

Chapitre 9

Bases phylogénétiques et ontogénétiques des traitements numériques

9.1. Introduction

Qu'il s'agisse d'évaluer le nombre de prédateurs ou la quantité de nourriture disponible, la capacité de percevoir la numérosité peut s'avérer vitale pour l'animal. Si ce traitement a une valeur adaptative, on peut supposer qu'au cours de l'évolution, un mécanisme d'appréhension de la numérosité a été sélectionné. Dans cette perspective, un tel mécanisme serait partagé par diverses espèces animales et serait aussi présent chez le bébé humain. Un grand nombre de recherches ont visé à en établir l'existence par la démonstration de capacités numériques élémentaires dites « proto-numériques » chez l'animal et le jeune enfant. Dans un premier temps, nous décrirons une série de travaux réalisés chez l'animal. Cette section se clôturera par la description d'un modèle théorique proposé pour rendre compte des compétences numériques observées.

Dans un deuxième temps, nous aborderons les recherches sur la cognition numérique du bébé humain. Nous discuterons alors des diverses interprétations théoriques qui en ont été données, les unes en termes de traitement numérique, les autres en termes de mise en œuvre de capacités cognitives non spécifiques. Dans la dernière partie enfin, nous envisagerons la continuité des traitements numériques au cours du développement par la présentation de quelques études réalisées chez l'enfant d'âge préscolaire.

9.2. Les capacités proto-numériques chez l'animal

Les recherches menées chez l'animal mettent en évidence des capacités à discriminer des numérosités, à comprendre les relations ordinales entre les nombres et enfin, à réaliser des opérations arithmétiques élémentaires.

9.2.1. La discrimination de numérosités

Une grande variété d'espèces animales (rongeurs, singes, oiseaux, etc.) s'est montrée capable de percevoir la numérosité de stimuli présentés simultanément. Ainsi, un raton laveur a appris à choisir parmi plusieurs boîtes contenant un à cinq objets, celle qui en contenait exactement trois alors que la taille, la densité et l'odeur des stimuli étaient contrôlées. Un chimpanzé a pu être entraîné à choisir le chiffre arabe correspondant à la numérosité d'ensembles de un à neuf objets, et un perroquet s'est montré capable de donner « oralement » la numérosité d'un sous-ensemble d'objets appartenant à une même catégorie après avoir appris le nom des différentes catégories d'objets composant l'ensemble total. En outre, ces animaux étaient capables de généraliser leur apprentissage à de nouveaux items sans entraînement supplémentaire.

La discrimination de numérosités a également été étudiée par des tâches de comparaison. Par exemple, des singes écureuils ont pu choisir parmi deux cartes comportant 7 et 8 points, celle qui contenait le moins de points. La densité, la taille et la position des points étaient variées de façon aléatoire de telle sorte que les singes ne puissent baser leur jugement sur ces dimensions.

D'autres travaux ont mis en évidence des capacités à discriminer la numérosité d'ensembles séquentiels. Plusieurs de ces expériences ont utilisé un paradigme de conditionnement dans lequel des rats étaient entraînés à appuyer un nombre cible de fois sur un premier levier pour que de la nourriture soit délivrée après appui sur un deuxième levier. Les rats ont ainsi pu apprendre la tâche pour des nombres cibles allant jusqu'à 24. Si la durée et le nombre covarient dans ce type d'expérience, la réponse des rats semble bien basée sur la numérosité plutôt que sur le temps écoulé. En effet, en état de privation important en nourriture, les rats doublent leur vitesse de pression sur le premier levier sans toutefois augmenter le nombre de pressions. Il est à noter que la précision avec laquelle les animaux discriminent la numérosité, autrement dit l'étendue avec laquelle ils généralisent leur réponse à des numérosités voisines dépend de la taille du nombre cible. Ainsi, le nombre de pressions exercées par l'animal se distribue normalement autour du nombre cible et la déviation standard de la distribution augmente proportionnellement avec celui-ci. En d'autres termes, plus la magnitude du nombre cible est importante moins la discrimination est précise.

Ce type de recherches a également mis en évidence des transferts possibles d'une modalité sensorielle à une autre. Ainsi, après avoir appris à choisir entre deux leviers en fonction du nombre de sons qu'ils entendaient, des rats transfèrent leur apprentissage lorsque les bruits sont remplacés par des flashes lumineux (Fernandez et Church, 1982). Dans une autre expérience, des rats devaient choisir un levier après une séquence de deux sons ou flashes et un autre levier après une séquence de quatre sons ou flashes. Après la présentation d'une séquence combinée de deux sons et de deux flashes, les rats choisissaient le levier correspondant à 4. De même, la réponse des rats à une séquence combinée d'un son et d'un flash consistait à appuyer sur le levier correspondant à la numérosité 2. Ces résultats suggèrent un caractère relativement abstrait des représentations utilisées par l'animal.

9.2.2. La compréhension des relations ordinales

Outre leurs capacités de discrimination numérique, certains animaux démontrent aussi des capacités de traitement des relations ordinales entre les numérosités. Ainsi, des canaris ont pu sélectionner un objet sur base de sa position ordinale. Ils devaient choisir, parmi dix boîtes alignées, la boîte contenant la cinquième aspirine. Ils ne pouvaient se baser sur le rythme puisque le nombre d'aspirines par boîte allait de 0 à 2 et que la distance entre les boîtes variait d'un essai à un autre. Les rats possèdent des capacités similaires. En effet, ils ont pu être entraînés à entrer dans le troisième, le quatrième ou le cinquième tunnel d'un ensemble composé de six tunnels alors que la distance entre ceux-ci variait d'un essai à l'autre. Plus récemment, des macaques rhésus ont appris à sérier quatre images selon le nombre croissant d'items dessinés sur chacune (de un à quatre items de forme, de taille et de couleur aléatoires). Ces singes transféraient immédiatement leur apprentissage lorsqu'ils étaient testés avec des images comportant cinq à neuf dessins. Ils étaient également capables de réaliser une sériation suivant l'ordre décroissant des numérosités. En revanche, un ordre non naturel des numérosités ne pouvait être appris (Brannon et Terrace, 2000). Par ailleurs, l'analyse des réponses correctes révèle des effets de taille et de distance : les performances sont meilleures pour les petites numérosités que pour les grandes, et d'autant plus élevées que la différence entre les nombres représentés est grande. Les macaques peuvent également tenir compte de l'ordinalité des numérosités lorsque celles-ci sont représentées par des chiffres arabes. D'autre part, l'étude d'un chimpanzé a montré que sa capacité à ordonner des chiffres arabes était sous-tendue par des processus de planification, de contrôle et d'exécution comme on le suppose chez l'être humain. En effet, lorsque l'animal devait ordonner trois numéraux compris entre 0 et 9 alors que la position des deuxième et troisième numéraux était échangée immédiatement après la sélection du premier, il commettait plus d'erreurs que pour les essais où cet échange n'a pas lieu, et lorsqu'il répondait correctement au deuxième numéral, il le faisait plus lentement. Ces résultats suggèrent qu'il a déjà établi la séquence complète ainsi que sa programmation motrice avant de pointer le

premier numéral (Biro et Matsuzawa, 1999). De plus, lorsque ce chimpanzé devait ordonner trois numéraux arabes, le temps mis pour répondre au premier numéral était plus court quand celui-ci était proche de 1 (effet de position sérielle) et quand les distances entre les premier et second et entre les deuxième et troisième numéraux étaient plus grandes (effet de distance). Le fait que cet effet de distance affecte le temps de réponse initial confirme que le singe estime l'ordre de la séquence entière avant de répondre. Ces résultats suggèrent que le chimpanzé a formé une représentation linéaire et intégrée des numéraux 1 à 9 par l'apprentissage des différentes séquences possibles de trois numéraux (Tomonaga et Matsuzawa, 2000).

9.2.3. Les capacités arithmétiques élémentaires

Certaines espèces animales peuvent également réaliser des opérations d'addition. Ainsi, des chimpanzés sont parvenus à choisir parmi deux plateaux contenant des morceaux de chocolat celui qui en comportait la plus grande somme. Sur chaque plateau, les morceaux étaient répartis en deux tas : par exemple, 3 et 4 morceaux sur le premier plateau et 5 et 1 morceaux sur l'autre. Toutefois, une opération d'addition était-elle vraiment nécessaire ? En réalité, l'estimation des volumes occupés sur chaque plateau est suffisante pour réussir la tâche. Une interprétation de type perceptif ne permet toutefois pas d'expliquer les résultats suivants. En effet, après avoir appris à associer les numéraux arabes de 0 à 4 avec leurs numérosités respectives, un chimpanzé a pu choisir, sans entraînement supplémentaire, le numéral représentant la somme d'aliments cachés à trois localisations différentes (de 1 à 3 objets par localisation). L'expérience a ensuite été renouvelée en remplaçant les objets par des chiffres. D'autre part, des macaques rhésus ont pu, par exemple, sélectionner parmi deux ensembles de trois chiffres arabes, l'ensemble dont la somme était la plus grande en étant récompensés par le nombre de cacahuètes correspondant (Olthof, Iden et Roberts, 1997). Ces données excluent une interprétation en termes d'estimation perceptive puisque les items à quantifier n'étaient pas présents.

En résumé, ces études montrent que les animaux peuvent déterminer la numérosité d'ensembles indépendamment des propriétés perceptives des items qui les composent, qu'ils soient présentés simultanément ou séquentiellement, en modalité visuelle ou auditive. Ils sont également capables d'ordonner des ensembles en fonction de leur numérosité, de les comparer et de réaliser des opérations arithmétiques. Par ailleurs, la précision des représentations numériques est inversement proportionnelle à la taille de la numérosité comme l'indiquent les effets de taille et de distance. La présence de telles capacités suggère l'existence d'un mécanisme de traitement réellement numérique chez diverses espèces animales.

Dans une première expérience, des rats apprennent à distinguer un signal auditif de 2 secondes composé de 2 sons d'un signal auditif de 8 secondes composé de 8 sons. Ils sont ensuite testés soit avec des séquences dont la durée varie (2 *versus* 8 secondes) et le nombre est maintenu à une valeur constante intermédiaire (4), soit avec des séquences dont le nombre varie (2 *versus* 8) alors que la durée est maintenue constante (4 secondes). Les rats discriminent les nouvelles séquences dans les deux cas suggérant qu'ils traitent spontanément et simultanément la durée et le nombre. Une deuxième recherche démontre que l'administration de métamphétamine affecte de la même manière les processus de perception du nombre et de la durée des stimuli. Enfin, dans une troisième expérience, les rats se montrent capables de transférer les propriétés numériques et temporelles des stimulations auditives à des stimulations cutanées.

Encadré 9.1. *Expériences de Meck et Church sur le traitement de la durée et de la numérosité chez le rat*

9.2.4. Le modèle de l'accumulateur

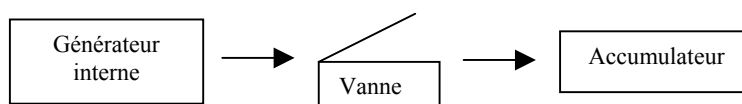
Suite à une série d'expériences (voir encadré 9.1), Meck et Church (1983) ont suggéré qu'un même mécanisme sous-tendait l'estimation de la numérosité et de la durée.

Leur modèle de traitement numérique (déjà décrit dans le paragraphe 5.2.4.4) s'inspire du modèle de mesure des intervalles temporels de Gibbon et représente la numérosité sous forme de magnitude dans un accumulateur (voir encadré 9.2). Ce modèle permet de comparer des numérosités par la mise en mémoire temporaire de la valeur de l'accumulateur et sa comparaison à une autre magnitude. Il permet également d'effectuer des transformations arithmétiques (ajout et retrait) par des processus analogiques opérant sur les numérosités représentées par les magnitudes. Enfin, le modèle postule qu'il y a une variabilité dans la manière dont la numérosité est représentée. Ainsi, l'estimation répétée d'une même numérosité ne débouche pas forcément sur exactement le même état de l'accumulateur. Les magnitudes résultantes sont normalement distribuées autour d'une moyenne qui correspond à la valeur cible. Obéissant à la loi de Weber, cette variabilité s'accroît avec la taille de la numérosité à représenter : plus la numérosité (ou la durée) est grande, plus la variance des représentations autour de la moyenne est importante (variabilité scalaire). Cette variabilité se traduit par les effets de taille et de distance observés chez l'animal. En effet, comme la variance des courbes de distribution autour des valeurs cibles augmente avec la taille des numérosités à représenter, à distance constante, plus la taille des numérosités à comparer augmente, plus les courbes de

distribution tendent à se superposer. Il est dès lors plus difficile de les discriminer. L'effet de distance s'explique quant à lui par le fait que moins les numérosités sont éloignées l'une de l'autre, plus les courbes de distribution se superposent, et donc, moins leur différence est saillante et inversement.

Dans le modèle des intervalles temporels de Gibbon, la durée est représentée mentalement par des magnitudes générées par un accumulateur. Le mécanisme est composé d'un générateur interne qui produit constamment des impulsions. Lorsqu'une séquence temporelle débute, une vanne se ferme permettant aux impulsions d'être transmises à un accumulateur dont le rôle est de sommer les différentes impulsions qui lui parviennent et d'afficher cette somme sous forme de magnitudes. Lorsque la séquence est terminée, la vanne s'ouvre interrompant la transmission des impulsions. La durée de la séquence est ainsi représentée par la magnitude obtenue dans l'accumulateur. Ce mode de fonctionnement a été appelé le mode *run*.

Afin de rendre compte de la discrimination du nombre, un autre mode de fonctionnement, appelé mode *event*, a été introduit. Dans celui-ci, chaque fois qu'une entité est comptée (ou qu'un événement est rencontré), la vanne se ferme pour un temps fixe et bref, et laisse passer de l'énergie dans l'accumulateur. Celui-ci se remplit ainsi d'incrémentations égales, une pour chaque entité comptée. L'ensemble des incrémentations correspond à la magnitude dans l'accumulateur et représente la numérosité. C'est donc la durée de l'impulsion qui détermine s'il s'agit d'un intervalle temporel (mode *run*) ou d'une numérosité (mode *event*).



Encadré 9.2. *Le modèle de l'accumulateur de Meck et Church inspiré du modèle des intervalles temporels de Gibbon*

Si toutes ces données ont amené à considérer que l'animal possédait un mécanisme spécifiquement dédié aux traitements numériques, des études récentes suggèrent que celles-ci doivent être interprétées avec prudence. Ainsi, l'idée que l'animal utilise spontanément le nombre a été remise en question. En effet, s'il est capable de traiter la durée et la numérosité, il ne répondrait sur base du nombre que

lorsque d'autres paramètres comme la durée ne sont pas disponibles. Ainsi, après avoir appris à des rats à appuyer sur le levier gauche en réponse à 2 sons d'une durée totale de 4 secondes ou à 4 sons d'une durée totale de 2 secondes, et sur le levier droit en réponse à 8 sons d'une durée totale de 4 secondes ou à 4 sons d'une durée totale de 8 secondes, ils sont testés avec 2 sons d'une durée totale de 8 secondes ou 8 sons d'une durée totale de 2 secondes. Ces signaux sont ambigus dans la mesure où ils conduisent à une réponse différente (levier gauche ou droit) en fonction de la dimension utilisée, temporelle ou numérique. Les résultats indiquent que les rats répondent essentiellement selon la dimension temporelle (Breukelaar et Dalrymple-Alford, 1998).

Nous voudrions également attirer l'attention sur l'aspect artificiel des études réalisées chez l'animal. En effet, les capacités numériques observées sont le résultat d'un apprentissage intensif sur un petit nombre de sujets en captivité. Elles pourraient dès lors ne pas être présentes spontanément mais être le fruit du conditionnement. Cette possibilité a été envisagée récemment par Hauser, Carey et Hauser (2000). Ces auteurs ont testé deux cents singes rhésus semi-sauvages, non entraînés dans la situation suivante. Les singes regardaient deux expérimentateurs placer des morceaux de pomme dans des boîtes opaques. Ils pouvaient ensuite s'avancer vers l'une des deux boîtes pour en prendre le contenu. Si les singes choisissaient bien la boîte contenant le plus grand nombre de morceaux de pomme pour les comparaisons *1 versus 2*, *2 versus 3*, *3 versus 4* et *3 versus 5*, ils choisissaient au hasard l'une ou l'autre boîte pour les comparaisons *4 versus 5*, *4 versus 6*, *4 versus 8* et *3 versus 8*. Les échecs pour les numérosités supérieures contrastent avec les habiletés numériques démontrées précédemment. Il semble donc que les capacités numériques naturelles des animaux ne sont pas aussi étendues qu'on pouvait le penser.

Dans l'hypothèse où l'animal possède un mécanisme de traitement numérique qui serait le fruit d'un processus évolutif, on peut supposer qu'un mécanisme similaire opère également dans le cerveau du bébé humain. L'observation chez ce dernier de compétences numériques comparables à celles observées chez l'animal apporterait des éléments en faveur d'une telle hypothèse.

9.3. Les capacités proto-numériques chez le bébé

Depuis une vingtaine d'années, des recherches utilisant le paradigme d'habituation ont montré que les bébés étaient capables de discriminer la numérosité de petites collections. Dans ces études, la phase d'habituation consiste à présenter répétitivement au bébé des ensembles contenant n éléments jusqu'à observer une diminution de son intérêt (mesuré par le temps de fixation du regard ou le taux de succion). Ensuite, l'expérimentateur introduit des collections dont le nombre

d'éléments ($n \pm a$) diffère des ensembles d'habituation. L'observation d'un regain d'intérêt pour ces nouvelles collections est interprétée comme le signe d'une perception par le bébé, du changement de numérosité. De cette façon, Starkey et Cooper (1980) ont montré que des bébés de 4 à 7 mois sont capables de distinguer des collections linéaires de 2 points de collections linéaires de 3 points mais échouent lorsqu'on leur présente des collections de 4 *versus* 6 points. La longueur et la densité des stimuli étaient contrôlées¹ de telle façon que ces variables perceptives ne permettent pas de rendre compte du regain d'intérêt (voir figure 9.1).

Cette expérience a été répliquée avec des résultats similaires chez des nouveau-nés, âgés de 21 à 144 heures. Chez l'adulte, il a été proposé que les petites numérosités étaient identifiées de manière précise et instantanée (phénomène de *subitizing*) par la reconnaissance de patrons perceptifs canoniques (1 forme un point, 2 une droite, 3 un triangle et 4 un quadrilatère ; voir paragraphe 5.2.4.1). Cependant, dans l'expérience de Starkey et Cooper, l'utilisation de configurations linéaires permet d'exclure cette hypothèse puisque dans ce cas, 2 points et 3 points alignés forment une droite et ne pourraient donc pas être discriminés. Une conclusion similaire peut être tirée d'une étude longitudinale qui teste la discrimination numérique chez des bébés de 5, 8 et 13 mois en utilisant des collections de rectangles en mouvement continu. Ces rectangles forment occasionnellement des occlusions partielles et transitoires, et ont des trajectoires indépendantes empêchant ainsi la perception de configurations dynamiques. Les bébés de 5 mois discriminent 2 *versus* 3 et 3 *versus* 4 rectangles, et à 8 mois, ils sont également capables de discriminer 4 *versus* 5 rectangles (les résultats à 13 mois sont inconsistants probablement en raison de l'utilisation du paradigme d'habituation qui n'est plus appropriée à cet âge). Les bébés pourraient donc abstraire la numérosité de petits ensembles d'objets en mouvement. Cette discrimination numérique ne serait dès lors pas soutenue par la reconnaissance d'une configuration spatiale particulière, mais refléterait bien le traitement d'unités distinctes.

	2/3	3/2	4/6	6/4
H1	• •	• • •	• • • •	• • • • • •
H2	• •	• • •	• • • •	• • • • • •
T	• • •	• •	• • • • • •	• • • •

Figure 9.1. Exemples de stimuli d'habituation (H1 et H2) et de test (T) utilisés par Starkey et Cooper (1980)

1. Les collections utilisées lors de la phase d'habituation varient en longueur et densité, et les stimuli post-habituation ont la longueur de l'un des patterns d'habituation et la densité de l'autre pattern d'habituation.

Ceci est également attesté par la capacité des bébés à discriminer des collections de stimuli visuels présentés séquentiellement. Cette capacité a été démontrée chez des bébés de 5 mois à l'aide d'un paradigme d'anticipation visuelle (Canfield et Smith, 1996). Les expérimentateurs projetaient de manière séquentielle un certain nombre d'images (2, 3 ou 4) à gauche du centre visuel. Ensuite, ils leur montraient une image à droite du centre visuel. Dans la condition régulière, l'image de droite était toujours proposée après qu'un même nombre d'images soit apparu à gauche. Dans la condition irrégulière, le nombre d'images présentées à gauche avant projection de l'image de droite était variable. Seuls les bébés de la condition régulière anticipaient l'apparition de l'image de droite (mouvement oculaire vers la droite) indiquant qu'ils avaient détecté le nombre d'images présentées à gauche. L'attente du bébé serait bien basée sur l'information numérique de la séquence étant donné que le rythme et la durée de présentation des images variaient à chaque essai de façon à ne pas constituer une information pertinente. La perception de la numérosité de stimuli séquentiels semble donc être une compétence précoce.

La perception de stimuli séquentiels s'appliquerait également à des actions et à la modalité auditive. En effet, des bébés de 6 mois ont pu discriminer des séries de 3 sauts de poupées de séries de 2 sauts et des enfants de 4 jours ont été capables de discriminer des mots de 2 *versus* 3 syllabes, la durée des stimuli étant contrôlée.

Par ailleurs, les représentations de la numérosité des collections ne seraient pas liées à la modalité de présentation des stimuli, puisque les bébés sont capables de comparer des collections de stimuli visuels avec des stimuli auditifs. Ainsi, des bébés de 6 à 8 mois ont pu détecter la correspondance numérique entre des ensembles d'entités présentées en modalité auditive et visuelle (Starkey, Spelke et Gelman, 1990). En effet, face à des ensembles de 2 et 3 objets hétérogènes, les bébés fixent plus longtemps les collections qui correspondent au nombre exact de sons entendus et ce, même lorsque les sons ne sont pas présentés simultanément aux objets. Cependant, deux études rapportent des résultats inverses puisque leurs bébés fixent plus longtemps l'ensemble d'objets dont le nombre ne correspond pas à celui des sons entendus. Ainsi, sans réellement mettre en cause l'idée d'une sensibilité numérique intermodale, cette contradiction pose toutefois la question de l'influence d'aspects non maîtrisés de la procédure expérimentale dans les résultats obtenus.

D'autres travaux se sont intéressés à la compréhension des relations quantitatives. La détection des relations numériques entre des ensembles (*plus que* versus *moins que* versus *équivalence*) a été examinée chez des bébés âgés de 6 à 16 mois à l'aide d'une procédure d'habituation (Cooper, 1984). Le bébé était habitué à des paires d'ensembles qui partageaient toujours le même type de relation quantitative. Par exemple, pour la relation *moins que*, le premier ensemble de la paire comportait toujours moins d'éléments que le suivant (3 – 4, 2 – 4, 1 – 2). Dans la phase-test, on lui présentait des paires de stimuli engagés dans l'une des deux autres relations

quantitatives. A 6-7 mois, les enfants ne montrent pas de forme de déshabitude consistante. Les enfants de 10-12 mois détectent les changements d'une relation d'inégalité à une relation d'équivalence et inversement. Par contre, ils ne réagissent pas lors du changement d'une relation d'inégalité à une autre. Quant aux enfants de 14-16 mois, ils réagissent aux deux types de changements. La compréhension des relations quantitatives ne serait donc pas inhérente à la structure des représentations numériques de l'enfant, mais découlerait de ses interactions avec l'environnement, en particulier lorsqu'il voit ce qui se produit lorsque l'on ajoute ou retire un objet d'un ensemble.

Enfin, ces représentations permettraient également de réaliser des petites opérations arithmétiques de manière précise. Des travaux utilisant le paradigme de violation des attentes (soit, le fait que les bébés ont tendance à regarder plus longtemps des événements inattendus) suggèrent en effet que les bébés sont capables d'anticiper le résultat d'opérations additives et soustractives. Dans l'expérience de Wynn (1992), des bébés de 5 mois sont placés devant un petit théâtre (voir figure 9.2). L'expérimentateur dépose un Mickey sur la scène (1) et l'écran est relevé, cachant le Mickey (2). L'expérimentateur rajoute alors de manière visible un deuxième Mickey derrière l'écran (condition d'addition $1 + 1$) (3). L'écran est ensuite abaissé et le bébé voit soit deux Mickey (événement possible : $1 + 1 = 2$) (4a), soit un Mickey (événement impossible : $1 + 1 = 1$) (4b). On note alors que les bébés fixent plus longtemps l'événement impossible que l'événement possible.

Des résultats similaires sont observés dans la condition de soustraction $2 - 1$. Dans ce cas, deux Mickey sont initialement sur scène. L'écran se relève et l'expérimentateur retire un Mickey. L'écran est alors abaissé révélant un (événement possible : $2 - 1 = 1$) ou deux Mickey (événement impossible : $2 - 1 = 2$). A nouveau, les bébés fixent plus longtemps l'événement impossible. Afin de s'assurer que les bébés ne sont pas simplement surpris par l'absence de changement suite à une transformation (d'ajout ou de retrait), Wynn réalise une expérience complémentaire dans laquelle les événements possible et impossible sont tous deux numériquement différents de la situation de départ : $1 + 1 = 2$ ou 3. Les résultats obtenus confirment les précédents et indiquent que le bébé ne s'attend pas uniquement à une modification du nombre après une transformation ($1 + 1 \neq 1$) mais qu'il a une attente précise concernant le résultat final ($1 + 1 = 2$ et non 3). Ces résultats ont été répliqués avec deux personnages d'identité physique différente et avec des objets placés sur un tourne-disque à faible vitesse de façon à ce que les bébés ne puissent se créer une image statique de la situation. Cette dernière expérience permet d'exclure l'idée que les résultats de Wynn sont liés à la violation des attentes développées par les bébés quant à la localisation des objets plutôt qu'à des attentes de nature numérique.

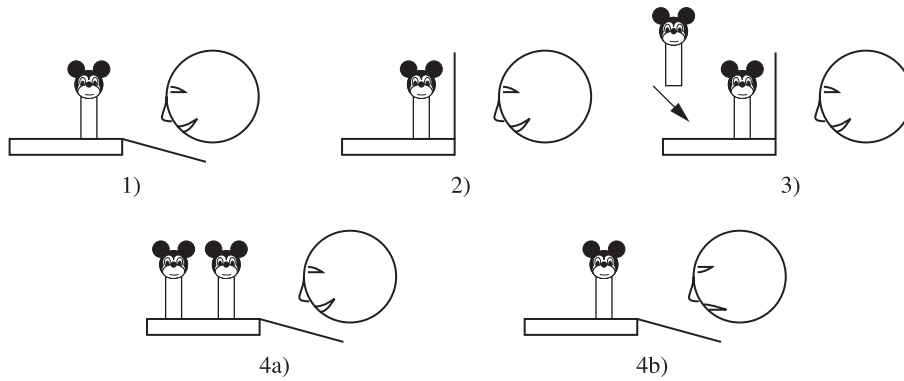


Figure 9.2. Procédure utilisée par Wynn (d'après Wynn, 1992)

Notons cependant que ces situations d'arithmétique simple se sont avérées sensibles à des facteurs mnésiques et plus précisément au nombre de mises à jour des représentations mentales élaborées par l'enfant. En effet, dans une situation d'addition $1 + 1$, des bébés de 8 mois manifestent la réaction de surprise attendue face au résultat impossible ($1 + 1 = 1$) lorsque le premier objet est placé sur la scène avant la levée de l'écran (condition « objet d'abord »), mais pas lorsque l'écran est posé avant la présentation du premier objet (condition « écran d'abord » ; Uller, Carey, Huntley-Fenner et Klatt, 1999). Cette différence de performance serait liée à la fragilisation de la représentation mentale dans la condition « écran d'abord » en raison du plus grand nombre de mises à jour qui lui est imposée (la condition « écran d'abord » en nécessite deux alors que la condition « objet d'abord » n'en demande qu'une). D'autres données selon lesquelles le bébé réagit au résultat impossible $2 + 1 = 2$ mais pas au résultat impossible $1 + 1 + 1 = 2$ (1 *versus* 2 mises à jour) vont également dans ce sens.

En résumé, les bébés sont capables très précocement de discriminer des collections de stimuli visuels présentés simultanément ou séquentiellement. Cette discrimination peut également s'opérer sur du matériel sonore et une comparaison des représentations mentales créées au travers d'inputs provenant de modalités sensorielles différentes est possible. Les bébés semblent également sensibles aux erreurs d'opération arithmétique.

A l'heure actuelle, deux types d'hypothèses sont proposées pour rendre compte de ces compétences. Le courant majoritaire représenté par Gallistel et Gelman (1992) et Dehaene et Changeux (1993) défend l'idée que des représentations réellement numériques sont mises à l'œuvre chez l'enfant. Ces représentations reposeraient sur un mécanisme numérique analogique et approximatif semblable à celui que posséderait l'animal, soutenant ainsi l'idée d'un ancrage phylogénétique

des connaissances humaines. Simon (1997) en revanche, pense que des processus cognitifs généraux non numériques peuvent rendre compte des observations.

9.3.1. Modélisations proposées dans le cadre de l'hypothèse numérique

9.3.1.1. Le modèle de l'accumulateur de Meck et Church

Gallistel et Gelman (1992) considèrent le modèle de l'accumulateur de Meck et Church (1983) qui décrit l'estimation numérique et temporelle chez l'animal, et affirment qu'il permet de rendre compte des habilités numériques observées chez le bébé humain. En effet, d'une part, il s'agit d'un mécanisme qui détermine un nombre discret d'entités individuelles dont l'information perceptive (configuration, contour, taille, volume, densité) n'est pas prise en compte. D'autre part, rien dans la structure de l'accumulateur ne restreint le type d'items qui peuvent être comptés (objets, sons, actions). Enfin, il permet de rendre compte de la capacité à effectuer des opérations arithmétiques et des comparaisons de numérosités. Selon les auteurs, le système linguistique n'aurait plus qu'à se greffer sur ce mécanisme pour en découpler l'étendue spatio-temporelle. En effet, la connaissance conceptuelle nécessaire à l'apprentissage du système numérique verbal serait contenue dans le système préverbal puisque ce dernier repose sur les mêmes principes que le comptage verbal. Ainsi, le principe de correspondance terme à terme précise que le comptage verbal demande un ajustement entre l'émission verbale et le pointage spatial de l'objet. Parallèlement, l'appariement des états de l'accumulateur avec les items comptés se réalise terme à terme puisqu'une impulsion passe dans l'accumulateur pour chaque item énuméré. Le dénombrement correct requiert également que les noms de nombre soient émis suivant un ordre stable et conventionnel. De la même manière, dans l'accumulateur, les magnitudes suivent un ordre stable et isomorphe à celui des nombres. Enfin, le dénombrement correct est régi par le principe de cardinalité qui postule que le dernier mot émis correspond au cardinal de l'ensemble. De même, l'état final de l'accumulateur est utilisé pour représenter la numérosité d'un ensemble. Les principes d'abstraction et de non-pertinence de l'ordre sont également compatibles avec le modèle de l'accumulateur dans la mesure où la nature des stimuli n'est pas prise en compte et où l'ordre dans lequel les stimuli sont énumérés n'affecte pas l'état final de l'accumulateur.

Ainsi, il reste à l'enfant qui apprend à compter verbalement à établir une analogie entre les relations de magnitude de ses représentations numériques et les relations positionnelles des noms de nombres. Il apprend alors les correspondances bidirectionnelles entre les magnitudes préverbales et les noms de nombres. Cette correspondance permet de connaître la signification cardinale des noms de nombre. Gallistel et Gelman ajoutent que l'appariement entre les magnitudes préverbales et les noms de nombre est influencé par le temps qui lui est alloué : plus celui-ci est important, plus la variabilité diminue. Rappelons en outre, que le modèle de

l'accumulateur possède une variabilité intrinsèque qui serait responsable des effets de taille et de distance chez l'animal et qui permet de rendre compte de la limite de la discrimination précise des bébés aux petites numérosités.

9.3.1.2. *Le modèle neuronal de Dehaene et Changeux*

Pour Dehaene et Changeux (1993), les capacités proto-numériques partagées par les bébés humains et les animaux sont déterminées biologiquement et reposeraient sur un circuit cérébral localisé dans le cortex pariétal inférieur. C'est ce même circuit qui serait à la base des performances d'adultes humains dans les tâches de comparaison numérique et d'estimation de numérosité. Dehaene et Changeux en ont décrit une modélisation neuronale pour la modalité visuelle² (voir paragraphe 5.2.4.3). Ce modèle comporte quatre modules distincts.

Le premier module correspond à une carte rétinienne dont les neurones codent la stimulation visuelle provoquée par la vue d'objets. La taille des objets est codée par le nombre de neurones activés et leur localisation par la répartition des activations.

Le deuxième module est constitué par une carte topographique qui conserve l'information sur la localisation des objets mais normalise leur taille : les objets de différentes tailles y étant représentés par l'activation d'un même nombre de neurones. Ensuite, l'activité totale issue de la carte topographique est sommée par l'intermédiaire de groupes de neurones de sommation constituant le troisième module. Comme l'activité issue de la carte topographique est hautement corrélée avec la numérosité en raison de la normalisation, l'activation de ces groupes de neurones reflète également la numérosité. Le dernier module, constitué de détecteurs de numérosité, permet de mettre en correspondance l'activation des neurones de sommation avec une numérosité donnée. L'existence neuronale de tels détecteurs de numérosité aurait été rapportée dans le cortex associatif des chats.

Ce modèle rend compte des effets de taille et de distance par la variabilité intrinsèque du système de détection de numérosité. Les activations évoquées par les différentes numérosités en entrée peuvent se recouvrir impliquant que le même détecteur de numérosité peut être occasionnellement activé quand par exemple *quatre* ou *cinq* objets sont présentés. Ce recouvrement diminue lorsque les numérosités sont plus distantes (effet de distance). De plus, pour une même distance numérique, le recouvrement augmente avec la numérosité (effet de taille). Cette propriété est analogue à ce que la loi Weber prédit et provient du fait que la numérosité est estimée comme une somme d'activations approximativement constantes associées à chaque objet en entrée : plus grand est le nombre de termes dans la somme, plus grande est la variance du résultat. Ainsi, bien que le système de

2. Bien que moins détaillé, un modèle analogue a été conceptualisé pour la modalité auditive.

détection de numérosité ne soit pas limité aux petits nombres, il y a une limite au-dessus de laquelle deux numérosités consécutives ne peuvent être discriminées.

D'un point de vue développemental, Dehaene et Changeux soulignent deux étapes importantes : un stade initial où seules les habiletés de détection numérique sont présentes, et une deuxième étape supposée apparaître à la fin de la première année où les enfants deviennent capables de comparer des numérosités et de comprendre les relations quantitatives entre les ensembles. Pour rendre compte de ces habiletés de comparaison numérique, les auteurs introduisent deux modules supplémentaires : une mémoire qui permet de maintenir active la représentation d'une numérosité pendant qu'une autre est traitée et un module d'appariement terme à terme qui vérifie les points de similarité entre les représentations présente et passée.

Ces deux modules, en connexion avec une boucle d'auto-évaluation, permettent un processus d'apprentissage dans lequel le système devient progressivement capable de comprendre comment les variations de numérosités sont reliées aux actions d'ajouter ou de soustraire. Si, pour les auteurs, le système de détection de numérosité constitue bien la première couche du système arithmétique adulte, ils ne précisent pas les étapes ultérieures du développement et notamment celles de l'apprentissage du comptage verbal.

Tout comme Gallistel et Gelman, Dehaene et Changeux font l'hypothèse d'un mécanisme numérique inné dont la variabilité intrinsèque permet de rendre compte des effets de taille et de distance et donc de la limitation de la discrimination des bébés. Un parallèle peut également être établi entre l'étape de normalisation du modèle neuronal et le mode *event* de l'accumulateur dans la mesure où ils traduisent chacun un processus de normalisation qui consiste à segmenter l'expérience perceptive en items qui sont énumérés sans plus tenir compte de leurs attributs sensoriels (taille, couleur, etc.).

Notons toutefois que pour la modalité visuelle, Dehaene et Changeux proposent un processus fonctionnant en parallèle alors que l'accumulateur opère de manière séquentielle. Enfin, alors que dans le modèle de l'accumulateur, la compréhension des relations quantitatives est innée car celles-ci sont intrinsèquement liées à la structure des représentations numériques, dans le modèle neuronal, elle fera l'objet d'un apprentissage au cours de la première année de vie. Par ailleurs, certaines faiblesses existent dans ces deux modèles. Notamment, s'ils envisagent la possibilité de traiter la numérosité des stimuli auditifs ou des stimuli événementiels (actions), ils n'en précisent pas les mécanismes. En outre, ils ne spécifient pas la manière dont les items à énumérer sont sélectionnés, ou encore, celle dont les différentes modalités sensorielles interagissent.

9.3.2. Les hypothèses non numériques

9.3.2.1. Le subitizing

La limite des capacités de discrimination du bébé à 3 ou 4 éléments rappelle le phénomène de *subitizing*³ observé chez les adultes. Selon Trick et Pylyshyn (1994), le subitizing exploiterait un mécanisme d'individuation préattentif, parallèle et à capacité limitée, décrit dans le cadre d'une théorie plus générale de la vision, permettant de conserver la trace de cibles par leur indexation au moyen de marqueurs mentaux (FINST pour *Fingers of Instantiation*, voir paragraphe 5.2.4.2). Ces marqueurs véhiculent l'information concernant la localisation spatiale des objets sans aucune information concernant les caractéristiques perceptives ou l'identité des objets⁴.

Ces FINST sont attribués en parallèle et limités en nombre (environ 4). Ainsi, pour des petites numérosités, chaque élément peut être marqué par un FINST. Le subitizing consiste à apparier le nombre de FINST utilisés avec le nom de nombre qui lui correspond.

Pour Simon (1997), un ensemble minimal de compétences, parmi lesquelles des capacités d'individuation selon ce mécanisme FINST, suffisent pour rendre compte des comportements observés chez les bébés. Il ne serait donc pas nécessaire de postuler l'existence d'un mécanisme inné de détection de la numérosité. A titre d'exemple, l'auteur illustre sa proposition par la situation d'addition $1 + 1$ utilisée par Wynn (voir figure 9.3). A la vue du premier Mickey, les bébés créent un marqueur d'individuation spatiale (FINST) (1). Cette représentation mentale abstraite de l'objet est mémorisée par le bébé de manière à persister même lorsque l'objet est caché derrière l'écran (2). L'ajout visible d'un deuxième Mickey débouche sur la formation d'une seconde représentation mentale (3). A la levée de l'écran, le bébé apparie les traces mentales mémorisées de chaque entité avec les objets visibles par un mécanisme de correspondance terme à terme (4a et 4b), et il est surpris quand le nombre de traces ne correspond pas au nombre d'objets (4b). Cette surprise est liée à la violation de ses attentes quant à la permanence de l'objet : un même objet ne peut occuper plusieurs positions disjointes, deux objets différents ne peuvent occuper une même position et un objet physique ne peut disparaître et apparaître soudainement sans trajectoire spatio-temporelle continue.

3. Le *subitizing* décrit l'appréhension quasi immédiate des petites numérosités (jusque 3, 4) par opposition au processus sériel de comptage nécessaire pour l'appréhension exacte des numérosités supérieures (voir paragraphe 5.2.4).

4. Les détails de l'objet seront perçus lors de l'intervention ultérieure de processus attentionnels.

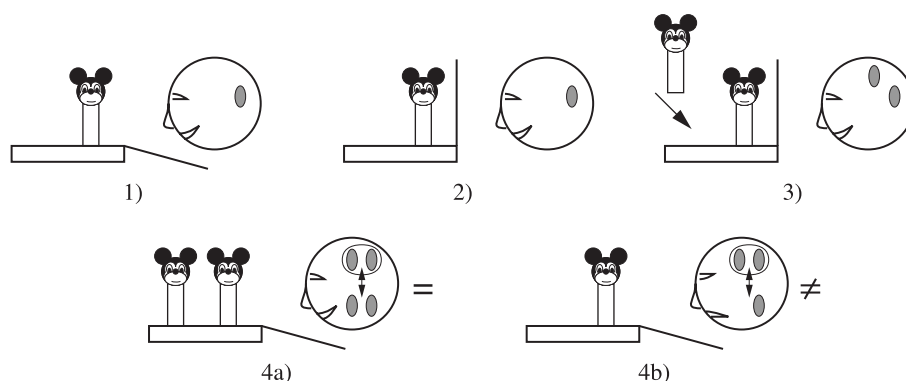


Figure 9.3. *Etapes du processus de correspondance terme à terme (d'après Simon 1997)*

En d'autres termes, les capacités arithmétiques des bébés pourraient s'expliquer par des compétences d'individuation spatiale, d'encodage de représentation abstraite, de raisonnement physique, de mémorisation et de comparaison terme à terme. Or, ces compétences sont le résultat de traitements généraux de l'information qui ne sont pas spécifiques au traitement des nombres. Ces compétences permettent de réussir n'importe quelle tâche de discrimination de petites numérosités (jusqu'à environ 4) sans pour autant impliquer que les bébés apprécient la relation quantitative entre les deux collections. Selon Simon, c'est à partir de cette capacité à effectuer des jugements même/différent basés sur l'existence de l'objet que les jeunes enfants élaborent un système de connaissances conceptuelles leur permettant d'apprécier la signification des quantités et des relations qu'il y a entre elles. Conjointement, l'acquisition et la maîtrise de procédures de dénombrement permettront de former des représentations quantitatives au-delà du rang des processus perceptifs.

Bien qu'attrayante, l'hypothèse de Simon ne prédit que de manière *post-hoc* les observations de Wynn et n'est pas compatible avec des observations récentes de discrimination de larges collections. En effet, si la discrimination numérique entre des petits ensembles d'objets reflète l'opération d'un processus de maintien de la trace de l'objet visible et que donc les enfants représentent les traces des entités et non la valeur cardinale des ensembles, ils ne devraient pas pouvoir discriminer des ensembles dont la numérosité excède la capacité de ce processus, limitée à 3-4 objets. Or, la possibilité de discriminer des grandes numérosités a été récemment mise en évidence.

Des bébés ont été habitués à des ensembles constitués de deux groupes de trois éléments. Ils ont ensuite été testés avec des ensembles de 8 éléments : soit 2 groupes

de 4 éléments, soit 4 groupes de 2 éléments. Les résultats indiquent que les bébés réagissent à la présentation de 4 groupes de 2 éléments mais pas à deux groupes de 4 éléments indiquant qu'ils discriminent les ensembles de 2 *versus* 4 groupes. Or, dans ces conditions, des mécanismes de représentation d'objets ne peuvent opérer en raison du nombre trop élevé d'éléments individuels, à moins de considérer que les FINST sont attribués à chaque groupe plutôt qu'à chaque objet individuel. Dans ce cas, il resterait à définir les modalités d'attribution des FINST qui tantôt sont associées à des éléments, et tantôt à des groupes.

Des résultats plus nets encore montrent que des bébés de 6 mois sont capables de discriminer des grandes numérosités pour autant qu'elles entretiennent un rapport de 1 pour 2. Ainsi, après une phase d'habituation à 8 éléments, ils discriminent 16 éléments mais pas 12 éléments (Xu et Spelke, 2000).

Comme la discrimination des grands nombres n'est possible que s'il y a une grande différence entre les ensembles, elle dépendrait d'un mécanisme approximatif de représentation de la numérosité tel que décrit par Meck et Church, et Dehaene et Changeux. Cependant, on peut imaginer que les deux mécanismes coexistent. Ainsi, face à des petits ensembles d'objets, les bébés essaieraient de garder la trace de chaque entité par un mécanisme préattentionnel basé sur l'objet (FINST). En revanche, face à un grand nombre d'objets, les mécanismes de maintien de la trace des objets seraient dépassés et les bébés porteraient leur attention non plus sur les objets individuels mais sur la collection. Un mécanisme approximatif de représentation de la numérosité serait alors utilisé. L'existence conjointe de ces deux types de mécanismes pourrait rendre compte du fait que les bébés peuvent discriminer 2 points de 3 points mais pas 4 de 6 contrairement à ce qui est attendu selon la loi de Weber, puisque les deux paires de stimuli entretiennent un même rapport de deux tiers.

9.3.2.2. *L'influence des variables perceptives*

Dans la lignée d'une interprétation non numérique des résultats obtenus chez le bébé se pose la question de l'influence des variables perceptives. En effet, la numérosité varie naturellement avec plusieurs dimensions perceptives comme la brillance, la densité, l'aire de l'ensemble, la longueur du contour ou encore la surface occupée par les items. Il est donc nécessaire de s'assurer que, dans les expériences de discrimination numérique, les bébés ne réagissent pas à des changements liés à ces variables continues plutôt qu'au nombre d'éléments. Une manière de répondre à cette préoccupation est de maximiser les variations possibles au cours de la phase d'habituation de telle sorte que la numérosité en soit la seule propriété invariante. Cette méthode a été utilisée notamment dans l'étude suivante où l'on présentait à des bébés de 10 à 12 mois des ensembles constitués d'objets familiers qui différaient en couleur, identité et forme d'une collection à l'autre et dont la taille et la position variaient de façon aléatoire à chaque essai. Par exemple,

au cours de la phase d'habituation, les bébés voyaient 2 *grands chiens bruns*, 2 *petites maisons rouges*, 2 *papillons bleus de taille moyenne*, et étaient testés avec des ensembles de 3 *perroquets verts* et de 2 *drapeaux mauves*. Les résultats confirment ceux obtenus précédemment et montrent que les bébés peuvent discriminer des collections de 2 *versus* 3 objets mais pas de 4 *versus* 5.⁵

Un autre type de contrôle consiste à équilibrer les variables perceptives en fonction de la valeur moyenne de ces variables sur les ensembles d'habituation comme c'est le cas dans l'étude de Xu et Spelke (2000). Dans un premier temps, les bébés sont habitués à des collections de 8 ou 16 points dont la taille et la position varient. Les moyennes de la surface totale occupée par les points, de la brillance et de la longueur du contour sur l'ensemble des essais d'habituation sont identiques pour les deux numérosités. Les bébés sont ensuite testés avec des ensembles de 8 et 16 points présentés en alternance. Durant cette phase test, la surface totale, la brillance et la longueur du contour, qui sont deux fois plus importantes pour les ensembles de 16 points que pour ceux de 8, sont équidistantes par rapport à celles des ensembles d'habituation. Par contre, la taille des éléments et leur densité sont égalisées pour les deux numérosités. Avec un tel contrôle, des bébés de 6 mois ont pu discriminer des ensembles de 8 *versus* 16 points mais pas de 8 *versus* 12.

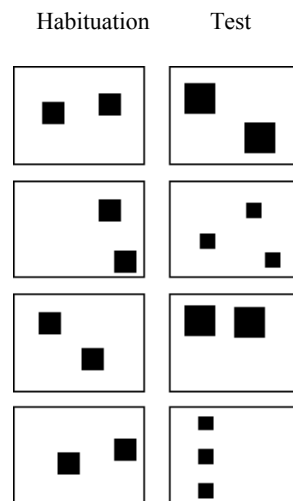


Figure 9.4. Exemple de stimuli d'habituation et de test utilisés par Clearfield et Mix (1999)

5. De façon inexplicable, la discrimination de 3 *versus* 4 n'est réussie que par les garçons alors que dans une autre condition où tous les stimuli sont identiques, elle n'est réussie que par les filles.

Si ces manipulations rendent difficile la discrimination sur base de variables continues, elles ne permettent pas d'en examiner les effets. C'est précisément dans cette optique que certains auteurs adoptent une méthodologie différente. Ainsi, Clearfield et Mix (1999) font varier systématiquement le nombre et la longueur du contour (somme totale des périmètres des objets dans l'ensemble). Ils habituent des bébés de 6 à 8 mois à des collections de deux ou trois carrés et les testent ensuite avec des collections qui varient soit en nombre (longueur de contour identique par rapport aux essais d'habituation) soit au niveau de la longueur de contour (nombre identique ; voir figure 9.4). Ils observent que seul un changement de longueur de contour donne lieu à une réaction de la part des bébés.

Feigenson, Carey et Spelke (2002) cherchent eux à contraster le nombre et la surface des stimuli. Dans une condition, ils habituent des bébés à un grand objet tridimensionnel. Pendant la phase test, ils mesurent les temps de fixation du regard sur un petit objet (changement de masse, nombre identique) ou deux petits objets (changement de nombre, surface totale identique à celle du gros objet) (voir figure 9.5).

Les bébés réagissent à un changement de surface mais pas à un changement de nombre. Ils ont également été testés en utilisant la procédure de Wynn. On présentait au bébé un petit objet auquel était ajouté un deuxième petit objet. Ensuite, une fois l'écran relevé, il voyait soit un gros objet (nombre incorrect mais surface équivalente), soit deux gros objets (nombre correct mais surface incorrecte). Les résultats ne montrent pas de sensibilité au nombre puisque le bébé regarde plus longtemps un résultat inattendu en termes de surface (apparition de deux gros objets) qu'en termes de nombre. Les mêmes résultats sont obtenus dans une condition de soustraction.

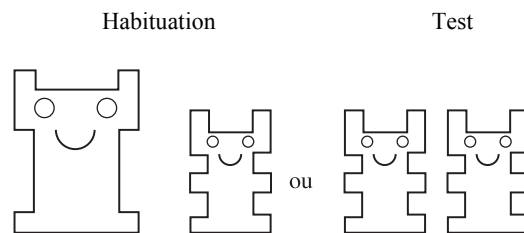


Figure 9.5. Exemple de stimuli utilisés par Feigenson, Carey et Spelke pour tester la discrimination de numérosités à l'aide du paradigme d'habituation (d'après Feigenson et al., 2002)

Le débat sur l'influence des variables perceptives n'est donc pas clos. Si les découvertes négatives ne démontrent pas formellement que les bébés sont incapables de former des représentations numériques, elles suggèrent toutefois que la sensibilité à des variables continues pourrait contribuer de manière non négligeable à la performance des bébés dans de nombreuses expériences.

9.4. Les enfants d'âge préscolaire

Si l'on admet l'hypothèse que l'animal, le bébé et l'adulte humain possèdent un même mécanisme numérique analogique, on s'attend à trouver chez les enfants d'âge préscolaire (soit de 2 à 5 ans) des capacités similaires voire supérieures à celles observées chez les bébés. Différentes études se sont intéressées à cette population. Elles se distinguent des recherches sur le bébé par deux points.

Premièrement, les méthodes expérimentales classiquement utilisées chez le tout petit (paradigme d'habituation, de regard préférentiel ou d'anticipation) ne sont plus adaptées chez l'enfant plus âgé. Dans ce cas, c'est souvent une réponse comportementale de sélection d'items ou une réponse verbale qui constituera la variable dépendante.

Deuxièmement, la population concernée entre dans la phase d'acquisition du langage. Dans le domaine numérique, cela se traduira par la maîtrise progressive du comptage et son influence sur la réalisation des traitements numériques.

La discrimination numérique a été testée chez des enfants de 2 à 5 ans à l'aide d'une tâche de jugement même/différent (Starkey et Cooper, 1995). Un ensemble cible qui comprend $n \pm 1$ éléments par rapport à l'ensemble de comparaison, est présenté pendant 200 ms et suivi d'un masque pour éviter que les enfants puissent recourir au comptage verbal. Les stimuli correspondent à des ensembles linéaires de 1 à 7 objets dont la longueur, la densité et la composition sont contrôlées. Le comptage verbal est également évalué en demandant à l'enfant de dénombrer une rangée de 5 éléments et de donner la valeur cardinale de l'ensemble. Les performances des enfants de 2 et 3 ans, qui ne maîtrisent pas le comptage verbal, sont au-dessus du niveau du hasard uniquement pour les numérosités 1, 2 et 3. On retrouve donc chez ces enfants des capacités similaires à celles des bébés dans les expériences d'habituation. Au-delà de 3 ans 1/2, les enfants, qui ont une meilleure maîtrise du comptage verbal, étendent leur capacité de discrimination à la numérosité 4.

La comparaison de numérosités a également fait l'objet d'études. Ainsi, des enfants âgés de 2 ans 1/2 à 5 ans ont été testés dans une situation où il s'agissait de choisir parmi deux plateaux celui qui comportait ou bien le plus d'éléments, ou bien

le moins. Après une phase d'entraînement sur des plateaux comportant 1 *versus* 2 items, l'enfant était testé sur des plateaux de 3 *versus* 4 items. Dès 2 ans 1/2, la plupart des enfants réussissaient l'item test. Des observations similaires ont été rapportées chez des enfants de 16 mois et de 14 mois.

Plus récemment, des enfants de 3 à 5 ans ont réalisé une tâche de comparaison numérique qui consiste à choisir le plus grand de deux ensembles et dans laquelle l'effet du rapport (1/2 ou 2/3) était examiné pour des grandes ou des petites numérosités (allant de la paire 1 *versus* 2 à 5 *versus* 10 pour les rapports un demi et des paires 2 *versus* 3 à 10 *versus* 15 pour les rapports deux tiers ; Huntley-Fenner et Cannon, 2000). Leurs performances étaient au-dessus du niveau du hasard à tous les âges et n'étaient pas influencées par le niveau d'habileté en comptage ni par la taille des numérosités. Seul, un effet du rapport était observé (meilleurs résultats pour les rapports 1/2).

Ces travaux montrent donc que les enfants d'âge préscolaire qui ne maîtrisent pas le comptage verbal ont des capacités de discrimination de numérosités comparables à celles des bébés puisqu'elles sont limitées aux numérosités 1, 2 et 3 lorsque la discrimination porte sur des numérosités que ne diffèrent que d'un seul élément. Ces enfants comprennent également les relations quantitatives. Leurs performances en comparaison de numérosités ne dépendent pas de leur niveau de comptage verbal et sont influencées par le rapport. Ces données sont comparables à celles recueillies chez l'animal et compatibles avec l'idée que les représentations numériques sont le produit d'un mécanisme analogique de représentation des quantités. Toutefois, d'autres recherches révèlent des performances paradoxalement plus faibles chez les enfants d'âge préscolaire que chez les bébés dans des tâches de discrimination de numérosités.

C'est le cas notamment dans les études de Mix (1999). Dans ces recherches, la tâche des enfants consiste à choisir parmi deux ensembles linéaires de points celui qui comporte le même nombre d'items qu'un ensemble cible. La moitié des cartes de choix est contrôlée en longueur et l'autre en densité. L'une des cartes de choix présente la numérosité cible ($n = 2, 3$ ou 4) et l'autre, la carte « distracteur » comporte $n \pm 1$ items. La tâche d'appariement est suivie d'épreuves qui évaluent le comptage.

Une première étude évalue l'influence de la similarité des stimuli sur les jugements d'équivalence numérique. Des enfants de 2 ans 1/2 à 4 ans 1/2 sont testés avec la tâche d'appariement dans trois conditions. Dans la première, les items cibles (*des jetons*) sont très similaires aux items de comparaison (*des points*) ; dans la deuxième condition, les items de l'ensemble cible (*des coquillages rouges*) sont homogènes mais différents des items de comparaison et dans la troisième condition, l'ensemble cible est composé d'objets hétérogènes. Les résultats indiquent que les

enfants de 2 ans 1/2 échouent quelle que soit la condition. A 3 ans, ils ne peuvent reconnaître l'équivalence numérique que dans la condition la plus transparente (*points-jetons*). A 3 ans 1/2, l'appariement d'ensembles différents mais homogènes (*points-coquillages*) devient possible. Enfin, ce n'est qu'à l'âge de 4 ans, lorsque le comptage commence à être maîtrisé, qu'ils parviennent à appairer de manière consistante des ensembles hétérogènes (*points-objets hétérogènes*). Des compétences en comptage semblent donc nécessaires pour réaliser les appariements les plus complexes.

Une seconde étude examine la capacité d'enfants de 3 et 4 ans à réaliser des jugements d'équivalence numérique entre des collections d'entités présentées dans différentes modalités (auditive et visuelle). La tâche des enfants consiste à choisir parmi deux ensembles linéaires de points celui qui comporte le même nombre d'items qu'un ensemble cible visuel ou auditif. Les enfants de 3 ans peuvent appairer la numérosité de deux ensembles de stimuli visuels simultanés, mais ils ne peuvent reconnaître l'équivalence numérique entre des stimuli auditifs et visuels. Cet appariement intermodal n'est réussi qu'à 4 ans et cette réussite serait liée à la maîtrise du comptage.

Par la suite, Mix cherche à savoir si l'échec des enfants de 3 ans dans la condition d'intermodalité est lié aux propriétés séquentielles des stimuli, à leur nature événementielle ou au caractère intermodal de la situation. Elle contraste alors dans la tâche d'appariement une présentation simultanée des jetons de l'ensemble cible à une présentation séquentielle (un jeton par seconde). Dès 3 ans, les enfants réussissent la tâche simultanée au-dessus du niveau du hasard alors que la tâche séquentielle ne commence à être réussie qu'à partir de 3 ans 1/2 par les enfants qui disposent d'une compétence de comptage minimale.

Ensuite, les jugements d'équivalence sont évalués lorsque les stimuli présentés séquentiellement sont des objets (*jetons*) ou des événements (*flashes lumineux* ou *sauts de poupée*). Les enfants de 3 ans 1/2 ne réussissent que la condition « objet » alors qu'à 4 ans, la condition « événement » l'est également. Ici encore, les performances sont fonction du niveau de maîtrise du comptage puisque les enfants qui ne savent pas compter ne réussissent aucune des conditions. Les difficultés éprouvées par les enfants de 3 ans dans la tâche d'appariement auditif-visuel pourraient donc être liées au caractère à la fois séquentiel et événementiel des stimuli auditifs.

L'ensemble de ces travaux est en contradiction avec les résultats d'expériences réalisées chez les bébés puisque contrairement à l'enfant de trois ans, les bébés ont pu discriminer la numérosité de stimuli auditifs, séquentiels, événementiels, et hétérogènes. Une contradiction entre les résultats des recherches menées chez le

bébé et l'enfant plus âgé apparaît également dans les études reprenant le paradigme de Wynn sur les calculs élémentaires.

Ainsi, des enfants âgés de 2 et 3 ans ont été placés dans la situation d'addition $1 + 1$ où les événements impossibles étaient 1 ou 3 mais au lieu d'examiner leurs temps de fixation oculaire, c'est leurs réactions verbales (*ça va* ou *ça ne va pas*) qui sont évaluées. Les résultats indiquent que les enfants de 2 ans réussissent significativement mieux l'événement impossible $1 + 1 = 1$ que l'événement impossible $1 + 1 = 3$. Ce décalage, bien qu'il disparaisse à l'âge de 3 ans, remet en cause l'interprétation de Wynn puisque c'était précisément le synchronisme entre les réactions de surprise aux deux situations impossibles qui l'avait amenée à rejeter une explication en termes de traitement perceptif global de type $1 + 1 = \text{plus que } 1$ par rapport à une explication en termes de calcul exact où $1 + 1 = 2$ et pas 1 ou 3.

La généralisation verbale des capacités proto-arithmétiques observées chez le bébé a également été examinée dans une étude qui évalue la compréhension des transformations additives, soustractives et spatiales chez des enfants de 2 et 3 ans (Vilette et Mazouz, 1998). Les expérimentateurs présentent quatre conditions à l'enfant :

- 1) une condition « ajout » ($2 + 1$ avec 2 pour événement impossible),
- 2) une condition « retrait » ($3 - 1$ avec 3 pour événement impossible),
- 3) une condition « ajout + retrait » qui évalue la compréhension de ces deux opérations en tant que transformations inverses ($2 + 1 - 1$ avec 3 pour événement impossible),
- 4) une condition qui vérifie la compréhension de la non-pertinence de la transformation spatiale d'un point de vue numérique ($3 + \text{déplacement}$, avec 2 comme événement impossible).

A 2 et 3 ans, les transformations additives et soustractives ne sont pas encore maîtrisées verbalement. Les conditions « ajout » et « retrait » sont mieux réussies que les deux autres, mais les taux de réussite restent inférieurs à 60 %. Les transformations additives et soustractives ne sont pas reconnues comme des transformations inverses l'une de l'autre et ce n'est qu'à partir de 3 ans 1/2 que la non-pertinence numérique des transformations spatiales est reconnue. Les résultats témoignent donc une fois de plus, d'un décalage entre les capacités proto-arithmétiques mises en évidence chez les bébés et celles manifestées par les enfants de 2-3 ans.

En résumé, une partie des travaux réalisés chez l'enfant plus âgé trouve des résultats compatibles avec ceux obtenus chez les bébés. Ainsi, des enfants qui ne maîtrisent pas le comptage verbal peuvent discriminer la numérosité de stimuli

visuels simultanés et réaliser des comparaisons de numérosités⁶. Par contre, lorsqu'il s'agit de discriminer des stimuli auditifs, séquentiels, événementiels ou hétérogènes ou de réagir sur le résultat d'opérations arithmétiques élémentaires, les performances des enfants de 2-3 ans sont plus faibles que celles du bébé.

Comment expliquer ces divergences de résultats ? La comparaison des études réalisées chez le bébé et chez l'enfant plus âgé met en évidence une différence dans l'utilisation d'une réponse passive en termes de temps de fixation du regard et d'une réponse active (verbale ou de choix). Or, si l'on se réfère à la conception de Karmiloff-Smith (1992), les concepts commenceraient par être implicites, inaccessibles à l'introspection consciente et deviendraient explicites ou accessibles à la conscience par l'opération d'un processus de redescription conceptuelle. Les deux types de réponses implicites ou explicites pourraient donc faire appel à des niveaux de conceptualisation différents. Rejoignant cette idée, Mix souligne que le niveau d'abstraction sollicité dans ses études diffère de celui requis dans les paradigmes d'habituation. Selon elle, les tâches d'appariement numérique supposent une comparaison directe impliquant la reconnaissance d'une propriété numérique commune partagée par deux ensembles, au-delà de leurs différences respectives. Par contre, dans les expériences d'habituation, l'abstraction demandée consiste à appliquer le même processus d'énumération à des ensembles qui diffèrent en apparence mais n'implique pas une comparaison directe. De même, dans les études sur la généralisation verbale des capacités proto-arithmétiques, le décalage observé entre les compétences préverbales et linguistiques plaide en faveur de la nécessité d'une réorganisation des connaissances précoces avant d'atteindre de réelles compétences arithmétiques verbales. Les capacités proto-arithmétiques des bébés ne relèveraient donc pas du même niveau d'élaboration cognitive que celles étudiées chez les enfants plus âgés. L'apparition du comptage verbal pourrait être le signe de cette réorganisation conceptuelle.

9.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'idée que l'homme possède un dispositif cérébral inné spécifiquement dédié aux traitements numériques et résultant de la phylogenèse par la revue d'une série de travaux qui montrent que l'animal et le bébé humain disposent de certaines capacités numériques. En raison de la population étudiée, ces capacités ne peuvent être le produit d'un apprentissage verbal et culturel. Par ailleurs, les compétences numériques observées sont sujettes aux effets de taille et de distance que l'on retrouve dans les tâches de comparaison numérique chez l'adulte humain. L'observation de cette continuité des compétences numériques

6. Ces études ne contrôlent cependant pas la surface occupée par les stimuli, celle-ci a donc pu être prise comme critère de discrimination et contribuer à la réussite de enfants.

entre l'animal et l'homme plaide en faveur de l'existence d'un mécanisme numérique analogique commun (par exemple, le modèle de l'accumulateur ou le modèle neuronal). Nous voulons cependant émettre plusieurs restrictions à une telle interprétation. Premièrement, les travaux réalisés chez l'animal ont nécessité un apprentissage intensif sur un petit nombre de sujets en captivité et ont utilisé des procédures d'évaluation artificielles.

Ainsi, on peut se demander si les animaux possèdent spontanément de telles capacités. L'étude d'Hauser et collègues (2000) sur des singes semi-sauvages non entraînés laisse penser qu'une part importante des performances observées dans les études précédentes est le fruit d'un conditionnement. La deuxième restriction concerne l'interprétation possible d'un certain nombre de résultats obtenus chez le bébé (ainsi que du résultat d'Hauser *et al.*, 2000) par la mise en œuvre de compétences non numériques (voir Simon, 1997) : capacités d'individuation spatiale, d'encodage de représentation abstraite, de raisonnement physique, de mémorisation et de comparaison terme à terme. Néanmoins, cette interprétation ne peut s'appliquer qu'à la discrimination des petites numérosités et n'est donc pas compatible avec les données sur la discrimination de grandes numérosités (Xu et Spelke, 2000). Des répliques de cette dernière expérience s'avèrent ainsi capitales pour soutenir l'existence d'un mécanisme numérique analogique. Enfin, une troisième restriction repose sur l'influence d'aspects méthodologiques sur les performances observées et donc sur leur interprétation, qu'il s'agisse du contrôle des variables perceptives qui covarient avec le nombre ou du nombre de mises à jour des représentations mentales requises par la tâche.

Par ailleurs, plusieurs questions quant à l'ontogenèse des compétences numériques sont en suspens. L'observation d'une divergence entre les compétences numériques du bébé et de l'enfant plus âgé laisse supposer que les compétences précoces du bébé font l'objet d'une réorganisation conceptuelle, à moins que la baisse momentanée de performance entre 2 et 3 ans soit liée à l'apparition d'une nouvelle compétence (encore immature) qui ne découle pas des premières. Notamment, on peut se demander si le fait que la maîtrise du comptage verbal soit corrélée avec la possibilité pour le jeune enfant de discriminer des stimuli séquentiels, hétérogènes ou auditifs signifie que le comptage verbal est le résultat de la réorganisation des compétences numériques précoces ou qu'il correspond à une nouvelle compétence qui se développerait sur d'autres bases que les compétences proto-numériques. Là se pose toute la question de savoir quel est le devenir des compétences proto-arithmétiques et à partir de quelles représentations se développent les capacités numériques verbales.

Trois possibilités au moins sont à considérer. Selon Gallistel et Gelman, les capacités numériques verbales se construiraient à partir d'un mécanisme numérique analogique comme l'accumulateur. Pour Simon, en revanche, c'est à partir de

mécanismes de maintien de la trace de l'objet que les jeunes enfants apprennent la signification des quantités et apprennent ensuite à y attribuer une étiquette verbale. Enfin, il est aussi possible que ces deux types de représentation soient nécessaires pour former une notion de nombre discret unique, spécifique aux humains et dépendante du langage.

9.6. Bibliographie

- Biro, D., & Matsuzawa, T. (1999). Numerical ordering in a Chimpanzee (*Pan troglodytes*): Planning, Executing, and Monitoring. *Journal of Comparative Psychology*, 113(2), 178-185.
- Brannon, E.M., & Terrace, H.S. (2000). Representation of the numerosities 1-9 by rhesus macaques (*Macaca mulatta*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 26(1), 31-49.
- Breukelaar, J.W.C., & Dalrymple-Alford, J.C. (1998). Timing ability and numerical competence in rats. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 24(1), 84-97.
- Canfield, R.L., & Smith, E.G. (1996). Number-based expectations and sequential enumeration by 5-month-old infants. *Developmental Psychology*, 20, 493-523.
- Clearfield, M.W., & Mix, K.S. (1999). Number versus contour length in infants' discrimination of small visual sets. *Psychological Science*, 10(5), 408-411.
- Cooper, R.G. (1984). Early number development: Discovering number space with addition and subtraction. In C. Sophian (Ed.), *Origins of cognitive skills: The eighteenth annual Carnegie symposium on cognition* (pp. 157-192). Hillsdale : Erlbaum.
- Dehaene, S., & Changeux J.P. (1993). Developmental of elementary numerical abilities: A neuronal model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 390-407.
- Feigenson, L., Carey, S., & Spelke, E. (2002). Infants' discrimination of Number vs. Continuous Extent. *Cognitive Psychology*, 44, 33-66.
- Fernandes, D.M., & Church, R.M. (1982). Discrimination of the number of sequential events by rats. *Animal Learning and Behavior*, 10, 171-176.
- Gallistel, C.R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44, 43-74.
- Hauser, M.D., Carey, S., & Hauser, L.B. (2000). Spontaneous number representation in semi-ranging rhesus monkeys. *Proceedings of the Royal Society of London: Biological Sciences*, 267, 829-833.
- Huntley-Fenner, G., & Cannon, E. (2000). Preschoolers' magnitude comparisons are mediated by a preverbal analog mechanism. *Psychological Science*, 11(2), 147-152.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science*. Cambridge : MIT Press/Bradford Books.

- Meck, W.H., & Church, R.M. (1983). A mode control model of counting and timing processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 9(3), 320-334.
- Mix, K.S. (1999). Preschoolers' recognition of numerical equivalence: Sequential sets. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74, 309-332.
- Olthof, A., Iden, C.M., & Roberts, W.A. (1997). Judgments of ordinality and summation of number symbols by squirrel monkeys (*Saimiri sciureus*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 23(3), 325-339.
- Simon, T.J. (1997). Reconceptualizing the origins of number knowledge: A « non-numerical » account. *Cognitive Development*, 12, 349-372.
- Starkey, P., & Cooper, R.G. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science*, 210, 1033-1035.
- Starkey, P., & Cooper, R.G. (1995). The development of subitizing in young children. *British Journal of Developmental Psychology*, 13, 399-420.
- Starkey, P., Spelke, E.S., & Gelman, R. (1990). Numerical abstraction by human infants. *Cognition*, 36, 97-128.
- Tomonaga, M., & Matsuzawa, T. (2000). Sequential responding to Arabic numerals with wild cards by the chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Animal Cognition*, 3(1), 1-11.
- Trick, L., & Pylyshyn, Z. (1994). Why are small and large numbers enumerated differently ? A limited-capacity preattentive stage in vision. *Psychological Review*, 101, 80-102.
- Uller, C., Carey, S., Huntley-Fenner, G., & Klatt, L. (1999). What representations might underlie infant numerical knowledge ? *Cognitive Development*, 14, 1-36.
- Vilette, B., & Mazouz, K. (1998). Les transformations numériques et spatiales entre deux et quatre ans. *Archives de Psychologie*, 66, 35-47.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749-750.
- Xu, F., & Spelke, E. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11.