

Les Capacités Numériques Préverbales et leur Evolution

Julie Féron* et Célia Hodent^{◇◇}

De nombreuses expériences suggérant que le bébé possède une certaine sensibilité numérique préverbale ont conduit les chercheurs à un débat concernant la nature de cette capacité : la sensibilité numérique établie chez le bébé relève-t-elle de capacités dédiées à la cognition numérique ou repose-t-elle sur un raisonnement fondé sur la représentation des objets constituant les numérosités ? Selon la deuxième approche, la représentation de la numérosité ne deviendrait conceptuelle que tardivement, avec l'apparition du langage. Cependant, les données expérimentales ont révélé que les capacités numériques des bébés sont indépendantes des caractéristiques perceptives des objets (telle l'identité physique ou la localisation spatiale des objets). Par ailleurs, elles ne sont pas spécifiques aux objets visuels et s'appliquent aussi à des entités sonores ou à des événements physiques. Ainsi, si les aptitudes numériques préverbales ne sont pas fondées sur l'objet lui-même, le langage ne peut constituer une cassure développementale entre une représentation implicite du nombre, basée sur l'objet, et une représentation conceptuelle. Les échecs des bébés ou des enfants plus âgés que l'on peut trouver dans la littérature pourraient dès lors refléter autre chose qu'une absence de compétence numérique. Comme autre alternative, nous proposons ici d'analyser ces échecs plutôt en termes de défaut d'inhibition, défaut qui pourrait ainsi masquer l'existence de réelles compétences numériques chez les jeunes enfants.

Mot- clés : Compétences numériques préverbales ; Langage ; Inhibition

Preverbal numerical abilities and their evolution. Many experiments have suggested that infants show preverbal numerical capacities. These data have led researchers to a debate about the nature of these capacities : is the numerical sensibility found with infants based on specific cognitive capacities or is it based on a global representation of objects? According to the second approach, the representation of numerosity should only be of conceptual nature after the occurrence of language. However, experimental data have revealed that infants' numerical capacities are independent of perceptive characteristics of objects (as physical identity or

* Laboratoire « Cognition et Développement » CNRS – UMR 8605 Université René Descartes – Institut de Psychologie

◇◇ Equipe « Développement et Fonctionnement Cognitifs » Groupe d'Imagerie Neurofonctionnelle Universités de Caen et Paris V, CNRS, CEA, UMR 6095

spatial localisation of objects). Moreover, they are not specific to visual objects and can also be applied to auditive entities or physical events. Thus, if preverbal numerical abilities are not based on the object itself, the language cannot represent a developmental drop between a previous stage of implicit representation of number, based on the object, and the final stage of conceptual representation of number. Infants and older children's failures that can be stated in the literature could then reflect something else than a lack of numerical competence. As another alternative, we propose here to analyse these failures in terms of inhibition inefficiency, default which could hide the existence of true numerical capacities with young children.

Keywords : Preverbal numerical capacities; Inhibition; Language

APPRÉHENSION DU NOMBRE CHEZ LE BÉBÉ : UNE ARGUMENTATION NUMÉRIQUE

Parmi les compétences précoces qui intéressent les psychologues, la question de l'existence ou non de capacités protonumériques chez le bébé et le jeune enfant est un domaine largement étudié. Il est aussi largement discuté. Deux approches concernant la nature de ces capacités précoces d'appréhension de la numérosité s'opposent alors, alimentant le débat inné-acquis. S'agit-il de capacités préverbales innées reposant sur des structures élémentaires spécifiques (*domain specific*) comme le suggèrent plusieurs modèles (Gallistel et Gelman, 1992 ; Gelman et Gallistel, 1978 ; Spelke, 2000 ; Wynn, 1995) ? Ou, au contraire, ces compétences, dites « numériques », sont-elles simplement le témoignage d'une capacité perceptive globale, basée sur l'objet (Huttenlocher, Jordan et Levine, 1994 ; Simon, 1997 ; Uller, Carey, Huntley-Fenner et Klatt, 1999), jusqu'à l'apparition du langage ? Pour cette dernière approche, l'apparition du langage serait alors un événement clé dans le développement des capacités numériques, marquant le passage d'une capacité perceptive globale à une conception plus abstraite du nombre.

Cette question de l'incidence du langage sur le traitement du nombre nous amène ainsi directement à nous interroger sur les caractéristiques des capacités numériques de l'adulte, afin d'en déduire l'apport du langage par rapport aux capacités numériques préverbales observées chez le bébé. La maîtrise d'un langage numérique constitue sans conteste un outil indispensable pour la formalisation des idées mathématiques. Par exemple, les deux propriétés du nombre, à savoir le cardinal (qui exprime la quantité) et l'ordinal (qui exprime la place des objets placés dans un certain ordre), sont inhérentes au système de comptage verbal. Ainsi, l'aspect cardinal est appréhendé par le fait que des ensembles contenant le même nombre d'objets sont dénommés par le même mot-nombre. L'aspect ordinal est représenté par la position relative de chaque mot-nombre dans la succession naturelle des nombres. Plus on avance dans la séquence numérique et plus la numérosité est

importante, ce qui permet d'apprécier les relations numériques entre deux ensembles du type « plus grand que » et « moins grand que ». Le système de comptage verbal représente donc un outil puissant pour encoder les numérosités. Cependant, de récentes données obtenues chez l'adulte indiquent que le langage n'est pas toujours impliqué dans le traitement des nombres et, par conséquent, les êtres ne maîtrisant pas la fonction langagière pourraient aussi y accéder. En effet, les adultes utilisent plusieurs procédures pour quantifier un ensemble dont les bases cognitives et neuronales ont récemment été mises en évidence. Ils peuvent par exemple dénombrer jusqu'à quatre éléments disparates en un simple coup d'œil. Ce phénomène couramment mentionné sous le terme de « subitisation », en anglais *subitizing*, est défini par Fisher (1991) comme « l'appréhension quasi instantanée du nombre ». Lorsque l'ensemble à dénombrer est supérieur à quatre, l'estimation en un coup d'œil devient imprécise¹. Nous pouvons alors effectuer un comptage sériel qui consiste à attribuer un symbole numérique à chaque élément en faisant appel à la relation de succession, le dernier élément étant pris comme le résultat de la collection entière. Le comptage et l'évaluation trouvent leur légitimité en tant que modes distincts de quantification dans les études d'imagerie cérébrale et neuropsychologiques. Ces dernières montrent que différents traitements peuvent être perturbés indépendamment les uns des autres. Par exemple, certains patients atteints de lésions cérébrales conservent des capacités numériques « élémentaires » (comme la comparaison de nombres) alors que leurs systèmes linguistiques et de calcul symbolique ont été détériorés (voir Cohen et Dehaene, 1991, pour des exemples). Dehaene, Spelke, Pinel, Stanescu et Tsivkin (1999) ont eu l'idée de tester le rôle du langage dans les calculs. Dans cette expérience, des sujets bilingues anglais-russe sont entraînés dans l'une des deux langues à donner la somme exacte ou approchée d'additions. Le test présente dans les deux langues des problèmes rencontrés lors de l'entraînement (problèmes familiers) et des problèmes nouveaux. En ce qui concerne les calculs exacts, les résultats font apparaître, entre autres, de meilleures performances (temps de réponse plus rapides) dans la langue qui a servi à l'entraînement plutôt que dans l'autre. Au contraire, les résultats sont identiques pour les approximations quelle que soit la langue testée. Le calcul estimé ne semble donc pas dépendre du langage : l'équivalence des performances en approximation dans les deux langues, contrairement au calcul exact, peut être interprétée comme l'absence de travail de traduction d'une langue à l'autre. Ces résultats ont été confirmés par l'analyse des données en imagerie cérébrale, comme celle de Dehaene et al. (1999) qui révèle une activation du lobe frontal inférieur gauche, lié au langage, lorsqu'un sujet donne la somme exacte d'additions. En revanche, lorsque le sujet doit estimer cette somme, ce sont les deux lobes pariétaux inférieurs, liés à la vision et à l'orientation spatiale,

¹ Dans le cas d'un arrangement particulier comme le dé ou les doigts, le *subitizing* peut aller respectivement jusqu'à 6 et 10.

qui sont activés. Le cerveau utilise ainsi des circuits neuronaux différents selon que les calculs sont exacts ou approchés, et ces données suggèrent qu'il existe au moins deux modes de représentation des nombres : un mode symbolique dépendant du langage qui permet d'effectuer des calculs précis et élaborés et un mode analogique qui compare les nombres entre eux (ou des ensembles concrets) et rend les calculs approximatifs possibles (voir aussi Spelke et Tsivkin, 2001). Ce second mode qui représente les nombres par une grandeur physique est caractérisé par la loi de Weber. Il en découle que la discriminabilité entre deux quantités est fonction de leur rapport numérique (il est plus facile de distinguer 3 versus 8 que 3 versus 4) et de leur taille (il est plus facile de comparer 2 et 3 que 8 et 9).

Cet ensemble de capacités indépendantes du langage coïnciderait avec les compétences dites numériques du nourrisson : les bébés sont capables de se représenter le nombre d'entités discrètes dans un ensemble et d'apprécier l'équivalence numérique entre deux ensembles. Cette discrimination est précise jusqu'à 3 ou 4 éléments et devient approximative pour de plus larges ensembles. Par ailleurs, les bébés comprennent les effets d'ajout et de retrait et sont sensibles aux relations ordinales entre numérosités distinctes bien avant l'acquisition de symboles numériques conventionnels. Mais ces compétences relèvent-elles d'un domaine général de connaissances ou sont-elles spécifiquement numériques ? Pour aborder la nature de ces aptitudes, des recherches conduites avec des bébés ont été menées dans des conditions expérimentales très variées. Nous allons donc examiner les faits expérimentaux tels qu'ils ont été rapportés dans la littérature.

La discrimination numérique préverbale

C'est par les paradigmes d'habituation et de réaction à la nouveauté qu'un grand nombre d'études a montré que les bébés étaient capables de différencier des ensembles constitués de 1, 2, 3 et parfois 4 éléments. Ils échouent cependant le plus souvent pour des numérosités supérieures à 4, lorsque les ensembles à discriminer sont numériquement proches (par exemple 4 versus 6). Ce chiffre correspondant à la limite de perception directe des nombres chez l'adulte. C'est l'une des raisons pour lesquelles certains auteurs (comme Strauss et Curtis, 1981) pensent que le même processus est responsable de la perception des petites numérosités chez le bébé et l'adulte. Mais sur quelle information repose cette différenciation ? Mandler et Shebo (1982) avancent par exemple que le processus de discrimination numérique résulte de la reconnaissance holistique de patterns perceptifs canoniques qui corrélerent avec la présentation de certaines numérosités. Selon ces auteurs, la numérosité elle-même ne serait donc pas extraite.

Cependant, trois arguments au moins vont à l'encontre de cette interprétation. Le premier concerne la reconnaissance de *patterns canoniques* : selon ce critère, la reconnaissance ne peut s'appliquer

qu'à des items présentés sous une certaine configuration, par exemple une ligne pour 2 ou un triangle pour 3. Or, on trouve une discrimination même lorsque la densité et l'alignement des stimuli sont contrôlés (Strauss et Curtis, 1981), ou lorsque les objets présentés sont en mouvement continu (van Loosbroek et Smitsman, 1990). Le nombre étant le seul paramètre invariant dans l'ensemble des stimuli, il semble que les bébés se basent sur l'information numérique pour effectuer une discrimination.

Le deuxième argument concerne la *reconnaissance holistique* des patterns perceptifs qui implique que les objets soient présentés simultanément. Deux expériences ont pourtant mis en évidence une capacité d'énumération strictement séquentielle. Dans la première, Wynn (1996) montre que des bébés âgés de six mois sont capables de discriminer des événements physiques séquentiels, à savoir des sauts successifs d'une poupée, la durée et le tempo de l'événement étant contrôlés. La seconde expérience, réalisée par Canfield et Smith (1996), indique que les bébés de cinq mois sont capables d'extraire et d'utiliser une information numérique pour anticiper la localisation d'une cible visuelle. Les auteurs présentent aux bébés des séquences de 2 ou 3 dessins apparaissant les uns après les autres à gauche d'un écran, suivis d'un dessin cible qui apparaît à droite. Les durées de présentation des stimuli et les intervalles inter-stimuli varient d'un essai à l'autre de telle sorte que la durée totale de présentation ne peut servir de prédicteur pour l'apparition du dessin cible. L'analyse des saccades anticipatrices révèle que les bébés reconnaissent et utilisent le nombre de dessins présentés séquentiellement à gauche afin de prédire la localisation du dessin cible à droite.

Enfin, un troisième argument repose sur les études d'*appariement intermodal*. Plusieurs expériences réalisées par Starkey, Spelke et Gelman (1983, 1990) avec des bébés de six mois ont mis en évidence la capacité d'apparier le nombre d'objets visuels équivalent au nombre d'objets sonores. Deux planches représentant chacune 2 ou 3 objets hétérogènes sont présentées aux bébés. Puis ils entendent soit 2, soit 3 battements de tambour. Les bébés regardent alors plus longtemps l'image représentant le nombre d'objets qui correspond au nombre de battements de tambour. Ainsi, la discrimination numérique n'est pas spécifique à la modalité visuelle et ces résultats suggèrent que le bébé possède une représentation amodale de la numérosité. En effet, si le bébé est capable d'abstraire la numérosité indépendamment de la modalité sensorielle mobilisée, de la nature et du mode de présentation des stimuli, alors on peut dire que cette compétence numérique relève du domaine de la cognition. A l'heure actuelle, deux études ont répliqué cette expérience mais ont révélé des résultats inverses (Moore, Benenson, Reznick, Peterson et Kagan, 1987 ; Mix, Cohen Levine et Huttenlocher, 1997) : les bébés âgés de six à huit mois ont manifesté une préférence visuelle pour le nombre d'objets qui ne correspond pas au nombre de battements de tambour entendus. Par ailleurs, lorsque le tempo et la durée de

présentation des sons sont aléatoires (Mix, Cohen Levine et Huttenlocher, 1997), les bébés ne présentent plus aucune préférence pour l'un des deux dispositifs visuels. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la contiguïté des événements visuels et sonores pour que ceux-là puissent être mis en correspondance. Ils ne remettent pas pour autant en cause la sensibilité numérique des bébés dans les études d'appariement intermodal audition-vision. Bien que la préférence pour le familier soit plus rarement obtenue que la préférence pour le nouveau dans les études d'habituation chez le bébé, elle n'en est pas moins la manifestation d'une discrimination.

On voit ainsi que le bébé peut extraire la dimension numérique d'ensembles variés (objets visuels, objets sonores ou événements) présentés simultanément ou séquentiellement, indépendamment de leur configuration spatiale ou temporelle. La discrimination ne relève donc pas d'une capacité perceptive globale comme le suggèrent Mandler et Shebo (1982). Deux études ont pourtant mis en évidence le rôle d'indices quantitatifs dans la discrimination numérique, à savoir la longueur totale du contour des items (Clearfield et Mix, 1999) et la masse des dispositifs visuels (Feigenson, Carey et Spelke, 2002). Dans l'expérience de Clearfield et Mix, des bébés âgés de six à huit mois sont habitués à des ensembles composés de 2 ou 3 carrés. En test, on leur présente soit un ensemble identique en nombre mais de contour de périmètre différent, soit un ensemble dont la longueur totale de périmètre reste la même mais composé d'un nombre d'objets différent. Les résultats ont montré que les bébés réagissent au changement de longueur totale de périmètre alors que leur temps de fixation visuelle ne diffère pas significativement pour le changement de nombre. On peut concevoir la saillance de cet indice lors de présentation de formes géométriques simples, mais il est peu écologique de postuler son utilisation par le bébé lorsqu'il s'agit de formes complexes tels des objets hétérogènes. Feigenson et Spelke, quant à elles, ont testé l'incidence de la masse totale. La procédure est la même mais les stimuli utilisés sont des objets tridimensionnels. Les bébés âgés de sept mois ont dans cette étude réagi à la fois au changement de nombre et à celui de masse, avec un effet plus important pour le deuxième. Ainsi, bien que les bébés soient capables de discriminer des ensembles sur la base de leur nombre, ils semblent aussi utiliser préférentiellement des variables quantitatives lorsque celles-ci sont disponibles, leur saillance étant probablement plus importante que celle de la numérosité elle-même.

Tan et Bryant (2000) ont testé le rôle des indices perceptifs dans la discrimination d'ensembles plus vastes. Les auteurs sont partis de deux constats. Le premier est qu'il existe beaucoup de situations naturelles dans lesquelles les variables continues d'un ensemble, comme la longueur ou la densité, covarient avec le nombre. D'ailleurs les enfants (comme les adultes), même après avoir appris à compter, préfèrent comparer des quantités sur la base de ces indices plutôt que d'effectuer un comptage sériel (ces indices heuristiques pouvant dans certains cas induire un biais perceptif – cf. Houdé,

1997 ; Houdé et Guichart, 2001). L'autre constat est que les expériences dans lesquelles le bébé échoue à discriminer 4 contre 6 ont systématiquement contrôlé la longueur et la densité des stimuli (Antell et Keating, 1983, Starkey et Cooper, 1980). Les bébés ne peuvent donc pas utiliser ces indices perceptifs, ce qui pourrait expliquer leur échec. Pour tester cette hypothèse, Tan et Bryant ont réalisé deux expériences. Dans la première, les bébés âgés de six mois sont familiarisés visuellement à deux ensembles composés de 4 ou 6 objets. Le test présente simultanément 4 et 6 objets. Pour la moitié des sujets, l'ensemble nouveau diffère à la fois par le nombre et par la longueur (longueur=nombre) alors que la densité est maintenue constante. Pour l'autre moitié des sujets, le nouvel ensemble varie par le nombre et la densité mais la longueur est maintenue constante (densité=nombre). La deuxième expérience suit la même procédure à ceci près que les deux ensembles sont présentés de manière successive lors du test. Les résultats montrent que les bébés discriminent entre 4 et 6 dans toutes les conditions excepté en condition de présentations successives, lorsque les ensembles diffèrent par le nombre et la densité avec la longueur maintenue constante. Ainsi, les indices perceptifs (ici la densité), dont on a montré l'importance précédemment, permettent aussi aux bébés de discriminer entre de grandes numérosités. Les résultats des études présentées ci-dessus nous amènent à nous poser la question suivante : le bébé peut-il se représenter à la fois les numérosités et les dimensions continues des ensembles (mais il préférerait répondre sur la base de sa représentation la plus saillante) ou sa réponse repose-t-elle uniquement sur le traitement des variables continues qui corrélerent avec les numérosités ? L'étude réalisée par Xu et Spelke (2000) permet de réfuter cette dernière supposition en montrant que des bébés âgés de 6 à 8 mois peuvent discriminer des ensembles plus larges alors même que la densité et la surface des dispositifs sont contrôlées. Leur réussite est toutefois soumise à un effet de distance : les bébés discriminent 8 contre 16 objets (ratio 2 : 1) mais pas 8 contre 12 (ratio 3 : 2).

L'ensemble de ces données permet d'envisager que des traitements numériques et non numériques coexistent chez le bébé. Ce dernier est capable de se représenter des petites numérosités (jusqu'à 3 ou 4) de manière exacte et indépendamment des caractéristiques physiques des items (identité et localisation spatiale). En ce sens, cette capacité numérique peut être qualifiée d'abstraite. Mais les faits rapportés ci-dessus suggèrent aussi que les bébés préfèrent discriminer sur la base de variables perceptives plutôt que d'abstraire les numérosités si cela leur est possible. En revanche, le fait que la différenciation entre grands ensembles soit soumise à un effet de distance et/ou réalisée à partir de variables continues suggère que leur représentation est approximative (comme on peut d'ailleurs l'observer chez l'adulte, ce qui n'exclut pas l'existence de connaissances numériques chez ce dernier).

Les capacités arithmétiques des bébés

Le débat concernant la nature des compétences numériques a été vivement relancé par les expériences de Wynn (1992). Par un paradigme de « réaction à l'événement impossible », la réponse visuelle de bébés de quatre-cinq mois révèle que ces derniers sont capables de réaliser des opérations sur des petits nombres (dites « additions » et « soustractions »). Le dispositif expérimental pour l'addition est le suivant : devant le bébé, on place un Mickey sur une plate-forme. Un écran en rotation cache alors le Mickey. A la vue du bébé, un autre Mickey est introduit derrière l'écran. L'écran s'abaisse, révélant soit deux Mickey (événement possible « $1+1=2$ »), soit un seul (événement impossible « $1+1=1$ »). Pour la soustraction, la procédure est inversée : un Mickey est retranché à partir d'une configuration initiale de deux Mickey. L'écran baissé, le bébé voit soit un Mickey (événement possible « $2-1=1$ »), soit deux (événement impossible « $2-1=2$ »). Les résultats montrent que les bébés ont des temps de fixation visuelle plus longs pour les événements impossibles, révélant ainsi qu'ils sont conscients qu'une propriété du réel (le nombre) a été transgressée. On pourrait alors penser que les bébés s'attendent simplement à un changement de nombre sans pour autant connaître le résultat exact de cette transformation. Mais dans une expérience contrôlée de Wynn, les bébés ont aussi des temps de fixation visuelle plus longs devant l'événement « $1+1=3$ », alors que l'état final impossible « 3 » respecte l'ordinalité par rapport à l'état initial « 1 » et le résultat possible « 2 ». Wynn en conclut que les bébés effectuent un calcul précis puisqu'ils s'attendent à ce qu'un Mickey ajouté à un autre donne précisément deux Mickey, ni un, ni trois. Les bébés auraient alors une approche arithmétique préverbale, et non « seulement perceptive », des événements du monde qui les entoure – au sens où le principe numérique structurerait ici la perception visuelle des objets.

Certains auteurs suggèrent cependant que le comportement observé chez les bébés ne requière pas de connaissance numérique spécifique. Simon (1997), par exemple, pense qu'il s'agit plutôt d'une simple discrimination de type « pareil/pas pareil » et non d'une connaissance que les bébés auraient sur le nombre ou l'arithmétique. La réaction des bébés face à l'événement impossible serait due à la non-concordance entre la représentation mentale et la perception directe des objets impliqués dans l'événement, et non à la violation du résultat d'un comptage. Selon l'auteur, les résultats de Wynn (1992) ne démontrent pas que les bébés ont compris le concept de nombre, pas plus qu'ils ne savent que « un plus un est égal à deux ». Ils auraient simplement réagi au fait qu'un objet qui existait précédemment derrière un écran a disparu, grâce à un jugement « pareil/pas pareil » établi par correspondance terme à terme. En prenant l'exemple de l'événement « $1+1=1$ », Simon décrit le processus en cause de la façon suivante : lorsque l'on présente une

figurine au bébé, ce dernier crée une représentation abstraite de l'objet qu'il intègre sous forme de *token* (sorte de symbole) dans un modèle mental. Puis l'écran est levé, masquant la vue de l'objet dont la représentation mentale reste intacte, puisque le bébé de quatre-cinq mois « sait » que l'objet persiste derrière l'écran (cf. Baillargeon, 1987). Le bébé voit alors qu'un deuxième objet est placé derrière l'écran, ce qui donne lieu à la création d'un autre *token*, assurant sa représentation mentale. Quand l'expérimentateur ôte l'un des deux objets à l'insu du bébé, aucun changement ne se fait dans la représentation mentale que ce dernier a des objets derrière l'écran. Enfin, l'écran est baissé, révélant un seul objet. Le bébé construit alors une nouvelle représentation mentale de la scène présentée intégrant un seul *token* pour la figurine isolée. Il peut dès lors comparer par correspondance terme à terme la nouvelle représentation de la scène avec celle qu'il avait précédemment en mémoire, ce qui lui permet ainsi de constater qu'un des deux *tokens* de sa représentation en mémoire reste non apparié. Le bébé réagit alors à cette modification de son environnement par un temps de fixation visuelle plus long. Cette réaction à la nouveauté observée prendrait donc appui sur des connaissances physiques, et non sur des connaissances arithmétiques, qui ne se mettraient en place que plus tardivement, avec l'apparition du langage. Pourtant, les proto-opérations dont le bébé est capable ne sont liées ni à des attentes quant à l'identité des stimuli, ni à des attentes quant à la localisation précise des objets (comme dans le cas de la discrimination numérique). Ainsi, Simon, Hespos et Rochat (1995) ont répliqué l'expérience de Wynn (1992), avec laquelle ils ont obtenu les mêmes résultats que cette dernière, et, dans une expérience complémentaire, ont subrepticement remplacé l'un des objets cachés par un autre objet (changement d'identité) avant de rabaisser l'écran. Dans cette nouvelle condition, les événements sont donc physiquement impossibles. Les résultats ont montré que les bébés font abstraction de l'identité des objets et restent surpris par le seul mauvais résultat. Dehaene, Koechlin et Mehler (1997) ont quant à eux testé le rôle de la représentation espace/objet sur des sujets de quatre mois et demi. Les auteurs ont mis au point un dispositif tel qu'il est impossible de se baser sur la disposition spatiale des objets : placés sur un tourne-disque, les stimuli bougent derrière l'écran. Là encore, les bébés demeurent surpris par l'événement numérique impossible, malgré l'absence d'une localisation précise des objets cachés. Sans sous-estimer le rôle de la représentation mentale des objets, il semble toutefois que les bébés répondent réellement à la tâche « combien » dans les situations impliquant des opérations, en négligeant les aspects « quoi » et « où ».

Dans le même courant théorique que Simon (1997), Uller, Carey, Huntley-Fenner et Klatt (1999) avancent que les connaissances numériques des bébés sont basées sur une représentation mentale des objets. Quatre expériences utilisant les événements « $1+1=1$ ou 2 » sont menées dans leur étude, avec des bébés âgés de huit et dix mois. Dans chacune des expériences, le bébé est confronté à l'une ou

l'autre condition suivante : soit le premier élément de l'addition est présenté avant la levée d'un écran (*object-first condition*), soit il est placé directement derrière l'écran relevé (*screen-first condition*). Les résultats montrent que les bébés de huit mois ne réagissent pas correctement à l'événement impossible « $1+1=1$ » dans la condition où l'écran est levé avant le début de l'opération, contrairement aux bébés de dix mois. Les plus jeunes bébés réussissent cependant dans les deux conditions lorsque les objets sont placés derrière deux écrans séparés. Selon les auteurs, ces résultats suggéreraient que les bébés construisent un modèle mental qu'ils réactualiseraient au fur et à mesure des événements. Dès lors, un modèle construit à partir d'un objet préalablement vu sur le dispositif (avant la levée de l'écran) serait plus robuste et donc plus facilement mis à jour qu'un modèle construit de mémoire (puisque l'élément premier est directement placé derrière l'écran). En conséquence, la présence de deux écrans séparés, permettant la localisation physique des deux éléments, aiderait le bébé à isoler et maintenir une représentation pour chaque objet dans leur modèle mental. Par ailleurs, la performance des bébés de dix mois est expliquée en termes d'acquisition graduelle de la capacité à construire des modèles mentaux de différents objets cachés. La résolution d'une addition serait donc basée sur une représentation de l'objet, et non pas sur un traitement arithmétique.

Cependant, ces résultats peuvent s'interpréter différemment. Si l'on admet que de la levée de l'écran découle la « cristallisation » de l'état initial, alors dans le cas où l'écran se lève sur la plate-forme vide, l'absence d'objet devrait donc être codée selon une valeur équivalente au concept « zéro ». Or, comme nous le rappelle Wynn (1998), le concept de la valeur « zéro » est difficilement acquis, en témoigne son apparition tardive dans l'histoire du développement des mathématiques. Cela nous permet ici de souligner que la présence à quatre-cinq mois d'une sensibilité arithmétique chez le bébé n'implique en aucun cas que ce dernier maîtrise véritablement le concept de nombre, qui se développerait ainsi tout au long de l'enfance et sans doute encore à l'âge adulte. L'acquisition plus tardive d'une notion telle que la valeur « zéro » ne remet pas en question la nature (jugée cognitive ici) du processus engagé dans la résolution d'opérations à quatre-cinq mois. Il peut être alors suggéré que le bébé de huit mois aurait des difficultés à engager un calcul à partir d'un concept (« zéro ») qu'il ne possède sans doute pas (puisque l'opération revient ici à « $0+1+1$ »). Des indices perceptifs (deux écrans) pourraient dès lors aider le bébé à combler cette lacune. Il est évident que, tout comme l'adulte, plus le bébé aura d'indices à sa disposition, meilleures seront ses performances. Par conséquent, le fait que le bébé puisse s'appuyer sur des indices perceptifs dans certaines conditions ne doit pas être forcément un synonyme d'absence de compétences numériques abstraites chez celui-ci.

Relations quantitatives

La question de la connaissance des relations ordinales du type « plus grand que », « moins grand que » chez le bébé a suscité moins d'attention que celle de la représentation de la valeur cardinale d'ensembles. Il est pourtant important de se demander si le bébé, sensible à la valeur numérique d'ensembles d'objets ainsi qu'à leurs transformations numériques, est aussi capable d'apprécier les relations numériques entre les numerosités qu'il discrimine. En effet, savoir que 1 plus 1 donne 2 ou que 2 est différent de 3 n'implique pas forcément la connaissance du fait que 2 est moins grand que 3. Néanmoins, les données dont nous disposons suggèrent que les bébés peuvent se représenter de telles relations avant d'avoir acquis un système de comptage verbal. Cooper (1984), utilisant une procédure d'habituation, a montré que les enfants étaient capables d'ordonner des petites numerosités au cours de leur deuxième année de vie. Des bébés âgés de dix/douze mois et quatorze/seize mois sont habitués à des paires d'ensembles a et b présentant toujours la même relation $a > b$ ou $a < b$. Le test présente les relations $a > b$, $a < b$ et $a = b$. Les résultats montrent que les plus jeunes réagissent uniquement au dispositif présentant la relation d'égalité. Ne réagissant pas au changement d'une inégalité à l'autre, il semblerait que les relations numériques ne soient pas encore encodées en termes de « plus grand que », « moins grand que ». En revanche, les enfants les plus âgés réagissent aux deux types de relations nouvelles lors du test (égalité et inégalité de sens inverse), ce qui indique que les relations ordinales sont comprises à cet âge. La connaissance de ces relations ne serait donc pas inhérente à la représentation numérique établie précocement mais émergerait plus tardivement, à partir de quatorze mois. Cooper (1984) suggère que c'est à partir de l'observation répétée par le bébé d'ajouts et de retraits d'objets dans l'environnement que cette connaissance pourrait se construire progressivement.

Les résultats expérimentaux de Cooper (1984) ont en partie été confirmés par Sophian et Adams (1987), avec une procédure différente. Dans leur étude, des bébés âgés de quatorze, dix-huit, vingt-quatre et vingt-huit mois sont encouragés à choisir parmi deux ensembles celui qui comporte le plus d'objets. Après une phase de familiarisation avec la tâche, les bébés sont confrontés à trois types de problèmes. Les deux ensembles présentés aux bébés peuvent être initialement égaux (première condition) ou inégaux (deuxième condition). L'expérimentateur recouvre alors ces ensembles et effectue une transformation sur l'un d'eux (ajout ou retrait d'un objet). Dans une troisième condition, les deux ensembles sont initialement différents mais ne subissent aucune transformation après avoir été recouverts. Les résultats montrent que, dès quatorze mois, les bébés sont capables de choisir l'ensemble comportant le plus d'objets (bonnes performances dans la troisième condition) et comprennent le sens des transformations numériques

(différenciations entre ajout et retrait dans les deux premières conditions). Mais ce n'est qu'à partir de vingt-quatre mois qu'ils peuvent combiner les numérosités initiales et le sens de la transformation afin de retrouver l'ensemble le plus grand.

Feigenson et Carey (2000), utilisant une procédure de choix préférentiel, ont mis en évidence une appréciation des relations numériques ordinales chez des enfants plus jeunes. Des bébés âgés de dix et douze mois pouvaient choisir parmi deux ensembles celui qui contenait le plus de biscuits. Les résultats ont montré qu'aux deux âges, les bébés choisissent le plus grand nombre en comparant des ensembles de 1 contre 2 et 2 contre 3 biscuits mais pas pour des ensembles de 3 contre 4 biscuits. Ces résultats montrent que les bébés ont accès aux représentations ordinales dès la première année de vie, celles-ci étant limitées aux petits nombres.

Ainsi, les bébés comprennent les relations ordinales entre deux numérosités bien avant l'apparition d'un système de comptage verbal, mais le progrès observé dans les performances des bébés à partir de vingt-quatre mois, âge auquel un début de langage numérique conventionnel apparaît, souligne le rôle que pourrait jouer l'acquisition d'un tel système symbolique dans la représentation numérique.

DÉVELOPPEMENT DU NOMBRE, LANGAGE ET INHIBITION

Les exemples que nous avons développés précédemment montrent bien que les bébés sont sensibles au nombre bien avant l'apparition d'un système de comptage verbal qui se manifeste par la représentation de la valeur cardinale d'ensemble, la représentation de leurs transformations (ajouts et retraits) et la compréhension des relations entre deux numérosités. S'il existe des compétences numériques préverbaux, quelle sera alors l'influence du langage sur ces capacités ? Nous nous restreindrons ici à l'expérience de Wynn (1992) sur les opérations, et au débat qu'elle a suscité, pour aborder cette question. Ainsi, nous allons examiner le devenir de cette capacité du bébé à appréhender le nombre, qu'elle soit d'emblée de nature cognitive, au sens numérique (Wynn), ou perceptive (Simon), après deux ans, âge d'apparition du langage. C'est ce qu'a réalisé Houdé (1997) en étudiant les réactions verbales aux événements « $1+1=1$, 2 ou 3 » chez des enfants francophones de deux et trois ans. Avec le même dispositif expérimental que celui utilisé par Wynn (voir précédemment), des Babar ayant remplacé les Mickey, les résultats font apparaître un net décalage dans les performances numériques des enfants. En effet, les réactions verbales correctes (« ça va pas ») face aux deux types d'événements impossibles « $1+1=1$ » et « $1+1=3$ » (soit un synchronisme des performances, comme observé chez les bébés de quatre-cinq mois au niveau visuel) ne sont observées qu'à trois ans. À deux ans, les jeunes enfants ne détectent que les événements impossibles « $1+1=1$ » (avec des réactions du type « ça va pas, il en manque un, où il est ? ») et pas

(ou plus) « $1+1=3$ » (soit une absence de synchronisme, avec des réponses du type « ça va, y en a plein, t'en as mis plusieurs »). Or, si l'on se place du point de vue nativiste, c'est précisément, selon Wynn (1997), l'existence de ce synchronisme des réactions à « $1+1=1$ » et « $1+1=3$ » chez les bébés qui permet de conclure à l'existence d'une véritable capacité numérique chez le bébé, au sens d'un calcul élémentaire précis. Pourquoi alors ce synchronisme n'est-il plus observé à deux ans, pour réapparaître ensuite à trois ans ?

Selon Houdé (1997), qui se réfère au concept de « redescription représentationnelle » de Karmiloff-Smith (1992), ce décalage de performance serait provoqué par une forme de « reformatage cognitivo-linguistique » des compétences numériques précoces du bébé, engendrant une altération temporaire des capacités arithmétiques entre deux et trois ans (ce qui relativise l'idée du rôle « tout positif » du langage sans pour autant remettre en question l'interprétation numérique de Wynn). Ce reformatage correspondrait notamment à l'apprentissage du lexique des nombres (qui comporte au départ un certain flou dans l'étiquetage des quantités), ainsi qu'à l'acquisition du nombre-dans-le-langage, c'est-à-dire la distinction singulier/pluriel qui oppose « 1 » à « plus que 1 », donc à tous les autres nombres considérés globalement (2, 3, etc.). D'autres auteurs, comme Bideaud (1997), Vauclair (2000) et Wakeley, Rivera et Langer (2000) ont interprété les résultats de Houdé dans un sens différent, voire opposé. En effet, ces auteurs y voient non pas un reformatage, mais simplement la marque de l'émergence tardive (bien que plus précoce que chez Piaget et Szeminska, 1941) des capacités numériques de l'enfant, remettant ainsi en cause les conclusions de Wynn (1992) à propos du bébé et donnant par-là même raison à l'analyse non numérique de Simon (1997). Ainsi, Bideaud (1997) interprète-t-elle l'absence de synchronisme dans les performances numériques des enfants de deux ans, avec les événements « $1+1=1$ » et « $1+1=3$ », comme étant le signe de la nécessité d'une construction au niveau conceptuel de ce qui, au départ, relevait simplement de l'intelligence perceptive. Les bébés auraient donc une approche perceptivo-attentionnelle du nombre, comme le décrit Simon, jusqu'à ce que l'apparition du langage et de sa puissance de conceptualisation permettent enfin à l'enfant de trois ans de développer des capacités réellement numériques. Les analyses de Vauclair (2000) et de Wakeley *et al.* (2000), bien qu'utilisant des arguments différents, vont dans le même sens.

Cependant, les résultats de Houdé (1997) ne permettent en rien d'aboutir à une telle interprétation constructiviste d'une cassure perceptif-non numérique/numérique-conceptuel dans le développement des capacités de l'enfant. En effet, d'autres explications peuvent être avancées. Il est probable par exemple que le langage, en acquisition à cet âge, court-circuite les capacités réelles des enfants. Dans son livre *Comment la parole vient aux enfants* (1996), de Boysson-Bardies précise que l'acquisition du

nombre dans le langage, c'est-à-dire la distinction singulier/pluriel, débute entre vingt et vingt-quatre mois. Il est donc possible que cette distinction en émergence et en cours de consolidation à deux-trois ans ait une influence sur l'échec des enfants de cet âge à considérer comme impossible l'événement « $1+1=3$ ». Si l'on ajoute quelque chose à partir du singulier (un Babar), on obtient forcément la pluralité (deux ou trois Babar) ; c'est d'ailleurs ce que les enfants semblent exprimer lorsqu'ils disent, pour l'événement « $1+1=3$ », « ça va, y en a plein, t'en as mis plusieurs ». L'acquisition nouvelle du « nombre-dans-le-langage » entraînerait ici la prédominance temporaire, jusqu'à trois ans, d'un traitement holistique (singulier/pluriel), des quantités. Ce mode de traitement (« 1 » contre « 2, 3, 4, etc. ») viendrait perturber les capacités numériques précoces à un moment du développement (entre deux et trois ans), alors qu'il n'existait pas au niveau des réactions visuelles analytiques précises des bébés de quatre-cinq mois qui détectent vraisemblablement aussi bien les événements « $1+1=3$ » que « $1+1=1$ » comme étant impossibles, par rapport à « $1+1=2$ ». Dès lors, lorsque l'enfant de deux ans échoue à détecter l'impossibilité arithmétique de « $1+1=3$ », la difficulté qu'il éprouve pourrait ne pas résider au niveau de ses capacités numériques *per se*, c'est-à-dire dans l'incapacité d'effectuer un calcul précis. Au contraire, toute la difficulté pour l'enfant viendrait de son incapacité à inhiber (cf. Dempster et Brainerd, 1995 ; Houdé, 2000a) le schème d'opposition singulier/pluriel, fortement présent dans ses « acquisitions du moment » et actualisé, amorcé par la situation expérimentale adaptée de Wynn (1992) – où l'on part du singulier (« 1 ») pour, dans un cas, rester au singulier (« $1+1=1$ »), ou pour devenir pluriel dans les deux autres cas (« $1+1=2$ » et « $1+1=3$ »). Par conséquent, deux-trois ans ne serait pas nécessairement la période marquant indubitablement le passage d'une approche strictement perceptive, non numérique, à une approche conceptuelle du nombre. Cela implique que rien n'exclut que les bébés de quatre-cinq mois soient déjà dotés, comme l'avance Wynn (1992, 1995, 1998), de réelles capacités numériques (exprimées par les moyens qui sont les leurs), soumises ensuite à une certaine turbulence cognitive lorsque s'imbrique, entre vingt et vingt-quatre mois, une nouvelle acquisition, celle de la distinction linguistique singulier/pluriel.

Par ailleurs, ce concept d'inhibition est utilisé par Houdé (1997) notamment pour expliquer l'échec massif dans une adaptation de l'épreuve piagétienne de conservation avec des petits nombres (deux et trois) chez les enfants de trois-quatre ans. Alors que ces enfants ont de bonnes performances à l'épreuve des événements possible « $1+1=2$ » (nombre conservé) et impossibles « $1+1=1$ » et « $1+1=3$ » (nombre transgressé), ils échouent avec les mêmes nombres et les mêmes objets (deux et trois Babar) dans l'épreuve de conservation. L'interprétation avancée par Houdé est que l'enfant présente un défaut d'inhibition du « schème dangereux » « longueur=nombre », lié à la prégnance visuo-spatiale des alignements de Babar (voir aussi Houdé et Guichart, 2001). L'enfant posséderait bien des capacités

cognitives lui permettant d'appréhender des petites numérosités, mais ces capacités seraient télescopées par un schème dit « dangereux », correspondant à un aspect prégnant de la situation et dont l'activation entraîne une réponse erronée (« il y a plus d'éléments là où c'est plus long » dans le cas de l'échec à l'épreuve de conservation). En transposant ce raisonnement chez l'enfant de deux-trois ans qui échoue à l'épreuve de l'événement impossible « $1+1=3$ », on peut alors légitimement se demander si les capacités arithmétiques de ces enfants ne seraient pas masquées par un défaut d'inhibition de la distinction linguistique singulier/pluriel, déclenchée par cette situation.

L'ensemble de ces réflexions alimente évidemment le débat sur les relations entre langage et pensée. Sans vouloir traiter exhaustivement cette question, signalons simplement ce que nous dit Oléron (1979) dans son livre *L'enfant et l'acquisition du langage* : « (...) les rapports entre cognition et langage ne sont pas définis indépendamment de la conception qui est développée pour chacun des termes. Il existe dans le langage toute une part qui se rapporte à la description du monde physique et qui, de ce point de vue, n'est pas sans rapport avec les descriptions que permettent les mathématiques et la logique. » (p. 219). Il n'est donc pas étonnant qu'à deux-trois ans le langage en acquisition puisse momentanément interférer avec des concepts mathématiques installés (mais certes pas figés) plus précocement. En ne concevant plus aujourd'hui qu'il n'y a pas de pensée (principes cognitifs) avant le langage, on peut ainsi souligner le fait que l'enfant acquière de nouvelles représentations ou des découpages nouveaux du monde environnant à travers les caractéristiques de sa propre langue (Oléron, 1972), idée déjà développée par Whorf (1956). Ainsi, en ce qui concerne le nombre, l'enfant qui possédait des capacités numériques prélinguistiques (Wynn, 1992, 1995, 1998) va devoir réorganiser ses connaissances, de façon plus ou moins coûteuse, en fonction des classifications propres à sa langue. La question se pose alors de savoir comment se réorganisent les connaissances numériques avec l'apparition du langage et à partir de quelle organisation préverbale, les principales théories traitant des capacités protonumériques (Gallistel et Gelman, 1992 ; Gelman et Gallistel, 1978 ; Spelke et Tsivkin, 2001 ; Wynn, 1995) ne rendant pas compte de la possible interférence induite par l'acquisition de la distinction singulier/pluriel.

Si l'on admet qu'un traitement numérique *per se* peut avoir lieu avant la maîtrise du langage, l'argumentation basée sur les modèles mentaux que l'on trouve dans la littérature, comme celle de Simon (1997) visant à montrer que le bébé et le jeune enfant ont une approche simplement (et seulement) perceptive du nombre (Mix, 1999 ; Siegel, 1973 ; Uller, Carey, Huntley-Fenner et Klatt, 1999 ; Xu, 1993 ; etc.) pourraient être analysée différemment. En effet, la manifestation d'un traitement physique ou perceptif n'implique pas nécessairement de conclure à l'absence d'un traitement cognitif (ici numérique), par défaut. Les deux processus pourraient coexister, et

même interagir, en témoignent les erreurs de raisonnement résultant d'un biais d'ordre perceptif chez l'enfant comme chez l'adulte, alors que l'on accorde à ceux-ci les capacités nécessaires pour résoudre la tâche. L'exemple de l'adulte est très révélateur. Ainsi, Houdé et Moutier (1996, 1999 ; voir aussi Houdé, Zago, Mellet, Moutier, Pineau, Mazoyer et Tzourio-Mazoyer, 2000) montrent que l'adulte, confronté à une tâche de falsification de règles conditionnelles de type « si non-p alors q » (matériel repris de Evans, 1989), échoue dans l'application du raisonnement logique nécessaire pour résoudre la tâche. Faut-il en conclure que l'adulte est « irrationnel », dépourvu de compétences analytiques ? Selon Houdé et Moutier, la réponse est négative. Ils montrent que cet échec est en fait dû à un défaut d'inhibition d'un biais d'appariement perceptif (focalisation sur les éléments cités dans la règle à falsifier). En effet, à l'issue d'un apprentissage à l'inhibition mené sur une tâche comparable (tâche de sélection de Wason, 1968), les performances des sujets à la tâche de falsification de règles sont notablement meilleures. Or, les auteurs n'observent pas d'amélioration des performances avec une procédure contrôle de test-retest, ni même avec un apprentissage expérimental à la logique seule, sans composante d'inhibition. Par conséquent, c'est l'apprentissage à l'inhibition qui est déterminant dans la réussite de la tâche. Les adultes posséderaient donc bien les compétences nécessaires à la résolution de la tâche, mais elles seraient occultées, mises à mal par un biais de nature perceptive.

Si les caractéristiques perceptives d'une situation donnée viennent interférer avec le raisonnement logique de l'adulte, les compétences cognitives des bébés et des enfants ne sont par conséquent pas à l'abri d'une telle interférence ! Il est dès lors nécessaire de faire la distinction entre compétence et performance. Nous utiliserons ces termes en accord avec la définition donnée par Houdé dans le *Vocabulaire de sciences cognitives* (Houdé, Kayser, Koenig, Proust et Rastier, 1998). Ainsi, « (...) un décalage s'observe souvent entre la compétence évaluée (par exemple, une structuration logico-mathématique) et la performance observée, compte tenu du contexte et des facteurs de perception, de mémoire, d'attention, etc. Dans ce cas, la compétence n'est pas nécessairement innée, mais peut renvoyer à une compétence cognitive (ou sociale) construite au cours du développement. » (p. 94). La performance (seule observable et mesurable) n'est donc pas forcément fidèle aux compétences réelles de l'enfant ou même, comme nous venons de le voir, de l'adulte. De fait, les mauvaises performances observées chez un sujet ne témoignent pas nécessairement d'une absence de compétence. Comme le souligne Wynn (1997), les enfants peuvent échouer à une tâche pour des raisons non liées à leur compréhension ou leurs capacités conceptuelles. Ce qui explique que l'on observe parfois, à tout âge, la coexistence du « rationnel construit » et de « l'irrationnel présumé révolu » (Houdé, 1995). C'est sans doute ce qui se manifeste chez l'adulte, présumé rationnel, qui commet des erreurs de raisonnement logique ou chez l'enfant jugé non conservant (et ce

jusqu'à un âge avancé) alors que des capacités numériques sont observées dès quatre-cinq mois.

En conséquence, l'observation d'un défaut ou d'une baisse de performance à un âge donné peut relever de multiples facteurs plutôt que d'une incapacité cognitive proprement dite. On sait combien il faut en psychologie du développement, tant chez l'enfant que chez l'adulte, se méfier des « faux négatifs » (Gelman, 1997 ; Houdé, 2000b), c'est-à-dire de la tendance à conclure trop rapidement qu'une erreur dans une tâche traduit nécessairement un défaut des capacités conceptuelles requises pour sa résolution. Là réside toute la difficulté de l'étude des compétences précoces de l'enfant, ainsi que le risque de conclure à une absence illusoire de capacités, par défaut.

LES BÉBÉS, CALCULATEURS PRÉCOCS ?

En conclusion, l'ensemble de ces données expérimentales nous conduit à penser que le bébé, très précocement, puisse être doté de capacités numériques préverbales lui permettant d'appréhender certains événements de son environnement. Ceci ne veut bien sûr pas dire que le bébé les utilise inévitablement, ni qu'il possède une maîtrise numérique à toute épreuve. Par ailleurs, lorsqu'ils sont disponibles, il est compréhensible que le bébé (comme l'enfant et l'adulte) utilise plus facilement des indices perceptifs et heuristiques, plus aléatoires mais cognitivement moins coûteux. La non observation de capacités numériques préverbales ne signifie donc pas forcément qu'elles sont effectivement absentes chez les bébés. Il est donc nécessaire d'analyser avec prudence les échecs de ces jeunes enfants.

Ainsi, l'acquisition du langage ne serait pas un outil obligatoire nécessaire pour abstraire des numérosités, même si le langage a forcément une incidence sur l'organisation des capacités numériques des bébés, déjà en place à un niveau préverbal. Malheureusement, à l'heure actuelle, aucun modèle ne rend véritablement compte de l'ensemble des résultats expérimentaux, ni de la place du langage dans le développement des compétences numériques.

Bibliographie

- Antell, S. E., & Keating, D. P. (1983). Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development*, 54, 695-701.
- Baillargeon, R. (1987). Object permanence in 3.5- and 4.5-month-old infants. *Developmental Psychology*, 23, 655-664.
- Bideaud, J. (1997). La construction du nombre chez le jeune enfant : Une bonne raison d'affûter le rasoir d'Occam. *Bulletin de Psychologie*, 50 (427) « Hommage à Pierre Oléron », 19-28.
- Boysson-Bardies, B. de (1996). *Comment la parole vient aux enfants*. Paris: Odile Jacob.

- Canfield, R. L., & Smith, E.G. (1996). Number-based expectations and sequential enumeration by 5-month-old infants. *Developmental Psychology*, *32*, 269-279.
- Clearfield, M.W., & Mix, K.S. (1999). Number vs. contour length in infants' discrimination of small visual sets, *Psychological Science*, *10*, 408-411.
- Cohen, L., & Dehaene, S. (1991). Neglect dyslexia for number? A case report. *Cognitive Neuropsychology*, *8*, 39-58.
- 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*, Hillsdale, NJ, Erlbaum, 157-192.
- Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R. & Tsivkin, S. (1999). Sources of Mathematical thinking: Behavioural and brain-imaging evidence. *Science*, *284*, 970-974.
- Dempster, F.N. & Brainerd, C.J. (1995). *Interference and inhibition in cognition*. New York: Academic Press.
- Evans, J.St.B.T. (1989). *Biases in human reasoning*. Hove and London: Lawrence Erlbaum.
- Feigenson, L., & Carey, S. (2000). *Poster presented at the biennial meeting on the International Conference on Infant Studies*, Brighton, June.
- Feigenson, L., Carey, S., & Spelke, E. (2002). Infants' discrimination of number vs. continuous extend. *Cognitive Psychology*, *44*, 33-66.
- Fischer, J.P. (1991). Le subitizing et la discontinuité après 3. In J. Bideau, C. Meljac & J.P. Fischer (Eds). *Les chemins du nombre* (pp 235-258). Lille: Presse Universitaire de Lille.
- Gallistel, C.R. & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, *44*, 43-74.
- Gelman, R. (1997). Constructing and using conceptual competence. *Cognitive Development*, *12*, 305-313.
- Gelman, R. & Gallistel, C.R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Houdé, O. (1995). *Rationalité, développement et inhibition*. Paris: PUF.
- Houdé, O. (1997). Numerical development: From the infant to the child. Wynn's (1992) paradigm in 2- and 3-year olds. *Cognitive Development*, *12*, 373-391.
- Houdé, O. (2000a). Inhibition and cognitive development: Object, number, categorization and reasoning. *Cognitive Development*, *15*, 63-73.
- Houdé, O. (2000b). Développement cognitif et fonctions exécutives : Inhibition et « faux négatifs ». *Revue de Neuropsychologie*, *10*, 459-470.
- Houdé, O. & Guichart, E. (2001). Negative priming effect after inhibition of number/length interference in a Piaget-like task. *Developmental Science*, *4*, 71-74.
- Houdé, O., Kayser, D., Koenig, O., Proust, J. & Rastier, F. (1998). *Vocabulaire de sciences cognitives*. Paris: PUF.
- Houdé, O. & Moutier, S. (1996). Deductive reasoning and experimental inhibition training : The case of the matching bias. *Current Psychology of Cognition*, *15*, 409-434.

- Houdé, O. & Moutier, S. (1999). Deductive reasoning and experimental inhibition training : The case of the matching bias. New data and reply to Girotto. *Current Psychology of Cognition*, 18, 75-85.
- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 721-728.
- Huttenlocher, J., Jordan, N. & Levine, S.C. (1994). A mental model for early arithmetic. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123, 284-296.
- Karmiloff-Smith, A. (1992) *Beyond modularity. A developmental perspective on cognitive science*. Cambridge: MIT Press.
- Koechlin, E., Deheane, S. & Mehler, J. (1997). Numerical transformation in five-months-old infants. *Mathematical Cognition*, 3 (2), 89-104.
- Mandler, G. & Shebo, B.J. (1982). Subitizing: An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111, 1-22.
- Mix, K.S. (1999). Similarity and numerical equivalence : Appearances count. *Cognitive Development*, 14, 269-297.
- Mix, K.S., Cohen Levine, S., & Huttenlocher, J. (1997). Numerical abstraction in infants: another look, *Developmental Psychology*, 33 (3), 423-428.
- Moore, D., Benenson, J., Reznick, J.S., Peterson, M., & Kagan, J. (1987). Effect of auditory numerical information on infants' looking behavior: contradictory evidence, *Developmental Psychology*, 23 (5), 665-670.
- Oléron, P. (1972). *Langage et développement mental*. Bruxelles: Dessart.
- Oléron, P. (1979). *L'enfant et l'acquisition du langage*. Paris: PUF.
- Piaget, J. & Szeminska, A. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchâtel: Delachaux & Niestlé.
- Siegel, L.S. (1973). The role of spatial arrangement and heterogeneity in the development of concepts of numerical equivalence. *Canadian Journal of Psychology*, 27, 351-355.
- Simon, T.J. (1997). Reconceptualizing the origins of number knowledge. A « non-numerical » account. *Cognitive Development*, 12, 349-372.
- Simon, T.J., Hespos, S.J. & Rochat, P. (1995). Do infants understand simple arithmetic? A replication of Wynn (1992). *Cognitive Development*, 10, 253-269.
- Sophian et Adams
- Spelke, E.S. (2000). Core knowledge. *American Psychologist*, 55, 1233-1243.
- Spelke, E.S. & Tsivkin, S. (2001). Initial knowledge and conceptual change: space and number. In M. Bowerman et C. Levinson (Eds.), *Language acquisition and conceptual development* (pp. 70-97). Cambridge: Cambridge University Press.
- Starkey, P. & Cooper, R.G. (1980). Perception of number by human infants. *Science*, 210, 1033-1035.
- Starkey, P., Spelke, E.S. & Gelman, R. (1983). Detection of intermodal numerical correspondences by human infants. *Science*, 222, 179-181.
- Starkey, P., Spelke, E.S. & Gelman, R. (1990). Numerical abstraction by human infants. *Cognition*, 39, 171-172.

- Strauss, M.S. & Curtis, L.E. (1981). Infant perception of numerosity. *Child Development*, *52*, 1146-1152.
- Tan, L.S.C. & Bryant, P. (2000). The cues that infants use to distinguish discontinuous quantities: evidence using a shift-rate recovery paradigm. *Child Development*, *71*, 1162-1178.
- Uller, C., Carey, S., Huntley-Fenner, G. & Klatt, L. (1999). What representations might underlie infant numerical knowledge? *Cognitive Development*, *14*, 1-36.
- van Loosbroek, E. & Smitsman, A.W. (1990). Visual perception of numerosity in infancy. *Developmental Psychology*, *26*, 916-922.
- Vauclair, J. (2000). Connaissances protonumériques chez le primate et le jeune enfant. In M. Pesenti et X. Seron (Eds.), *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 11-32). Marseille: Solal.
- Wakeley, A., Rivera, S. & Langer, J. (2000). Can young infants add and subtract? *Child Development*, *71*, 1525-1534.
- Wason, P. (1968). Reasoning about a rule. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *20*, 273-281.
- Whorf, B.L. (1956). *Language, thought and reality*. Cambridge: MIT.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, *358*, 749-750.
- Wynn, K. (1995). Origins of numerical knowledge. *Mathematical Cognition*, *1*, 35-60.
- Wynn, K. (1996). Infants' individuation and enumeration of actions. *Psychological Science*, *7*, 164-169.
- Wynn, K. (1998). Psychological foundation of number: Numerical competence in human infants. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*, 296-303.
- Xu, F. (1993). *The concept of object identity*. Paper presented at the Biennial Meeting of the Society for Research in Child Development, New Orleans, LA.
- Xu, F. & Spelke, E.S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, *74*, B1-B11.