

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

PAR
MICHEL PARÉ

ÉTUDE DE LA COORDINATION D'UN MOUVEMENT
DE PRÉHENSION CHEZ DES ENFANTS ÂGÉS DE 2 À 9 ANS

NOVEMBRE 1994

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

RÉSUMÉ

L'étude du développement des composantes cinétiques de la préhension s'inspire des travaux de Johansson et Westling (1984a, 1984b, 1987, 1988) chez l'adulte. Ces auteurs ont démontré que la manipulation d'un objet implique le contrôle précis des forces de pince et de soulèvement, basé sur des mécanismes intégrant les informations afférentes concernant cet objet et les connaissances des propriétés physiques d'objets manipulés antérieurement (Johansson, 1991). Le sujet adulte est ainsi capable d'anticiper les composantes cinétiques pour manipuler adéquatement un objet et programmer le geste selon un ratio entre la force de pince et de soulèvement. Cette capacité suggère la présence d'un modèle central de modulation de la force isométrique (Johansson, 1991; Teasdale, Forget, Bard, Paillard, Fleury et Lamarre, 1993). Des études de Forssberg, Eliasson, Kinoshita, Johansson, Westling et Gordon (1991, 1992) démontrent que les mécanismes du contrôle anticipé de la saisie, soit les modes de coordination parallèle et séquentielle du geste retrouvés chez l'adulte, ne sont pas innés. Ceux-ci apparaissent entre 2 et 4 ans et ne sont pas entièrement développés avant plusieurs années. Toutefois, Forssberg et al. (1991, 1992) ne font pas référence au développement des mécanismes qui sous-tendent l'apparition du patron adulte. Dans un autre ordre d'idées, les travaux de Dugas, Marchand, Paré et Mineault (1993) démontrent la présence d'un ratio force de pince/tension réelle homogène chez l'adulte au cours des essais.

Le but de la présente étude est d'établir que l'émergence d'un patron adulte de coordination des forces préhensiles est accompagnée de l'apparition d'une marge de sécurité adaptée au poids des objets manipulés. On veut également vérifier l'apparition d'une interaction entre la force de pince et l'accélération

verticale de l'objet avec la maturation pour maintenir un ratio force de pince/tension réelle homogène.

Un total de 36 sujets, répartis en 8 groupes d'âge au sein de 2 protocoles expérimentaux, ont pris part au projet. Les sujets devaient, en utilisant la pince digitale, soulever un objet dont la taille et le poids variaient et le déposer sur une cible surélevée de 15 cm avec leur main dominante. L'objet était muni d'une jauge de pression pour mesurer la force de pince. Le déplacement était échantillonné à l'aide du système *Peak Performance*; à cet effet des marqueurs réfléchissants étaient collés sur l'objet et la main du sujet.

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent la présence de trois stades de développement du mouvement de préhension. Ces stades se distinguent dans les groupes d'âge de 2 à 5 ans, de 6 à 8 ans et de 9 ans. La maturation se manifeste dans le premier stade par l'apparition d'une symétrie dans le patron d'accélération et de décélération verticale de l'objet manipulé. On constate également l'utilisation d'une bouffée principale d'augmentation de la force de pince qui marque le début de l'organisation du contrôle anticipé du geste. Par ailleurs, il y a une modification importante dans la modulation de la force de pince et de l'accélération verticale de l'objet. On constate l'évolution par la transition d'une relation linéaire négative à 2 ans vers une relation linéaire positive à 3 ans qui se consolide jusqu'à 9 ans. Le deuxième stade se distingue par une phase exploratoire, afin de trouver une solution adéquate à l'application de la force de pince et à la modulation de l'accélération verticale. À partir de 6 ans, on note une diminution de la marge de sécurité pour atteindre une valeur minimal et stable à 9 ans. Enfin, à 9 ans l'enfant démontre un contrôle du geste nécessitant encore un raffinement pour atteindre le niveau de performance de l'adulte.

REMERCIEMENTS

Je veux témoigner ma reconnaissance au professeur Claude Dugas pour l'encadrement soutenu et la confiance qu'il a su m'accorder pendant la réalisation de ce projet. Je remercie également messieurs Denis Marchand et Claude Brouillette pour leur support tout au long de l'expérimentation.

Mes remerciements s'adressent aussi aux enfants et aux parents, ayant participé à l'étude, pour leur disponibilité. Enfin, merci aux organismes qui m'ont permis, par leur proche collaboration, de recruter la majorité des sujets.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
CHAPITRE	
I. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE	1
Composantes cinétiques de la préhension chez l'adulte	3
Composantes cinétiques de la préhension chez l'enfant	7
Hypothèses	11
II. MÉTHODE	13
Sujets	13
Tâche	14
Appareillage	14
Procédures	18
Acquisition et analyse des données	21
III. RÉSULTATS	23
Déplacement vertical de l'objet	23
Accélération verticale de l'objet	26
Force de pince	36
Tension réelle	46
IV. DISCUSSION	49
Temps d'exécution du mouvement	49
Composante cinématique de la saisie chez l'enfant	51

	Page
Composante cinétique de la saisie chez l'enfant	53
Développement de la préhension	55
V. CONCLUSION	58
RÉFÉRENCES	60
ANNEXES	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Page
1. Covariation du poids et de la taille des nouveaux objets	17
2. Comparaison des moyennes des groupes de 3 et 4 ans aux autres groupes d'âge pour l'accélération verticale maximale de l'objet	29
3. Comparaison des moyennes des groupes de 5 et 8 ans aux groupes plus âgés pour l'accélération verticale maximale de l'objet	34
4. Analyse de régression de l'accélération verticale en fonction de la force de pince	42
5. Analyse de régression sur la moyenne des latences d'accélération verticale et de la force de pince	43

LISTE DES FIGURES

Figures	Page
1. Représentation schématique du fonctionnement du SNC pour le contrôle d'un mouvement de préhension	5
2. Principales phases d'un mouvement de saisie	6
3. Plan de phase entre la force de pince et la force de soulèvement pour la phase précédant la mise en charge et pendant le soulèvement de l'objet	9
4. Schéma et photo de l'objet utilisé pour mesurer la force de pince	15
5. Schéma et photo du nouvel objet utilisé pour mesurer la force de pince	16
6. Disposition du montage expérimental selon la perspective des caméras	19
7. Déplacement vertical du petit objet de 110 g (P3) en fonction du temps pour un sujet de 3 ans, de 4 ans, de 8 ans et un sujet adulte	25
8. Accélération verticale du petit objet de 110 g (P3) en fonction du temps pour un sujet de 2 ans, de 3 ans, de 4 ans et un sujet adulte	28
9. Régression entre les valeurs maximales d'accélération et de décélération verticale de l'objet pour tous les sujets de P2 et P3 et excluant les sujets de 2 et 3 ans pour P2 et P3	31
10. Latences pour atteindre les valeurs maximales d'accélération et de décélération verticale en fonction de l'âge	32

Figures	Page
11. Moyenne des valeurs maximales d'accélération verticale de l'objet en fonction de trois groupes d'âge pour P2 et P3 dans l'ensemble des conditions	33
12. Moyenne des valeurs maximales de décélération verticale de l'objet en fonction de trois groupes d'âge pour P2 et P3 dans l'ensemble des conditions	33
13. Écart-type des valeurs maximales d'accélération et de décélération verticale de l'objet en fonction de l'âge pour P3	35
14. Écart-type de la latence pour atteindre l'accélération et la décélération maximale de l'objet en fonction de l'âge	35
15. Force de pince en fonction du temps pour un objet de 50 g et de 110 g (P2) pour un sujet de 2 ans et un de 6 ans	37
16. Première dérivée de la force de pince du petit objet de 110 g (P3) en fonction du temps pour un sujet de 3 ans, de 6 ans, de 9 ans et un sujet adulte	38
17. Première dérivée de la force de pince du petit objet de 110 g (P3) en fonction du temps pour un sujet de 4 ans	39
18. Latence pour atteindre le maximum de la force de pince en fonction de l'âge pour P3	40
19. Régression entre les valeurs maximales d'accélération verticale de l'objet et la force de pince pour les sujets de 2 ans pour P2 et de 3 et 4 ans, de 6 à 8 ans, de 9 ans et d'âge adulte pour P3 dans l'ensemble des conditions	45

Figures	Page
20. Indice d'homogénéité de la tension réelle en fonction de l'âge dans le protocole P3 pour la condition taille variable-poids constant	47
21. Marge de sécurité moyenne pour la phase de soulèvement en fonction de l'âge	48

CHAPITRE I

Introduction et problématique

La préhension représente une habileté motrice fondamentale du répertoire de mouvement chez l'humain. Elle permet l'exploration et l'interaction avec l'environnement dans lequel nous vivons. Cette habileté se développe au cours de la maturation de l'enfant (Dodwell, Muir et DiFranco, 1976; Ruff et Halton, 1978) et les théories de Twitchell (1970) et McDonnell (1979) sur l'origine de la préhension suggèrent une activité motrice rudimentaire dès la naissance. Les résultats de von Hofsten (1982) confirment d'ailleurs que l'enfant possède dans son héritage phylogénique la capacité de générer des activités préhensiles en considérant le mouvement d'atteinte comme une composante de la préhension. Avec la maturation du système nerveux central (SNC), par une augmentation de la myélinisation et des connexions entre le cortex et les structures sous-corticales, se développe un contrôle des muscles distaux des membres supérieurs. De plus, avec cette maturation, le cortex module l'activité réflexe gérée par le tronc cérébral.

La recherche sur le développement des activités préhensiles a suivi principalement deux avenues. La première concerne la maturation des mouvements d'atteinte qui sont déjà présents à la naissance sous une forme rudimentaire (*pre-reaching*, von Hofsten 1982). Trois facteurs influencent la maturation de ces mouvements; (i) les réflexes primitifs; (ii) la coordination oeil-main; (iii) le développement de la posture. On peut observer, chez le nourrisson, qu'un mouvement d'extension du bras entraîne dans une synergie réflexe

l'extension des doigts nuisant ainsi à l'enfant dans sa capacité à saisir des objets. Au cours du deuxième mois, cette synergie disparaît pour permettre le contrôle de la fermeture des doigts (von Hofsten et Fazel-Zandy, 1984). Concernant la maturation de la coordination oeil-main, Bushnell (1985) suggère que le développement du mouvement d'atteinte suivrait deux directions. De 0 à 2 mois, le rôle de la vision se limite au déclenchement du geste. Puis, avec l'apparition de la coordination oeil-main, le mouvement passe vers le quatrième mois à un mode de contrôle guidé visuellement (McDonnell, 1975; Lasky, 1977; von Hofsten, 1979).

Enfin, la posture influence le développement du mouvement d'atteinte puisqu'un geste qui éloigne la main de l'axe central du corps modifie son centre de masse, causant ainsi un déséquilibre. Donc, l'enfant doit établir un équilibre du tronc qui permet d'anticiper l'effet de déstabilisation du mouvement d'atteinte. Dans cette optique, le SNC doit s'assurer de la stabilité du tronc avant ou simultanément au déclenchement du mouvement d'atteinte. À ce sujet, Rochat (1992) démontre l'importance de la posture dans la conduite d'un mouvement de préhension chez des enfants âgés de 5 et 6 mois, ne pouvant se maintenir sans aide en position assise. Ces enfants sont incapables de produire un mouvement d'atteinte avec un seul bras. Ils laissent voir un mouvement symétrique par une synergie des deux bras pouvant réduire le nombre de degrés de liberté à contrôler pour maintenir la posture durant le geste. Par ailleurs, une étude de von Hofsten et Woollacott (1990) démontre que les muscles du tronc sont activés en anticipation d'un geste d'atteinte, avec une seule main, chez des enfants de 9 mois.

Ceci suggère que le SNC intègre rapidement le contrôle anticipé de la posture pour faciliter la conduite du mouvement de préhension.

Dans la seconde avenue, les recherches portent sur l'étude des mouvements de saisie et plus particulièrement sur les composantes cinématiques et cinétiques de ce geste, telles que l'orientation de la main, l'ouverture et la configuration des doigts ainsi que le contrôle de la force de pince exercée par le pouce et l'index. D'une part, les principales conclusions concernant les composantes cinématiques démontrent que l'enfant de 6 mois positionne sa main en anticipation de l'orientation de l'objet. Ceci révèle une utilisation efficace à cet âge de certains indices visuels (Lockman, Ashmead et Bushnell, 1984; von Hofsten et Fazel-Zandy, 1984; Morrongiello et Rocca, 1986). D'autre part, dans l'étude de von Hofsten et Rönnqvist (1988) sur le développement de l'ouverture des doigts chez des enfants de 5-6 mois, 9 mois et 13 mois, les résultats laissent voir que seulement les enfants des groupes de 9 et 13 mois ajustent l'ouverture de leurs doigts en fonction de la taille de l'objet à saisir. La stratégie employée par les plus jeunes sujets consiste à produire une ouverture maximale quelle que soit la taille de l'objet. Ces résultats, et les études sur l'orientation, démontrent que les indices visuels pertinents ne sont pas tous perçus ou traités chez l'enfant de 6 mois. À cet âge, le SNC ne peut donc pas gérer toutes les finalités du mouvement.

Composantes cinétiques de la préhension chez l'adulte

Concernant la force de pince, les recherches chez l'enfant s'inspirent des travaux de Johansson et Westling (1984a, 1984b, 1987, 1988) chez l'adulte, qui

décrivent le patron de coordination des forces de pince et de soulèvement. L'adulte programme la saisie d'un objet en anticipation en considérant les caractéristiques extrinsèques de l'objet, telles que sa taille et sa texture (Johansson, 1991; Gordon, Forssberg, Johansson et Westling, 1991a, 1991b, 1991c). En utilisant une banque d'expériences contenues dans une mémoire sensorielle (Squire, 1986), l'adulte développe une représentation mentale de l'objet pour qu'au moment du contact, l'objet soit saisi avec une force adéquate. En d'autres termes, le sujet estime le poids de l'objet et le coefficient de friction en fonction de la taille et de la texture, sur la base des informations visuelles disponibles, afin de moduler l'augmentation des forces de pince et de soulèvement. Cette capacité s'explique entre autres par la présence d'un modèle central de modulation des forces isométriques qui permet de générer une force adéquate pour un objet donné (Johansson, 1991; Teasdale, Forget, Bard, Paillard, Fleury et Lamarre, 1993) (Figure 1).

Le schéma de la Figure 1 illustre les principales conclusions de Johansson et Westling (1984a, 1984b, 1987, 1988) concernant le fonctionnement du SNC en ce qui a trait au contrôle d'un mouvement de préhension. Le schéma présente les interactions entre la vision, deux niveaux de mémoire et les structures prémotrices et motrices du SNC pour la planification et l'exécution d'un geste de saisie.

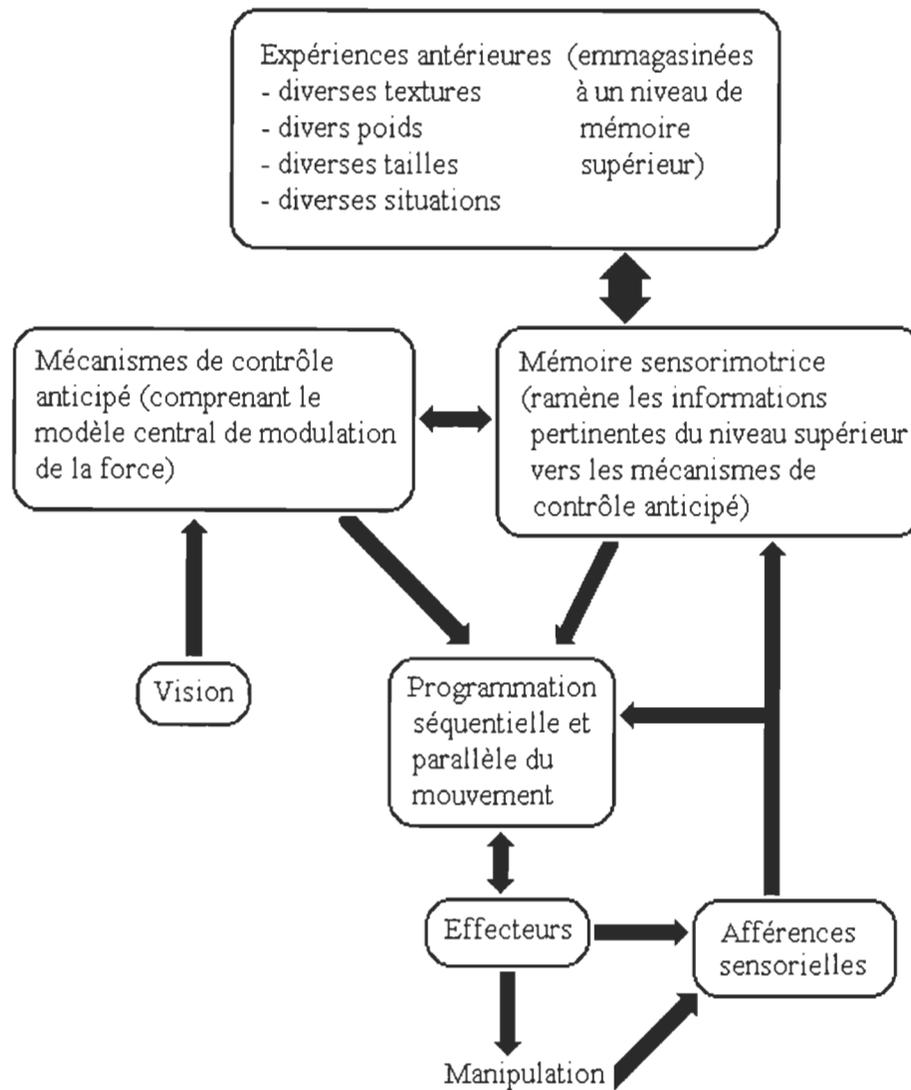


Figure 1. Représentation schématique du fonctionnement du SNC pour le contrôle d'un mouvement de préhension.

Johansson et Westling (1984a, 1984b, 1987, 1988) observèrent quelques particularités liées à la coordination employée au cours du mouvement de saisie. Il existe une augmentation en parallèle de la force de soulèvement exercée par le bras et de la force de pince exercée par le pouce et l'index (Figure 2, période *b*).

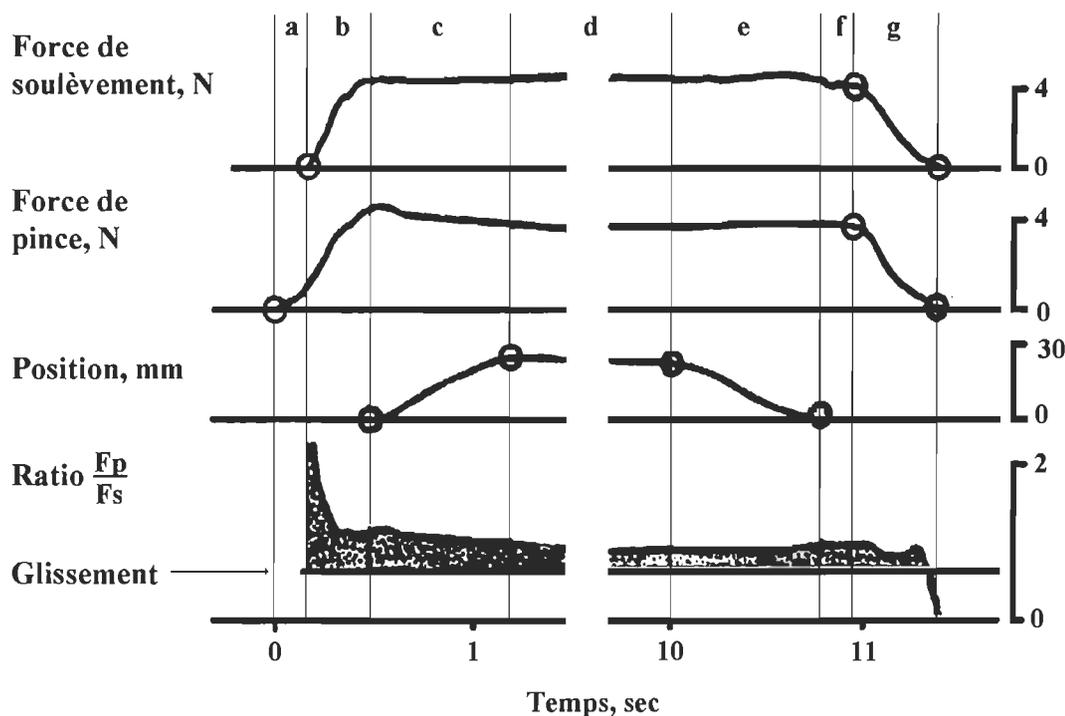


Figure 2. Principales phases d'un mouvement de saisie. La force de soulèvement, la force de pince, la position verticale, le ratio entre la force de pince et de soulèvement (F_p/F_s) et le ratio de glissement sont exprimés pour un essai en fonction du temps. Les périodes indiquées sont: *a*- phase précédant la mise en charge; *b*- soulèvement; *c*- transition; *d*- phase statique; *e*- remise en place; *f*- délai; *g*- dépôt. La région ombrée indique la marge de sécurité pour éviter les glissements (tiré de Johansson, 1991).

Cette coordination naît d'une synergie musculaire qui entraîne la co-activation d'une grande partie des muscles du bras et de l'avant-bras (Smith, 1981). Par ailleurs, ce mode de coordination permet au SNC de moduler son action par l'intermédiaire d'un seul paramètre, le ratio force de pince/force de soulèvement (F_p/F_s). Ce ratio varie d'un objet à l'autre en fonction du poids et de la texture et en fonction d'une marge de sécurité que s'accorde l'individu pour s'emparer de l'objet. La marge de sécurité correspond à la différence entre le ratio minimal nécessaire pour saisir un objet (ratio de glissement, Figure 2) et le ratio qu'utilise l'individu pour effectivement prendre l'objet. Une seconde particularité du mouvement est la présence d'un mode de coordination séquentielle. Le déclenchement de cette coordination se fait sur la base du message des mécanorécepteurs au contact de l'objet et permet au système d'émettre les commandes musculaires responsables d'agripper l'objet.

Composantes cinétiques de la préhension chez l'enfant

Chez l'enfant, l'évolution des forces de pince et de soulèvement est marquée par le passage d'une application exclusivement séquentielle à une synchronisation de l'augmentation des forces (Forssberg, Eliasson, Kinoshita, Johansson, Westling et Gordon, 1991, 1992). Plus précisément, l'enfant au cours de ses premières tentatives de saisie (à partir du quatrième mois), augmente sa force de pince jusqu'à l'atteinte d'un maximum avant d'initier un mouvement de soulèvement. Ceci démontre clairement que la synergie musculaire décrite par Johansson (1991) n'est pas innée. Le geste de l'enfant ne se fait pas selon une stratégie d'anticipation, mais plutôt avec un mode exploratoire qui se manifeste par plusieurs bouffées d'augmentation de la force de pince. Cette coordination

exploratoire se retrouve aussi chez l'adulte dans une situation d'incertitude avec une mauvaise anticipation du poids de l'objet (Johansson, 1991). Par ailleurs, Forssberg et al. (1991) estiment que le patron adulte de coordination parallèle des forces apparaît vers 2 ans étant donné que ces enfants démontrent l'utilisation d'une bouffée principale d'augmentation de la force de pince.

Toutefois, comme on le remarque à la Figure 3, le patron de l'enfant de 4 ans ressemble davantage à celui de l'adulte que le patron des enfants de 2 ans. Ce dernier démontre encore la présence d'une élévation asynchrone des forces, avec la force de pince qui augmente avant le début de l'augmentation de la force de soulèvement. Ceci révèle que l'enfant n'est pas encore apte à anticiper correctement les paramètres nécessaires à la saisie de l'objet sans avoir à réajuster son geste. Cette incapacité d'anticiper les paramètres du mouvement, particulièrement la coordination des forces en fonction du poids de l'objet, est probablement liée au manque d'expérience de l'enfant. L'enfant ne disposant pas d'une large banque d'expériences de préhension doit utiliser une stratégie circonspecte pour que le geste soit accompli avec une certaine précision. De plus, une augmentation importante du nombre de manipulations exécutées et une calibration des relations existant entre la taille et le poids des objets favorise le développement du modèle de modulation de la force isométrique. Finalement, une étude de Gordon, Forssberg, Johansson, Eliasson et Westling (1992) démontre que ce n'est qu'à partir de 30 à 36 mois que l'enfant commence à utiliser les informations visuelles concernant la taille de l'objet pour anticiper la force à générer pour saisir un objet. Ceci vient appuyer l'idée que l'enfant, à cause de son

manque d'expérience, n'est pas apte à anticiper les exigences du geste de préhension.

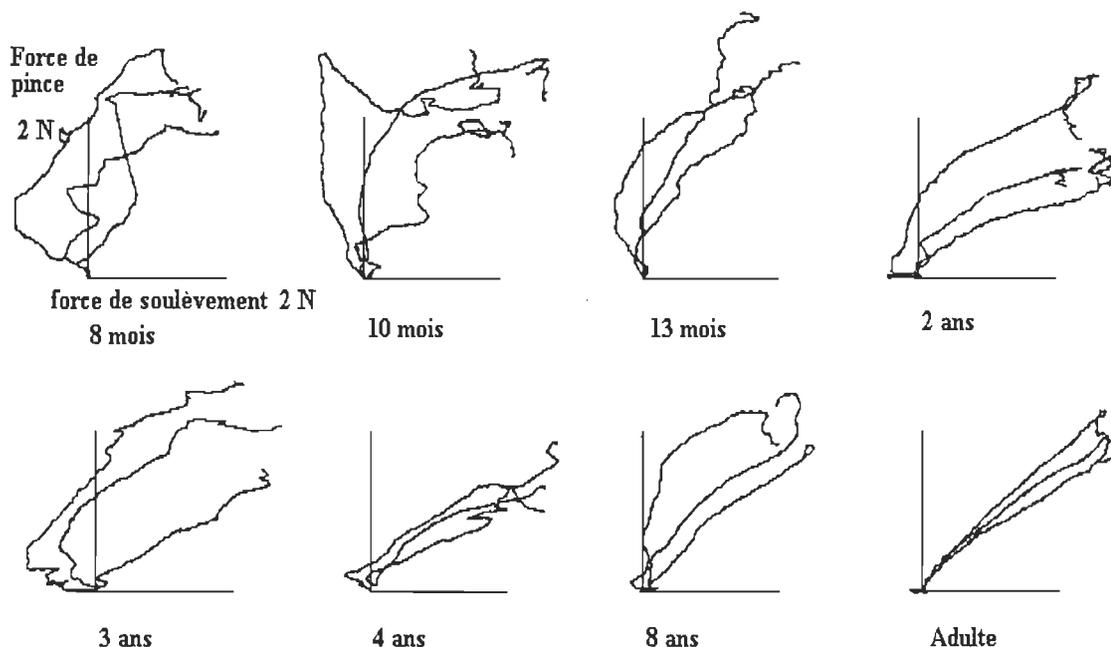


Figure 3. Plan de phase entre la force de pince et la force de soulèvement pour la phase précédant la mise en charge et pendant le soulèvement de l'objet. Trois essais sont présentés pour chaque sujet (tiré de Forssberg et al., 1991).

Dans l'étude de Forssberg et al. (1991) sur l'évolution du ratio F_p/F_s ont ne fait pas référence à la marge de sécurité. Les travaux de Johansson et Westling (1984a, 1984b, 1987, 1988) chez l'adulte démontre qu'on s'accorde une marge de sécurité relativement constante en fonction du poids et de la texture des objets, ce qui permet une manipulation efficace de l'objet. Dans cette optique, il devient intéressant de quantifier l'évolution du ratio F_p/F_s en fonction de la marge de

sécurité dans le but d'expliquer le développement du modèle central de modulation de la force isométrique.

Toutefois, ceci exige que le SNC puisse se référer à une valeur de comparaison afin d'établir le ratio F_p/F_s adéquat à la saisie d'un objet donné. L'opérationnalisation des mécanismes proposés dans le modèle central de modulation de la force permet entre autres d'établir la valeur de comparaison, le ratio de glissement, et par le fait même de programmer en anticipation le ratio F_p/F_s adéquat pour la saisie d'un objet donné. L'étude de l'évolution du ratio F_p/F_s peut permettre aussi de déterminer à quel âge apparaissent les premiers rudiments de contrôle anticipé de la saisie.

Dans le même ordre d'idées, la tension réelle développée pour maintenir un objet entre les doigts au cours du soulèvement, en fonction de l'accélération appliquée à l'objet, présente un ratio force de pince/tension réelle (F_p/TR) relativement homogène chez l'adulte au cours des essais (Dugas, Marchand, Paré et Mineault, 1993). La tension réelle s'exprime sous la forme suivante:

$$\text{Tension réelle (TR)} = \text{masse de l'objet} \times (\text{accélération gravitationnelle (9,81 m/s}^2\text{)} \\ + \text{accélération verticale de l'objet})$$

Équation 1.

où TR représente le poids soulevé par le sujet; c'est à dire que le calcul de cette variable tient compte de la valeur d'allègement mesurée par une plate-forme de force.

Les résultats de Dugas et al. (1993) appuient l'idée que le geste est coordonné en anticipation et implique la présence d'un modèle central de modulation de la force isométrique sur lequel repose la programmation anticipée du geste. L'évolution de ce ratio devient donc intéressante à étudier chez l'enfant puisqu'il permettrait d'établir comment et à quel moment le geste devient programmé en anticipation de façon efficace.

Hypothèses

En résumé, la manipulation d'un objet implique le contrôle précis des forces de pince et de soulèvement, basé sur des mécanismes intégrant les informations afférentes (vision et proprioception) concernant l'objet, avec les connaissances des propriétés physiques des objets manipulés antérieurement, emmagasinées dans la mémoire à long terme. Par ailleurs, le contrôle anticipé de la force de pince semble reposer sur un modèle central de modulation de la force isométrique. Enfin, les études de Forssberg et al. (1991) et Gordon et al. (1992) démontrent que l'enfant ne possède pas les mécanismes de contrôle de la saisie à sa naissance et que ceux-ci apparaissent entre 2 et 4 ans.

Ce qu'on veut maintenant établir c'est que l'émergence d'un patron adulte de coordination parallèle des forces de pince et de soulèvement vers 4 ans est accompagné de l'apparition d'une marge de sécurité adaptée au poids des objets manipulés.

Hypothèse 1: La marge de sécurité évolue de façon inversement proportionnelle avec l'âge pour atteindre vers la huitième année une valeur minimale et relativement constante.

D'autre part, les travaux de Dugas et al. (1993) démontrent la présence d'un ratio F_p/TR homogène chez l'adulte au cours des essais. Ceci implique la présence d'une invariance dans la modulation de la force de pince et de l'accélération verticale imposée à l'objet. Une explication alternative serait la présence d'une interaction étroite entre la force de pince et l'accélération verticale pour maintenir l'homogénéité du ratio.

Hypothèse 2: À partir de 4 ans apparaît une interaction entre l'accélération verticale et la force de pince qui conduit à un ratio F_p/TR plus constant avec l'âge.

CHAPITRE II

Méthode

Sujets

L'échantillon est composé d'enfants âgés de 2 à 9 ans, sans discrimination pour le sexe et la dominance manuelle. Tous les sujets étaient naïfs face aux objectifs de l'étude. Les sujets furent recrutés sur une base volontaire auprès des parents par l'envoi de lettres dans quatre garderies et six écoles primaires de la région immédiate de Trois-Rivières. Le seuil inférieur de 2 ans est utilisé pour cibler l'apparition de la coordination parallèle du geste de préhension (Forsberg et al., 1991). La limite de 9 ans est établie en fonction du niveau de maturation du mouvement, soit l'établissement d'un patron adulte (Forsberg et al., 1991). Les sujets sont divisés en huit sous-groupes (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9 ans) et chaque sous-groupe comporte de quatre à cinq sujets totalisant 36 sujets pour l'échantillon étudié.

Un groupe contrôle formé de trois sujets volontaires, naïfs face aux objectifs de l'étude, âgés de 25 à 46 ans, ont également participé à l'expérimentation. Les résultats de ce groupe définissent une mesure étalon dans le but de comparer le patron de mouvement des enfants au patron adulte de préhension. Enfin, deux autres sujets, âgé de 23 et 31 ans, ont réalisé un protocole expérimental pour établir un ratio de glissement auquel est comparé l'ensemble des résultats de l'échantillon.

Tâche

Le sujet doit saisir un objet placé devant lui, reposant sur une table, et le déplacer sur une courte distance (20 cm) pour le déposer sur une cible surélevée de 15 cm (Figure 6). La tâche est clairement expliquée à l'enfant et plusieurs saisies de démonstration sont effectuées par l'expérimentateur. Les sujets n'exécutent aucun essai de pratique.

Appareillage

Enregistrement cinétique. Pour l'acquisition de l'ensemble des données relatives à chaque variable, trois instruments de mesure sont utilisés. La force de pince définie comme la force de compression (exprimée en newtons), exercée par les doigts contre l'objet, est mesurée en utilisant une jauge de pression (OMEGA Engineering, modèle PX 136-005GV) fixée sur une bouteille de plastique souple remplie d'eau (Figure 4). La pression exercée sur la bouteille provoque une élévation de la pression interne qui est transmise à une poire suspendue à l'intérieur de la bouteille. À l'extrémité externe de cette poire, la jauge capte les variations de pression à l'intérieur de la poire. Cette procédure a comme avantage de répartir également la pression exercée sur l'objet sans contraindre l'enfant à une configuration spécifique des doigts. Une étude de validité et de fidélité réalisée avec un producteur de force mécanique pour chaque objet démontre, d'une part, un haut coefficient de fidélité avec une corrélation variant de 0,984 à 0,999 en test/re-test (Annexe A). D'autre part, nous avons obtenu un haut niveau de validité avec une corrélation variant de 0,995 à 0,999 entre la force réelle appliquée et la valeur prédite par une équation de calibration, calculée par une analyse de régression.

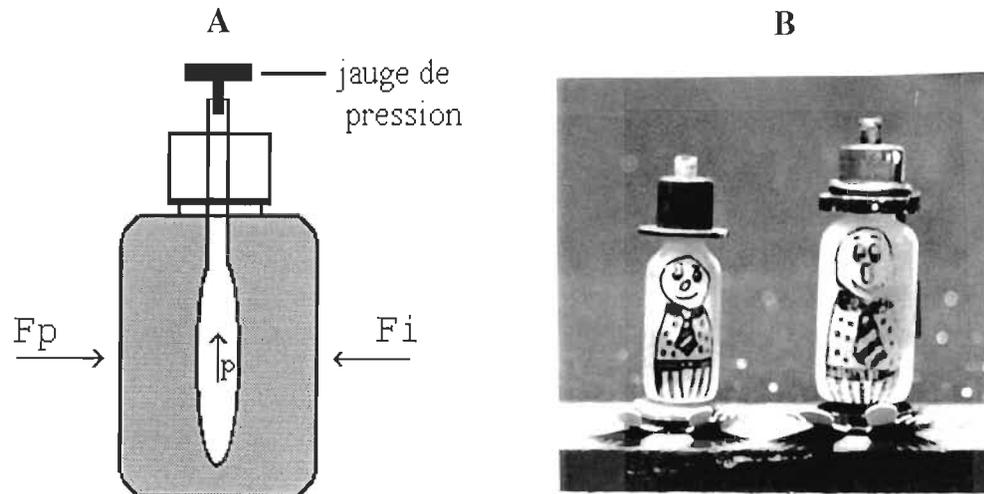


Figure 4. Schéma de l'objet (A) et photo des objets utilisés (B) pour mesurer la force de pince. F_i et F_p représentent respectivement la force appliquée par l'index et le pouce et P est la pression mesurée à la jauge située à l'extrémité de la poire.

Deux objets de taille différente sont utilisés pour chaque sujet puisque Newell, Scully, McDonald et Baillargeon (1990) ont démontré l'influence de la taille de l'objet sur la configuration des doigts utilisée par l'enfant. À partir de 4 mois, l'enfant choisit la configuration en fonction de la grosseur de l'objet par rapport à la grosseur de sa main, plutôt qu'en fonction d'une contrainte de maturation tel que postulé par Halverson (1931). Dans cette optique, pour favoriser l'utilisation de la pince digitale, le plus petit objet a un diamètre de 2,4 cm comparativement à un diamètre de 3,2 cm pour l'objet plus gros. La hauteur et le poids des objets varient avec le diamètre (9 cm vs 10,5 cm; 50 g vs 110 g).

Il faut ajouter qu'au cours de l'expérimentation nous avons modifié les objets de manière à faciliter la saisie de l'objet pour les plus jeunes enfants. En effet, ceux-ci en saisissant l'objet par la partie supérieure, nous empêchait de mesurer la force de pince. Les principales modifications sont illustrées à la Figure 5 et ces dernières permettent l'introduction d'une nouvelle condition expérimentale, soit la manipulation du poids de l'objet en fonction de la taille (Tableau 1). Avec cette nouvelle procédure, les sujets doivent réaliser trois séries de 10 essais. Au total, 23 sujets participent au nouveau protocole expérimental et 13 sujets pour le protocole avec deux objets.

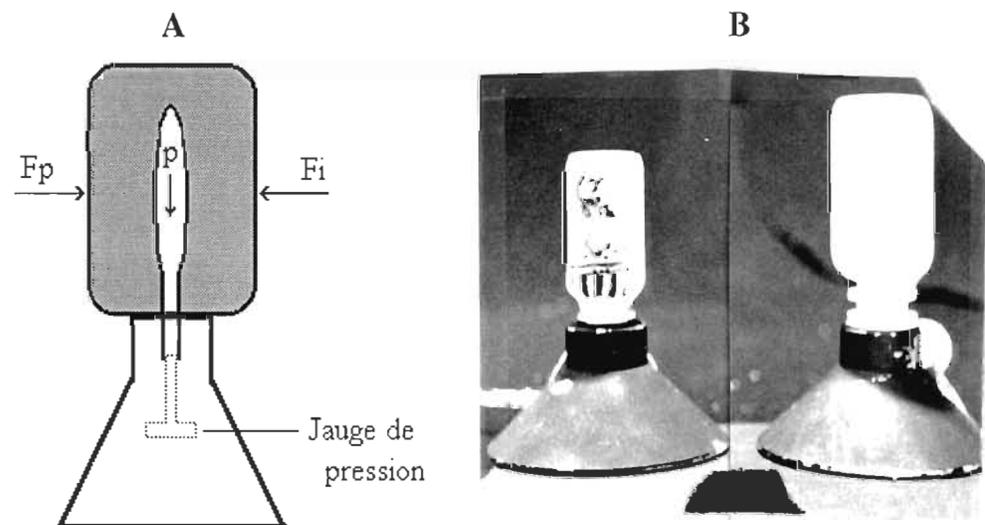


Figure 5. Schéma du nouvel objet (A) et photo des objets utilisés (B) pour mesurer la force de pince. La modification permet de dégager la partie supérieure de l'objet pour mesurer la force de pince chez tous les sujets. F_i et F_p représentent respectivement la force appliquée par l'index et le pouce.

Tableau 1
Co-variation du poids et de la taille des nouveaux objets

Diamètre	2,4 cm	3,2 cm	3,2 cm
Poids	110 g	110 g	145 g

Pour mesurer l'allègement, définie comme la force verticale (exprimée en newtons) exercée par le bras pour soulever l'objet, nous utilisons une plate-forme de force équipée de deux jauges de contraintes (OMEGA Engineering, modèle 61/120LY61). Le principe de fonctionnement est le même que celui d'une balance, la lecture varie selon le poids appliqué avec une sensibilité d'environ 0,5 g.

Enregistrement cinématique. Les déplacements des membres et de l'objet sont enregistrés en utilisant un système de caméra vidéo à haute résolution (*Peak Performance Technologies inc.*). Le système d'acquisition consiste en un ensemble de deux caméras (Panasonic WV-3990) et de deux magnétoscopes (Panasonic, AG-1960) permettant l'enregistrement d'un mouvement en deux ou trois dimensions. Un système d'éclairage supplémentaire de 250 W situé à quelques centimètres de chaque caméra est nécessaire afin d'illuminer les marqueurs réfléchissants. Le système de traitement des données se compose d'un ordinateur (ARL) muni d'une carte de contrôle vidéo et d'une carte permettant la saisie des images. A ceci s'additionne un moniteur Sony (PVM-1341), un magnétoscope d'édition (Panasonic AG-7350) et un logiciel de numérisation (Peak 5). Le principe de fonctionnement consiste à numériser des marqueurs

réfléchissants collés sur le sujet et l'objet. Ces marqueurs permettent, lors du processus de numérisation, d'établir les coordonnées cartésiennes pour reconstituer le déplacement des membres et de l'objet.

Dans le cadre de cette étude, une première caméra est située au plafond, au-dessus de l'objet à saisir, et une seconde est située perpendiculairement à la ligne du mouvement du bras (Figure 6). Un marqueur réfléchissant est collé sur une des faces de l'objet de façon à ne pas obstruer la saisie de l'objet. De plus, des marqueurs sont collés sur l'ongle du pouce et de l'index ainsi que sur la tête du radius avant le début de l'expérimentation pour laisser le sujet s'acclimater à cette nouvelle situation.

Procédures

Déroulement de la séance d'enregistrement. Au cours de la séance d'enregistrement, les sujets sont assis face à une table sur laquelle repose l'objet. L'expérimentateur invite l'enfant à saisir l'objet avec le pouce et l'index de sa main dominante, à le soulever et le déposer quelques centimètres plus loin, pour un total de 20 ou 30 essais réussis selon le protocole (10 essais par objet). Les plus jeunes sujets ajoutent fréquemment le majeur pour saisir l'objet. On considère que l'addition du majeur constitue une stratégie circonspecte utilisée par l'enfant pour saisir l'objet; pour cette raison les données relatives à ces essais n'ont pas été exclues de l'analyse. Les sujets s'assoient sur une chaise. Avant de débiter l'acquisition des données, l'expérimentateur ajuste la distance entre le sujet et l'objet. Un objet trop éloigné amène une diminution des tentatives d'atteinte des

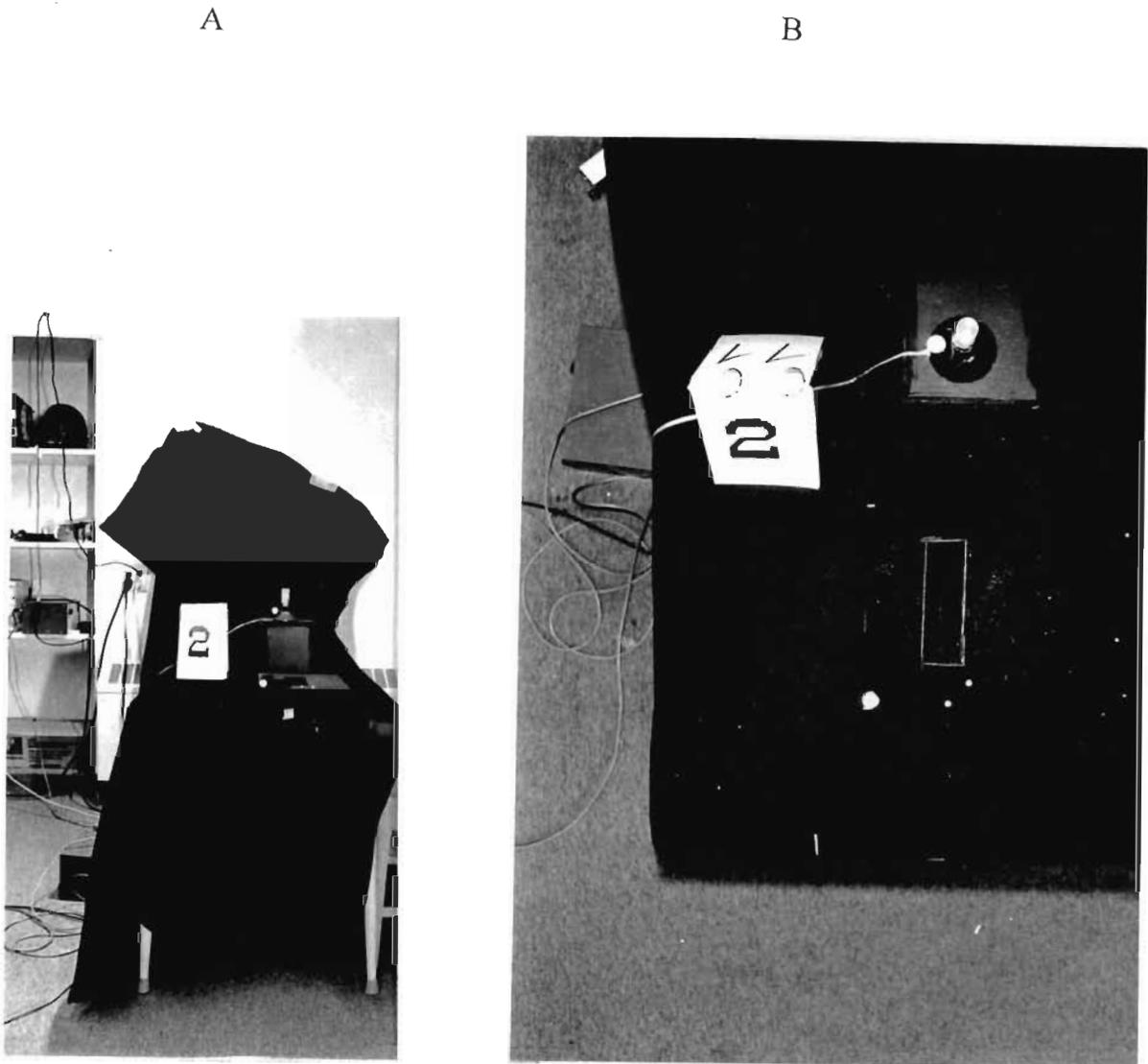


Figure 6. Disposition du montage expérimental selon la perspective des caméras; au plafond (A) et de côté (B).

sujets (Fetters et Todd, 1987). Pour minimiser cet effet, la distance sujet-objet est standardisée selon la procédure de Fetters et Todd (1987), soit en positionnant l'objet à la hauteur du poignet lorsque le bras de l'enfant est en extension. La présentation des conditions expérimentales se fait aléatoirement pour chaque sujet. Enfin, le changement de poids de l'objet dans le nouveau protocole expérimental se fait à l'insu du sujet.

Finalement, pour éviter les difficultés inhérentes à l'acquisition d'un ratio de glissement pour chaque enfant, nous avons utilisé un protocole avec des sujets adultes. Cette approche a été choisie puisqu'il aurait été complexe d'obtenir une valeur de ratio de glissement pour tous les enfants. Toutefois, nous assumons ici que la friction est constante, mais dans les faits la sudation affecte la friction entre les doigts et l'objet à saisir. Comme le taux de sudation varie d'un individu à l'autre, nous sommes conscients que d'appliquer un coefficient de glissement moyen à l'ensemble des sujets doit être pris en considération dans l'interprétation des résultats.

La procédure pour les sujets consiste, dans un premier temps, à exécuter 20 essais pour se familiariser avec l'objet. Suite à une consigne, les sujets complètent 10 essais. Le soulèvement de l'objet doit se faire avec une force de pince permettant à l'objet de glisser entre les doigts, tout en maintenant une vitesse comparable aux 20 essais précédents. La vitesse du mouvement est confirmée par une analyse qualitative de l'accélération de l'objet. Les données de deux sujets adultes permettent d'établir un ratio de glissement moyen pour les objets. Cette procédure tient compte de la phase de soulèvement; Johansson et Westling

(1984b) ont déterminé le ratio de glissement en demandant au sujet de relâcher la prise de façon graduelle jusqu'au glissement de l'objet. Toutefois, cette mesure ne tient pas compte de l'effet d'accélération lors du soulèvement de l'objet qui oblige l'application d'une force de pince légèrement supérieure à la phase statique.

Acquisition et analyse des données

Les signaux provenant des objets et de la plate-forme de force sont échantillonnés par un convertisseur analogique/numérique (interface A/D Peak et carte d'acquisition DT-2821) à une fréquence de 180 Hz. Les données sont normalisées à 60 Hz en vue de les synchroniser avec les données cinématiques. Les signaux des objets, de même que ceux de la plate-forme de force, sont amplifiés adéquatement et filtrés avec un filtre passe-bas de 10 Hz.

Les signaux numériques des objets sont transformés en valeur relative au niveau de base respectif à chaque essai. Cette procédure est utilisée compte tenu de la variation inter-essai du niveau de base. Cette fluctuation est causée par un délai mécanique de rétablissement de la pression interne de la poire. Par ailleurs, les signaux des objets et de la plate-forme sont transformés en newtons par une équation de calibration. Un protocole de calibration est réalisé avant chaque séance d'expérimentation pour l'objet et la plate-forme. Enfin, les données numérisées des objets sont filtrées à une fréquence de 6 Hz en utilisant un filtre Butterworth *dual-pass* afin de calculer la première dérivée de la force de pince.

Concernant les données cinématiques (*Peak Performance*), elles sont échantillonnées à une fréquence de 60 Hz, ce qui donne une déviation variant de

0,0 à 0,8 degré pour des mouvements angulaires variant de 3,0 à 132,6 degrés (Scholz et Millford, 1993). Une fois numérisés, les signaux sont filtrés par un filtre Butterworth *dual-pass* à une fréquence optimisée pour chaque courbe selon le programme de filtrage du logiciel Peak 5. Le déplacement vertical de l'objet est différentié deux fois pour obtenir l'accélération.

CHAPITRE III

Résultats

Il est opportun de revenir sur les deux protocoles expérimentaux utilisés pour recueillir l'ensemble des résultats de cette étude. D'une part, le premier protocole (P2) compte un total de 13 sujets répartis dans 4 groupes d'âges (2, 5, 6 et 8 ans). Les deux objets manipulés par ces sujets varient en fonction du poids et de la taille; soit 50 g pour le petit objet et 110 g pour l'objet plus grand. D'autre part, 26 sujets répartis en 7 groupes d'âges (3, 4, 6, 7, 8, 9 ans et adulte) ont participé au deuxième protocole (P3). Ce protocole compte trois objets à manipuler avec une covariation entre la taille et le poids (voir Tableau 1 à la page 17). En ce qui concerne les analyses statistiques réalisées pour les deux protocoles, les variables dépendantes sont soumises à une analyse de variance (ANAVAR) de type $A \times B$, le facteur A étant l'âge et le facteur B l'objet. Dans le cas de P3, la covariation du poids et de la taille de l'objet permet d'étudier les variables dépendantes pour trois conditions expérimentales différentes. Ces trois conditions sont la variation de la taille pour un même poids (110 g petit vs 110 g grand), la variation du poids pour une même taille (110 g grand vs 145 g grand) et la variation du poids et de la taille (110 g petit vs 145 g grand) comme pour P2.

Déplacement vertical de l'objet

Le montage expérimental oblige les sujets à soulever les objets sur une distance minimale de 15 cm. Suite à la numérisation, nous avons constaté pour certains essais, que la distance parcourue est inférieure à 15 cm. Une explication possible de ce phénomène peut être les marqueurs réfléchissants utilisés, qui ont

une surface de 1 cm et, au moment de la numérisation, le système *Peak Performance* utilise cette surface pour déterminer le centre du marqueur. Ainsi, dans le cas où seulement la moitié inférieure du marqueur réfléchit la lumière, dû au jeu d'ombrage ou à d'autres facteurs, la distance parcourue par l'objet s'en trouve modifiée. Pour cette raison et dans le but de s'assurer de la fidélité des résultats, tous les essais, dont le déplacement vertical maximal est inférieur à 14,5 cm, sont éliminés. Environ 14 % des essais, soit 142 essais/1040 ne sont pas inclus dans l'analyse statistique à cause de cette différence dans le déplacement maximal de l'objet.

L'analyse des variables relative au déplacement de l'objet permet une description globale de la performance des sujets. On peut remarquer à la Figure 7, une diminution de la variabilité du mouvement avec l'âge, qui se reflète dans le regroupement des courbes de déplacement autour de la moyenne. De plus, une différence d'environ 270 millisecondes (ms) entre les sujets de 3 et 4 ans, délimite l'atteinte de la hauteur maximale. Enfin, on constate que le sujet adulte déplace l'objet sur une plus courte distance verticale. Une ANAVAR sur le déplacement vertical maximal laisse voir un effet de l'âge ($F_{(6,38)}=2,746, p<0,05$) pour P3, confirmant que l'adulte atteint, pour chaque essai, une hauteur inférieure. Un dernier point à soulever pour le déplacement concerne le temps de mouvement, défini comme la latence pour atteindre la hauteur maximale. Cette variable constitue un indice pour discuter du temps nécessaire à l'exécution du geste. On considère qu'un allongement du temps de mouvement peut refléter l'immaturité des mécanismes de contrôle anticipé, obligeant l'enfant à utiliser davantage le feedback pour contrôler son geste (Gordon, 1994). Une ANAVAR, contrastant la

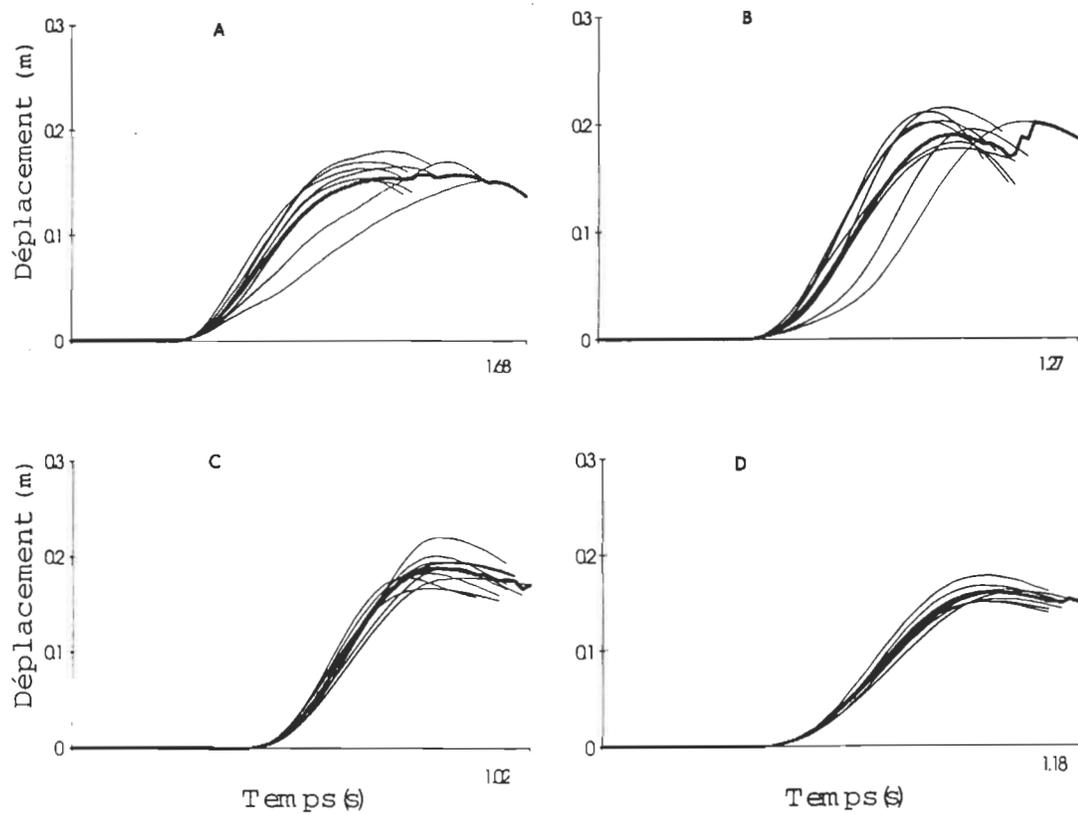


Figure 7. Déplacement vertical du petit objet de 110 g (P3) en fonction du temps pour un sujet de 3 ans (A), de 4 ans (B), de 8 ans (C) et un sujet adulte (D). Les lignes minces (—) représentent chaque essai et la ligne épaisse (—) représente la moyenne des essais.

latence pour atteindre la hauteur maximale en fonction de l'âge des sujets et de l'objet, révèle un effet significatif de l'âge pour P3 ($F_{(6,38)}=5,203, p<0,001$) et (P2) ($F_{(3,16)}=6,336, p<0,005$). L'analyse de comparaison des moyennes (méthode par contraste) démontre que les sujets de 2 et 3 ans atteignent une hauteur maximale moins rapidement ($F_{(1)}=17,742, p<0,001$ et $F_{(1)}=13,741, p<0,001$) que les autres sujets dans les protocoles P2 et P3. Forssberg et al. (1991) ont également démontré la présence d'une lenteur chez les plus jeunes sujets, au cours de la phase qui précède la mise en charge (Figure 2, période *a*), ce qui témoigne, selon ces auteurs, d'une inefficacité du processus de programmation du geste. Toutefois, puisque la myélinisation de la voie cortico-spinale se poursuit jusqu'à 1 ou 2 ans (Müller, Hömberg et Lenard, 1991), il est possible qu'une transmission moins efficace des commandes musculaires explique la lenteur du geste. De plus, il faut mentionner que le fait d'être plus lent permet, du même coup, une plus longue stimulation des mécanorécepteurs lors de chaque manipulation. Ainsi, un plus grand nombre d'informations est acheminé au SNC lors du contact prolongé, pour optimiser le contrôle compte tenu du niveau de maturation atteint.

Accélération verticale de l'objet

La figure 8 illustre les patrons d'accélération-décélération pour des sujets de 2, 3, 4 ans et un sujet adulte. Une des modifications importantes, apportée par la maturation, concerne le développement d'une symétrie dans le patron d'accélération. Ces changements se produisent tant au niveau de l'amplitude des valeurs maximales d'accélération et de décélération, qu'au niveau de la latence des événements. Pour quantifier ces changements, les valeurs maximales

d'accélération, de décélération et leur latence sont soumises à une ANAVAR (âge \times objet). Les résultats de cette analyse laissent voir un effet significatif de l'âge, quant à l'accélération verticale maximale pour P3 ($F(6,38)=3,940, p<0,005$) et pour P2 ($F(3,18)=4,629, p<0,05$). En moyenne, l'accélération maximale passe de $1,8 \text{ m/s}^2$ ($s_x = 0,806$) à 3 ans jusqu'à $2,5 \text{ m/s}^2$ ($s_x = 0,255$) chez l'adulte; ce qui représente une augmentation de 39 %. Une analyse de comparaison des moyennes permet d'établir que la symétrie semble se développer au cours de la troisième année, pour apparaître de façon distincte à l'âge de 4 ans.

Les résultats de la comparaison des moyennes sont consignés au Tableau 2. On peut voir que les comparaisons du groupe de 3 ans aux autres groupes d'âges révèlent des différences significatives des moyennes, alors que les comparaisons du groupe de 4 ans aux sujets plus âgés n'atteignent pas le seuil de signification.

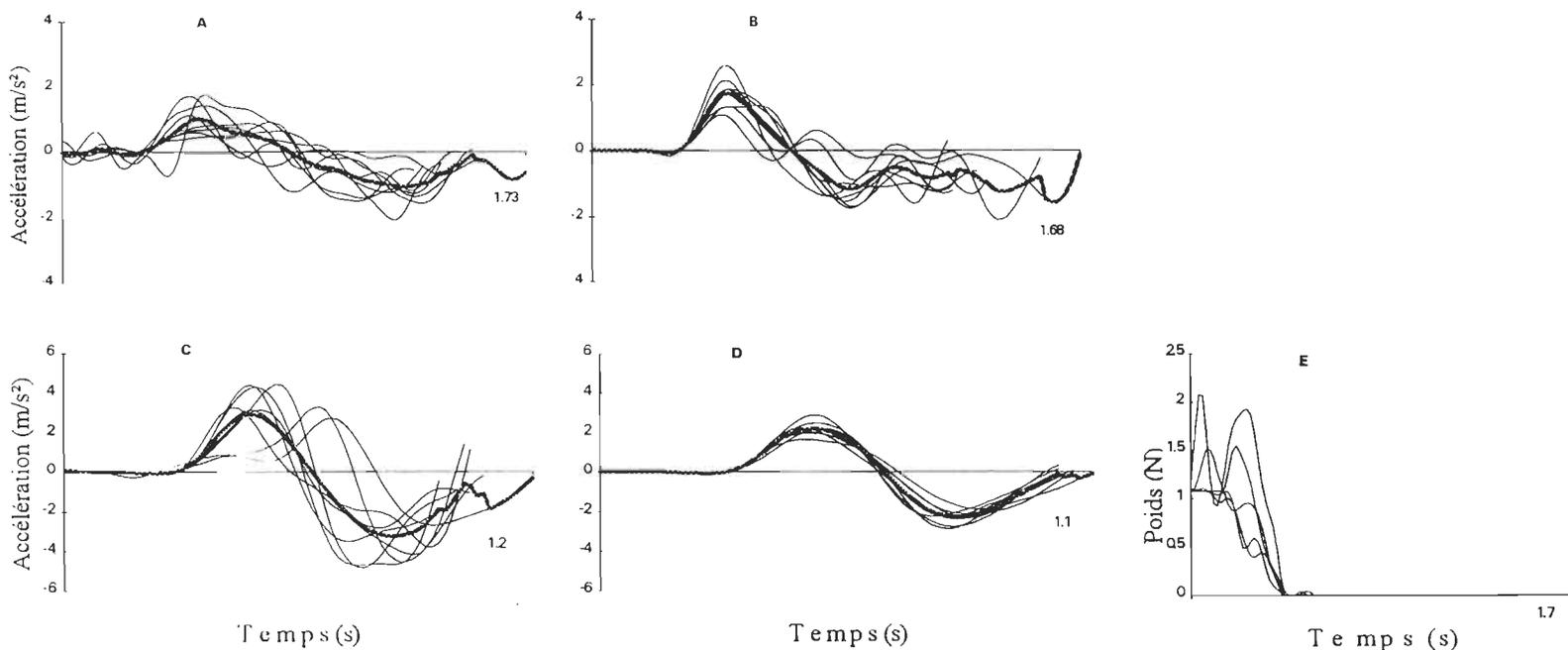


Figure 8. Accélération verticale du petit objet de 110 g (P3) en fonction du temps pour un sujet de 2 ans (A), de 3 ans (B), de 4 ans (C) et un sujet adulte (D). Les échelles varient pour les figures A-B et C-D pour obtenir une meilleure perspective de la variabilité. Les lignes minces (—) représentent chaque essai et la ligne épaisse (—) représente la moyenne des essais. On constate une plus grande variabilité pour les premières millisecondes du sujet de 2 ans (A) s'expliquant par des tentatives échouées de soulèvement de l'objet et confirmée par les données de la plate-forme de force (E).

Tableau 2

Comparaison des moyennes des groupes de 3 et 4 ans aux autres groupes d'âges pour l'accélération verticale maximale de l'objet

Protocole	Contraste (A vs B)	\bar{X}_A	vs	\bar{X}_B	<i>p</i>
P3	3 vs 4 à adulte	1,8224		2,5053	0,0165
P3	3 vs 6 à adulte	1.8224		2,0471	0,0284
P3	3 vs 9-adulte	1.8224		2,4962	0,0424
P3	3 vs 4	1,8224		2,7489	0,0156
P3	4 vs 6 à adulte	2,7489		2,0471	0,3409
P3	4 vs 9-adulte	2,7489		2,4962	0,4660

Pour quantifier le niveau de symétrie du patron d'accélération, une analyse de régression est réalisée en contrastant les valeurs maximales d'accélération et de décélération verticale de l'objet, en supposant qu'une corrélation élevée révèle une plus grande symétrie entre ces deux variables (Figure 9 A). La corrélation obtenue est $r = -0,82$ entre les valeurs maximales d'accélération et de décélération et permet de conclure à la présence d'une symétrie importante dans le mouvement. Toutefois, une augmentation de cette corrélation de $-0,82$ à $-0,94$, lorsqu'on retranche les données des enfants de 3 ans (Figure 9 B), supporte les résultats de l'analyse de comparaison des moyennes. Donc, le développement de la symétrie dans le patron d'accélération-décélération se déroule effectivement au cours de la troisième année.

La maturation joue également un rôle important au niveau temporel et, plus précisément, en ce qui concerne les latences pour atteindre les valeurs maximales d'accélération et de décélération (Figure 10). Les sujets de 3 ans démontrent une latence moyenne de 552 ms pour atteindre une accélération maximale. De 3 à 4 ans, il y a une diminution marquée de cette latence de 44 ms en moyenne et elle se poursuit, de façon continue, jusqu'à 8 ans. Cette diminution de la latence avec l'âge est statistiquement significative ($F_{(6,38)}=4,639, p<0,005$). Il en est de même de la latence pour atteindre la décélération maximale, qui va de 1,19 secondes en moyenne pour les sujets de 3 ans à 938 ms en moyenne pour ceux de 4 ans ($F_{(6,38)}=7,995, p<0,001$). Ces résultats viennent consolider le fait que les plus jeunes sujets démontrent une lenteur marquée pour exécuter le geste de préhension.

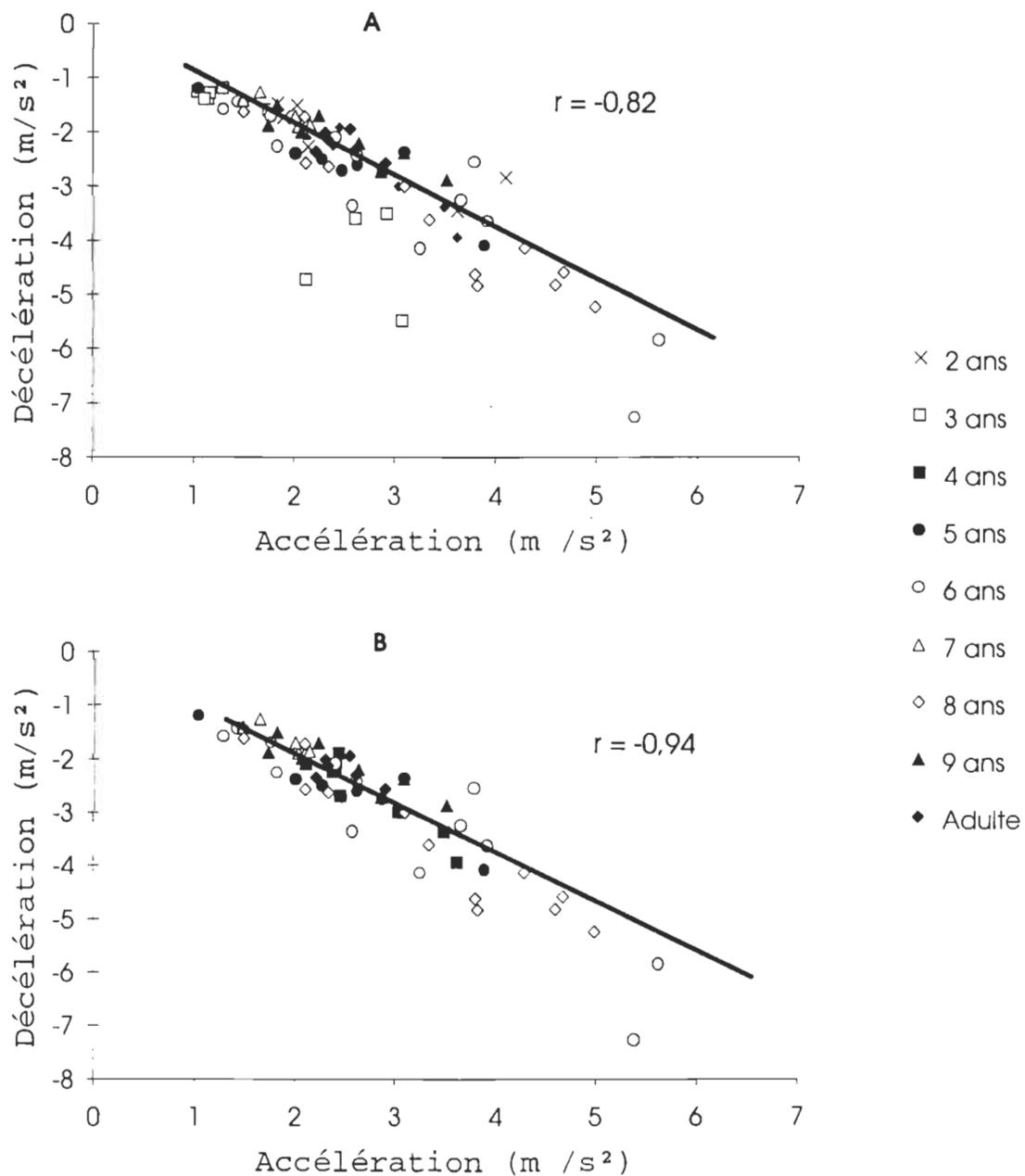


Figure 9. Régression entre les valeurs maximales d'accélération et de décélération verticale de l'objet pour tous les sujets de P3 (3 ans à adulte) (A) et excluant les sujets de 3 ans pour P3 (4 ans à adulte) (B).

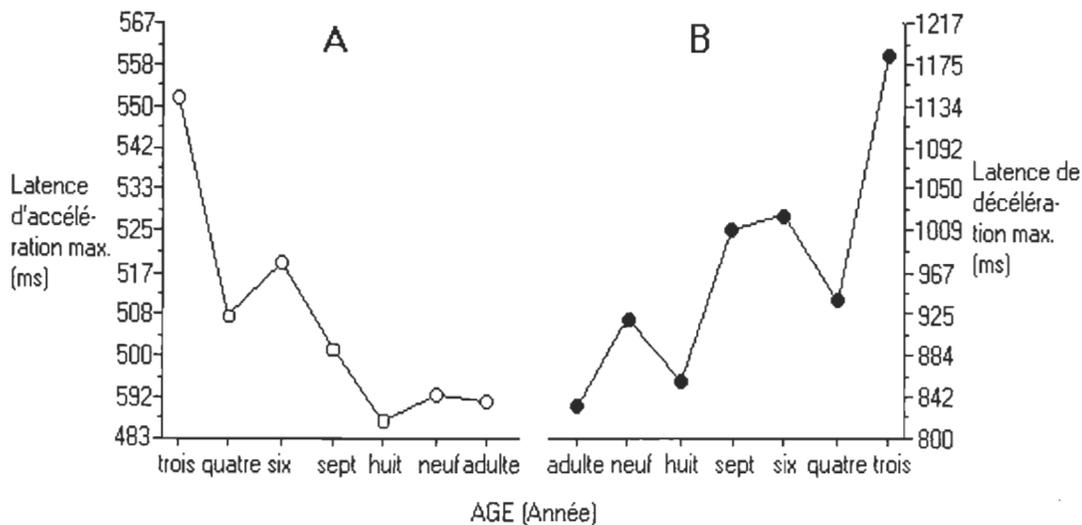


Figure 10. Latences pour atteindre les valeurs maximales d'accélération (A) et de décélération verticale (B) en fonction de l'âge.

On constate une dernière influence de la maturation dans le patron d'accélération-décélération (Figures 11 et 12). Chez les sujets âgés de 6 à 8 ans, il y a une augmentation de l'amplitude des valeurs d'accélération et de décélération. Une analyse de comparaison des moyennes (Tableau 3) démontre pour cette tranche d'âge, une augmentation de l'amplitude des valeurs maximales d'accélération. Cet effet est supporté par une augmentation significative pour P3 ($F_{(1)}=5,230, p<0,05$) et P2 ($F_{(1)}=8,346, p<0,01$), lorsqu'on compare les moyennes des valeurs maximales de décélération pour les sujets âgés de 6 à 8 ans aux valeurs des groupes plus jeunes et plus âgés.

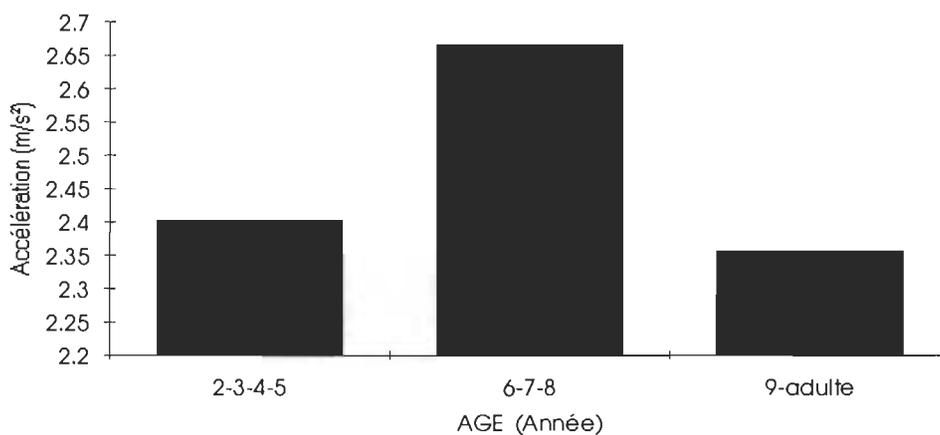


Figure 11. Moyenne des valeurs maximales d'accélération verticale de l'objet en fonction de trois groupes d'âge pour P2 et P3 dans l'ensemble des conditions.

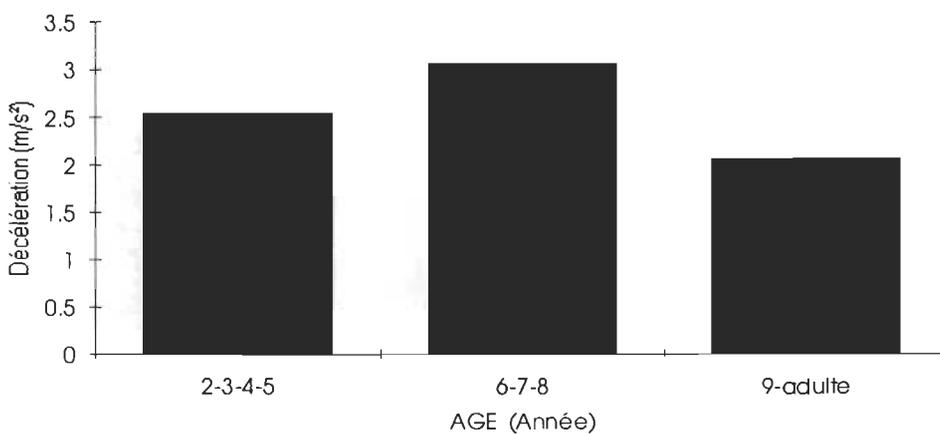


Figure 12. Moyenne des valeurs maximales de décélération verticale de l'objet en fonction de trois groupes d'âge pour P2 et P3 dans l'ensemble des conditions. Les valeurs de décélération sont exprimées en valeurs absolues.

Tableau 3

Comparaison des moyennes des groupes de 5 et 8 ans aux groupes plus âgés pour l'accélération verticale maximale de l'objet

Protocole	Contraste (A vs B)	\bar{X}_A	vs	\bar{X}_B	p
P3	8 vs 9-adulte	3,4432		2,4962	0,0165
P2	5 vs 6-8	2,5414		3,8057	0,0093

Enfin, on peut noter que seuls les sujets adultes démontrent une faible variabilité autour de la moyenne de la courbe d'accélération (Figure 13). Cette diminution se reflète au niveau des écarts-types des valeurs maximales d'accélération et de décélération. Quant aux sujets de 3 à 9 ans, ils ne démontrent pas de diminution de la variabilité des valeurs maximales d'accélération et de décélération. Par contre, il y a une diminution significative ($F_{(6,38)}=4,055$, $p<0,005$ et $F_{(6,38)}=4,894$, $p<0,001$) des latences pour atteindre les valeurs maximales d'accélération et de décélération (Figure 14).

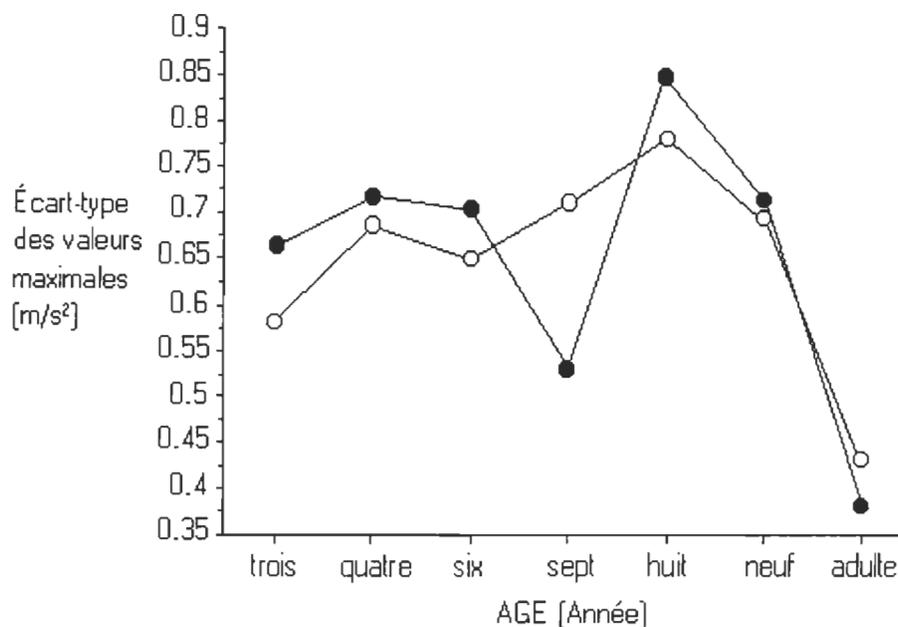


Figure 13. Écart-type des valeurs maximales d'accélération (—○—) et de décélération (—●—) verticale de l'objet en fonction de l'âge pour P3.

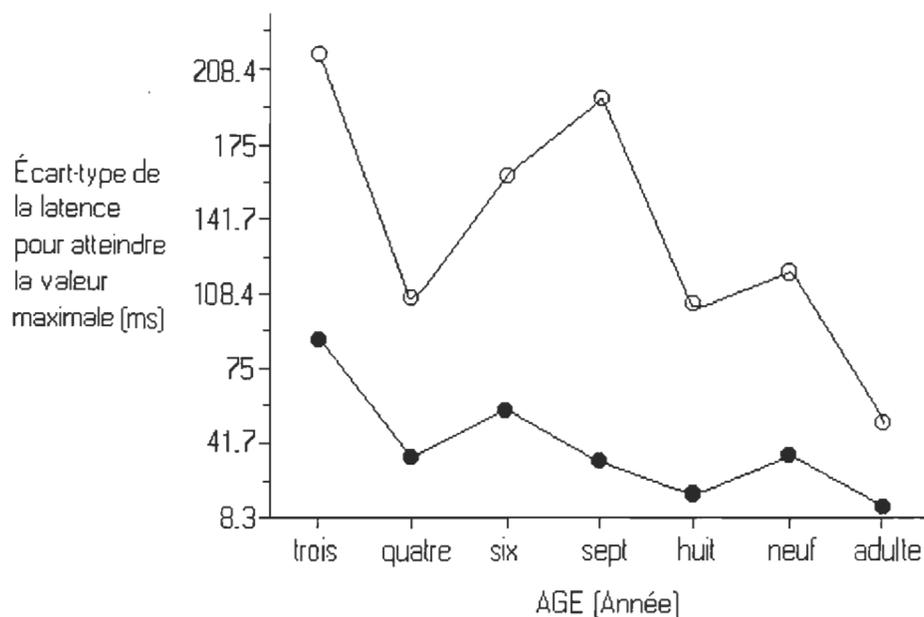


Figure 14. Écart-type de la latence pour atteindre l'accélération (—○—) et la décélération (—●—) maximale de l'objet en fonction de l'âge.

Force de pince

Une interrogation majeure de cette étude concerne l'influence de la maturation sur la modulation de la force de pince en fonction du poids et de la taille d'un objet donné. Pour vérifier cette hypothèse, les sujets ont systématiquement manipulé des objets dont le poids et la taille varient. Pour confirmer que la différence de 35 et 60 g dans le poids des objets manipulés est perçue par les sujets, les résultats de la force de pince maximale sont soumis à une ANAVAR (âge × objet). Cette analyse révèle un effet d'objet hautement significatif dans le protocole P3 ($F(6,38)=23,150, p<0,0001$) et P2 ($F(3,18)=29,478, p<0,0001$). Ceci confirme que tous les sujets modulent la force appliquée de façon différente en fonction des objets manipulés. De plus, en analysant la première dérivée de la force de pince, qui permet d'évaluer l'application de la force, nous constatons un effet d'objet significatif pour P3 ($F(6,38)=24,660, p<0,0001$) et P2 ($F(3,18)=20,709, p<0,0005$). Donc, tous les sujets utilisent une plus grande force de pince pour l'objet plus lourd (Figure 15).

Un deuxième point d'intérêt, concernant la force de pince maximale, est l'absence d'un effet significatif de l'âge dans les résultats de l'ANAVAR. Il semble donc, qu'à 2 ans, les enfants ont la capacité d'utiliser une force de pince adéquate pour le poids de l'objet; ce qui suggère de prime abord, la présence du contrôle anticipé du geste décrit par Forssberg et al. (1991). Toutefois, ces sujets n'utilisent pas une stratégie de contrôle anticipé efficace pour générer une force de pince adéquate en fonction du poids de l'objet (Figure 16). En effet, on constate, chez l'enfant de 3 ans, plusieurs bouffées d'augmentation de la force de pince avant de pouvoir générer une force suffisante pour soulever l'objet. Ceci

témoigne clairement de l'utilisation d'un mode de contrôle exploratoire. Notons que cette hésitation dans l'augmentation de la force de pince se manifeste jusqu'à l'âge de 6 ans. Comme on le remarque à la Figure 16 B, le sujet de 6 ans présente deux bouffées d'augmentation à l'intérieur de la bouffée principale. Par contre, à 9 ans, les sujets utilisent une bouffée unique similaire au profil de l'adulte.

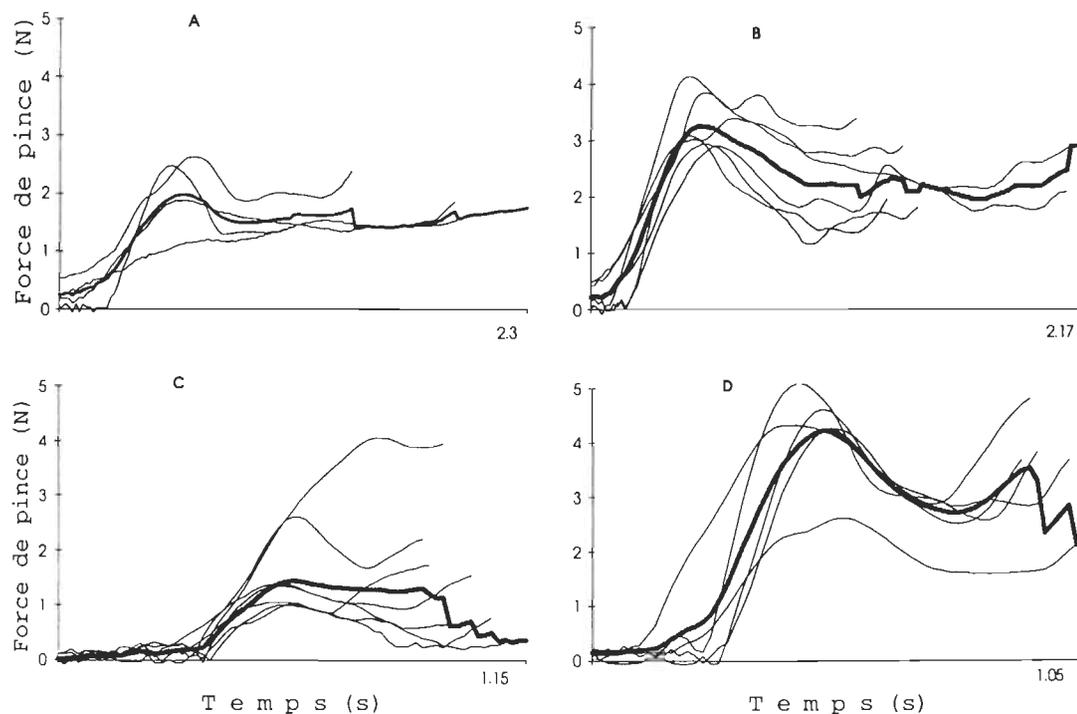


Figure 15. Force de pince en fonction du temps pour un objet de 50 g (A, C) et de 110 g (B, D)(P2) pour un sujet de 2 ans (A, B) et un de 6 ans (C, D). Les lignes minces (—) représentent chaque essai et la ligne épaisse (—) représente la moyenne des essais.

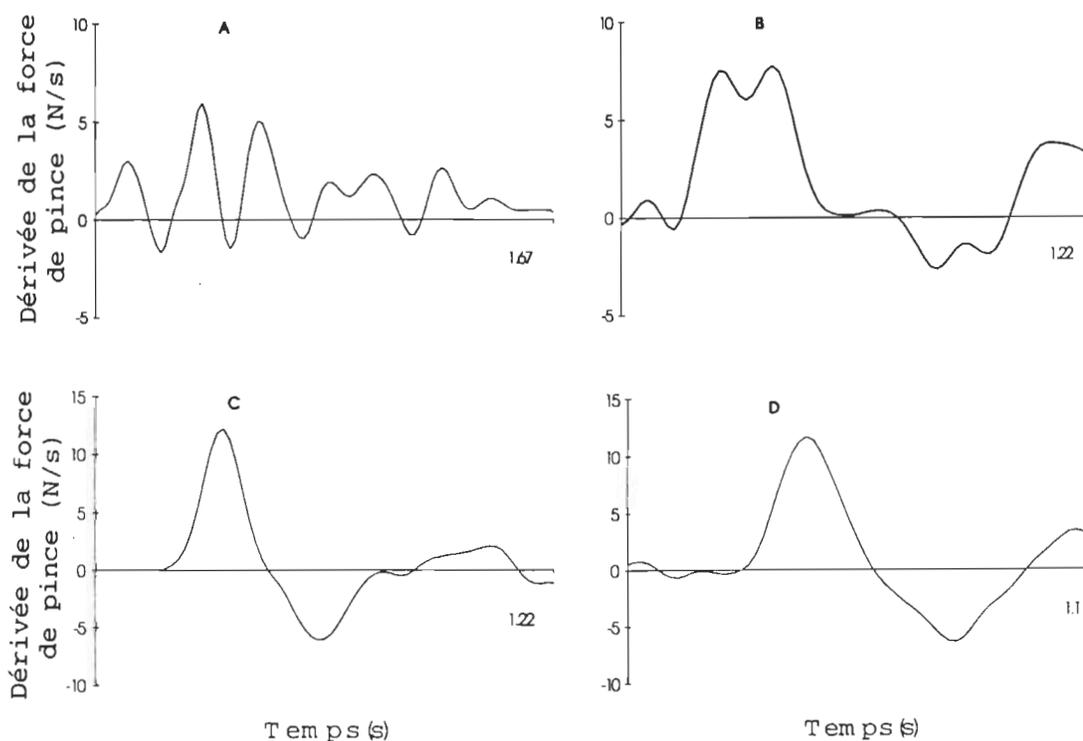


Figure 16. Première dérivée de la force de pince du petit objet de 110 g (P3) en fonction du temps, pour un sujet de 3 ans (A), de 6 ans (B), de 9 ans (C) et un sujet adulte (D). Les échelles varient pour les figures A-B et C-D pour obtenir une meilleure perspective de la variabilité.

Une ANAVAR sur la première dérivée de la force de pince révèle un effet significatif de l'âge ($F_{(6,38)}=6,069, p<0,0005$) dans P3; les enfants augmentent moins rapidement la force qu'ils appliquent à l'objet jusqu'à l'âge de 7 ans. L'application de la force se fait à un rythme moyen de 11,02 N/s ($s_x = 2.839$) chez les sujets de 3 ans, comparativement à une moyenne de 16,33 N/s ($s_x = 5.534$) pour les enfants de 4 à 9 ans. L'analyse de comparaison des moyennes laisse voir

que les enfants de 3 ans sont significativement plus lents que l'ensemble des sujets ($F_{(1)}=11,892, p<0,005$). On doit également souligner que les enfants de 4 ans oscillent entre les deux modes de contrôle. La Figure 17 illustre ce phénomène pour un sujet de 4 ans; on distingue, dans une série de 5 essais successifs, la présence des deux modes de contrôle du mouvement. Pour l'ensemble des sujets de 4 ans étudiés, nous avons trouvé 70 % des essais réalisés avec un mode de contrôle anticipé, soit par une bouffée principale d'augmentation de la force de pince.

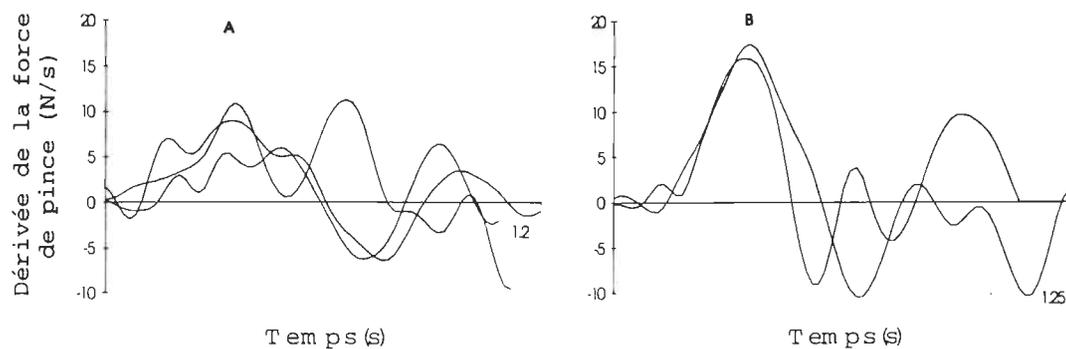


Figure 17. Première dérivée de la force de pince du petit objet de 110g (P3) en fonction du temps pour un sujet de 4 ans. On note la présence de deux modes de contrôle du geste, soit exploratoire (A) et anticipé (B).

De plus, la latence pour atteindre une force de pince maximale démontre également un effet de l'âge ($F_{(6,38)}=4,944, p<0,001$), qui confirme la lenteur des sujets de 3 ans (P3) (Figure 18). En effet, ceux-ci utilisent un mode de contrôle

exploratoire qui allonge le temps d'exécution. Un tel mode de contrôle implique une utilisation constante de l'information afférente pour atteindre une force de pince adéquate. Cela leur permet de compenser une incapacité dans l'utilisation des indices visuels, afin d'anticiper les paramètres de programmation du geste. Enfin, on remarque une légère augmentation des latences, pour atteindre la force de pince maximale, chez le groupe de 6 ans. On constate également cette augmentation pour les latences d'accélération maximale (Figure 10 A), ce qui indique un lien étroit dans la programmation temporelle de ces deux variables.

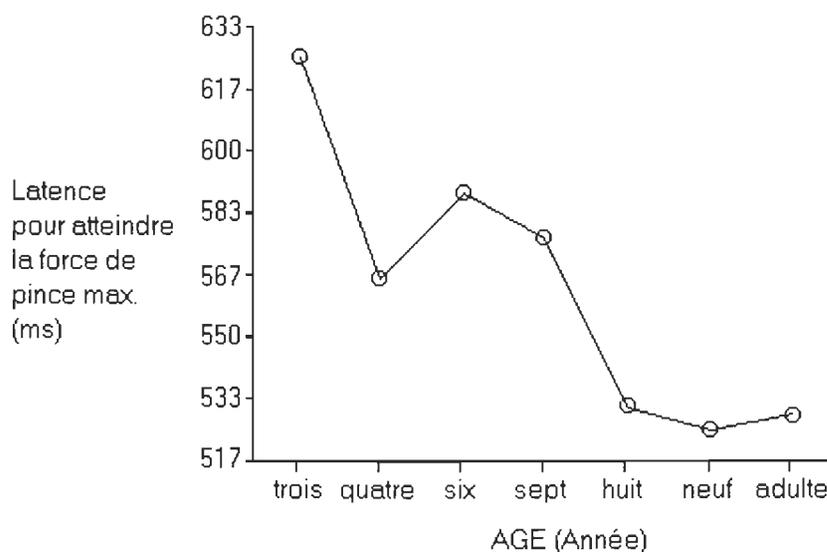


Figure 18. Latence pour atteindre le maximum de la force de pince en fonction de l'âge pour P3.

Finalement, la deuxième hypothèse de cette recherche suggère la présence d'une interaction entre l'accélération verticale appliquée à l'objet et la force de pince utilisée pour maintenir l'objet entre les doigts. Pour vérifier cette

hypothèse, nous avons utilisé une analyse de régression sur les valeurs maximales de la force de pince et d'accélération verticale de l'objet. Les résultats de l'analyse sont résumés au Tableau 4 pour P2 et P3. Cette analyse comprend l'ensemble des combinaisons de poids et de taille utilisées dans P3. Une deuxième analyse de régression, contrastant la latence pour atteindre une accélération maximale à la latence pour atteindre une force de pince maximale, révèle aussi la présence d'une covariation de ces deux variables au sein des deux protocoles (Tableau 5).

Les résultats présentés dans ces deux tableaux sont la pente permettant de voir la direction de la relation existant entre les variables, la valeur de la corrélation entre les variables et le t de Student. Les résultats du test de Student déterminent notamment si la pente de régression est significativement différente de zéro. On constate à la lumière de ces résultats, que les enfants de 2 ans présentent une relation négative entre la force de pince et l'accélération de l'objet (Figure 19 A). Une explication possible de ce phénomène est l'utilisation d'un mode de coordination séquentielle (Johansson et Westling, 1984b) des commandes régissant la force de pince et l'accélération verticale. Dans cette optique, l'augmentation de la force de pince se fait sur la base du message afférent des mécanorécepteurs stimulés par le mouvement vertical de l'objet. À partir de 3 ans, la relation entre la force de pince et l'accélération devient positive, suggérant un changement vers un mode de coordination parallèle. De plus, il est intéressant de constater qu'il existe une synchronisation des commandes du mouvement chez les sujets de 3 ans (Tableau 4, $r = 0.68$; $t = 4,81$; $p < 0,05$), telle que le révèle la corrélation linéaire significative entre les latences d'accélération et de la force de pince.

Tableau 4

Analyse de régression de l'accélération verticale en fonction de la force de pince

Conditions	<i>n</i>	Pente	<i>r</i>	<i>t</i>
2 ans (P2)	34	-0,485	-0,51	3,38**
3 et 4 ans (P3)	199	0,30	0,32	4,73**
6 à 8 ans (P2)	93	0,44	0,49	2,19*
6 à 8 ans (P3)	232	0,32	0,37	6,07**
9 ans (P3)	100	0,27	0,32	3,36**
Adulte (P3)	53	0,20	0,53	4,42**

Note: L'en-tête "Conditions" réfère aux conditions dans lesquelles l'analyse de régression fut réalisée. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$.

Tableau 5

Analyse de régression sur la moyenne des latences d'accélération verticale et de force de pince

Conditions	<i>n</i>	Pente	<i>r</i>	<i>t</i>
2 ans (P2)	6	0,72	0,73	2,13
5 à 8 ans (P2)	20	0,30	0,46	2,20*
2 à 8 ans (P2)	26	0,46	0,56	3,35*
3 ans (P3)	30	0,57	0,68	4,81*
4 à adulte (P3)	122	0,19	0,41	4,93**
3 à adulte (P3)	154	0,37	0,64	10,23**

Note: L'en-tête "Conditions" réfère aux conditions dans lesquelles l'analyse de régression fut réalisée. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$.

La Figure 19 illustre les relations entre les variables d'accélération et de force de pince pour différents niveaux d'âges. On constate pour les groupes de 3 et 4 ans et de 6 à 8 ans, une plus grande dispersion des données autour de la droite de régression. Cette variabilité chez les enfants de 3 et 4 ans s'explique par le manque d'expérience et l'oscillation entre un contrôle anticipé et exploratoire, principalement chez les sujets de 4 ans. Pour le groupe de 6 à 8 ans, cette variabilité est le fruit d'une augmentation de l'amplitude de l'accélération verticale en l'absence d'une variation proportionnelle pour la force de pince. Enfin, chez les sujets 9 ans et l'adulte, on constate une réduction de la variabilité qui dénote une consolidation de la programmation du mouvement. L'ensemble des résultats suggère qu'il existe une interaction entre l'amplitude et le moment d'activation des commandes musculaires qui modulent l'accélération verticale et la force de pince en parallèle, ce qui permet d'en déduire la présence d'une synergie musculaire.

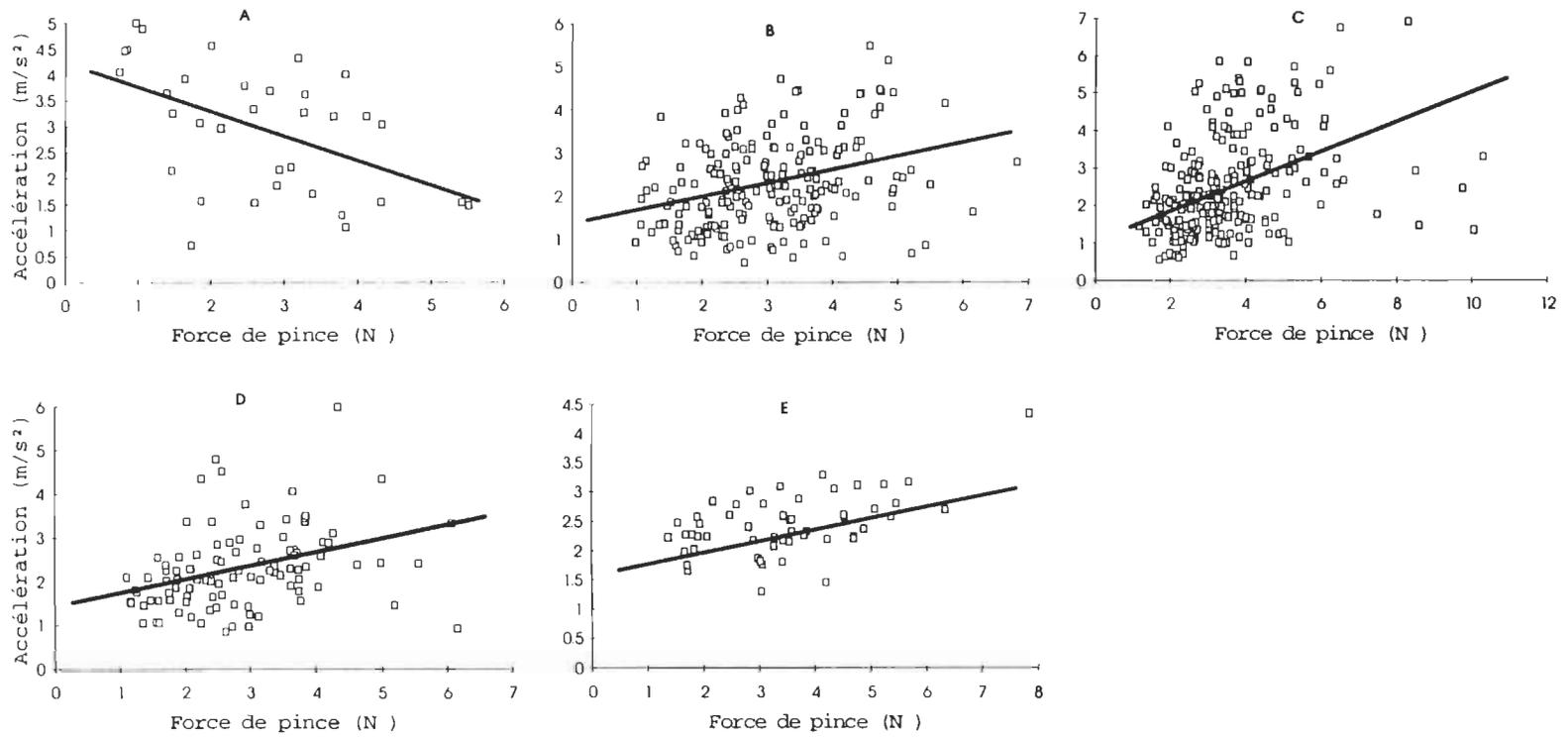


Figure 19. Régression entre les valeurs maximales d'accélération verticale de l'objet et la force de pince pour les sujets de 2 ans (A) pour P2 et de 3 et 4 ans (B), de 6 à 8 ans (C), de 9 ans (D) et d'âge adulte (E) pour P3 dans l'ensemble des conditions.

Tension réelle

Dans le cadre de cette recherche, la tension réelle s'apparente à la force de soulèvement discutée dans les travaux de Johansson et Westling (1984a). Elle est calculée à partir des données d'allègement de l'objet et de son accélération verticale en tenant compte de l'accélération gravitationnelle (voir Équation 1 à la page 12). Le premier résultat concernant la tension réelle est la moyenne de l'écart-type des essais propres à chaque objet. Ces valeurs sont interprétées comme un indice d'homogénéité de la saisie au cours des essais. Les résultats de l'ANAVAR (âge × objet) laissent voir un effet d'objet ($F(6,38)=4,810, p<0,05$ et $F(3,17)=41,06, p<0,0001$) pour les deux protocoles, indiquant une plus grande variabilité de la tension réelle lors du soulèvement de l'objet plus lourd.

En outre, dans P3, nous avons étudié l'effet de variation de la taille de l'objet en maintenant un poids constant (petit-110 g vs grand-110 g). Il est intéressant de noter, pour cette condition expérimentale, un effet significatif de l'âge pour P3 ($F(6,37)=2,713, p<0,05$), relativement à l'indice d'homogénéité de la tension réelle (Figure 20). Ce fait est d'autant plus notable si l'on tient compte de l'absence d'un effet de poids pour cette même condition. Donc, ceci suggère que les sujets de 3 et 4 ans n'utilisent probablement pas les indices visuels pour programmer leur geste en anticipation. On peut également supposer que ces sujets sont moins efficaces pour utiliser les informations tactiles, du moins à l'intérieur de 10 essais, pour s'ajuster à l'incongruité taille-poids.

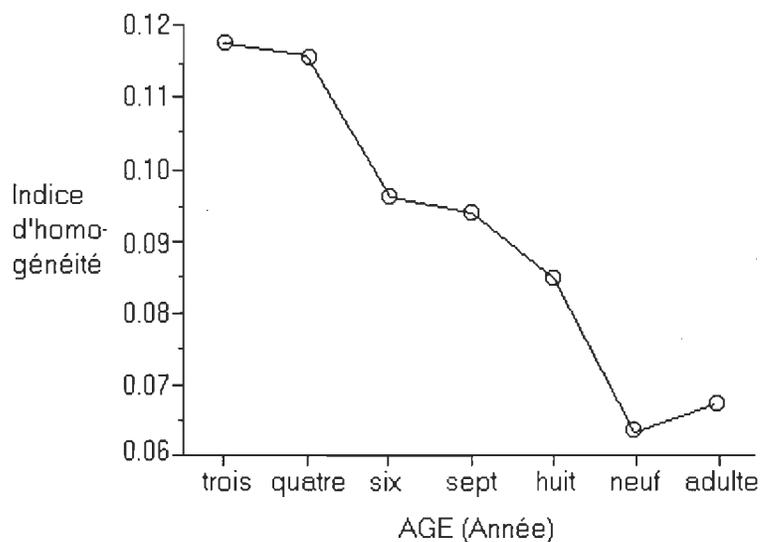


Figure 20. Indice d'homogénéité de la tension réelle en fonction de l'âge dans le protocole P3, pour la condition taille variable-poids constant.

Enfin, une analyse de régression a été réalisée sur la tension réelle et la force de pince pour la phase de soulèvement, c'est à dire du début de l'augmentation de la force de pince jusqu'à l'initiation du déplacement vertical de l'objet. La phase de soulèvement est sélectionnée pour conduire cette analyse parce que lors de cette période, les écarts entre les ratios F_p/TR et le ratio de glissement s'avèrent plus importants. Donc, à partir des courbes de régression obtenues, nous évaluons l'écart moyen entre le ratio F_p/TR utilisé par les sujets et le ratio de glissement préalablement calculé selon le même modèle. L'ANAVAR (âge \times objet) conduite pour les sept niveaux d'âges, ne révèle pas d'effet principal de l'âge (Figure 21).

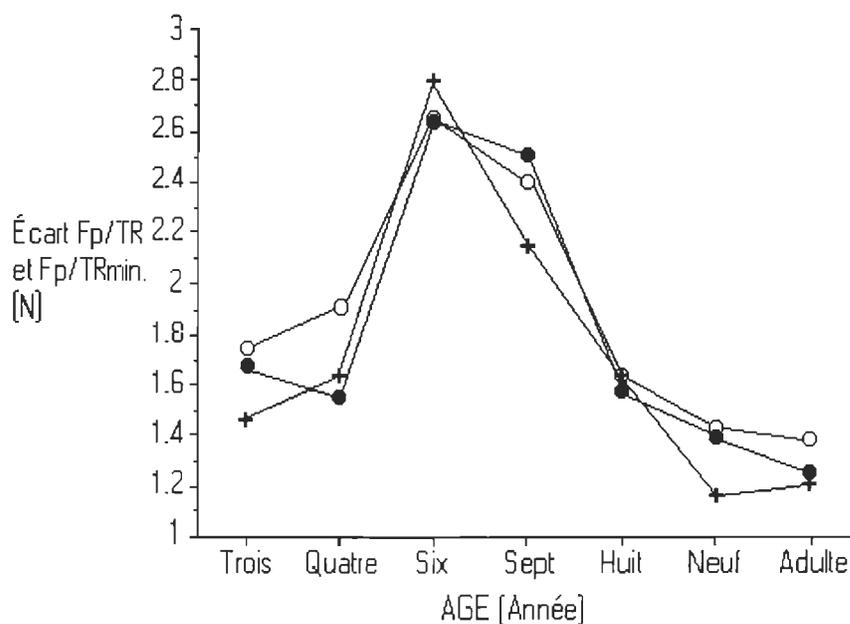


Figure 21. Marge de sécurité moyenne pour la phase de soulèvement, en fonction de l'âge pour les conditions poids constant (+), taille constante (•) et poids et taille variables (o) du protocole P3.

On constate une diminution de la marge de sécurité à partir de 6 ans jusqu'à 9 ans. Les sujets de 6 ans, pour leur part, utilisent un mode de contrôle anticipé. Toutefois, compte tenu de leur inexpérience, ils appliquent une plus grande force de pince pour s'assurer que l'objet sera soulevé, quitte à réajuster la quantité de force employée durant la phase de transport de l'objet. On peut donc supposer qu'à partir de 6 ans, le SNC programme le geste à partir d'un seul paramètre, soit le ratio F_p/TR , sous une forme de synergie musculaire.

CHAPITRE IV

Discussion

Dans l'ensemble, les résultats de cette étude révèlent la présence d'une progression dans le développement, qui se distinguent dans les groupes de 2 à 5 ans, de 6 à 8 ans et de 9 ans. Ces trois stades se manifestent par des changements au plan de la cinétique et de la cinématique du mouvement.

Temps d'exécution du mouvement

L'analyse du temps d'exécution permet de discuter de la programmation du mouvement. Il faut se rappeler qu'un allongement du temps de mouvement peut refléter l'immaturation des mécanismes de contrôle anticipé, obligeant l'enfant à utiliser davantage le feedback pour contrôler son geste (Gordon, 1994).

L'évolution avec l'âge des latences, pour atteindre la valeur maximale de la force de pince, d'accélération et de décélération verticale de l'objet, présente un profil en dents de scie (Figures 10 et 18). Plus précisément, nous constatons une diminution des latences de 2 à 5 ans, puis une augmentation chez les sujets de 6 ans, suivie d'une autre diminution jusqu'à 8 ans.

Pour leur part, les enfants de 2 et 3 ans sont significativement plus lents que les sujets plus âgés pour exécuter le geste. Chez les sujets plus jeunes, les variables temporelles étudiées démontrent de plus grandes latences. De façon spécifique, les résultats obtenus, tant au niveau temporel qu'au niveau des valeurs maximales d'accélération, de décélération et de la première dérivée de la force de pince, ne permettent pas de conclure à la présence d'un mode de contrôle anticipé

chez les sujets de 2 et 3 ans. Sans compter, que pour le groupe de 4 ans, nous avons constaté une oscillation entre les modes de contrôle exploratoire et anticipé, pour la coordination de leurs mouvements.

Cette conclusion va à l'encontre des résultats de Forssberg et al. (1991), quant à la présence du contrôle anticipé de la préhension dès l'âge de 2 ans. Ces chercheurs suggèrent que la principale évidence, pour déterminer la présence d'un contrôle anticipé, soit l'utilisation d'une bouffée principale d'augmentation de la force de pince. Comme nous l'avons constaté, le groupe de 3 ans utilise plusieurs bouffées d'augmentation pour générer une force de pince adéquate afin de saisir l'objet, confirmant par le fait même, l'inefficacité des mécanismes d'anticipation. Toutefois, cette différence avec les résultats de Forssberg et al. (1991) peut s'expliquer entre autres, par la nature et les exigences de la tâche dans les deux études. Le mouvement utilisé dans la présente étude, oblige la programmation d'une composante verticale pour soulever et une composante horizontale pour déplacer l'objet vers une cible. Par contre, la tâche de Forssberg et al. (1991) exige uniquement une composante verticale en l'absence d'une manipulation subséquente. De plus, l'objet utilisé par Forssberg et al. (1991) contraignait le mouvement de saisie, en obligeant le sujet à saisir l'objet avec une pince digitale par le dessus. Dans nos protocoles, les objets permettaient aux enfants d'utiliser une configuration des doigts qu'ils jugent la plus efficace.

Finalement, le profil d'évolution en dents de scie des latences avec l'âge démontre clairement la présence des trois étapes de développement. En outre, il est intéressant de souligner que les latences associées aux variables d'accélération

verticale de l'objet et de force de pince, suivent un patron similaire de développement, suggérant un lien étroit pour la programmation de ces paramètres.

Composante cinématique de la saisie chez l'enfant

L'analyse des données d'accélération et de décélération démontre également la présence de trois stades dans le développement de la cinématique. Le premier stade, de 2 à 5 ans, est marqué par l'apparition d'une symétrie dans le patron de la courbe d'accélération et de décélération de l'objet. Cette symétrie se manifeste dans les changements d'amplitude des valeurs maximales d'accélération et de décélération, mais également au niveau du synchronisme pour atteindre ces valeurs, soit par une diminution des latences et de leurs variabilités. D'une part, il faut souligner que l'accélération verticale constitue la principale composante modulant la force de soulèvement, telle que décrite par Johansson et Westling (1984a). D'autre part, l'apparition d'une symétrie dans le patron d'accélération-décélération semble lier à l'apparition de la coordination parallèle des forces de pince et de soulèvement. Il est donc probable que l'apparition de cette symétrie reflète la capacité de l'enfant d'anticiper la force de soulèvement nécessaire pour un objet donné. Ainsi, ce n'est probablement pas avant 4 ans, que l'enfant est en mesure de coordonner parallèlement les forces de pince et de soulèvement. Ceci puisque les premiers signes de contrôle anticipé du geste se développent au cours de la troisième année, soit au moment de l'apparition de la symétrie du patron accélération-décélération.

Le deuxième stade de développement se manifeste, plus particulièrement, par une augmentation de l'amplitude des valeurs maximales d'accélération et de

décélération verticale de l'objet. Touwen (1978) suggère à cet effet, qu'une augmentation de la variabilité dans le mouvement permet au SNC d'explorer et d'évaluer différents patrons de réponse. Or ce phénomène semble se manifester pour le patron d'accélération-décélération chez les sujets de 6 à 8 ans. Suite à l'apparition de la symétrie à 4 ans, les sujets de 6 à 8 ans varient leur patron de mouvement, pour explorer différentes combinaisons d'application des forces, afin d'augmenter les expériences de préhension. Donc, ceci suggère que les enfants de 6 et 8 ans comprennent les relations taille-poids (Gordon, 1994). Toutefois, nos résultats démontrent que cette relation n'est pas parfaitement harmonisée comme chez l'adulte. Dans le même ordre d'idées, les résultats de Laszlo (1990), sur l'évaluation de la capacité kinesthésique chez des enfants de 5 à 12 ans, laissent voir que les enfants de 6 et 7 ans possèdent une capacité de représentation mentale limitée. Donc, à 6 ans, l'enfant est capable d'un contrôle, anticipé tel que le révèle l'utilisation d'une bouffée principale d'augmentation de la force de pince. Néanmoins, sa capacité limitée de représentation mentale l'oblige à explorer différents patrons de mouvement, pour trouver des solutions adéquates à l'application de la force.

Enfin, le dernier stade de développement est marqué par une diminution progressive de l'amplitude des valeurs maximales d'accélération et de décélération, se rapprochant davantage des valeurs retrouvées chez l'adulte. Cependant, la variabilité de l'accélération verticale, pour les sujets de 9 ans, est tout aussi importante que pour les sujets des deux autres stades (Figure 13). Donc, chez l'enfant de 9 ans, il reste un raffinement à faire dans la programmation du geste pour atteindre le niveau de performance de l'adulte.

Composante cinétique de la saisie chez l'enfant

À partir de 2 ans, les sujets sont en mesure d'utiliser une force de pince suffisante pour s'emparer d'un objet. Cette constatation est triviale, puisque tous les sujets, quel que soit le niveau d'âge, ont réussi à soulever et déplacer les objets à tous les essais. Cependant, la stratégie employée pour produire le mouvement est grandement influencée par la maturation. Les plus jeunes enfants (2 et 3 ans) emploient un mode de contrôle essentiellement exploratoire avec des bouffées successives d'augmentation de la force de pince jusqu'à l'atteinte d'une valeur maximale. Bien que cette hésitation dans l'augmentation de la force de pince soit plus marquée chez les sujets de 2 et 3 ans, on constate sa présence jusqu'à l'âge de 7 ans, témoignant ainsi des difficultés liées aux contraintes de programmation pour ce geste. À l'âge de 9 ans, les enfants programment l'application de la force, en anticipation des propriétés physiques de l'objet comme son poids et sa texture. De plus, ils appliquent précisément la force avec une seule bouffée d'augmentation de la force de pince.

Un autre point à soulever, relativement à la cinétique de la saisie chez l'enfant, concerne la deuxième hypothèse de recherche, soit la présence d'une interaction entre la modulation de l'accélération verticale de l'objet et la force de pince appliquée à partir de 4 ans. À ce sujet, les analyses statistiques ont effectivement révélé la présence d'une interaction entre les variables, confirmant ainsi notre hypothèse. Toutefois, nous constatons que l'interaction est présente déjà à 3 ans, suggérant que ces sujets programment la force de pince et l'accélération verticale en parallèle. Par contre, l'utilisation de plusieurs bouffées d'augmentation pour la force de pince, démontre que l'enfant de 3 ans utilise tout

de même un mode de contrôle exploratoire. Enfin, la présence d'une telle interaction implique une relation étroite entre la composante de saisie de l'objet, la force de pince et la composante de soulèvement de l'objet, l'accélération verticale. L'étroite interaction entre les variables suggère la présence d'une synergie musculaire, simplifiant le nombre de degrés de liberté qui autrement, devraient être contrôlés indépendamment (Bernstein, 1967).

Enfin, le dernier point d'intérêt pour la cinétique de la saisie se rapporte à la première hypothèse, soit que la marge de sécurité évolue de façon inversement proportionnelle avec l'âge, pour atteindre une valeur minimale et constante vers 8 ans. Les résultats relatifs à cette variable démontrent clairement la présence des trois stades de développement. La marge de sécurité diminue graduellement avec l'âge, à partir de 6 ans. Par contre, les sujets de 3 et 4 ans démontrent des valeurs inférieures aux groupes de 6 et 7 ans. Cette différence peut s'expliquer selon deux alternatives. D'une part, nous avons remarqué que les sujets de 2, 3 et parfois 4 ans ajoutaient le majeur pour soulever l'objet. Or, l'ajout d'un doigt augmente la surface en contact avec l'objet et du même coup, augmente la friction entre les doigts et l'objet. Ainsi, il devient possible, dans cette situation, d'utiliser une force de pince moindre que lors du soulèvement à deux doigts. D'autre part, on peut penser à l'utilisation d'un mode de contrôle exploratoire chez les plus jeunes sujets. Malgré la présence d'une capacité de coordination parallèle entre les forces de pince et de soulèvement chez les enfants de 4 ans, nous avons observé une oscillation entre les modes de contrôle exploratoire et anticipé pour ce groupe d'âge. Ceci peut expliquer les valeurs inférieures de la marge de sécurité spécifiquement pour le groupe de 4 ans. Donc, en utilisant un mode de

contrôle exploratoire, les enfants de 3 et 4 ans utilisent une force de pince inférieure et soulèvent l'objet moins rapidement. Les résultats de l'accélération verticale démontrent effectivement des valeurs inférieures, qui convergent vers les forces plus près du ratio de glissement.

Développement de la préhension

Les résultats de cette étude confirment que la coordination du mouvement, décrite par Johansson (1991), n'est pas innée et qu'elle se développe entre 2 et 9 ans. Ajoutons qu'à 9 ans, les sujets n'ont pas atteint tout à fait le stade mature dans le contrôle du geste. Nous avons également constaté que le développement de la préhension semble s'organiser autour de la résolution de deux problèmes majeurs, auxquels les enfants sont confrontés.

Le premier problème touche la difficulté d'anticipation des paramètres de programmation du geste pour les jeunes enfants. Cette difficulté réside probablement dans l'utilisation inefficace des indices visuels disponibles concernant les propriétés physiques de l'objet. À ce sujet, Gordon et al. (1992) précisent que l'enfant exploite les indices visuels entre le trentième et le trente-sixième mois. Toutefois, selon nos résultats, l'enfant semble considérer les propriétés physiques de l'objet pour programmer la saisie seulement à partir de 48 mois. Cet écart avec les résultats de Gordon et al. (1992) se traduit certainement par la taille des objets utilisés dans chaque protocole. Les objets utilisés par Gordon et al. (1992) varient entre 512 et 4 096 cm³, alors que ceux utilisés dans cette recherche ont un volume de 15 et 40 cm³. Ainsi, la capacité à se représenter mentalement l'objet semble varier avec l'âge, suggérant un processus cognitif de

développement de cette capacité essentielle à la programmation anticipée de la saisie.

Une explication possible du développement de cette capacité repose sur l'accumulation d'informations provenant des afférences sensorielles, lors des mouvements de saisie exécutés. Ainsi, vers l'âge 4 ou 5 ans, l'enfant possède déjà une base de données en mémoire suffisamment étoffée, pour lui permettre de déterminer mentalement le poids et la rugosité de l'objet, suivant les indices visuels disponibles. Parallèlement, un processus cognitif établit des liens entre la force de pince utilisée, les propriétés de l'objet et les résultats obtenus, pour construire un modèle central de modulation de la force isométrique.

Un autre aspect, relié à l'anticipation des paramètres, concerne la capacité des sujets à intégrer et équilibrer les composantes du mouvement. Le problème pour le sujet consiste à équilibrer l'accélération horizontale et verticale du bras et la force générée pour retenir l'objet dans la pince digitale. On constate, au cours du deuxième stade de développement, que les sujets explorent différents patrons de réponses, probablement dans l'optique de trouver une solution à l'application des forces. On suppose qu'au cours de cette période, un processus cognitif leur permet de raffiner le modèle central de modulation de la force isométrique.

Le second problème concerne le déclenchement des commandes motrices, qui permettent de produire un geste efficace. Cela nécessite spécifiquement une plus grande synchronisation des forces, qui sont appliquées pour saisir et manipuler les objets. Nous avons démontré l'apparition d'une symétrie dans le

patron d'accélération-décélération. Nous avons également constaté des similarités dans les changements au niveau des latences associées aux variables d'accélération et de force de pince maximale. Ces résultats suggèrent que le SNC s'efforce d'optimiser le déclenchement des commandes motrices. Ainsi, lorsque les commandes motrices sont synchronisées et équilibrées, il devient possible pour le SNC de programmer le geste à partir d'un seul paramètre sous la forme d'un ratio entre les composantes de saisie et de soulèvement de l'objet (Johansson, 1991).

CHAPITRE V

Conclusion

En général, le développement cognitif et neuro-moteur explique les limites rencontrées chez l'enfant au cours de la maturation (von Hofsten, 1989).

Toutefois, nous avons constaté que l'expérience constitue également un facteur limitatif pour le développement de la préhension à tous les niveaux d'âges. Cette limitation se reflète par la durée des stades de développement, variant de 3 à 4 ans, pour acquérir les informations nécessaires à la programmation adéquate du geste. Nous avons étudié la préhension sur une période couvrant huit années de développement et de maturation et nous avons constaté que nos sujets plus âgés ne maîtrisent pas complètement le geste comme l'adulte. Ceci démontre qu'un nombre important d'interactions avec l'environnement est nécessaire, afin d'acquérir un contrôle de plus en plus efficace de la préhension jusqu'à l'atteinte d'un patron mature. En fait, une pierre d'assise de la préhension est la présence d'un modèle central de modulation de la force isométrique. La seule option disponible au SNC pour développer un tel modèle est l'interaction avec l'environnement pour établir des liens précis entre les afférences sensorielles et la force à générer pour saisir un objet. À ce sujet, les travaux de Held, Hein et Bauer (1963, 1967, 1974) démontrent que chez l'animal, le retrait des afférences visuelles, très tôt dans le développement, produit un déficit du contrôle des mouvements d'atteintes. Ils ont également démontré que l'animal recouvre rapidement un niveau de performance normal, lorsqu'on lui rend la vision de ses membres. Donc, les interactions avec l'environnement jouent un rôle essentiel

dans le développement, en permettant l'accumulation d'informations diverses pour raffiner le geste.

Dans un autre ordre d'idées, nous avons également constaté l'influence des contraintes de la tâche sur l'étude du développement des patrons de réponses des enfants. Cette influence se traduit par une différence dans la durée des stades de développement. Les études de Forssberg et al. (1991, 1992) démontrent l'apparition du contrôle anticipé aux environs de 2 ans, alors que nos résultats suggèrent son apparition chez les enfants de 4 ans. Bien que les caractéristiques du contrôle de la préhension apparaissent à des moments différents au cours de la maturation, il en demeure pas moins que les événements caractéristiques du développement présenté dans cette étude et celles de Forssberg et al. (1992, 1992) sont compatibles. On peut penser que la complexité de notre tâche expérimentale influence probablement les demandes de programmation. Ceci oblige les plus jeunes enfants à retourner vers un mode de contrôle moins élaboré, pour convenir aux exigences de la tâche. Finalement, l'influence des contraintes vient renforcer l'idée qu'il est nécessaire d'étudier les mouvements dans diverses conditions, pour cerner l'ensemble de la dynamique du contrôle du mouvement.

RÉFÉRENCES

- Bauer, J. et Held, R. (1975). Comparison of visually guided reaching in normal and deprived infant monkeys. Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Process, 1, 298-308.
- Bernstein, N. (1967). The coordination and regulation of movements. Oxford: Pergamon.
- Bushnell, E.W. (1985). The decline of visually guided reaching during infancy. Infant Behavior and Development, 8, 139-155.
- Dodwell, P.C., Muir, D.W. et DiFranco, D. (1976). Responses of infants to visually presented objects. Science, 194, 209-211.
- Dugas, C., Marchand, D., Paré, M. et Mineault, A. (1993, octobre). Natural response to perturbation of object weight in a reaching and grasping task. Communication présentée à la conférence de AAASP/SCAPPS 1993, Montréal.
- Fetters, L. et Todd, J. (1987) Quantitative assessment of infant reaching movements. Journal of Motor Behavior, 19(2), 147-166.
- Folio, M.R. et Fewell, R.R. (1983). Peabody developmental motor scales and activity cards (manual). Allen (Texas): DLM Teaching Resources.
- Forssberg, H., Eliasson, A.C., Kinoshita, H., Johansson, R.S. et Westling, G. (1991). Development of human precision grip I: Basic coordination of force. Experimental Brain Research, 85, 415-457.
- Forssberg, H., Kinoshita, H., Eliasson, A.C., Johansson, R.S., Westling, G. et Gordon, A.M. (1992). Development of human precision grip II: Anticipatory control of isometric forces targeted for object's weight. Experimental Brain Research, 90, 393-398.
- Gordon, A.M. (1994). Development of the reach to grasp movement. In K.M.B. Bennett et U. Castiello (Éds), New perspectives in the control of the reach to grasp movement. (Chap. 2). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

Gordon, A.M., Forssberg, H., Johansson, R.S. et Westling, G. (1991a). Visual size cues in the programming of manipulative forces during precision grip. Experimental Brain Research, 83, 477-482.

Gordon, A.M., Forssberg, H., Johansson, R.S. et Westling, G. (1991b). The integration of haptically acquired size information in the programming of precision grip. Experimental Brain Research, 83, 483-488.

Gordon, A.M., Forssberg, H., Johansson, R.S. et Westling, G. (1991c). Integration of sensory information during the programming precision grip: Comments on the contributions of size cues. Experimental Brain Research, 85, 226-229.

Halverson, L. (1931). An experimental study of prehension in infants by means of systematic cinema records. Genetic Psychology Monographs, 10, 107-286.

Held, R. et Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. Journal of Comparative and Physiological Psychology, 56, 872-876.

Held, R. et Hein, A. (1967). Dissociation of the visual placing response into elicited and guided components. Sciences, 158, 390-391.

Johansson, R.S. (1991). How is grasping modified by somatosensory input? In D.R. Humphrey et H.-J. Freund (Eds.), Motor Control: Concepts and Issues (pp 331-355). Chichester: Wiley & Sons.

Johansson, R.S. et Westling, G. (1984a). Influences of cutaneous sensory input on the motor coordination during precision manipulation. In C. von Euler, O. Franzen, U. Lindblom et D. Ottoson (Eds.), Somatosensory Mechanisms (pp. 249-260). London: MacMillan.

Johansson, R.S. et Westling, G. (1984b). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. Experimental Brain Research, 56, 550-564.

Johansson, R.S. et Westling, G. (1987). Signals in tactile afferents from the fingers eliciting adaptive motor responses during precision grip. Experimental Brain Research, 66, 141-154.

Johansson, R.S. et Westling, G. (1988). Coordinated isometric muscle commands adequately and erroneously programmed for the weight during lifting tasks with precision grip. Experimental Brain Research, 71, 59-71.

Lasky, R.E. (1977). The effect of visual feedback of the hand on the reaching and retrieval behavior of young infants. Child Development, 48, 112-117.

Laszlo, J.I. (1990). Child perceptuo-motor development: Normal and abnormal development of skilled behaviour. In C.A. Hauert (Éd.), Developmental psychology (pp. 273-309). North-Holland: Elsevier Science Publishers.

Lockman, J.J., Ashmead, D.H. et Bushnell, E.W. (1984). The development of anticipatory hand orientation during infancy. Journal of Experimental Child Psychology, 37, 176-186.

McDonnell, P.M. (1975). The development of visually guided reaching. Perception and Psychophysics, 19, 181-185.

McDonnell, P.M. (1979). Patterns of eye-hand coordination in the first year of life. Canadian Journal of Psychology, 33, 253-267.

Morrongiello, B.A. et Rocca, P.T. (1989). Visual feedback and anticipatory hand orientation during infants' reaching. Perceptual and Motor Skill, 69, 787-820.

Müller, Hömberg et Lenard, (1991). Magnetic stimulation of motor cortex and nerve roots in children. Maturation of cortico-motoneuronal projections. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 81, 63-70.

Newell, K.M., Scully, D.M., McDonald, P.V. et Baillargeon, R. (1990). Task constraints and infant grip configuration. Developmental Psychobiology, 22(8), 817-832.

Rochat, P. (1992). Object manipulation and exploration in 2- to 5-month-old infants. Developmental Psychology, 25(6), 871-884.

Ruff, H.A. et Halton, A. (1978). Is there directed reaching in the neonate? Developmental Psychology, 14, 425-426.

Scholz, J.P. et Millford, J.P. (1993) Accuracy and precision of the PEAK Performance Technologies motion measurement system. Journal of Motor Behavior, 25(1), 2-7.

Smith, A.M. (1981). The coactivation of antagonist muscles. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 59, 733-747.

Squire, L. (1986). Mechanisms of memory. Science, 232, 1612-1619.

Teasdale, N., Forget, R., Bard, C., Paillard, J., Fleury, M. et Lamarre, Y. (1993). The role of proprioceptive information for the production of isometric forces and for handwriting task. Acta Psychologica, 82, 179-191.

Touwen, B. (1978). In B. Touwen (Éd.), Neurological development in infancy. (p. 99). London: SIMP and Heinemann Med. Books.

Twitchell, T.E. (1970). Reflex mechanisms and the development of prehension. In K. Connolly (Ed.), Mechanisms of Motor Skill Development (pp. 25-38). London: Academic Press.

von Hofsten, C. (1979). Development of visually directed reaching: The approach phase. Journal of Human Movement Studies, 5, 160-178.

von Hofsten, C. (1982). Eye-hand coordination in newborns. Developmental Psychology, 18, 450-461.

von Hofsten, C. et Fazel-Zandy, S. (1984). Development of visually guided hand orientation in reaching. Journal of Experimental Child Psychology, 38, 208-219.

von Hofsten, C. et Rönnqvist, L. (1988). Preparation for grasping an object: A developmental study. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 14, 610-621.

von Hofsten, C. et Woollacott, M. (1990). Postural preparations for reaching in 9-month-old infants. Manuscrit.

ANNEXE A

Validité et fidélité d'une jauge de pression pour mesurer la force de pince appliquée sur une bouteille au cours de la saisie d'un objet.

La validité d'un instrument de mesure réfère à sa capacité de classer les objets ou les personnes évalués en fonction d'une caractéristique précise, c'est-à-dire de mesurer vraiment ce qu'on veut effectivement mesurer. Ainsi, la validité est directement proportionnelle à la corrélation existant entre la mesure de l'instrument et la valeur vraie de la caractéristique évaluée. Par ailleurs, la fidélité consiste à établir l'utilité de l'information obtenue avec l'instrument de mesure ainsi que sa précision. L'information sera qualifiée d'utile lorsqu'elle correspond à la grandeur de l'objet mesuré. Dans cette optique, un coefficient de fidélité donné confère au départ un certain niveau de validité à l'instrument évalué. Concernant la précision, celle-ci réfère à une valeur d'erreur associée à l'instrument qui soit relativement proche de zéro; une valeur de zéro fait référence à un instrument de mesure parfait.

Le but ici est d'établir le degré de validité et de fidélité d'un nouvel instrument conçu pour mesurer la force de pince. La force de pince correspond à la force que génère un individu pour saisir un objet avec ses doigts. Elle s'exprime en terme de déformation mécanique de l'objet ou, pour un objet fermé, en terme d'augmentation de la pression à l'intérieur de l'objet au cours de la saisie. L'instrument évalué dans cette étude quantifie la force de pince à partir de la variation de la pression interne. Une jauge de pression montée sur l'objet permet l'échantillonnage de cette variation. Le fonctionnement de la jauge est fort simple et consiste en une membrane de silicone reliée à un mécanisme piézo-électrique dont la décharge varie en fonction de la tension de la membrane. Cette jauge de pression est sensible pour des pressions pouvant aller jusqu'à 5 PSI (Pound per Squared Inch ou livre/pouce²).

L'objet a été conçu pour forcer une plus grande utilisation de l'étendue de sensibilité de la jauge. La figure 1 montre le schéma des objets évalués. La jauge de pression est montée sur une poire en caoutchouc et cette dernière repose dans une bouteille de plastique malléable remplie d'eau.

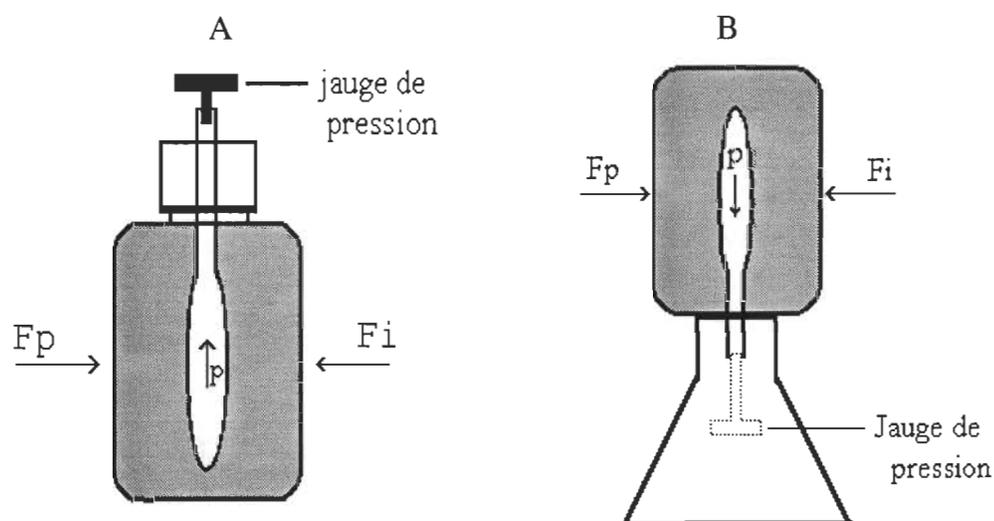


Figure 1. Schéma des deux versions des bouteilles (A et B) équipées de la jauge de pression. En utilisant une poire immergée dans l'eau, cela a pour effet de répartir plus uniformément la pression appliquée à la poire. P = pression, F_p = force appliquée par le pouce et F_i = force appliquée par l'index.

Méthode

Quatre objets furent mis à l'épreuve concernant leur validité et fidélité (Tableau 1); soit les modèles d'objets schématisés à la Figure 1 en deux tailles différentes.

Tableau 1
Co-variation du poids et de la taille des objets testés

Diamètre	2,4 cm	2,4 cm	3,2 cm	3,2 cm
Poids	50 g	110 g	110 g	145 g

La stratégie utilisée consistait à appliquer une gamme de poids connus contre l'objet par l'intermédiaire d'un dispositif recréant les conditions d'utilisation de l'objet (Figure 2).

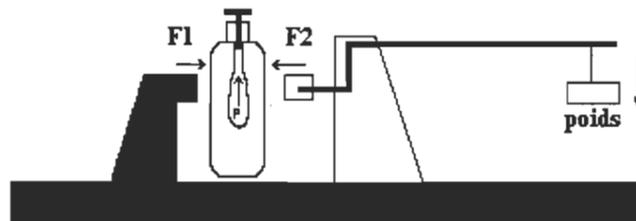


Figure 2. Schéma du dispositif utilisé pour appliquer une force externe connue sur l'objet. Il consiste en un système à levier (ratio 5:1). L'objet est appuyé sur une butée et une deuxième butée fixée au levier vient comprimer la bouteille. La surface des butées représente environ 2 cm^2 .

La charge était appliquée sur une période de trois secondes, pour chaque poids utilisé. Le déroulement temporel consistait à l'enregistrement pour la première seconde du niveau de base généré par la jauge de pression en l'absence d'une charge. À la fin de la période initiale, la charge était appliquée, pour une durée de 2 secondes. Cette procédure était répétée, pour chaque charge appliquée, et les

données étaient échantillonnées à une fréquence de 1000 Hz. Le protocole expérimental est résumé au tableau 2. Au total, plus de 200 essais furent complétés pour fin d'analyse ultérieure.

Tableau 2
Protocole expérimental

Objet	Charge (g) \times 5	Ordre de présentation
2,4 cm/50 g (V)	0; 5,6; 10; 15,6; ...; 70	Croissant, aléatoire, croissant (R)
3,2 cm/110 g (V)	0; 5,6; 10; 15,6; ...; 110	Croissant, aléatoire, croissant (R)
2,4 cm/110 g (N)	0; 5,6; 10; 15,6; ...; 110	Aléatoire, croissant, croissant (R)
3,2 cm/110 ou 145g (N)	0; 5,6; 10; 15,6; ...; 150	Croissant, aléatoire, croissant (R)

V fait référence aux premiers objets utilisés (Figure 1A) tandis que N réfère à la version modifiée des objets (Figure 1B). R signifie que cette condition fut reproduite quelques jours plus tard.

Analyse de résultats

L'analyse des résultats consistait d'abord à retrancher, pour chaque essai, la valeur moyenne correspondant au niveau de base selon l'équation suivante:

Valeur moyenne de la charge appliquée (calculée sur les 100 dernières données) –
valeur moyenne du niveau de bas (calculée sur les 1000 premières données)

Cette procédure était utilisée afin d'éliminer la fluctuation inter-essai du niveau de base causé par un délai mécanique de rétablissement de la pression interne et du même coup, permettait d'obtenir des données exprimées sur la même échelle. Par la suite, les données étaient corrigées selon une transformation par racine carrée et ces nouvelles valeurs étaient soumises à une analyse de régression en fonction des charges appliquées exprimées en Newton. Ainsi nous pouvions obtenir l'équation de la droite de régression et soumettre les valeurs d'origine à cette équation et vérifier le pouvoir de prédiction de l'équation. Pour ce faire une analyse de corrélation fut réalisé entre les valeurs réelles corrigées et les valeurs prédites par l'équation de régression.

Résultats

Nous avons obtenu des corrélations variant entre $r = 0,995$ et $r = 0,999$, qui confère un fort pouvoir de prédiction aux équations de régression et par le fait même un haut niveau de validité. Pour tester la fidélité des objets, nous avons corrélé les valeurs corrigées, obtenues pour chaque condition de présentation des charges, propre à chaque objet. L'analyse de corrélation entre les valeurs obtenues pour les ordres de présentation croissant, aléatoire et croissant reporté (R) révèle une forte corrélation variant de $r = 0,984$ à $r = 0,999$ suggérant un niveau élevé de fidélité.

Conclusion

Les niveaux élevés de validité et de fidélité permettent de s'attendre à de faibles erreurs de mesure et confirment que les mesures recueillies à l'aide de ces

instruments quantifiés adéquatement la force qu'un individu peut générer pour saisir cet instrument.