'ordonnent sur le premier axe de la même façon que dans l'analyse sur l'ensemble de l'échantillon, ce qui permet de lui attribuer la même signification. Les coordonnées des items dans le plan formé par les facteurs 2 et 3 sont indiquées dans la figure 4.

Figure 4. Sous-échantillon de 9-12 ans : position des items dans le plan des facteurs 2 (axe horizontal) et 3 (axe vertical).

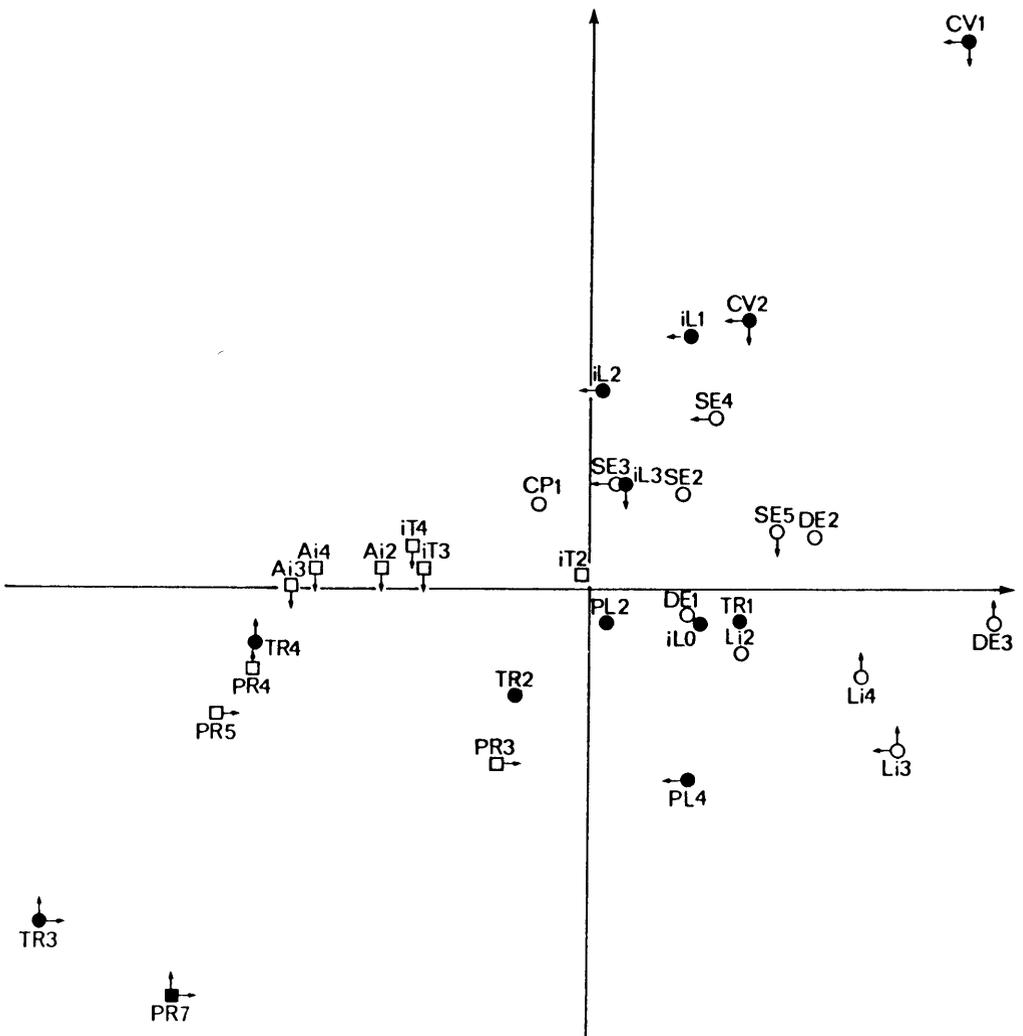


Figure 4. 9-12 year-olds sample: items position in the plane defined by Factor 2 (horizontal axis) and Factor 3 (vertical axis).

Le facteur 2. Cet axe (horizontal) oppose, là encore, les items LM (symboles carrés à gauche du barycentre) aux items IL (symboles ronds à droite du barycentre) à l'exception des items TR qui se trouvent du côté LM.

Le facteur 3. On retrouve, comme dans l'analyse portant sur l'ensemble de l'échantillon, les items de conservation du volume à un pôle de l'axe 3 (en haut de l'axe vertical), mais le pôle opposé est ici moins bien défini : On retrouve PR7, TR3, et PL4 parmi les contributions les plus fortes, mais LI3, PR3, et PR5 y contribuent aussi, quoique plus faiblement.

En fait, il semble que la structure des items serait ici mieux représentée par trois facteurs obliques que par deux facteurs orthogonaux et bipolaires : un facteur passant entre PR7 et TR3, saturé par les items LM et ceux de plis-trous, un autre orienté vers les items de conservation du volume et de sectionnement de volumes (CV, IL, et SE), et un troisième orienté vers les items de pliage de lignes et de dépliement de volumes (LI et DE). Il est regrettable que ces techniques de rotation ne puissent être utilisées dans le cadre de l'analyse des correspondances, qui ne permet donc pas de mettre cette structure en évidence de façon plus précise.

Les parts d'inertie expliquées par les trois premiers facteurs. Elles sont respectivement de 20%, 7%, et 6% avec le codage disjonctif et de 26%, 15% et 11% avec le codage en tableau de Burt.

Au total, la comparaison des analyses effectuées sur des groupes d'âges différents montre que les deux premiers facteurs (facteur général de difficulté et opposition logique-infralogique) gardent la même signification au cours de la période d'âge étudiée ici. Les 21 items communs aux trois analyses sont en effet, dans chacune, ordonnés de la même manière sur le premier axe, et classés de façon identique de part et d'autre du barycentre sur le second (à l'exception de l'item de conservation du poids qui contribue au pôle LM de l'axe 2 à 6-9 ans, tandis qu'il ne contribue pas à cet axe à 9-12 ans). L'interprétation du 3e facteur est moins assurée. Les items contribuant le plus à cet axe dans l'analyse sur l'ensemble de l'échantillon ne sont guère réussis avant 10 ans. La seule base fiable pour décrire leur structure est donc l'analyse effectuée sur l'échantillon de 9-12 ans. Elle ne confirme pas le regroupement, sur le facteur 3, de tous les items où les éléments sur lesquels le sujet doit opérer ne sont pas accessibles à la perception. Seuls les items de conservation du volume constituent un pôle nettement distinct des pôles logique et infralogique. A ces âges, la réussite des items difficiles de l'épreuve d'image mentale "plis-trous" apparaît par contre comme corrélée avec celle des items logiques, spécialement avec celle des items de quantification de probabilités (plus discriminants à ces âges, dans le domaine LM, que ceux d'intersection de classes).

2. L'espace support des sujets.

Les résultats qui viennent d'être présentés s'appuient sur une lecture en colonnes du tableau des données, c'est-à-dire sur une analyse du nuage des profils des items sur le support des sujets. Nous nous appuierons maintenant sur une lecture en lignes de ce même tableau, c'est-à-dire sur l'analyse du nuage des profils des sujets sur le support des items. En nous limitant à l'analyse effectuée sur l'ensemble de l'échantillon, nous caractériserons d'abord les patterns de réponse des sujets qui contribuent le plus fortement aux axes 2 et 3. La représentation simultanée des items et des sujets sur l'axe 1 sera ensuite utilisée pour opérationnaliser la notion de décalage individuel.

2.1. Le regroupement des sujets sur l'axe 2 :

Dans l'espace support des items, le 2e axe a été interprété comme un facteur bipolaire logique-infralogique. Le tableau 9 présente les patterns de réussite (1) ou échec (0) des cinq sujets ayant, dans l'espace support des sujets cette fois-ci, les contributions relatives (CTR) les plus fortes à chacun des deux pôles de ce facteur.

En colonne, on trouve les items qui ont une CTR à l'axe 2 supérieure à la moyenne (ils étaient signalés, dans la figure 2, par une flèche dirigée vers l'axe horizontal). Ceux qui correspondent au pôle négatif (LM) figurent dans la partie gauche du tableau et ceux qui correspondent au pôle positif (IL), dans la partie droite. Au sein de chacun des deux pôles, les items sont ordonnés de gauche à droite en fonction croissante de leur coordonnée sur le facteur commun de difficulté (facteur 1) : de IT3 à PR4 au pôle négatif et de SE5 à LI4 au pôle positif. Sous le nom de chaque item figure le nombre de sujets qui le réussissent, sur un total de 154.

En ligne figurent, identifiés par leur sexe (F ou G) et leur âge, les cinq sujets qui contribuent le plus au pôle négatif (LM), puis, en dessous, les cinq sujets qui contribuent le plus au pôle positif (IL). Au sein de chacun des deux groupes, l'ordre des sujets est fonction décroissante de leur CTR au pôle considéré du facteur 2.

La lecture du tableau en ligne montre, par exemple, que le premier sujet du pôle LM, un garçon de 7 ans, réussit quasiment tous les items logiques, du moins difficile (IT3) à un des plus difficiles (PR7), et échoue par contre à tous les items du pôle infralogique. A l'inverse, le premier sujet du pôle IL, une fille de 11 ans, échoue à tous les items logiques, quelle que soit leur position sur l'axe de difficulté, tandis qu'elle réussit des items infralogiques situés assez loin sur cet axe.

Les patterns figurant dans ce tableau donnent une idée de l'ampleur que peuvent prendre ces décalages chez les sujets les plus caractéristiques et montrent qu'ils peuvent être de sens inverse chez des sujets différents. Lorsqu'on considère les patterns de l'ensemble de l'échantillon, et non seulement ceux des cinq sujets les plus caractéristiques de chaque pôle, le contraste

entre les deux types de patterns s'atténue bien entendu au fur et à mesure que décroît la CTR des sujets au facteur. Il reste néanmoins sensible tant que la CTR est supérieure à la moyenne, c'est-à-dire pour une vingtaine de sujets à chaque pôle.

Tableau 9. Patterns de réponse des cinq sujets contribuant le plus à chaque pôle du facteur 2.

| | | | POLE- | | | | POLE+ | | | | | | | | |
|---------------|------|-----|-------|----|----|----|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | I | A | A | P | P | P | P | S | L | D | D | S | L |
| | | | T | I | I | R | R | R | R | E | I | E | E | E | I |
| Items | | | 3 | 4 | 3 | 5 | 3 | 7 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 |
| Réussites (N) | | | 100 | 76 | 68 | 44 | 40 | 18 | 18 | 64 | 45 | 32 | 39 | 24 | 19 |
| Sujets | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Sexe | Age | | | | | | | | | | | | | |
| POLE- | G | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G | 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | G | 9 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | F | 12 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| POLE+ | F | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | G | 12 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | F | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G | 12 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | F | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

Table 9. Response patterns of the five subjects with the greatest contribution to each pole of Factor 2.

2.2. Le regroupement des sujets sur l'axe 3 :

Le tableau 10 présente, selon le même principe, les patterns de réussite-échec des cinq sujets ayant les CTR les plus fortes à chacun des deux pôles du facteur 3.

Tableau 10. Patterns de réponse des cinq sujets contribuant le plus à chaque pôle du facteur 3.

| | | POLE- | | | | | POLE+ | | | | | |
|---------------|---|-------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Items | | TR2 | PL4 | PR7 | TR4 | TR3 | CP1 | IL1 | CV2 | CV1 | IL3 | IL2 |
| Réussites (N) | | 43 | 39 | 18 | 18 | 14 | 66 | 43 | 28 | 15 | 20 | 14 |
| Sujets | | | | | | | | | | | | |
| Sexe | | Age | | | | | | | | | | |
| POLE- | F | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | G | 10 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | F | 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | G | 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| POLE+ | G | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | G | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | G | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| | G | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | F | 11 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Table 10. Response patterns of the five subjects with the greatest contribution to each pole of Factor 3.

3. Représentation simultanée des items et des sujets sur l'axe 1.

La figure 5 représente l'axe 1, limité à son extrémité gauche par la coordonnée correspondant à l'échec à l'item le plus facile (PR1) et, à son extrémité droite, par la coordonnée correspondant à la réussite à l'item le plus difficile (IL2). Le point central figure le barycentre du nuage.

Figure 5. Projection simultanée d'items et d'individus caractéristiques sur le premier axe.

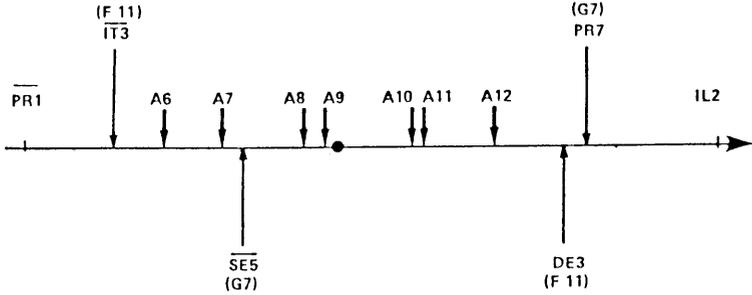


Figure 5. Projection of both items and individuals on the first axis.

Les sept groupes d'âge de 6 à 12 ans (A6 à A12) ont été projetés sur cet axe en "individus supplémentaires" (cf. note 4). Leurs coordonnées sont indiquées par les flèches les plus courtes. Le fait que la progression le long de cet axe soit fonction croissante de l'âge est assez clair. Ceci permet d'interpréter l'axe 1, dans l'espace support des sujets, comme un facteur général de développement. Cette progression n'est cependant pas uniforme : elle marque deux paliers entre 8-9 ans et 10-11 ans. Ce fait pourrait être intéressant s'il devait se confirmer mais, dans l'état actuel de nos connaissances, l'hypothèse d'un biais d'échantillonnage ne peut être exclue⁹.

On a par ailleurs indiqué sur l'axe 1, par des flèches plus longues, les coordonnées des modalités de réponse ($\overline{IT3}$, PR7, $\overline{SE5}$, DE3) permettant de caractériser, à titre d'exemple, les bornes supérieures et inférieures des patterns de développement des deux sujets (G7 et F11) ayant la contribution la plus forte au facteur 2. Les modalités de réponse aux items du pôle LM ($\overline{IT3}$ et PR7) sont indiquées au-dessus de l'axe, et les modalités de réponse aux items du pôle IL ($\overline{SE5}$ et DE3) en-dessous. En se reportant au tableau 9, on peut voir que le sujet G7 réussit tous les items logiques du pôle LM jusqu'à PR7 inclus. Si n'on ne prend en compte que les items de ce pôle, on peut considérer que G7 a atteint, sur l'axe commun de difficulté, le niveau correspondant à la coordonnée PR7 (ce qui est indiqué dans la figure 5, en plaçant G7 entre parenthèses au-dessus de PR7). Mais si l'on ne prend en compte que les items du pôle infralogique, le niveau atteint par G7 sur l'axe de difficulté est caractérisé par la coordonnée de $\overline{SE5}$. A l'inverse, le niveau de difficulté atteint par le sujet F11 peut être caractérisé par la coordonnée de la réussite à DE3 dans le domaine IL et par celle de l'échec à $\overline{IT3}$ dans le domaine LM.

Les informations résumées dans la figure 5 permettent deux types de comparaisons relatives aux sujets. La première est inter-individuelle : G7 est en avance sur F11 dans le domaine LM, tandis que F11 est en avance sur G7 dans le domaine IL. La seconde est intra-individuelle : G7 est plus en avance dans le domaine LM que dans le domaine IL ; F11 est plus en avance dans le domaine IL que dans le domaine LM. Le premier type de comparaison exige seulement que les items, et par contrecoup les sujets, puissent être ordonnés au sein de chacun des deux domaines. Le second exige en outre une échelle de référence commune aux deux domaines, qui est ici fournie par l'existence d'un facteur commun. Seule la métrique commune fournie par cette échelle de référence permet ici de dire que le développement des opérations LM et IL donne lieu à des décalages individuels, c'est-à-dire à des décalages intra-individuels qui peuvent être de sens inverse chez des sujets différents.

DISCUSSION

L'analyse factorielle des réponses données par un échantillon d'enfants de 6 à 12 ans dans une batterie d'épreuves piagétienne fait ressortir à la fois

un facteur commun au développement cognitif dans les différents domaines notionnels explorés, et l'existence d'une variabilité intra-individuelle du niveau de développement en fonction des situations dans lesquelles celui-ci est évalué. La signification de ces deux observations sera d'abord discutée en revenant sur l'interprétation des facteurs issus de l'analyse des correspondances.

Le facteur général de développement.

Dans l'espace support des individus, la relation entre l'âge des sujets et leur position sur le premier axe permet d'interpréter celui-ci comme un facteur général de développement. Dans l'espace support des variables, la relation entre la fréquence de réussite des items et leur position sur cet axe permet de l'interpréter comme un facteur général de difficulté. Il est tentant de le rapprocher du facteur général d'intelligence (G) mis en évidence par les différentialistes dans les analyses factorielles d'épreuves psychométriques. Nous ne disposons pas, dans l'étude présentée ici, de faits empiriques permettant d'étayer ce rapprochement, mais les résultats de travaux ayant inclus des épreuves piagétienne et des épreuves psychométriques dans une même analyse factorielle montrent qu'elles sont saturées par un même facteur général (Carroll et al., 1984 ; Humphreys et Parsons, 1979 ; Humphreys et al., 1985 ; Inman et Secrest, 1981 ; Longeot, 1969). Ce rapprochement n'est toutefois pas de nature à faire progresser beaucoup l'interprétation puisque le facteur G n'a lui-même pas reçu d'explication satisfaisante dans le cadre psychométrique dont il est issu. En faisant le rapprochement en sens inverse, certains auteurs ont par contre proposé une interprétation du facteur G dans le cadre de la théorie opératoire. Les structures d'ensemble piagétienne étant censées entraîner, une fois acquises, une amélioration de la performance dans l'ensemble des domaines notionnels, Reuchlin (1964) a suggéré qu'elles pouvaient fournir une explication psychologique au facteur G des différentialistes. Longeot (1969) a mis cette hypothèse à l'épreuve en soumettant des épreuves piagétienne et des épreuves psychométriques à une même analyse factorielle. Le fait que les épreuves opératoires soient fortement saturées par le facteur général de la batterie de tests psychométriques l'a amené à conclure que le facteur G "se définit par le niveau opératoire global de l'enfant, c'est-à-dire par le stade général de développement qu'il a atteint" (p. 149).

Cette conclusion serait plus convaincante si la variance liée au niveau de difficulté dans les épreuves opératoires elles-mêmes pouvait être imputée aux seules structures opératoires. Tel n'est pas le cas dans les épreuves opératoires utilisées par Longeot (cf. Lautrey, 1985) ; tel n'est pas le cas non plus dans celles que nous avons utilisées. La seule analyse structurale des items PR3 et PR4, par exemple, conduit en principe à les placer à un niveau de difficulté équivalent, puisque les cas favorables et défavorables varient à la fois dans l'un et l'autre. Toutefois, le fait que le rapport de proportionnalité entre les deux tas de jetons à comparer soit de deux dans un item (PR3) et de

trois dans l'autre (PR4), les hiérarchise parfaitement (cf. tableau 1). Ce type de hiérarchie, qui ne peut être expliquée par les structures opératoires piagétienne, contribue tout autant à la définition du premier facteur que la hiérarchie attribuable à des différences structurales et, dans nos données du moins, il est le plus fréquent. Les différences de difficulté imputables à des différences structurales entre les items ne peuvent donc suffire à rendre compte du premier facteur, tout au plus peuvent-elles contribuer à sa définition.

L'impuissance des structures piagétienne à expliquer la plupart des différences de difficulté qui hiérarchisent nos items, nous a conduits à chercher une autre définition structurale de la complexité, à laquelle il a déjà été fait allusion dans l'introduction. La complexité des tâches proposées aux enfants a été évaluée par le nombre et le degré d'articulation de "dimensions de transformation" dont elles exigent en principe la prise en compte simultanée pour être réussies. Toutes les tâches que nous avons utilisées supposent en effet une activité de transformation, réelle ou représentée, de la part du sujet. Chaque "dimension de transformation" renvoie à un des schèmes de transformation qui doivent être mis en oeuvre simultanément pour réussir la tâche. Dans l'épreuve de pliage de lignes, par exemple, une première dimension porte sur la transformation de la relation haut/bas en une relation de superposition *dessous/dessus* (que le pliage introduit entre les deux moitiés de la figure situées respectivement au-dessus et au-dessous du pli). Une seconde dimension de la transformation doit prendre en compte le fait que la rotation de la moitié inférieure de la figure autour du pli *inverse* la position relative de ses éléments lorsqu'ils se déplacent sur la moitié supérieure. Une troisième dimension enfin porte sur l'orientation *gauche/droite*, dont il faut comprendre qu'elle est préservée par le pliage. L'analyse des productions des sujets a permis d'identifier, dans cette épreuve, six niveaux de complexité tenant compte du nombre de dimensions de transformation prises en compte et de la présence ou absence d'articulation entre elles. Les correspondances structurales entre les conduites observées dans les différentes épreuves sont alors cherchées au niveau du nombre de dimensions de transformation que le sujet intègre dans chacune. On pourra trouver une description des conduites des sujets qui s'appuie sur ce cadre conceptuel dans Rieben et al. (1983), et les résultats d'une analyse de la forme des décalages utilisant ces correspondances structurales dans Rieben et al. (1986).

Ce type d'analyse permet de rendre compte de quelques-unes des différences de difficulté que les structures piagétienne ne peuvent expliquer (par exemple entre le premier item de l'épreuve de pliage de lignes et les trois autres, ou entre le dépliement du cylindre et dépliement du cube). Néanmoins, il subsiste des différences entre les niveaux de difficulté des items, qui ne sont pas davantage explicables par notre analyse du nombre de dimensions de transformation qu'elles ne le sont par les structures opératoires. Par exemple, entre les trois derniers items du pliage de lignes, LI2, LI3, et LI4, tous trois censés requérir la mise en oeuvre des trois dimensions énoncées plus haut, et dont les réussites se hiérarchisent pourtant nettement (cf. tableau 7).

Il paraît en fait peu vraisemblable que l'entité mathématique correspondant au facteur G puisse recevoir une explication unique en termes de processus psychologiques ou en termes de propriétés de la tâche. Les aspects d'une situation qui entrent en jeu dans la définition de son niveau de difficulté sont nombreux et peuvent affecter la conduite par des paramètres assez différents, comme l'ont montré de nombreux auteurs (par ex., place en mémoire de travail, capacité de contrôle de sa propre activité, exigence de prérequis, etc.). La covariation de ces différents paramètres avec le temps peut donner lieu à un facteur commun de développement sans que celui-ci puisse pour autant recevoir une explication en termes de processus.

Les facteurs de groupe.

Si des variations imprévisibles du niveau de difficulté des items étaient les seules sources de décalage entre les acquisitions supposées de même niveau structural, leur suppression devrait permettre de retrouver le synchronisme. Cette suppression est difficilement réalisable au plan expérimental, mais l'extraction du premier facteur en fournit un équivalent au plan statistique : elle retire en effet toute la variance liée au niveau de difficulté, quelle qu'en soit l'origine. Le fait que d'autres facteurs systématiques de variation puissent être extraits ensuite montre que cela ne suffit pas à rétablir une corrélation homogène entre les acquisitions. Si on retrouve bien alors, dans le plan des deux facteurs suivants, une forte corrélation entre les items d'un même domaine (par exemple entre les items des différentes épreuves LM ou entre les items des différentes épreuves de conservation), les corrélations entre items de domaines différents sont plus faibles (cf. figure 2). Cette structure des corrélations donne lieu à des facteurs qui, du point de vue notionnel, peuvent être considérés comme des facteurs de groupe¹⁰. La fraction de variance dont rendent compte ces deux facteurs, considérés ensemble, est loin d'être négligeable puisqu'elle est équivalente à celle du facteur général dans les analyses des deux sous-échantillons de 6-9 et de 9-12 ans (rappelons que ce sont les résultats du codage en tableau de Burt qui doivent être considérés de ce point de vue). Elle en représente encore les deux tiers dans l'analyse de l'ensemble de l'échantillon, où la dispersion des âges atteint pourtant six ans (ce qui a bien sûr pour effet de renforcer l'importance du facteur général de développement). Contrairement aux propriétés des situations qui sous-tendent le premier facteur, et ont des effets de même sens sur tous les sujets, celles qui sous-tendent les facteurs de groupe ont des effets différents selon les sujets. Ceci suggère qu'elles sollicitent des processus distincts, dont les rythmes de développement ne sont pas strictement liés.

Le premier des facteurs de groupe a été interprété comme opposant les items LM et IL. Les items IL qui contribuent le plus à ce facteur sont ceux dans lesquels tous les éléments que le sujet doit mettre en relation sont accessibles à la perception. Cette caractéristique, et la nature des transformations

(rotations, rabattements, etc.) que l'enfant doit se représenter dans ces items, laissent penser que l'image mentale visuelle doit y jouer un rôle important. Dans le strict cadre de nos résultats, le pôle IL est donc surtout spatial et plus précisément défini par des tâches sollicitant fortement l'imagerie mentale de transformation, à propos de parties d'objets accessibles à la perception. Si nous conservons néanmoins la dénomination IL, c'est que le rapprochement de nos résultats avec ceux d'autres études laisse penser que sa définition peut être plus large. Dans une des rares analyses factorielles d'épreuves piagétienne où aient été données des épreuves de structuration du temps, un facteur de second ordre sature à la fois les épreuves de raisonnement spatial et de raisonnement temporel, tandis qu'un autre sature les épreuves de classification et de sériation (Inman et Secrest, 1981).

Le second facteur de groupe (facteur 3) est dû à la contribution d'items infralogiques qui ne commencent guère à être réussis que dans le sous-échantillon de 9-12 ans. Dans ce sous-échantillon, ce sont essentiellement les items de conservation du volume qui sont à l'origine d'un pôle factoriel nettement distinct des pôles IL et LM du second facteur. Les items de l'épreuve plis-trous qui, eux aussi, commencent seulement à être réussis dans ce groupe d'âge, se situent par contre près du pôle LM. Ce dernier résultat suggère que la réussite des items d'image mentale dans lesquels les éléments à mettre en relation ne sont pas accessibles à la perception (ni les plis ni les trous ne sont visibles dans cette épreuve) est plus strictement liée à la réussite des items LM que dans le cas contraire.

On pourra trouver ailleurs (Lautrey et al., à paraître), une discussion des convergences avec les résultats d'autres recherches ayant inclus des épreuves piagétienne dans une analyse factorielle (Carroll et al., 1984 ; Hornemann, 1974 ; Humphreys et Parsons, 1979 ; Humphreys et al., 1985 ; Inman et Secrest, 1981 ; Lautrey, 1980 ; Londeix, 1983 ; Longeot, 1969). En dépit de différences importantes dans l'âge des sujets examinés, la nature des épreuves, les techniques de passation, le mode de cotation, et les techniques d'analyse factorielle, la structure des relations est assez stable. On trouve toujours, lorsque l'échantillonnage des épreuves s'y prête, un facteur général et deux grands facteurs de groupe dont les contenus sont compatibles avec la distinction que fait la théorie opératoire entre les domaines LM et IL. Les épreuves de conservation sont saturées de façon intermédiaire par ces deux facteurs ou donnent lieu, lorsqu'elles sont suffisamment nombreuses, à un troisième facteur de groupe.

Décalages individuels et forme du développement.

La variabilité intra-individuelle du niveau de développement opératoire en fonction des situations n'est donc pas assimilable, du moins pas seulement, à un bruit parasite qui ne mettrait pas en question les lois générales du développement cognitif. Il est possible de lui trouver une struc-

ture reposant sur des propriétés stables des situations et des sujets. La structure décrite ci-dessus permet de distinguer deux sortes de propriétés.

Considérées du point de vue des situations, les premières propriétés ont en commun d'avoir le même effet sur tous les sujets et de faire qu'à l'intérieur d'un domaine notionnel, certaines acquisitions ne puissent être faites qu'après certaines autres. Considérées du point de vue des sujets, elles mettent en évidence l'existence de contraintes, qui peuvent être de natures diverses, mais introduisent toutes une chronologie dans l'élaboration des processus de traitement. Les secondes propriétés ont en commun de provoquer des effets différents suivant les sujets et de mettre en évidence la diversité des processus de traitement qui peuvent être mobilisés et les degrés de liberté qui existent entre leurs développements respectifs. Comme le soulignent plusieurs auteurs (cf. par exemple, Fischer et Silvern, 1985 ; Lautrey, 1984 ; de Ribaupierre et Pascual-Leone, 1984), ces deux aspects du développement ont jusqu'ici été étudiés dans des optiques différentes, par des chercheurs différents, et n'ont, la plupart du temps, pas été intégrés dans une conception d'ensemble.

Le rapprochement de ces deux aspects qui, pour se limiter aux travaux francophones, a été amorcé par Reuchlin (1964) et poursuivi par Longeot (1969, 1978), ouvre une perspective d'intégration intéressante. Sa réalisation pratique ne va cependant pas sans poser quelques problèmes méthodologiques, car à l'incompatibilité apparente des cadres conceptuels correspond une relative incompatibilité des méthodologies. Les méthodes corrélationnelles, propres à l'approche différentielle, ne tiennent pas compte des différences de moyenne et sont mal adaptées à faire ressortir le caractère hiérarchique des acquisitions, tandis que les méthodes d'analyse hiérarchique ou de comparaison de moyennes, propres à l'approche génétique, passent les différences individuelles sous silence. L'analyse des correspondances a paru offrir un moyen intéressant de réaliser cette intégration au niveau méthodologique, dans la mesure où, traitant le tableau de données initial plutôt que celui des corrélations, elle permet à la fois la mise en évidence d'un facteur hiérarchique (repérable par l'effet "Guttman") rendant compte du déroulement temporel des acquisitions, et de facteurs rendant compte des autres sources de variabilité.

Dans cette perspective d'intégration, les concepts "d'acquisition régionale" (Reuchlin, 1964) ou de "décalage individuel" (Longeot, 1978) sont la traduction, dans la dynamique du développement, de la notion de facteur de groupe dans le modèle factoriel. Ces concepts mettent l'accent sur une forme de variabilité des conduites dont la source ne peut être localisée ni dans les caractéristiques des sujets ni dans celles des situations, envisagées isolément, mais dans l'interaction entre les unes et les autres : certaines propriétés des situations-problèmes sollicitant plus probablement certains processus de traitement que d'autres, et certains sujets tendant à mobiliser certains processus de traitement préférentiellement à d'autres. Cette forme d'interaction est très comparable, à l'échelle temporelle du développement, aux interactions "aptitude-traitement" qui ont été mises en évidence à l'échelle temporelle de l'apprentissage (cf. Cronbach et Snow, 1977). L'analyse de cette forme de

variabilité offre alors un moyen d'isoler les différents processus de traitement disponibles et d'étudier la nature de leurs interactions au cours du développement.

Ainsi, l'existence d'un décalage individuel entre le niveau de développement atteint dans le domaine LM et celui atteint dans le domaine IL permet-il d'écarter une des deux hypothèses que Piaget avait envisagées à propos des rapports entre les opérations mises en oeuvre dans ces deux domaines :

1) Les opérations infra-logiques seraient issues de l'application des opérations logico-mathématiques au domaine du continu.

2) Les unes et les autres seraient issues d'un même processus de structuration, mais élaborées indépendamment dans les deux domaines.

Dans son introduction aux travaux que le Centre d'Epistémologie avait consacrés à l'espace, Piaget (1964) penchait, sur la base d'arguments théoriques, pour l'hypothèse 2. Les résultats présentés plus haut apportent des arguments empiriques en faveur de cette option. Si l'hypothèse 1 était correcte, le décalage entre les items IL et LM devrait être collectif, et en faveur des items LM. Les sujets qui sont, de façon cohérente, plus en avance dans le domaine IL que dans le domaine LM (cf. tableau 10) l'infirmement. Toutefois, le fait que les résultats infirment la première hypothèse n'implique pas qu'ils confirment la seconde. La relative indépendance entre les deux types d'opérations est tout aussi compatible avec une troisième hypothèse qui ferait reposer leur élaboration sur des processus différents. Nous penchons pour notre part pour cette troisième hypothèse, mais la présente expérience ne suffit pas à la départager de la seconde. Les décalages individuels cohérents entre items d'image mentale et items logico-mathématiques conduisent, pour la même raison, à mettre en question la thèse d'une subordination de l'image mentale de transformation aux structures opératoires (cf. Inhelder et Piaget, 1966), du moins lorsque les éléments sur lesquels le sujet opère sont accessibles à la perception.

Du point de vue de la forme du développement, l'existence de décalages individuels ne permet pas d'assimiler celui-ci à une trajectoire unidimensionnelle. La métaphore de la trajectoire peut être conservée, mais sous réserve qu'elle soit représentée dans un espace multidimensionnel. Le modèle factoriel peut servir de support à une telle représentation, à condition d'y réintroduire - comme nous avons tenté de le faire ici - la variable temporelle. Dans ces conditions, les trajectoires peuvent prendre des formes différentes selon les individus.

Dans les résultats qui viennent d'être présentés, les différentes formes de trajectoires de développement sont inférées de l'étude transversale de sujets d'âges différents, mais nous ne connaissons qu'un point de la trajectoire de chaque sujet. Cette approche ne permet pas de savoir si la forme de développement qui caractérise un individu à un moment donné reste stable, autrement dit si certains paramètres de sa trajectoire restent invariants au cours du temps. Le prolongement longitudinal de cette étude, actuellement en cours, devrait permettre d'apporter des informations sur ce point.

NOTES :

1. L'indice calculé ici est celui que Longeot a mis au point pour analyser les relations d'ordre entre stades ou groupes d'items (cf. Longeot, 1969). Le principe de cet Indice d'Amélioration (IA) sur le hasard est de rapporter les erreurs (inversions d'ordre) observées dans l'échantillon à celles qui seraient attendues si les sujets se répartissaient au hasard sur les différents patterns possibles : $IA = 1 - \text{erreurs observées/erreurs attendues}$. Il varie entre 1 lorsque les patterns de réponse observés sont entièrement cohérents avec une structure d'ordre et 0 lorsqu'ils ont une distribution analogue à celle que pourrait donner le hasard.

2. En fait, les deux items de conservation de l'inégalité (substance et poids) ont le même profil que l'item de conservation de la substance. Les raisons pour lesquelles l'item de conservation de l'inégalité du poids est traité comme un item de conservation de la substance ont été analysées ailleurs (cf. Rieben et al., 1983, p. 81).

3. Cette situation ne doit pas être confondue avec celle où, à partir du même matériel, on demande à l'enfant de trouver la loi reliant le nombre de trous au nombre de pliages. Il s'agit là d'un problème très différent, qui peut être résolu sans recours à la représentation imagée des transformations.

4. Le positionnement de chaque sujet dans l'espace support des variables se fait par l'application de la formule de transition entre les deux espaces (cf. Benzecri, 1980, chap. 8). Elle consiste à projeter chaque sujet au barycentre des items, chaque item étant affecté de la pondération qu'il a dans le profil de ce sujet. Cette formule de projection barycentrique permet également de positionner des éléments "supplémentaires", réels ou fictifs, qui n'ont pas participé à l'analyse. C'est par cette méthode qu'ont été projetés les groupes d'âge représentés dans la figure 5.

5. Lorsque la hiérarchie est parfaite, $F2 = a(F1)^2 + bF1 + c$, où $F1$ et $F2$ désignent respectivement les coordonnées sur les deux premiers facteurs.

6. Dans la terminologie de Piaget, les opérations logico-mathématiques portent sur les relations entre objets discrets, tandis que les opérations infralogiques portent sur les relations entre les parties d'un même objet (par ex. opérations spatiales). Le domaine logico-mathématique est donc celui du discontinu, tandis que le domaine infra-logique est celui du continu (cf. Piaget et Inhelder, 1947). Le classement des épreuves de conservation dans l'un ou l'autre de ces deux domaines peut se discuter (cf. Rieben et al., 1983, p. 67). Cependant, il nous a semblé qu'au regard du critère évoqué ci-dessus, les épreuves de conservation des quantités continues utilisées ici devaient être classées dans le domaine infra-logique. D'une certaine manière, la position intermédiaire de ces items sur l'axe bipolaire logique/infra-logique dans nos résultats confirme empiriquement leur ambiguïté de ce point de vue.

7. La contribution relative (CTR) d'un item à un facteur F est - exprimée en millièmes - la part d'inertie de F dont cet item est responsable. Avec 76 modalités, la CTR moyenne est de $1000/76 = 13,15$ millièmes. Les CTR des items fléchés varient entre 16 millièmes pour la plus faible (CTR de SE2 à l'axe vertical) et 152 millièmes (TR3).

8. Les enfants de 9 ans figurent dans les deux sous-échantillons pour assurer à chacun des effectifs suffisants, et aussi parce que ce découpage permettra des comparaisons longitudinales et transversales dans une phase ultérieure du traitement des données (les enfants qui avaient de 6 à 9 ans lors du premier examen ont de 9 à 12 ans lors du second, effectué trois ans plus tard).

9. Les données longitudinales devraient permettre de trancher ce problème ultérieurement puisque les enfants qui ont 7 ou 8 ans dans cet échantillon, et sont nettement distingués lors du premier examen, auront respectivement 10 et 11 ans lors du deuxième examen, effectué trois ans plus tard.

10. La dénomination de "facteur de groupe" est habituellement employée dans les méthodes d'analyse factorielle utilisant une méthode hiérarchique d'extraction des facteurs. Les facteurs issus de l'analyse des correspondances ne peuvent être considérés comme des facteurs de groupe dans ce sens strict. Néanmoins, dans la mesure où le premier facteur peut être interprété comme un facteur général, le statut des deux facteurs suivants est comparable, du point de vue notionnel, à celui des facteurs de groupe dans une analyse utilisant une méthode hiérarchique d'extraction de facteurs obliques, après que les facteurs des différents ordres ont été orthogonalisés. Dans un cas comme dans l'autre, il ne faut pas perdre de vue que, dans le plan des facteurs de groupe, les corrélations entre les variables (fournies dans la figure 2 par les angles entre les vecteurs) doivent être relativisées pour tenir compte du fait que la variance du facteur général a été retirée. C'est la raison pour laquelle le commentaire de la figure 2 conclut seulement à une corrélation plus faible entre domaines qu'à l'intérieur d'un domaine, alors que la relation d'opposition entre les vecteurs des items IL et LM, par exemple, traduit une corrélation négative dans le plan des facteurs 2 et 3.

REMERCIEMENTS :

La recherche présentée ici fait l'objet d'une collaboration internationale, financée par les crédits du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique (requêtes 1.835-0.78 et 1.440-0.81), et des crédits de tranche C de l'Université de Paris V. Elle a par ailleurs utilisé les ressources habituelles du Laboratoire de Psychologie Différentielle (CNRS, UA 656, Université Paris V, CNAM, EPHE 3e section) et de la Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Education de Genève. Nous tenons à remercier A. Bérubé, O. Husain, M.A. Khandjian, F. Frascarolo-Moutinot, U. Rocha da Silva, D. Speierer, A. Spira-Froté et I. de Warengien pour leur collaboration active lors de la récolte et du dépouillement des données, ainsi que F. Perez-Diaz pour sa participation à leur traitement informatique.

RESUME :

Cent-cinquante quatre enfants de six à douze ans (vingt deux par tranche d'âge) ont passé individuellement une batterie de huit épreuves opératoires. L'utilisation de la méthode d'analyse des correspondances a permis de mettre en évidence la structure multi-dimensionnelle des trente-neuf items de la batterie et de lui faire correspondre la structure des décalages dans les patterns de développement des sujets. Les résultats font ressortir à la fois l'existence d'un facteur général de développement et celle d'une relative indépendance entre les acquisitions du domaine logico-mathématique et celles du domaine infralogique. Ils montrent que les différences individuelles de développement opératoire ne sont pas réductibles à des différences de vitesse dans le déroulement d'un processus qui serait identique pour tous les sujets. Il existe aussi des variations dans la forme même du processus de développement, dont les implications théoriques sont discutées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Benzecri, J.P. (1973). *L'analyse des données* (Vol. 2). Paris: Dunod.
- Benzecri, J.P. (1980). *Pratique de l'analyse des données* (Vol. 1). Paris: Dunod.
- Botson, C., Deliege, M. (1979). Quelques facteurs intervenant dans la progression des raisonnements élémentaires. *Bulletin de Psychologie*, 340, 539-556.
- Bryant, P.E., & Trabasso, T. (1971). Transitive inference and memory in young children. *Nature*, 232, 456-458.
- Carroll, J.B., Kohlberg, L., & De Vries, R. (1984). Psychometric and Piagetian intelligences: Toward resolution of controversy? *Intelligence*, 8, 67-91.

- Cibois, P. (1983). *L'analyse factorielle*. Paris: P.U.F.
- Cronbach, L.J., & Snow, R.E. (1977). *Aptitudes and instructional methods: A handbook for research on interactions*. New York: Irvington.
- Dimitrovsky, L., & Almy, M. (1975). Linkages among concrete operations. *Genetic Psychology Monographs*, 92, 213-229.
- Dodwell, P.C. (1960). Children's understanding and individual differences in cognitive development. *Canadian Journal of Psychology*, 14, 191-205.
- Fischer, K.W., & Silvern, L. (1985). Stages and individual differences in cognitive development. *Annual Review of Psychology*, 36, 613-648.
- Hornemann, J. (1974). Influence du contenu sur la résolution de problèmes logiques. *Enfance*, 1-2, 45-62.
- Humphreys, L.G. (1980). Methinks they do protest too much. *Intelligence*, 4, 179-183.
- Humphreys, L.G., & Parsons, C.K. (1979). Piagetian tasks measure intelligence and intelligence tests assess cognitive development: A reanalysis. *Intelligence*, 3, 369-382.
- Inman, W.C., & Secrest, T. (1981). Piaget's data and Spearman's theory - An empirical reconciliation and its implications for academic achievement. *Intelligence*, 5, 329-344.
- Jamison, W. (1977). Developmental inter-relationships among concrete operational tasks: an investigation of Piaget's stage concept. *Journal of Experimental Child Psychology*, 24, 235-253.
- Laurendeau, M., & Pinard, A. (1968). *Les premières notions spatiales de l'enfant*. Neuchâtel: Delachaux et Niestlé.
- Lautrey, J. (1980). La variabilité intra-individuelle du niveau de développement opératoire et ses implications théoriques. *Bulletin de Psychologie*, 33, 685-697.
- Lautrey, J. (1984). Diversité comportementale et développement cognitif. *Psychologie Française*, 29, 16-22.
- Lautrey, J. (1985). Stades et différences. In J. Bideaud & M. Richelle (Eds.), *Psychologie développementale - problèmes et réalités*. Bruxelles: Mardaga.
- Lautrey, J., de Ribaupierre, A., & Rieben, L. (1981). Le développement opératoire peut-il prendre des formes différentes chez des enfants différents ? *Journal de Psychologie*, 4, 421-443.
- Lautrey, J., de Ribaupierre, A., & Rieben, L. (1984). Quelques problèmes méthodologiques posés par l'analyse de la forme du développement cognitif. In *Psychologie et pédagogie*. Actes des Vèmes journées de psychologie différentielle, n° spécial du Bulletin du G.P.C.O., 13, 53-64.
- Lautrey, J., de Ribaupierre, A., & Rieben, L. (1985). Intra-individual variability in the development of concrete operations - relations between logical and infra-logical operations. *Genetic, Social and General Psychology Monographs*, 111, 167-192.
- Lautrey, J., de Ribaupierre, A., & Rieben, L. (sous presse). Operational development and individual differences. In E. De Corte, J.G.

- Lodewiks, R. Parmentier & P. Span (Eds.), *Learning and Instruction*. Oxford/Leuven: Pergamon Press/Leuven University Press.
- Lautrey, J., de Ribaupierre, A., & Rieben, L. (à paraître). L'intégration des aspects génétiques et différentiels dans l'étude du développement cognitif. In M. Reuchlin et al. (Eds.), *Les différences individuelles dans le fonctionnement cognitif*. Paris: P.U.F.
- Longeot, F. (1969). *Psychologie différentielle et théorie opératoire de l'intelligence*. Paris: Dunod.
- Longeot, F. (1978). *Les stades opératoires de Piaget et les facteurs de l'intelligence*. Grenoble: Presses Universitaires.
- Londeix, H. (1983). Approches génétique et différentielle du développement intellectuel. Thèse de doctorat de 3e cycle. Université de Bordeaux II.
- Piaget, J. (1964). Les travaux de l'année 1960-61 et le VIème symposium du Centre International d'Epistémologie Génétique. In V. Bang, P. Gréco & al. (Eds.), *L'épistémologie de l'espace, Etudes d'Epistémologie Génétique* (vol. 18), Paris: P.U.F., 1-37.
- Piaget, J. (1971). The theory of stages in cognitive development. In D.P. Green, M.P. Ford & G.B. Flamer (Eds.), *Measurement and Piaget*. New York: Mc Graw-Hill.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1941). *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*. Neuchâtel: Delachaux et Niestlé (2e édition, 1962).
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1947). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris: P.U.F.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1951). *La genèse de l'idée de hasard chez l'enfant*. Paris: P.U.F.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1959). *La genèse des structures logiques élémentaires*. Neuchâtel: Delachaux & Niestlé.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *L'image mentale chez l'enfant*. Paris: P.U.F.
- Piaget, J., Inhelder, B., & Szeminska, A. (1948). *La géométrie spontanée de l'enfant*. Paris: P.U.F.
- Reuchlin, M. (1964). L'intelligence : conception génétique opératoire et conception factorielle. *Revue Suisse de Psychologie Pure et Appliquée*, 23, 113-134.
- Reuchlin, M. (1985). Développement et différenciation. In J. Bideaud & M. Richelle (Eds.), *Psychologie développementale - problèmes et réalités*. Bruxelles: Mardaga.
- de Ribaupierre, A., & Pascual-Leone, J. (1984). Pour une intégration des méthodes en psychologie : approches expérimentale, psycho-génétique et différentielle. *L'Année Psychologique*, 84, 227-250.
- de Ribaupierre, A., & Rieben, L. (1985). Etude du fonctionnement opératoire: quelques problèmes méthodologiques. *Bulletin de Psychologie*, 38, 841-852.
- de Ribaupierre, A., Rieben, L., & Lautrey, J. (1985). Horizontal decalages and individual differences in the development of concrete operations. In V. Shulman, L. Restaino-Baumann & L. Butler (Eds.), *The future of Piagetian theory: the neo-Piagetians*. New York: Plenum, 175-200.

- Rieben, L., de Ribaupierre, A., & Lautrey, J. (1983). *Le développement opératoire de l'enfant entre 6 et 12 ans - élaboration d'un instrument d'évaluation*. Paris: Editions du CNRS.
- Rieben, L., de Ribaupierre, A., & Lautrey, J. (1986). Une définition structuraliste des formes du développement cognitif : Un projet chimérique ? *Archives de Psychologie*, 54, 95-121.
- Tuddenham, R.D. (1971). Theoretical regularities and individual idiosyncrasies. In D.P. Green, M.P. Ford & G.B. Flamer (Eds.), *Measurement and Piaget*. New York: Mc Graw-Hill, 175-197.
- Wohlwill, J.P. (1973). *The study of behavioral development*. New York: Academic Press.

Article reçu le 6 janvier 1986

Accepté le 10 juillet 1986