



HAL
open science

Processus d'activation-inhibition, variabilité, invariance temporelle : processus et facteurs du développement des coordinations et du contrôle dans les habiletés de frappe chez l'enfant

Florence Rosey

► To cite this version:

Florence Rosey. Processus d'activation-inhibition, variabilité, invariance temporelle : processus et facteurs du développement des coordinations et du contrôle dans les habiletés de frappe chez l'enfant. Sciences de l'Homme et Société. Université de Paris V – RENE DESCARTES, 2004. Français. NNT : . tel-01078547

HAL Id: tel-01078547

<https://hal.science/tel-01078547v1>

Submitted on 29 Oct 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE PARIS V – RENE-DESCARTES

Thèse présentée par Florence ROSEY

Pour obtenir le titre de
Docteur de l'Université de Paris V – RENE DESCARTES

Laboratoire de Recherche : Cognition et motricité

**PROCESSUS D'ACTIVATION-INHIBITION, VARIABILITÉ, INVARIANCE
TEMPORELLE : PROCESSUS ET FACTEURS DU DÉVELOPPEMENT DES
COORDINATIONS ET DU CONTRÔLE DANS LES HABILITÉS DE FRAPPE
CHEZ L'ENFANT**

Soutenue le : 24 Juin 2004

Devant le jury composé de :

- | | |
|------------|---|
| J. BERTSCH | Professeur, Université Paris-Sud XI, France. |
| B. BRIL | Directrice de Recherche, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales,
France. |
| B. DEBÛ | Professeur, Université de Grenoble I, France (Rapporteur) |
| E. GOLOMER | Chercheuse (HDR), Université Paris V, France (Co-Directrice) |
| J. KELLER | Maître de Conférences, Université Paris V, France (Directeur de Thèse) |
| H. RIPOLL | Professeur, Université d'Aix-Marseille II, France (Rapporteur) |

Remerciements

J'adresse mes remerciements :

À mes directeurs de recherche

Melle E. Golomer et M. J.Keller pour leur soutien,
leur patience, leur disponibilité et d'avoir tout au long de ce travail su canaliser l'expression de
mes idées par vos judicieuses réflexions.

À mes rapporteurs

Mme B. Debû et M. H. Ripoll pour leurs conseils éclairés qui m'ont permis de pousser plus
loin les limites de mes recherches, trouvez ici le témoignage de ma très grande gratitude.

Merci,

Aux petits monstres, à leurs parents, aux institutrices.

À mes proches pour leur soutien et leurs encouragements,
avec un petit merci plus particulier à mon père, pour la construction de la rampe.

À Arnaud et à Stéphane pour leur patience face à ma naïveté en informatique
À l'équipe du labo pour leur soutien.

```

      / \
     /  \
    <<  |
   /    |
  /      \
 /  \  \
(  )  ||
 |  /  ||
<  \  \)

```


Table des Matières

Table des Matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1- PERCEPTION ET CONTRÔLE MOTEUR : APPROCHE COGNITIVE VS THÉORIE ÉCOLOGIQUE.....	3
INTRODUCTION.....	3
I- PERCEPTION ET CONTRÔLE DU MOUVEMENT DANS L'APPROCHE COGNITIVE.....	3
A- La transmission de l'information.....	4
B- Le modèle cybernétique	6
C- La théorie de l'information et le modèle cybernétique appliqués à la performance humaine.....	7
1- La théorie des deux traces (Adams).....	8
2- La théorie du schéma (Schmidt)	9
a- Les limites de la théorie d'Adams	9
b- La théorie et la notion de schéma	10
α - Le schéma de rappel ou d'évocation	11
β - Le schéma de reconnaissance	12
3- Etat d'activation du système et modifications du mouvement.....	12
4- Temps de réaction et initiation du mouvement.....	13
5- L'anticipation	15
D- Le traitement de l'information visuelle	16
II- PERCEPTION ET CONTRÔLE MOTEUR DANS L'APPROCHE ÉCOLOGIQUE	19
A- Couplage perception-action (l'exemple de la perception visuelle).....	20
1- Flux optique et déplacement	20
2- Les affordances : l'expression de l'isomorphisme individu-environnement	22
3- L'invariant optique tau (τ).....	23
a- Définition du tau (τ).....	23
b- La stratégie du tau-coupling.....	25
c- Le tau-guide	25
4- Autres stratégies basées sur tau (τ)	26
a- Élévation de l'angle du regard ou comment intercepter une balle	26
b- La stratégie de l'annulation de l'accélération de la tangente de l'angle optique (AT)	28
c- La stratégie de la trajectoire optique linéaire (LOT).....	29
5- La dynamique du couplage perception-action.....	32
B- Coordination et développement moteur	33
1- La dynamique de la coordination.....	34
a- Les degrés de liberté (DDL).....	34
b- Les invariants dynamiques.....	35
c- Variables essentielles	37
d- Variables de coordination	37
CONCLUSION.....	38
CHAPITRE 2 - DÉVELOPPEMENT DE L'HABILETÉ D'INTERCEPTION	40
INTRODUCTION.....	40

I- LE STADE DE L'INTELLIGENCE SENSORI-MOTRICE : EXEMPLE DU DÉVELOPPEMENT DE LA COORDINATION VISUO-MOTRICE	43
II- TEMPS DE DÉVELOPPEMENT, APTITUDES PRÉCOCES ET PROCESSUS D'ACTIVATION-INHIBITION	46
1- Aptitudes précoces : le reflet des décalages.....	47
2- Inhibition : le reflet d'un temps de développement où le nouveau côtoie l'archaïque .	49
a- Modèle de Pascual-Leone, inhibition et temps de développement	49
b- L'erreur " A non-B "	50
c- Le paradigme de " l'évènement impossible "	50
3- Inhibition et développement	52
a- Mise en évidence de l'inhibition.....	53
b- Différents types d'inhibition.....	54
III- L'INTERACTION CONTEXTE-MATURATION	56
A- La conception dynamique du niveau de coordination – l'instabilité source de progrès..	58
B- Conclusion.....	59
IV- INFORMATIONS VISUELLES, PROPRIOCEPTIVES ET MOUVEMENTS	60
A- Intégration de l'information visuelle et de l'information proprioceptive	60
B- La vitesse du stimulus affecte le mouvement.....	62
C- La cinématique du mouvement reflète le mode de contrôle (proactif-réactif) du mouvement.....	64
V- CONCLUSION.....	65
CHAPITRE 3 –EXPÉRIMENTATIONS	67
I- INTRODUCTION : CHOIX D'UN CADRE ÉCOLOGIQUE POUR LES 3 EXPÉRIMENTATIONS	67
II- EXPÉRIENCE 1 : ÉTUDE TRANSVERSALE, DE L'EFFET D'INTERFÉRENCE SUR LA FRAPPE EN COUP DROIT AU TENNIS, POUR CINQ GROUPES D'ENFANTS DE 6 À 10 ANS.....	68
A- Introduction.....	68
B- Méthode.....	69
1- Participants.....	69
2- Matériel expérimental	70
3- Procédure	70
a- 1 ^{ère} étape	70
b- 2 ^{ème} étape.....	70
c- 3 ^{ème} étape –tâche d'interférence.....	71
4- Recueil des données.....	71
5- Les variables étudiées	73
6- Analyses statistiques	73
C- Résultats	73
1- Présentation des moyennes et des écarts-types	74
2- Analyse de variance	74
D- Discussion	77
III- EXPÉRIENCE 2 : ÉTUDE LONGITUDINALE DE LA RÉGULATION VISUELLE DE LA FRAPPE D'UN BALLON CHEZ LES ENFANTS DE 3 À 4 ANS. 80	80
A- Introduction.....	80

B- Méthode générale à l'expérience 2 et aux études attenantes	82
1- Participants.....	82
2- Matériel expérimental	82
a- Pré expérimentation	82
b- Dispositif final	84
3- Procédure	85
4- Recueil des données.....	85
5- Les variables étudiées	87
6- Différents comportements de frappe.....	88
7- Analyses statistiques	88
C- Résultats	89
1- Temps de mouvement de la main (TMM)	89
a- Régressions linéaires : Évolution des TMM selon la durée de chute du ballon	90
α - Régressions linéaires : Évolution des TMM selon la durée de chute du ballon à 40 cm	90
β - Régressions linéaires : Évolution des TMM selon la durée de chute du ballon à 60 cm	91
b- Comparaison des temps de mouvement de la main (TMM) pour les deux distances à la rampe 40 cm vs 60 cm.....	92
α - Présentations des moyennes et des écarts-types	92
β - Analyses de variance.....	93
i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2.....	93
ii- Groupes GD1-GD2.....	93
c- Comparaison des temps de mouvement de la main (TMM) pour la distance à la rampe 40 cm.....	95
α - Présentations des moyennes et des écarts-types	95
β - Analyses de variance.....	95
i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2.....	95
ii- Groupes GD1-GD2.....	96
d- Comparaison des temps de mouvement de la main (TMM) pour la distance à la rampe 60 cm.....	97
α - Présentations des moyennes et des écarts-types	97
β - Analyses de variance.....	98
i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2.....	98
ii- Groupes GD1-GD2.....	99
2- Temps de déclenchement de la main (TDM).....	99
a- Régressions linéaires : Évolution des TDM selon la durée de chute du ballon	99
α - Régressions linéaires : Évolution des TDM selon la durée de chute du ballon à 40 cm	99
β - Régressions linéaires : Évolution des TDM selon la durée de chute du ballon à 60 cm	101
γ - Définition de la relation entre le temps de déclenchement de la main, le temps de mouvement de la main	102
b- Comparaison des temps de déclenchement de la main (TDM) pour les deux distances à la rampe 40 cm vs 60 cm	102
α - Présentations des moyennes et des écarts-types	102
β - Analyses de variance.....	103
i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2.....	103
ii- Groupes GD1-GD2.....	105
3- Le temps de contact de la main avec le ballon (TCMB).....	106

a- Comparaison des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB) pour les deux distances à la rampe 40 cm vs 60 cm	106
α - Présentations des moyennes et des écarts-types	106
β - Analyses de variance.....	107
i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2.....	107
ii- Groupes GD1-GD2.....	110
4- Écarts main-ballon (EMBC)	112
a- Comparaison des écarts main-ballon (EMBC) pour les deux distances à la rampe 40 cm vs 60 cm.....	112
α - Présentation des moyennes et des écarts-types.....	112
β - Analyses de variance.....	112
i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2.....	112
ii- Groupes GD1-GD2.....	114
b- Effet d'ordre sur les écarts main-ballon (EMBC)	116
D- Discussion	118
IV- EXPÉRIENCE 2- ÉTUDE 1: ÉTUDE LONGITUDINALE, CHEZ LES ENFANTS DE 3 À 4 ANS, DU CONTRÔLE DE LA FRAPPE MANUELLE D'UN BALLON ET DE LA VARIABILITÉ DES POSITIONS DE LA MAIN.	123
A- Introduction.....	123
B- Méthode.....	124
1- Variable étudiée	124
2- Analyses statistiques	125
C- Résultats	125
1- Courbes de la variabilité de la position de la main durant la frappe à 40 et 60 cm de la rampe.....	126
2- Comparaison de la variabilité de la position de la main durant la frappe à 40 cm de la rampe vs 60 cm de la rampe.....	130
a- Présentations des moyennes et des écarts-types.....	130
b- Analyses de variance.....	130
α - Groupes FB-GD1 / FB-GD2.....	130
β - Groupes GD1-GD2	135
c- Effet d'ordre sur les EPM	138
α - Groupes FB-GD1 / FB-GD2.....	139
β - Groupes GD1-GD2	142
D- Discussion	144
V- EXPÉRIENCE 2- ÉTUDE 2 : ÉTUDE LONGITUDINALE, CHEZ LES ENFANTS DE 3 À 4 ANS, DU CONTRÔLE DE LA FRAPPE MANUELLE D'UN BALLON ET DE LA COORDINATION DES ARTICULATIONS.....	147
A- Introduction.....	147
B- Méthode.....	148
1- Recueil des données	148
2- Les variables étudiées	148
3- Analyses statistiques	149
C- Résultats	150
1- Temps d'initiation des articulations et hauteurs de chute du ballon.....	150
a- Présentations des moyennes et des écarts-types.....	150
b- Analyse de variance à mesures répétées	151

2- Régressions linéaires : Evolution des temps de déclenchement du pied selon la durée de chute du ballon	154
3- Temps de déclenchement de la main (TDM), temps de la pose du pied (TPP) et temps du contact de la main avec le ballon (TCMB)	155
a- Présentations des moyennes et des écarts-types.....	155
b- Analyse de variance à mesures répétées	155
D- Discussion	157
VI- EXPÉRIENCE 3 : ÉTUDE DE L'EFFET DU CHANGEMENT DE TAILLE DU BALLON SUR LA FRAPPE MANUELLE.....	159
A- Introduction.....	159
B- Méthode.....	161
1- Participants.....	161
2- Matériel expérimental	161
3- Procédure	163
4- Recueil des données	164
5- Les variables étudiées	166
6- Analyses statistiques	166
C- Résultats	167
1- Temps de mouvement de la main (TMM).....	167
a- Régressions linéaires : Évolution des TMM selon la durée de chute du ballon	167
b- Présentation des moyennes et des écarts-types.....	168
c- Analyse de variance à mesures répétées	169
2- Temps de déclenchement de la main (TDM).....	170
a- Régressions linéaires : Évolution des TDM selon la durée de chute du ballon	170
b- Présentation des moyennes et des écarts-types.....	171
c- Analyse de variance à mesures répétées	172
3- Le temps de contact de la main avec le ballon (TCMB).....	174
a- Présentation des moyennes et des écarts-types	174
b- Analyse de variance à mesures répétées	174
4- Écart main-ballon au contact (EMBC)	176
a- Présentations des moyennes et des écarts-types.....	176
b- Analyse de variance à mesures répétées	176
c- Effet d'ordre sur les EMBC	178
D- Discussion	179
VII- DISCUSSION GÉNÉRALE.....	182
RÉFÉRENCES	189
ANNEXES.....	203
Annexe 1	203
Annexe 2	205
Annexe 3	210
Annexe 4	211
Annexe 5	214
Annexe 6	218
Annexe 7	221
INDEX DES AUTEURS	223

Cadre Théorique

Introduction générale

Dès son plus jeune âge, l'enfant confronté à des situations d'évitement, d'atteinte ou de saisie d'objets, explore son environnement manuellement et visuellement. Ces situations deviennent d'autant plus délicates que les éléments environnants sont en mouvement et/ou l'enfant l'est aussi. Le développement du comportement sensori-moteur n'apparaît pas aussi ordonné et précis que dans la mise en relation étroite entre l'âge et la motricité de Piaget. En effet, les enfants capables de réaliser une tâche peuvent ne plus être capables de la réaliser lors d'une présentation ultérieure (Siegler, 1999). Par exemple, pendant les jeux de balle, les enfants d'un âge donné manifestent de nombreux comportements qui peuvent être décrits par leurs coordinations. Lorsqu'un enfant doit attraper un ballon, différents comportements apparaissent. Soit l'enfant ne fait aucun geste, soit il ouvre les bras avec un mouvement de recul, pour les refermer au moment où le ballon touche l'enfant et le laisse tomber ou il peut l'attraper. Ces différents comportements montrent que chacun possède plusieurs modes de pensée ou de raisonnement face à des problèmes et possède également plusieurs stratégies¹ susceptibles d'être appliquées, lors de résolution de problèmes, dont le niveau de sophistication varie. Au cours du développement, le changement réside dans le registre des situations dans lesquelles chacune de ces stratégies est utilisée (Siegler, 1999).

Les différents comportements, décrits précédemment lors de situations d'attrapés sont dus à des différences individuelles et inter-individuelles. Certains enfants semblent savoir percevoir, orienter leur comportement et l'adapter à leur environnement et à la situation, alors que d'autres enfants semblent moins pouvoir l'adapter. Ces différences sont-elles seulement dues à des connaissances différentes ou des différences de styles cognitifs qui influencent aussi ces choix d'organisations motrices ? Kagan, Rosman, Day, Albert et Phillips (1964) proposent le style cognitif impulsif-réfléchi pour désigner le mode d'entrée de résolution de problème, qui est déterminé par le temps de réponse qu'adopte l'enfant, en fonction de la réussite. Les enfants qui répondent rapidement ont tendance à faire beaucoup plus d'erreurs, sont considérés comme " impulsifs ", alors que ceux qui prennent plus de temps pour répondre, font moins d'erreurs et sont considérés comme " réfléchis ".

Si le réfléchi est de manière caractéristique lent et précis, il n'est pas aussi inflexible que l'impulsif, car il peut répondre rapidement et précisément quand la rapidité de la réponse est nécessaire (Busch & Dweck, 1975, Sugden & Connell, 1979). Le style cognitif impulsif-

¹ Le terme réfèrera au choix plus ou moins contrôlé des moyens à mettre en œuvre, parmi un ensemble de moyens ou de possibilités, pour répondre à un problème posé. La stratégie serait donc finalisée, constituée d'un ensemble d'actions coordonnées, (mise en relation) dynamiques.

réfléchi peut être considéré comme une stratégie individuelle utilisée dans l'évaluation de situation-résolution-problème plutôt qu'une disposition pour un temps de décision long ou court. Il apparaît bénéfique indifféremment de la nature de la tâche. Keller (1995), lors d'un travail sur le renvoi de balle type tennis, a montré que les enfants déterminés comme réfléchis sont plus performants que les enfants dits impulsifs. De plus, Keller et Ripoll (2001) ont montré que les réfléchis sont capables d'adapter leur temps de réponse (plus rapide) à la spécificité du renvoi de balle type tennis. Cette adaptation peut s'expliquer par la capacité des réfléchis à inhiber leur première réponse immédiate et à la réévaluer avant de proposer une nouvelle réponse (Kagan et coll., 1964). De plus, Maccoby, Dowley, Hagen et Degerman (1965) incluent dans ce style cognitif, la capacité à inhiber des comportements moteurs en réponse aux demandes de la tâche.

La capacité des réfléchis à inhiber leur première pourrait inclure le processus d'Activation-Inhibition. Il apparaîtrait comme le reflet du niveau d'inhibition où le réfléchi serait plus capable que l'impulsif d'inhiber les connaissances, les programmes et/ou les mouvements non pertinents en réponse à une situation.

Depuis les années 90, la psychologie du développement connaît une évolution. L'hypothèse sous-jacente à cette évolution, est que le développement cognitif ne se réduit pas à la seule substitution majorante de structures nouvelles mais serait la conséquence de l'inhibition efficace de structures inefficaces. Par la notion d'inhibition se dessine une nouvelle explication des différences de comportements. L'inefficacité observée chez les plus jeunes, dans les habiletés motrices, ne serait pas due à un défaut de stratégie ou de programme moteur mais à une incapacité à inhiber des structures concurrentes.

Keller et Rosey (2000) ont montré que le processus d'activation-inhibition participerait au style cognitif impulsif-réfléchi et qu'il expliquerait le développement des coordinations dans des habiletés motrices tel le cloche-pied, l'équilibre et le lancer à bras cassé. Ces observations suggèrent que les fonctions exécutives d'activation-inhibition pourraient être un des facteurs à l'origine de la production de structures motrices (ensemble de patterns ou d'unités fonctionnelles, coordonnés).

Ce travail de thèse s'inscrit dans la problématique de l'ontogenèse des habiletés de frappe. Il a la volonté d'éprouver la fonctionnalité du processus d'activation-inhibition sur le développement des coordinations et le contrôle du mouvement et vise à mieux connaître les processus et les mécanismes qui amènent à la sélection et à la stabilisation des coordinations, dans le cadre particulier des frappes manuelles et avec raquette chez le jeune enfant.

Chapitre 1

Perception et contrôle moteur : approche cognitive vs théorie écologique

CHAPITRE 1 - PERCEPTION ET CONTRÔLE MOTEUR : APPROCHE COGNITIVE VS THÉORIE ÉCOLOGIQUE

Introduction

Les tâches d'interception, telles que les attrapés ou les frappes manuelles ou avec objet (batte, raquette) soulèvent la question du contrôle du mouvement et de la place de la perception dans ce contrôle. Une caractéristique importante de la performance est le timing précis du mouvement adapté à l'environnement qui est continuellement en changement. La perception est indispensable, à cet égard, parce que le succès de l'attraper demande une conformité aux exigences spatiales et temporelles. En effet, afin de réussir un attraper ou une frappe, l'individu ne doit pas seulement minuter précisément son action, mais il doit aussi orienter et placer sa main à un endroit précis et à un moment précis (Savelsbergh, Rosengren, Van der Kamp & Verheul, 2003). Alderson, Sully et Sully (1974) ont déterminé, dans le cadre d'attrapés de balle au base-ball, que l'attrapeur avait une fenêtre temporelle de 60 ms pour éviter les erreurs de timing dans l'attraper, lorsqu'une balle approche à 110 km/h. Le rôle de la perception, et plus particulièrement de l'information visuelle dans la coordination et le contrôle du mouvement, est différent selon l'approche du contrôle du mouvement.

L'approche cognitive considère que la perception et l'action sont des processus tout à fait distincts : la perception est le traitement de l'information qui, à partir de l'image rétinienne, construit une représentation du monde. Le mouvement résulte de la mise en œuvre d'un programme moteur qui comprend des commandes musculaires. Cette production de réponse découle à partir du traitement d'une information prise sur l'environnement et les processus pourraient être analysés indépendamment l'un de l'autre. Les actions sont contrôlées à un niveau supérieur du système nerveux, où un plan d'action doit être formulé et exécuté. Dans la perspective écologique, au contraire, la perception et l'action sont des processus étroitement imbriqués. Les animaux et les êtres humains ne perçoivent pas le monde passivement mais s'y déplacent activement, en captant l'information nécessaire pour guider le mouvement : il existe un échange continu entre l'organisme et le monde.

I- Perception et contrôle du mouvement dans l'approche cognitive

Pour expliquer le comportement et plus particulièrement la nature de la connaissance, la psychologie cognitive étudie ce qui se passe dans le cerveau (la boîte noire) car la connaissance et la compréhension des modalités, par lesquelles les conduites s'élaborent, sont plus fécondes que la seule mesure du comportement (béhaviorisme). Dans l'approche cognitive, la perception résulte de mécanismes complexes effectuant des opérations, des

calculs à partir des signaux sensoriels. Cette approche met l'accent sur les traitements que les systèmes sensoriels effectuent sur l'information. L'information est interprétée sur la base de connaissances acquises par nos expériences antérieures. La psychologie cognitive s'est développée, en s'appuyant d'une part sur les travaux de la théorie de l'information de Shannon et Weaver (1949) et d'autre part, sur la cybernétique de Wiener (1948). La théorie de l'information est fondée sur les techniques de communication (type de transmission téléphonique). Ces techniques relient, par un canal de transmission, un " émetteur " et un " récepteur ". La cybernétique est une réflexion sur la nature des systèmes, mécaniques et humains, de rétroaction (feed-back), d'auto-correction et d'auto-régulation, c'est la théorie du contrôle et de la communication. Cette influence s'est traduite par la formulation de modèles du contrôle qui vont faire explicitement référence à la théorie de l'information et à la cybernétique (Keele, 1968 ; Adams, 1971), la théorie du schéma de Schmidt (1975) restant, en psychologie cognitive la théorie de référence dans le contrôle et l'apprentissage des habiletés motrices.

A- La transmission de l'information

La théorie de l'information de Shannon et Weaver (1949), fondée sur une théorie mathématique de la communication, s'attache à mesurer la quantité d'information transmise d'un point à un autre dans ces systèmes. La communication est réduite à la transmission d'une information par un canal. Broadbent (1958 in Gardner, 1993) est l'un des premiers, à avoir utilisé ce système pour décrire le fonctionnement de la pensée humaine. Ce modèle commence par l'information recueillie par les sens, mais se centre sur la caractéristique que les individus ont une capacité limitée de saisie et de stockage d'information. La pensée humaine est conçue comme une séquence constituée d'une série d'étapes au cours desquelles les informations sont traitées (codées, décodées, filtrées) et transmises jusqu'aux effecteurs (figure 1). Le système n'accède pas directement à la signification des informations, elle résulte de la comparaison entre les informations actuelles et les connaissances antérieures (représentations).

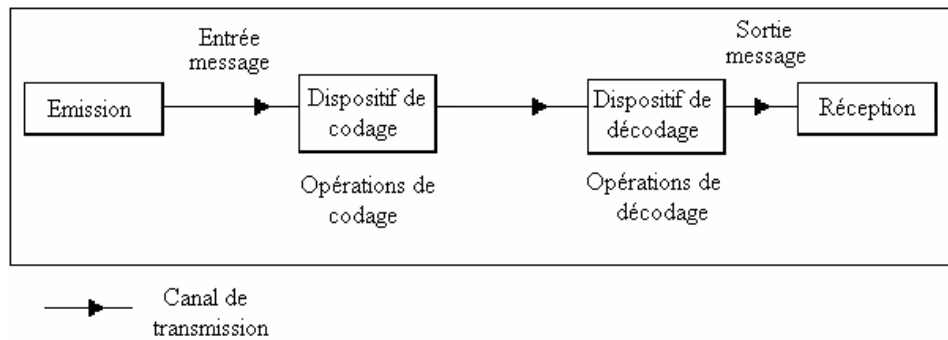


Figure 1. Dispositif de transmission de l'information (d'après la théorie de Shannon et Weaver, 1949).

L'application de ce schéma général de la transmission de l'information, dans l'étude de la motricité de l'individu, implique une description analogique de celle-ci. Les modèles de la motricité humaine ont défini des étapes de traitement de l'information (figure 2, Whiting, 1979 ; Schmidt, 1993).

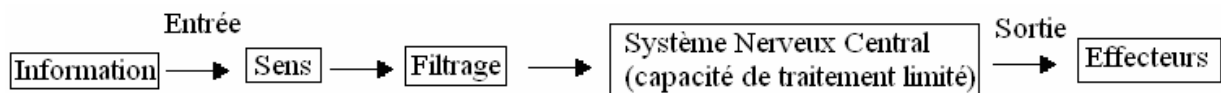


Figure 2. Dispositif de transmission de l'information de la théorie de l'information appliquée à la motricité humaine. L'information arrive par les organes sensoriels, est filtrée sélectivement avant d'entrer dans le système nerveux central à capacité de traitement limitée. Après avoir été traitée, l'information est transmise jusqu'aux effecteurs (d'après Whiting, 1979).

Une idée clé de la théorie de l'information est que l'information peut être conçue comme étant simplement une décision unique entre deux solutions également plausibles. Cette conception a permis de coder l'information en nombre de bits (de binary digit), donnant un " format " à l'information et de calculer la dégradation de l'information entre l'entrée et la sortie du système. La moindre perte dans le signal émis, entraîne une information incorrecte ou dégradée pour le récepteur. La théorie de l'information a abouti à l'assimilation de l'être humain à un système traitant l'information prélevée dans l'environnement en vue d'établir une réponse.

Le terme information réfère à la notion d'incertitude car il n'y a d'information obtenue que par rapport à une ignorance. L'individu, dans sa confrontation permanente à l'environnement, est donc à la recherche d'indices informationnels pour diminuer l'incertitude afin de compenser les capacités limitées de traitement et de stockage, du système nerveux central. Cette recherche s'effectue, par la perception du mouvement, pour la gestion des contacts avec l'environnement, éviter les collisions (marcher au milieu d'une foule, conduire

un véhicule) ou intercepter des objets (frappes, captures de balle). L'information, construite à partir de l'environnement, dépend du sens donné à notre environnement et du traitement de certains indices. Le traitement est une transformation de ces indices (informations), à travers une suite de manipulations comme le filtrage, la mise en forme, la combinaison et l'organisation. Il opère par stade et utilise des mémoires.

La théorie de l'information s'intéressant aux techniques d'ingénierie électrique, son application au fonctionnement de la pensée humaine a conduit à ce que " le système nerveux apparaisse comme un organe autosuffisant, recevant des messages des organes des sens et les transmettant aux muscles " (Wiener, 1961 in Gardner, 1993). Or, si la réalisation d'une tâche motrice implique la prise d'information pour atteindre le but déterminé, elle implique également un phénomène de rétroaction de l'information pour en permettre son évaluation. En effet, au cours de l'exécution du mouvement, il peut y avoir déclenchement de programmes moteurs mémorisés dans le cycle de l'effection motrice et le réajustement indispensable des positions, à partir des données sensorielles produites au cours de l'exécution du mouvement. Les activités du système nerveux apparaissent davantage comme " des processus circulaires, qui commencent dans le système nerveux, entrent dans les muscles pour ensuite entrer dans le système nerveux par les organes des sens " (Wiener, 1961 in Gardner, 1993). La notion de boucle de rétroaction est apparue avec la cybernétique, notamment à partir des travaux de Wiener sur les servomécanismes.

B- Le modèle cybernétique

Wiener, à partir de ses travaux sur les servomécanismes (dispositifs de guidage pour l'artillerie antiaérienne, les missiles et les avions en vol), a étudié la nature des systèmes de rétroaction, d'autocorrection et d'autorégulation. La cybernétique de Wiener (1948) a introduit dans le domaine de la théorie du contrôle et de la communication la notion de feed-back (information en retour à la réponse) et en a souligné le rôle pour le contrôle du mouvement. Le système de traitement de l'information est alors vu comme un système d'autorégulation où la valeur des entrées (informations) est comparée (par un comparateur) à la valeur des sorties (réponses). La comparaison entre ces deux valeurs est effectuée en fonction d'une valeur de référence. En fait, dans le cas d'un mouvement, celui-ci est régulé par la diminution de l'écart entre le mouvement produit et la référence initiale. L'information permet au système de s'adapter à la valeur voulue (ex : le thermostat par lequel on rentre une valeur de consigne ou encore les systèmes de pilotage automatique) l'information n'est, alors, utile que s'il existe un correcteur.

C- La théorie de l'information et le modèle cybernétique appliqués à la performance humaine

La notion de boucle de rétroaction, plus connue sous le terme de feed-back, renvoie à l'idée de contrôle de ce qui est produit. Lorsque l'on parle de correction, au niveau de la performance humaine, on fait allusion aux rectificatifs réalisés par des prises d'information qui agissent en retour, sur ce qui a été fait. Ces informations peuvent être liées soit au système proprioceptif, les informations traduisent alors l'état du mouvement grâce aux récepteurs situés dans les articulations et les muscles, soit au système extéroceptif, dans ce cas les informations renseignent sur les modifications de l'environnement (vision, audition). La boucle de rétroaction, processus essentiel de la cybernétique, a apporté la distinction entre deux types de système ou de contrôle. Le système fermé qui s'organise grâce aux informations extéroceptives (feed-back informationnels). Les classifications des activités sportives basées sur les notions d'habiletés ouvertes (contrôle fermé) et fermées (contrôle ouvert) ne représentent en fait que des tendances plus ou moins prédominantes de ces deux types de contrôle (Alain & Salmela 1973a). A partir de celles-ci, les sports de balle sont considérés comme des habiletés ouvertes puisque le sportif doit continuellement prendre des informations sur l'adversaire, le partenaire, la balle et lui-même. Le sportif adapte son mouvement par un contrôle rétroactif, c'est-à-dire que les informations extéroceptives et proprioceptives sont prises en compte au cours du mouvement.

Pour certains auteurs (Keele, 1968, 1977), la motricité peut fonctionner sans ces prises d'informations, car tout serait prévu à l'avance dans un programme moteur, c'est le système ouvert qui abouti à un mode proactif. Le programme moteur est la représentation du côté moteur de l'habileté (Keele, 1977). Il s'agit d'une unité qui contraint les muscles à se contracter dans la séquence désirée avec un temps propre, sans être influencée par les rétroactions périphériques. C'est une fois que la séquence aura été exécutée, que les corrections seront effectuées par rapport à l'écart entre le résultat attendu et le résultat obtenu (figure 3).

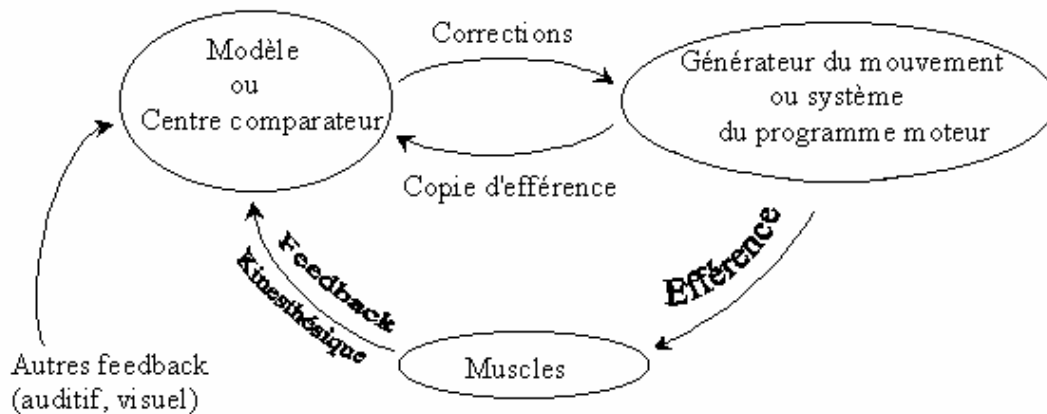


Figure 3. Programme moteur et contrôle (d'après Keele, 1977).

Lorsque l'individu a un geste à effectuer, le système moteur est mis en action sous l'effet des commandes nerveuses. Ces commandes sont organisées selon un ordre déterminé et elles constituent les programmes moteurs. Elles parviennent aux muscles par les voies efférentes. Parallèlement, une copie de ces commandes est effectuée et constitue la copie d'efférence. La comparaison entre l'efférence et la copie d'efférence au niveau du comparateur, permet la précision d'un geste et/ou de son évolution.

Avec les afférences qui proviennent des muscles, tout début du mouvement, puis avec le geste un peu plus avancé, le sujet dispose d'informations plus particulièrement liées à la kinesthésie : l'individu a une connaissance de sa performance (CP). La connaissance de la performance est enrichie grâce à la copie d'efférence et permet au sujet de savoir, avant la fin du geste, s'il a réussi ou non. Une fois l'action terminée, le sujet dispose de la connaissance du résultat (CR, réussite ou non de l'action) Ce résultat entraîne une correction si l'écart, entre le résultat obtenu et celui escompté, est trop élevé.

La formulation des modèles de contrôle de la performance humaine, tel que celui d'Adams (1971), fait explicitement référence à la théorie de l'information et à la conception d'un système autorégulé de la cybernétique.

1- La théorie des deux traces (Adams)

Adams (1971) s'est intéressé à la compréhension des mouvements simples et autorégulés tels que les mouvements de pointage. Les modèles S-R du béhaviorisme ne pouvant expliquer les changements dans le mouvement, Adams a cherché les variables qui en rendent compte. Il considère la mémoire de rappel et la mémoire de reconnaissance. Selon

Adams (1971), l'action est initiée à partir de deux types de mémoire ou trace. La trace *mnésique* a un rôle de sélection, d'initiation et de détermination des premières portions de la réponse, elle précède l'utilisation d'une trace perceptive qui contrôle la paramétrisation (amplitude, durée, force...) du mouvement. La trace *perceptive* correspond aux sensations qui accompagnent le résultat efficace et elle se renforce à chaque essai correct. Le déplacement d'un membre nécessite une référence aux mouvements passés, l'information sur l'erreur dans le mouvement (CR) et les feed-back immédiats sur la position momentanée du membre. La référence est la mémoire du mouvement passé, ce mécanisme de référence est la trace perceptive.

Le point essentiel, de la théorie d'Adams, se situe dans le mécanisme de rétroaction qui permet la comparaison entre ce qui est attendu et ce qui a été réellement fait. A chaque mouvement réalisé correspondent une trace mnésique et une trace perceptive, cette théorie sous-entend que pour chaque mouvement il y a une trace qui est stockée.

2- La théorie du schéma (Schmidt)

a- Les limites de la théorie d'Adams

Mais, les mouvements de déplacement de curseur, utilisés par Adams, ne reflètent pas le large panel de comportements habiles (Schmidt, 1975). De plus, cette théorie ne peut expliquer l'apprentissage d'autres types de réponses, et spécialement la généralisation de réponses nécessitant une vitesse d'exécution plus grande, c'est-à-dire sous contrainte de temps, telles que les frappes et les lancers. Enfin, se pose le problème de stockage des traces et de la nouveauté des tâches. La théorie d'Adams sous-tend que pour chaque mouvement réalisé, il y a un programme moteur et une référence par rapport auquel le feed-back sera comparé. Elle implique aussi une application, un à un, entre les états stockés (programmes ou états de feed-back) et le mouvement qui doit être exécuté. Le problème soulevé, pour le système nerveux central, est celui en termes de quantité de " matériel " qui doit être stocké (Schmidt, 1975). En effet, si l'on prend le cas de la langue anglaise, MacNeilage et MacNeilage (1973, in Schmidt, 1975) ont estimé qu'il existait, en considérant les inflexions et les accents, quelques 100.000 phonèmes et ainsi le même nombre d'états stockés. Lorsque l'on y ajoute les voies complémentaires pratiquement innombrables, autres que le langage, dans lesquelles les sujets déplacent leur corps qui implique la musculature et les os, l'individu doit avoir une quantité innombrable de programmes ou d'états de feed-back en mémoire.

Le problème de la nouveauté est contigu à celui de stockage. En effet, dans les activités sportives, nous n'exécutons pas deux fois de suite exactement le même geste. Si le

mouvement doit être programmé, par exemple, la séquence concernant les commandes musculaires doit être adaptée uniquement pour le mouvement qui doit être réalisé en regard à la position du corps dans l'espace et au but de la tâche.

En réponse aux limites de la théorie d'Adams, Schmidt (1975) propose la théorie du schéma.

b- La théorie et la notion de schéma

Schmidt (1975) a introduit, en référence à Bartlett (1932), la notion de schéma pour résoudre le problème de stockage et celui de la nouveauté des tâches. Pour Bartlett (1932), l'individu réalise quotidiennement un grand nombre de mouvements parfaitement bien adaptés et coordonnés. A chaque fois, ces mouvements sont arrangés en série et chaque mouvement successif est réalisé comme s'il était sous le contrôle du mouvement le précédent dans la série.

" La manière dont je frappe la balle au tennis dépend de la relation de certaines nouvelles expériences, la plupart d'entre elles visuelles, à de précédentes, de ma posture ou de la stabilité de mes postures au moment de la frappe ". Une fois que cette information sur l'état actuel du corps et de l'environnement a été prise Bartlett dit " quand je frappe la balle, je ne produis pas quelque chose de totalement nouveau et je ne répète jamais simplement quelque chose d'ancien. " (Bartlett, 1932, p.202).

La série de mouvements est réalisée comme si la position atteinte par les membres en mouvement, lors du stade précédent, avait été enregistrée (mémorisée) et " fonctionnant toujours " alors même que le mouvement précédent, lui-même, est antérieur et terminé. A chaque fois qu'il y a une certaine régularité du comportement, une réponse particulière n'est possible que parce qu'elle est reliée à d'autres réponses similaires. Ces réponses sont organisées de manière sérielle, pas simplement comme des éléments individuels se succédant les uns après les autres mais comme une unité. Le schéma réfère à l'organisation active des réactions antérieures, ou des expériences passées, qui sont supposées être toujours opérantes dans certaines réponses organiques bien adaptées (Bartlett, 1932). Face à une situation complexe, l'individu ne cherche pas chaque détail de cette situation pour la reconstruire méticuleusement comme un tout. Il part d'une impression générale d'une globalité, et sur cette base, il construit les détails probables. Le schéma est une organisation commune à tous les actes moteurs possédant une certaine identité de structure. Il est alimenté par quatre sources

d'information distinctes, les conditions initiales de l'action, la spécification de la réponse des programmes généraux, les conséquences sensorielles et le résultat de l'action.

Les *conditions initiales* réfèrent aux informations perçues par les différents récepteurs sensoriels (e.g., information proprioceptive au sujet de la position du corps, information visuelle, auditive sur l'environnement) avant l'exécution du mouvement. Une fois le mouvement réalisé, les conditions initiales sont stockées.

La *spécification de la réponse* : A partir du programme moteur général pour les commandes musculaires, avec les variations du pattern de base possible par le changement d'éléments important comme la vitesse, les forces impliquées, etc., le sujet doit spécifier ces éléments avant que le mouvement puisse être réalisé. Après le mouvement, ces spécifications sont stockées avec celles reçues après le mouvement. Elles servent d'enregistrement des spécifications du mouvement produit.

Les *conséquences sensorielles* correspondent aux informations sensorielles produites par la réponse. Elles réfèrent aux feed-back réels perçus par les récepteurs sensoriels. Les conséquences sensorielles sont une copie exacte de l'information afférente provenant du mouvement.

Et la *réponse produite* qui correspond au résultat du mouvement en fonction de celui attendu.

Ces quatre sources d'information sont mises en mémoire après que le mouvement a été réalisé. A partir de ses mouvements passés, le sujet extrait l'information au sujet de l'interrelation des quatre sources d'information, c'est la formation du schéma. Cette interrelation est renforcée à chaque essai successif et avec l'augmentation de la précision des feed-back donnés par la réalisation du mouvement. Schmidt propose deux schémas.

a- Le schéma de rappel ou d'évocation

Le schéma de rappel a pour rôle de sélectionner les paramètres requis afin d'exécuter le mouvement à venir : direction, amplitude du mouvement, durée, force. Il est formé à partir des essais antérieurs. Il correspond à la relation entre les résultats et les spécifications de la réponse. De plus, il permet de générer des spécifications de la réponse qui sont la meilleure expectation quant à la manière de réaliser la réponse désirée. Cette sélection se fait en fonction de l'analyse des conditions initiales et du but à atteindre.

β- Le schéma de reconnaissance

Le schéma de reconnaissance a un rôle de référence en ce sens qu'il permet d'évaluer la réponse par la comparaison entre le mouvement réalisé et le mouvement désiré, il correspond à la relation entre les résultats et les conséquences sensorielles. Le schéma de reconnaissance permet de générer une série de conséquences sensorielles attendues, qui représentent la meilleure estimation des conséquences sensorielles du mouvement correct. En cas de différences entre le mouvement réalisé et le mouvement attendu, celui-ci est corrigé. Le schéma de reconnaissance facilite l'organisation de la motricité.

Avec la théorie du schéma, Schmidt (1975) apporte une solution face au problème du stockage et de la nouveauté, soulevé par la théorie d'Adams. En effet, l'individu n'a plus à stocker des milliers de traces perceptives, mais à partir de programmes moteurs généralisés commun à une classe de mouvements, par exemple les lancers, les saisies, les attrapés..., il produit un programme moteur. L'individu peut également le paramétrer, pendant l'exécution du mouvement, en fonction des afférences sensorielles obtenues en retour. La variabilité des expériences précédentes dans une même classe de mouvement renforce le schéma, ce qui fournit une base pour la production de nouveaux mouvements appartenant à la même classe.

Dans le cadre de l'apprentissage, la théorie du schéma de Schmidt aboutit à la diversification des pratiques, des expériences motrices de l'individu afin qu'il développe un schéma moteur. Elle conduit aussi à la notion de transfert entre les pratiques et les expériences et indirectement à la notion d'interférence.

Avec la théorie du schéma de Schmidt, l'adaptabilité du mouvement s'effectue par la comparaison du résultat voulu à celui obtenu. La rapidité avec laquelle le mouvement est modifié, au cours de sa réalisation, dépend de l'état d'activation du système quand la modification est produite et de la nature de la modification générée (Carlton & Carlton, 1987).

3- Etat d'activation du système et modifications du mouvement

Carlton et Carlton (1987) ont demandé à des étudiants de déplacer une barre d'acier de 75 cm vers une cible à 70° de la position de départ. Ces étudiants devaient stopper leur mouvement à 3° (au maximum) de la cible. Un signal visuel était présenté, à côté de la cible, sur une proportion de 20% des essais réalisés. Les sujets devaient à l'apparition de ce signal visuel soit augmenter le plus rapidement possible la vitesse d'exécution (apparition du signal à gauche de la cible), soit revenir le plus rapidement possible à la position de départ (apparition du signal à droite de la cible). Le signal pouvait être présenté pendant l'activation de l'agoniste

ou celle de l'antagoniste. Lorsque le signal visuel, spécifiant une accélération du mouvement, était présenté pendant l'activation de l'agoniste, le délai de modification était plus court que lorsque le signal notifiait le retour vers la position de départ, c'est-à-dire l'arrêt de l'agoniste et l'activation de l'antagoniste.

Les délais de modification sont plus réduits, lorsque le stimulus stipule une modification des paramètres (i.e., vitesse d'exécution) du pattern d'activation planifié à l'origine qu'un changement (i.e., inversion de la direction du mouvement) de ce pattern (Carlton & Carlton, 1987). Cette différence de délai de modification s'expliquerait par le fait, qu'un changement de direction du mouvement nécessite l'initiation d'une nouvelle organisation motrice ou d'un nouveau programme moteur, alors que la poursuite de la même action nécessite la modification des paramètres dans le programme moteur en cours.

En fait, pour des réponses unidimensionnelles, l'interaction entre l'état du système neuromusculaire au moment de la modification et la nature de la modification requise détermine le délai de modification de la réponse. Les causes de cette non-univocité sont la fatigue musculaire, les conditions initiales (une même contraction peut induire une abduction ou adduction selon la position de départ), les conditions environnementales (gravité, vent...). Il semble que la correction motrice intervienne avec un délai plus bref que la perception consciente (Castiello, Paulignan & Jeannerod, 1991 in Rossetti & Coello, 2000).

Le problème de la vitesse, du délai des modifications du mouvement est important. En effet, beaucoup d'actes nécessitent la production de spécifications spatio-temporelles, de mouvements exacts, prenant en compte les conditions environnementales et l'état de l'organisme. Si l'une et l'autre sont perçus de manière erronée, ou si des changements surviennent dans l'un des états après le commencement d'un mouvement, la réponse produite ne coïnciderait pas souvent avec le but attendu. Les délais de modification du mouvement sont plus courts lorsque le sujet doit augmenter la vitesse d'exécution du mouvement, que lors de changement de direction de celui-ci (inversion de mouvement). Le moment d'arrivée, lors de l'exécution du mouvement, du stimulus qui stipule un changement, est important dans ces délais de modification. Son impact change en fonction de la nature de la modification à générer et de l'état du système au moment de cette modification.

4- Temps de réaction et initiation du mouvement

Si un programme moteur, pour une situation, est plus probable, il sera activé plus rapidement, permettant ainsi une forte diminution du temps de réaction au signal donné, qu'un programme moteur moins probable. Le temps de réaction est composé d'un élément central (le

temps mis pour sélectionner la réponse) et d'un élément périphérique (le temps pris pour initier la réponse) (Kerr, 1982). Le temps, pris par un individu afin d'initier la réponse appropriée, augmente d'une façon linéaire en fonction de la quantité d'information qu'il doit considérer (Hick, 1952 in Kerr, 1982). La loi de Hick s'exprime :

$$TR = a + b (H)$$

C'est à dire que le temps de réaction (TR) est une fonction linéaire monotone de la quantité d'information du système de signaux. Dans cette expression a et b sont constants et H est l'information transmise ($H = \log_2 (n)$, n est le nombre d'alternatives). Dans une tâche où la sélection de la réponse appropriée dépend du stimulus qui se produira parmi un groupe de stimuli possibles, le temps nécessaire pour sélectionner la réponse appropriée augmentera en fonction de l'incertitude véhiculée par la séquence des stimuli (Salmela & Alain, 1973b). Cette détermination, d'un nombre moyen d'informations traitées par unité de temps, postule une limitation de la capacité de traitement de l'information.

Ce postulat a conduit Connolly (1970), entre autres, à définir la diminution du temps de réaction en terme de vitesse de traitement. La vitesse de traitement de l'information est reflétée par la vitesse et la facilité avec lesquelles l'individu va combiner les multiples sous programmes pour réaliser un comportement complexe (Connolly, 1970). La vitesse de traitement de l'information augmente avec l'âge. Sugden (1980), à partir du test de Fitts (1954) de pointages par aller-retour, trouve que la vitesse de traitement de l'information atteint une valeur de 15 bits/s à l'âge de 12 ans.

Cette capacité limitée de traitement de l'information pose le problème de la prise en compte des informations dans les activités sportives telles les sports de raquette, les sports collectifs où les contraintes temporelles et la quantité d'information sont importantes. Dans ces sports, l'individu doit sans cesse répondre à des stimuli mobiles. Par exemple au base-ball, quand un batteur frappe une balle, celle-ci se déplace à une vitesse d'environ 160,9 km/h (Todd, 1981). Pour le joueur de champ il s'agit de déterminer où la balle tombera et s'il dispose de suffisamment de temps pour se déplacer à cet endroit avant qu'elle ne touche le sol. Nos capacités de traitement de l'information étant limitées, le joueur de champ doit, pour compenser cette faiblesse, prévoir à l'avance les événements qui vont se dérouler : il doit anticiper. L'anticipation ne se limite pas seulement à la lecture de trajectoire de balle, elle est également requise dans nos actes quotidiens comme lire, conduire une voiture. Mais les problèmes d'anticipation ont surtout été étudiés dans des tâches d'anticipation-coïncidence,

c'est-à-dire lors de situations d'interception d'un mobile ou d'un mouvement simulé. Par exemple l'allumage séquentiel d'une série de lumières alignées sur une rampe produit un point lumineux en déplacement. La cible à intercepter est le mouvement apparent créé par l'allumage successif de ces diodes.

5- L'anticipation

L'idée d'anticipation est associée à la nécessité de répondre avant l'apparition du signal pour gagner du temps lors de situations où le sujet n'a pas la possibilité d'analyser le stimulus et d'organiser la réponse (Marteniuk, 1976).

L'anticipation-coïncidence est définie par deux aspects (Stadulis, 1972). Le premier est la réalisation d'une réponse motrice au moment (coïncidence) où le mobile arrive au point d'interception déterminé. Le deuxième est l'initiation de la réponse avant (anticipation) que le mobile arrive au point d'interception, pour éviter d'arriver en retard à cause du temps de réaction. L'individu face à une situation d'interception d'un mobile doit prédire où l'interception se produira (prédiction spatiale) et à quel moment (prédiction temporelle). En effet, pour Gibbs (1954 in Whiting, 1979, p.18) dans le cas d'interception de balle, " l'anticipation est essentiellement un processus d'extrapolation des données sensorielles en cours à un certain état physique futur " afin d'extrapoler cet état physique futur l'individu " a besoin d'informations ininterrompues sur la vitesse du changement de la situation ". Le temps minimum pour le traitement de l'information visuelle est de l'ordre de 200 ms (Keele & Posner, 1968) à 100 ms (Carlton, 1981). Sachant qu'au base-ball, le batteur ne dispose que de 430 à 580 ms et que le temps de mouvement est en moyenne de 300 ms, celui-ci doit prendre des informations à l'avance pour pouvoir frapper la balle.

Afin de savoir quelle partie de la trajectoire de balle fournissait l'information nécessaire pour réaliser une interception, un groupe d'études a été réalisé en occultant certaines parties de la trajectoire. Whiting (1979) réalisa une série d'expériences avec un appareil qui lui a permis de réduire les possibilités de voir la balle sur toute sa trajectoire. Il ressort de ces expériences que la partie la plus informative est le milieu de la trajectoire. En effet, il ressort des expériences de Whiting (1979), que la seule prise d'information sur le début de la trajectoire implique une prédiction trop importante pour savoir où la balle arrive. Une seule prise d'information réalisée à la fin, quant à elle, ne laisserait pas assez de temps pour prévoir et organiser la réponse. Mais, cette information finale est importante car elle permet la mise en coïncidence de la balle et de la main (ou de la raquette, batte...) par une régulation de plus en plus fine du lieu et du moment de la saisie ou de la frappe. Cette

capacité d'anticipation de l'individu, à partir de portions de trajectoires de mobiles, permet de libérer de l'attention au profit de l'observation de l'environnement et des prises de décision (Keller, 1993).

Pour anticiper, l'individu doit extraire les informations pertinentes pour la réalisation de son geste, de son action, afin de l'adapter au contexte environnant. En fait, l'individu construit l'information pertinente en fonction de ce qu'il perçoit et cette construction est permise par le traitement de l'information perçue. Pour l'approche cognitive, la construction de l'information pertinente est nécessaire à l'action car le stimulus dans l'environnement ne contient pas d'information exacte en lui-même, les sens ne repèrent pas directement dans l'environnement l'information nécessaire aux actes (approche écologique). La perception ne survient donc pas parce qu'il " existe une sorte d'accord entre le monde et le sujet qui perçoit " (Gardner, 1993 ; p.349).

D- Le traitement de l'information visuelle

Marr (1982 in Gardner, 1993), dans la tradition de Helmholtz, pensait que le système a besoin de recalculer toutes les informations initiales pour qu'il y ait une perception (plus particulièrement visuelle) effective. A partir de ses travaux, sur le cervelet et la vision, Marr (1982 in Gardner, 1993) a proposé trois niveaux de traitement de l'information :

- Le niveau computationnel qui spécifie ce qui doit être " calculé " et les stratégies à utiliser pour réaliser une tâche déterminée.

- Le niveau algorithmique qui définit la nature exacte du " calcul " qui va être effectué. Niveau où sont posées les règles opératoires et les diverses étapes qui vont produire le résultat.

- Le niveau du " hardware " qui est le support matériel de ces opérations (structures nerveuses dans le cas d'un exercice non stimulé). Il impose des contraintes et des limitations aux deux autres.

Ces niveaux ont servi de référence pour déterminer les processus de traitement d'informations visuelles en fonction de trois types de représentations. Les trois types de représentation se composent ainsi :

- " L'esquisse primaire brute ou fondamentale ", elle contient des informations relatives aux variations d'intensité lumineuse qui sont utilisées pour situer les limites, définir les contours et les formes des objets.

- " L'esquisse 2½-D ", l'esquisse primaire est transformée en schéma 2½-D qui fournit des informations sur la profondeur à partir de l'ombre, du mouvement, de la texture et surtout des écarts binoculaires.

- " Le modèle 3-D ", les deux schémas précédents sont centrés sur l'observateur. La représentation obtenue dépend donc de l'angle sous lequel l'objet est observé. Le modèle 3-D lève les incertitudes et les difficultés car il est élaboré à partir d'informations indépendantes de l'observateur.

Cette représentation 3-D permet l'accessibilité, en ce sens que la représentation doit être construite facilement. Les différentes représentations d'un même objet doivent converger vers sa détermination unique (propriété d'unicité et de focalisation).

Une représentation doit être suffisamment sensible pour en reproduire les caractéristiques différentielles (propriété de stabilité et de sensibilité). La reconnaissance des objets en 3-D dépendrait de la combinaison " d'unités primaires " constituées de cylindres de tailles différentes et organisés de façon hiérarchique allant d'un niveau supérieur qui correspond à l'approche la plus globale, à un niveau inférieur qui concerne les détails (figure 4).

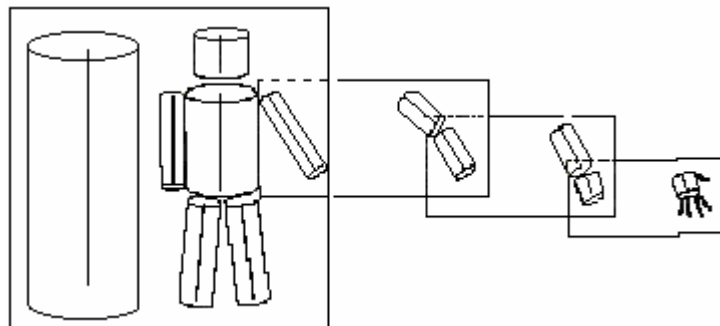


Figure 4. Reconnaissance des objets en 3-D (d'après Gardner, 1993). Chaque rectangle montre, à gauche, l'axe principal de l'objet décrit et à droite, les axes de ses composants. La première " boîte " montre le modèle d'un corps humain, avec son axe unique ainsi que les dispositions relatives des axes de ses composants (tête, tronc, jambes et bras). L'axe qui correspond au bras forme l'axe majeur du " modèle du bras " (deuxième cadre) où les axes des composants bras, avant-bras ainsi de suite jusqu'aux détails des doigts sont explicités

Le modèle de Marr (1982 in Gardner, 1993) représente bien la démarche de la psychologie cognitive qui fait référence à des représentations mathématiques de traitement de l'information par rapport au fonctionnement du cerveau et à l'intrication des différents niveaux de traitement hiérarchique.

La principale limite de l'approche cognitive est la complexité des opérations qui vont être mises en jeu pour agir car toutes les parties du corps doivent être contrôlées. Le contrôle du mouvement est un processus en étapes qui va de la perception de l'information à l'exécution du mouvement en lui-même. L'information perçue doit être traitée pour permettre à l'individu de prendre une décision quant à la réponse à réaliser et au moment de l'exécuter. L'individu doit tenir compte de l'objet en mouvement, des éléments stationnaires ainsi que de l'information relative à la façon dont les yeux et le corps sont en train de bouger. De plus, l'information n'étant pas directement fournie par l'environnement, le sujet doit construire l'information, celle-ci lui permettant de réduire l'incertitude au sujet de l'environnement et d'agir. A cette fin, le sujet oriente son attention vers les informations pertinentes pour la réalisation de son mouvement, à partir de connaissances stockées en mémoire, pour atteindre son but. Ensuite, le comportement est réalisé à partir de représentations et de calculs, or les capacités de traitement et de calcul sont limitées. La théorie cognitive aboutit à une conception de la perception, où les actions d'un point de vue visuo-moteur, n'apparaissent pas exceptionnelles mais reflètent une habileté à utiliser de façon très précoce des indices dont la signification dépend des connaissances acquises au cours des expériences antérieures (Grealy, 2002). Mais la théorie cognitive n'explique pas comment sont construits les programmes moteurs, sont produits les mouvements et les coordinations. Dans la théorie de la perception, il y a une distinction entre les propriétés des objets dans un environnement (les variables physiques) et les propriétés de la lumière qui est réfléchiée par ces objets (les variables optiques). Les études de la perception, traditionnellement, affirment que les relations possibles entre ces deux types de variables (ici référant à l'information visuelle) sont exclusivement composées d'applications multiples à une ("many-to-one"). Les variables optiques sont définies en référence à une image rétinienne bidimensionnelle statique et sont considérées comme étant une représentation appauvrie de l'environnement tridimensionnel. Il est ainsi supposé que la perception est médiée par les attentes du sujet agissant, lesquelles se développent au cours de l'expérience du sujet et sont mémorisées de manière permanente (Todd, 1981).

Au contraire, pour l'approche écologique l'information fait partie intégrante de l'action. Cette approche, en référence aux travaux de Gibson (1986) sur les processus perceptifs, a montré que les variables optiques peuvent être déterminées en référence à un arrangement optique richement structuré et en continuel changement. Ces postulats aboutissent à une conception que l'information qui spécifie l'action est directement disponible dans l'environnement, il n'y a pas besoin de traitement, la perception et l'action sont directes. Cet

accès direct à l'information est rendu possible parce que l'individu et l'environnement sont complémentaires : l'environnement est ce que l'individu perçoit. L'idée, que les entrées sensorielles sont converties dans les perceptions par des opérations du cerveau, est rejetée.

II- Perception et contrôle moteur dans l'approche écologique

L'homme évolue dans un monde perçu de manière tridimensionnelle, la perception implique la relation avec l'environnement. L'approche écologique comprend l'être humain à travers la relation environnement-individu selon un schéma auto-organisationnel en référence aux travaux de Gibson (1986).

Gibson a été influencé par la psychologie de la forme, qui définit la scène visuelle comme une totalité ou une Forme (Gestalt). A l'origine Gibson s'est intéressé à la perception visuelle et plus particulièrement aux lois optiques. Selon lui, *l'information* visuelle se situe nécessairement dans l'environnement, dans l'agencement des éléments de l'environnement. L'individu et l'environnement font partie d'un même monde où les propriétés des êtres vivants correspondent aux propriétés des objets. L'information est la distribution structurée de l'énergie dans l'aire optique environnante qui spécifie les événements ou les aspects des événements dans l'environnement. L'environnement est défini comme un *agencement* de surfaces, qui constitue le fond sur lequel l'animal vit et se déplace ou au-dessus duquel l'insecte, l'oiseau ou un pilote d'avion volent. Les surfaces sont composées d'éléments de texture (cailloux, grains de sable, arbre...). Cet agencement de surface réfère à l'arrangement permanent des surfaces du monde, lequel supporte et entoure les objets qui constituent le monde et bougent autour de lui. Il est à la fois permanent (invariant) dans certains aspects et changeant (variant) dans d'autres aspects. L'environnement consiste donc en des surfaces texturées, elles-mêmes englobées par un " médium ", l'air. La structure, qui existe dans les surfaces de l'environnement, structure à son tour la lumière qui atteint l'observateur. L'objet n'existe que, dans et par un environnement (Gibson, 1986). La perception spatiale et la perception de l'objet sont une seule et même fonction où l'objet est reconnu, pas parce qu'il est en mémoire, mais parce qu'il structure la lumière.

La perception ce n'est pas le traitement des entrées sensorielles, visuelles, auditives, olfactives, kinesthésiques, tactiles ou gustatives, mais l'extraction d'invariants (i.e, ce qui ne varie pas malgré les changements) à partir du flux optique (optic flow). La notion d'invariant va de paire avec la notion de variant, où chaque terme est le réciproque de l'autre, car la permanence (invariant) sous-tend le changement (variant) : La permanence est relative. Le flux optique c'est la déformation de l'image sur la rétine ; d'un objet, de l'environnement ;

pendant un déplacement de l'observateur. Les entrées sensorielles ne sont pas simplement de la lumière (une odeur...) qui vient stimuler les récepteurs sensoriels mais dans la lumière (l'odeur...) il y a de l'information qui peut activer les systèmes. Cette information peut très bien ne pas les activer.

A- Couplage perception-action (l'exemple de la perception visuelle)

Le rayon lumineux parvient à l'œil comme une série de " configurations du flux optique " (optic flow patterns) qui contiennent des informations très diverses. On y trouve les contrastes, les formes, les gradients de texture (changements de densité de la texture en relation avec la perception de la profondeur) qui constituent les indices permettant l'identification de l'objet.

1- Flux optique et déplacement

L'individu, pour tourner dans une direction, doit modifier le centre du flux optique dans cette direction relative à la structure fixée dans l'agencement optique (figure 5). L'individu doit laisser le centre du flux de l'agencement optique aussi proche que possible de l'espace vers lequel l'objet-but se projette. L'agencement optique correspond à l'agencement des angles visuels et de leurs intersections de l'environnement à partir d'une position d'observation. Cette position peut être ou non occupée par un " observateur ". Cette position n'est jamais stationnaire, sauf cas limite, car l'observation implique le mouvement (Gibson, 1986).

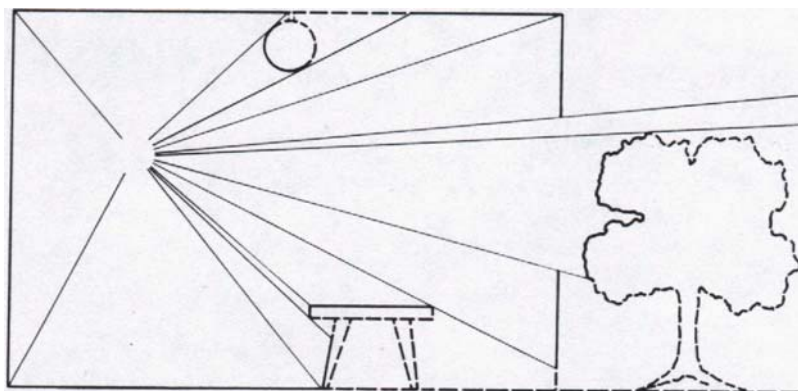


Figure 5. Exemple d'agencement optique. Agencement optique à partir d'une pièce avec une fenêtre. Certaines surfaces sont projetées vers la position d'observation et d'autres non. Certaines sont visibles (traits pleins) d'autres sont dissimulées (traits en pointillés). D'après Gibson (1986).

L'agencement optique change avec le déplacement de l'observateur. La différence entre deux aires optiques est due à la différence entre les deux positions d'observation. A chaque position d'observation correspond une aire optique. L'aire optique inclue les surfaces visibles comme les surfaces dissimulées, l'observateur y perçoit l'agencement des différentes surfaces et pas seulement celles qui sont visibles, ce qui aboutit à ce que l'observateur peut percevoir ce qui n'est pas visible.

Un taux uniforme d'approche est accompagné par un taux accéléré d'amplification. L'approche d'un objet est spécifiée par un agrandissement du contour fermé, dans l'aire optique, correspondant aux bords de l'objet-but. L'éloignement de cet objet-but est spécifié par une diminution du contour fermé. L'amplification atteint un taux explosif dans les derniers moments avant le contact. Cette expansion accélérée dans le champ de vision spécifie une collision imminente et c'est incontestablement un stimulus effectif pour le comportement chez les animaux avec des systèmes visuels bien développés. Chez l'homme, il produit un clignement des yeux et des mouvements aversifs de la tête, même quand le stimulus est une amplification anodine d'une ombre sur un écran translucide (Gibson, 1958).

La configuration du flux optique change donc comme l'observateur se déplace mais les invariants de structure et de texture ne changent pas. Selon Gibson, les informations sont prélevées au niveau des champs de flux rétinien sous la forme d'invariants optiques qui répondent à des règles de transmissions systématiques. Si l'arrangement optique change, comme le point d'observation change, il peut ne pas changer complètement. Les changements proviennent du déplacement de l'observateur et les non changements, de la rigidité de l'organisation des surfaces environnementales. Lorsque l'observateur est stationnaire, il dispose de l'information visuelle à propos de la forme et de l'orientation des objets en mouvements. L'observateur, quand il se déplace, dispose de l'information visuelle au sujet des relations proportionnelles entre la taille et la distance entre les objets stationnaires (Todd, 1981). Les invariants de structure et de texture spécifient un terrain qui ne bouge pas, alors que la configuration du flux optique spécifie le déplacement de l'observateur en référence au terrain (Gibson, 1986). Pour Gibson (1986) la structure réfère à une structure essentielle. Cette structure essentielle consiste en ce qui est invariant malgré le changement. Les invariants différentiels de la vitesse de l'image rétinienne (courbe, divergence et taille) sont utilisés pour caractériser les changements dans la forme des objets dus au mouvement relatif entre l'observateur et l'environnement.

La particularité, des invariants perceptifs, est d'être directement disponible pour l'acteur au niveau des transformations de la scène visuelle (pattern), de rendre compte de

façon univoque, c'est-à-dire sans ambiguïté, ni d'interprétation à faire, des propriétés physiques du système " individu-environnement ". Ces invariants spécifient des affordances qui correspondent en fait aux informations perçues en terme de possibilités d'actions.

2- Les affordances : l'expression de l'isomorphisme individu-environnement

La notion d'affordance vient de celle de " valence " en psychologie de la forme. C'est le caractère " incitateur " de l'objet, de l'agencement de l'environnement. Par exemple l'incitation d'une boîte aux lettres est " poste ta lettre ". Mais, la notion d'affordance se distingue de celle de " valence " en ce sens qu'elle est permanente, qu'elle n'est pas conférée à un objet par un besoin de l'observateur. L'affordance de la boîte aux lettres sera toujours " poste ta lettre " que l'individu ait besoin ou non de poster une lettre (Gibson, 1986). L'individu peut ou non répondre à l'affordance en accord avec ses besoins. Propriétés de l'environnement, les affordances sont reliées aux capacités de l'acteur à les utiliser.

L'affordance réfère, en fait, à la correspondance entre les capacités du sujet, les rapports environnementaux et les opportunités (bonnes ou mauvaises) qui rendent possible une activité donnée. Fondamentalement, la réalisation d'une affordance requiert que l'individu et l'environnement soient adaptés à chacun (Gibson, 1958). La perception des affordances est basée sur " l'extraction " d'information dans les sons, les odeurs, les saveurs et les lumières. Le concept d'affordance implique la réciprocité de la perception-action : la perception guide l'action en accord aux supports environnementaux ou obstacles présentés ; l'action en retour produit de l'information pour davantage de guidage, résultant en un cycle perception-action continu. L'information donnée en retour permet au mouvement d'être régulé de manière prospective plutôt que réactivement en réponse à une perturbation inattendue. L'information spécifie pleinement les agencements, les surfaces, les objets et les événements du monde. Les événements se sont les mouvements et les actions qui arrivent, réalisés par nous ou externes à nous. Ils révèlent les propriétés permanentes des choses et l'agencement. Les événements reflètent l'aspect temporel de la perception (Todd, 1981). Si la perception consiste à coordonner tous les types d'informations, il apparaît que l'information visuelle prédomine dans le contrôle du comportement car l'information visuelle spécifie l'environnement mais aussi permet de nous spécifier dans cet environnement. Warren (1984) a montré que des sujets étaient capables d'estimer avec précision et uniquement à partir de la perception visuelle, la hauteur à partir de laquelle les marches ne peuvent plus être montées normalement, c'est-à-dire sans recours aux mains ou à d'autres comportements d'escalade. L'individu extrait de son environnement des invariants, qui dépendent du rapport individu-

environnement (I-E). L'enfant doit apprendre à extraire et sélectionner l'information utile à ses actions et pas comment interpréter ou construire une perception signifiante à partir de stimuli (comme dans l'approche cognitive) (Savelsbergh, Davids, Van der Kamp & Bennett, 2003).

L'essentiel de l'information, nécessaire au déplacement de l'individu, est dans la stimulation rétinienne (flux optique environnant) et toute modification de l'environnement entraîne une modification du flux optique (Lee, 1976). L'estimation du temps-au-contact avec un objet, un élément de l'environnement repose sur le taux d'expansion de l'image de celui-ci sur la rétine (la variable τ).

3- L'invariant optique tau (τ)

Selon l'hypothèse de la vitesse constante le long de l'axe optique, le temps au contact s'avère être en fonction de l'aire entourée par le contour de l'objet et la dérivée de son temps de déplacement. Un avantage de cette méthode est que l'évaluation du temps au contact est réalisé sans suivre les points caractéristiques de l'image (Di Marco, Garulli, Prattichizzo & Vicino, 2003).

La perception du mouvement est nécessaire dans le contrôle des contacts avec l'environnement, l'évitement des collisions (marcher au milieu d'une foule, conduire un véhicule) et dans l'interception des objets (frappes, captures de balle). L'ensemble de ces actions implique de coordonner l'action avec le déplacement du mobile. Cette coordination nécessite la perception d'informations qui rendent compte du temps restant avant le contact (temps de pré-contact). C'est sur l'expansion optique, où comme un observateur approche d'un objet son angle visuel augmente géométriquement (figure 6), qu'est basée l'information qui spécifie l'existence ou non d'un chemin de collision.

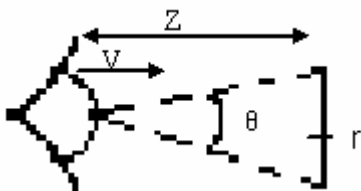


Figure 6. Expansion optique. Où Z est la distance à l'objet, r le rayon de l'objet, v la vitesse de l'observateur et θ l'angle visuel actuel de l'objet.

a- Définition du tau (τ)

Lee (1976, 1980) a montré que, pour un objet qui approche en ligne droite à vitesse constante vers un individu, l'information temporelle est spécifiée directement à l'inverse du taux relatif d'expansion du contour optique (la variable optique tau (τ) dû à l'approche de la balle). En effet, Lee, Young, Reddish et Clayton (1983) ont montré que, lors d'une frappe de

balle de plus de 700 ms, l'information visuelle semblait être utilisée non seulement pour déterminer le point d'initialisation temporelle de l'acte mais aussi pour guider le mouvement jusqu'à son aboutissement, quand la balle arrive dans " l'espace d'action ".

Cette variable optique se trouve être définie par la taille de l'image rétinienne divisée par la vitesse de changement de cette image, on obtient (Lee, 1976) :

$$\tau = \frac{1}{\text{taux d'expansion du contour optique}} = \frac{\text{séparation angulaire de 2 points de l'image du mobile}}{\text{taux de séparation des points de l'image du mobile}}$$

La simplification du rapport de la distance sur la vitesse se traduit par un temps.

Cette variable optique est une variable purement relative (Lee, 1976). Cette variable permettrait que le temps-au-contact soit directement utilisé et plus rapidement qu'à partir de la distance, la vitesse et l'accélération de l'image du mobile (Lee et coll., 1983). Lee et coll. (1983) ont voulu montrer, dans leur expérience de frappe de balle en sautant, que des actions complexes (i.e., arrêts des gardiens de buts, actions des joueurs de volley-ball qui impliquent des actions coordonnées des jambes et des bras) sont continuellement adaptées à τ , ce qui ne serait pas le cas si l'action était un acte balistique préprogrammé. Si les actions des jambes et des bras sont contrôlées par τ alors le temps au contact, lorsque chaque étape de l'action est atteinte, devrait être d'autant plus grand que le temps de chute du ballon sera grand. Si au contraire, l'action est préprogrammée en totalité comme une unité et que le programme est simplement déclenché lorsque τ atteint une certaine valeur, alors le temps total de mouvement devrait être constant et les différents temps de chute de la balle devrait affecter le timing des différentes étapes de cette action de la même manière. Une étape de l'action atteinte précocement entraîne la même précocité dans les autres étapes.

L'expérience consistait en une frappe d'un ballon de football en plastique de 20 cm de diamètre, tombant de trois hauteurs (3, 5 ou 7.2 m). Des adultes (4 hommes, âgés de 23 à 25 ans) devaient frapper le ballon avec une main. La frappe devait être la plus rapide et la plus forte possible. Il ressort que les sujets, sautant pour frapper la balle tombante, adaptent leurs actions de bras et de jambes, avec un certain délai visuo-moteur, à la variable optique " τ ".

Pour répondre aux critiques que :

- la variable τ ne rend pas compte du contrôle des actes moteurs avec une phase d'accélération suivie d'une phase de décélération (i.e., mouvement d'atteinte manuelle caractérisé par un profil de vitesse en cloche)

- et que cette variable ne fait référence qu'à un seul intervalle optique (celui entre l'individu et l'objet), alors qu'en sport plusieurs intervalles doivent être contrôlés simultanément, Lee et coll. (1995, 1999) ont élaboré une nouvelle théorie du contrôle spatio-temporel qui à la différence de la théorie de τ , n'est pas restreinte à la modalité visuelle et ne prend pas en compte qu'une seule et unique source d'information.

b- La stratégie du tau-coupling

La notion de τ -coupling renvoie à la constriction synchrone de deux intervalles en maintenant les valeurs de τ , dans un rapport constant, pour chaque intervalle. Un intervalle est la différence entre l'état actuel de l'organisme et le but à atteindre. Elle peut s'exprimer sous la forme d'une distance à parcourir, d'un angle qui varie ou d'une force qui doit être exercée pour accomplir une tâche donnée. La stratégie τ -coupling garantit que des intervalles d'amplitudes et d'orientations variables (parcours à des vitesses différentes) vont atteindre leur constriction maximale (c'est-à-dire la même destination) au même moment. Dans le cas où un objet se déplace en direction d'un but particulier (situation dynamique), l'ajustement temporel du mouvement s'effectue sur la base de la variable τ -coupling extrinsèque, c'est-à-dire du couplage entre la variable τ de l'intervalle objet-destination, avec celle de l'intervalle individu-destination. Par exemple, dans la course de relais, le coureur qui attend le passage du témoin doit réaliser un couplage temporel entre la constriction de l'intervalle le séparant de la limite de la zone de transmission, avec la constriction de celui le séparant du passeur qui court dans sa direction (Grealy, 2002).

Lorsqu'il s'agit de frapper précisément une balle immobile la théorie du τ -coupling ne peut être utilisée. En effet, il n'y a aucune information temporelle à partir de laquelle un contrôle prospectif du mouvement pourrait être réalisé, car dans ce cas le mouvement est auto-initié, le but et le déroulement temporel de l'action sont définis intrinsèquement et non plus extrinsèquement.

c- Le tau-guide

Le mouvement est alors contrôlé par l'utilisation de la variable τ -guide générée intrinsèquement et à laquelle le déplacement de l'individu est couplé. Le choix de cette variable appropriée aux contraintes de la tâche dépend du type d'action induit par la situation (affordance) et des prédictions faites à partir des expériences antérieures. L'hypothèse de la variable τ -guide intrinsèque oblige à accepter l'existence d'une capacité toute particulière à évaluer la durée totale d'une action avant que celle-ci ne soit produite (Grealy, 2002).

Lee (1976) et Lee et coll. (1983), entre autres, ont montré que tau permet de contrôler les mouvements de la main lors d'interception et de guider le déplacement de l'individu à l'endroit où la balle touchera le sol. Mais, les déplacements locomoteurs impliqués dans les actions d'interception pourraient s'organiser à partir d'autres stratégies. Babler et Dannemiller (1993) sont arrivés à l'utilisation de l'accélération verticale de l'image de la chute d'une balle, où la caractéristique de l'accélération de cette image semble convenir pour le guidage de la phase de poursuite en vue de l'interception. Le fait d'ajuster la vitesse de déplacement pour maintenir une accélération nulle de l'image du mobile, peut constituer un moyen concret pour guider l'action d'interception. Une telle stratégie devrait placer l'observateur à l'endroit d'atterrissage de l'objet.

4- Autres stratégies basées sur tau (τ)

a- Élévation de l'angle du regard ou comment intercepter une balle

En considérant la figure 7 (ci-dessous), pour intercepter une balle avant qu'elle ne touche le sol ($y = 0$), l'individu doit faire tendre x vers zéro. En fait, l'individu doit être à l'endroit précis où la balle touchera le sol.

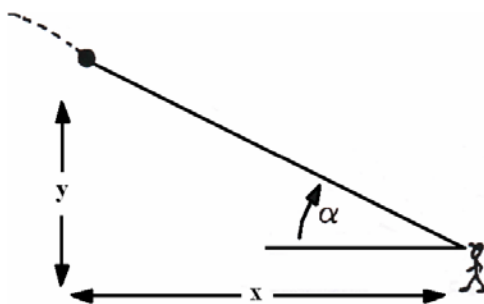


Figure 7. Représentation schématique de l'élévation de l'angle du regard (α). Y est la hauteur de la balle, X est la distance horizontale entre le joueur et la balle. D'après McLeod et Dienes (1996).

Si les distances x et y tendent ensemble vers zéro, l'angle de l'élévation du regard (α) devrait toujours être positif mais inférieur à 90 degré (figure 8).

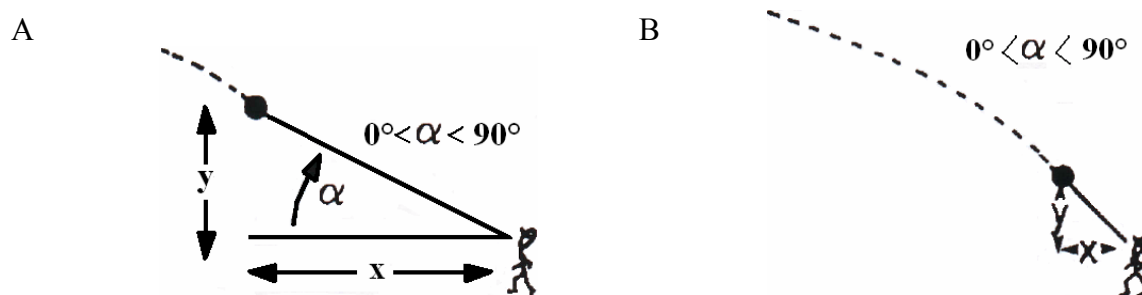


Figure 8. Illustration de l'évolution de x et y pour que le joueur de champ puisse attraper la balle. Pour

qu'il attrape la balle, à mesure que la balle tombe (Y tend vers zéro) il doit se rapprocher du lieu " d'atterrissage " de la balle (c'est-à-dire faire tendre X vers zéro). D'après McLeod et Dienes (1996).

L'échec de l'interception peut s'expliquer de deux manières : soit la balle est tombée devant lui (figure 9A), soit elle était au-dessus de sa tête (figure 9B). Pour attraper la balle le joueur doit donc courir à une vitesse qui lui permette de garder l'angle du regard supérieur à zéro degré et inférieur à quatre vingt dix degrés, tout au long de la trajectoire de la balle (McLeod & Dienes, 1996). Si l'angle de regard atteint une de ces deux valeurs alors le joueur échouera dans son attraper, excepté dans le cas d'attraper avec une extension du bras. C'est exact, seulement si les balles tombent juste devant les yeux de l'attrapeur (c'est-à-dire le point à partir duquel l'angle d'élévation du regard a été mesuré). Les joueurs de champ peuvent, effectivement, tendre leurs bras vers la balle et attraper une balle tombant devant eux, malgré un angle qui est égal à zéro (figure 9A). C'est exactement le même principe lorsque l'angle atteint la valeur de quatre vingt dix degrés (figure 9B) (McLeod & Dienes, 1996).

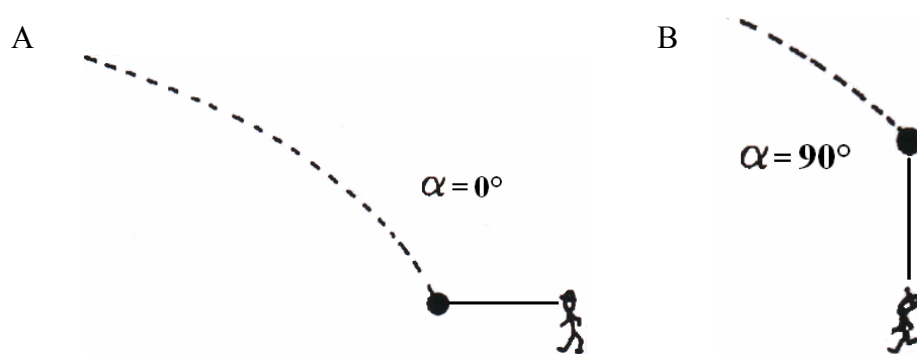


Figure 9. Illustration des deux cas qui peuvent expliquer l'échec du joueur de champ dans son attraper de balle. Figure A : la balle est tombée devant le joueur de champ (Y est égal à zéro mais X est supérieur à Zéro). Figure B : la balle était au-dessus de la tête du joueur de champ (X est égal à zéro mais Y est supérieur à zéro).

McBeath, Shaffer et Kaiser (1995), dans le cadre d'attrapés de balle au base-ball, ont montré deux types de stratégies selon les déplacements de la balle et du joueur. Lorsque joueur et balle se déplacent dans un même plan vertical, la stratégie utilisée serait basée sur l'annulation de l'accélération optique du mobile. Dans le cas où acteur et mobile ne se déplacent pas dans le même plan, elle serait basée sur la trajectoire optique linéaire (linear optical trajectory, LOT).

b- La stratégie de l'annulation de l'accélération de la tangente de l'angle optique (AT)

Cette stratégie basée sur l'annulation de l'accélération de la tangente (AT) de l'angle optique vertical (α) permettrait à l'individu d'être au bon endroit et au bon moment sans que celui-ci ne connaisse a priori ni la position ni le moment d'arrivée du mobile (McBeath et coll., 1995).

Cette stratégie provient d'une observation empirique que les joueurs de champ courent à une vitesse telle que la tangente de α augmente à un taux constant. L'attrapeur, pour être à la bonne place au bon moment, doit garder l'accélération de la tangente de α (balle, œil et horizontale, figure 7) proche de zéro. La tangente de α augmente lorsque la balle s'élève et diminue lorsque la balle retombe.

- Si la balle arrive devant le joueur, $AT < 0$ alors le joueur accélère,
- Si la balle arrive derrière le joueur, $AT > 0$ alors le joueur décélère ou recule pour faire l'attraper (Oudejans, Mickaels, Bakker & Davids, 1999 ; McLeod, Reed & Dienes, 2001).

Afin de déterminer comment AT est détectée, Oudejans et coll. (1999) ont observé les mouvements des yeux et de la tête de joueurs de champ au base-ball lors d'observation ou d'attrapés de balle, ainsi que les niveaux de réussite lors d'attrapés en condition de visibilité complète par rapport aux attrapés effectués dans l'obscurité (seule la balle est visible). Il ressort qu'après l'initiation du mouvement des yeux, dans le cas de l'observation de la balle, les joueurs de champ ont montré une poursuite visuelle continue de la balle. Dans la condition d'attraper, les mouvements de l'œil et de la tête semblent contribuer plus régulièrement à la poursuite visuelle que dans la condition d'observation. Parce que la poursuite, une fois débutée, était continue, les mécanismes de combinaison de l'information extra-rétinienne et rétinienne peuvent être exclus. Deux solutions demeurent : La solution rétinienne de l'information extraite (extraction du mouvement rétinien de l'arrière plan) et les solutions extra-rétiennes qui impliquent l'information vestibulaire et/ou proprioceptive de l'œil et des muscles du cou. D'où les conditions d'attraper dans l'obscurité et en visibilité complète car s'il est possible de courir dans le noir pour attraper une balle, alors les mécanismes extra-rétiens devraient être impliqués, si ce n'est pas réalisable alors un arrière plan visiblement structuré est nécessaire (Oudejans et coll., 1999). Le nombre de réponses correctes dans la condition de localisation ne diffèrent pas significativement entre dans l'obscurité (96%) et avec lumière (97%), les sujets n'avaient pas plus de difficulté à percevoir, dans l'obscurité, où la balle se

dirigeait. Dans l'obscurité (balle seule visible), les attrapeurs étaient capables de courir pour localiser l'atterrissage d'une balle et l'intercepter dans la majorité des cas. De la régularité de la poursuite visuelle de la balle et des attrapés réalisés dans le noir, Oudejans et coll. (1999) concluent que la source d'information, nécessaire pour le guidage de la locomotion dans la direction de la balle devant être attrapée, n'est pas détectée uniquement à partir du mouvement de la balle sur la rétine. Les mécanismes extra-rétiniens semblent être impliqués. La poursuite de la balle utilisant les mouvements de l'œil et de la tête (et peut-être d'autres segments du corps) dresse le pattern optique des rotations combinées de la tête et des yeux relatives à la tête. Le système proprioceptif " muscle-œil " seul ou le système vestibulaire seul ne pourrait extraire l'une et l'autre de ces rotations ; un effort minimal combiné du système vestibulaire et des systèmes proprioceptifs de l'œil et des muscles du cou est nécessaire. Un des avantages de l'implication du système vestibulaire dans la détection de rotation de la ligne de regard est la vitesse de traitement de ces signaux dans le système nerveux central, laquelle est plus élevée que celle avec laquelle les signaux visuels sont traités. L'autre avantage concerne une des critiques de l'utilisation de AT : l'Homme a une faible sensibilité à l'accélération (Todd, 1981 ; Babler & Dannemiller, 1993). L'implication du système vestibulaire signifie que AT est extrait par un système perceptif convenant mieux pour la détection de l'accélération (Cohen, 1974 in Oudejans et coll., 1999). Si AT est la variable opérationnelle dans la réalisation de la course dans les attrapés, AT peut-être conçue comme un invariant intermodal qui n'est pas extrait par une seule modalité mais grâce à l'interaction fonctionnelle entre les systèmes visuel, vestibulaire et proprioceptif du muscle. Pour Oudejans et coll. (1999) ce caractère intermodal de l'information extraite serait un principe général sous-jacent à la perception et à l'action.

c- La stratégie de la trajectoire optique linéaire (LOT)

De manière analogue, la stratégie LOT (linear optical trajectory strategy) serait susceptible de permettre à l'individu, lorsque ses déplacements et ceux du mobile ne sont pas dans un même plan, d'intercepter le mobile en maintenant constant l'angle d'élévation de la balle, sur le plan optique (McBeath et coll., 1995). L'information optique disponible pour le joueur de champ peut être plus simplement analysée sans la décomposer en composants séparés vertical (angle α) et horizontal (angle β) mais au contraire comme une image optique 2D unifiée (figure 10).

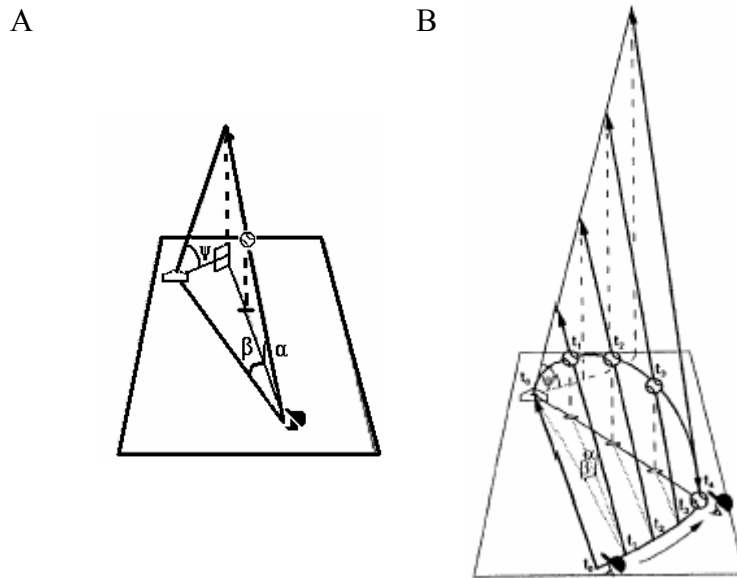


Figure 10. Modèle de la trajectoire optique linéaire (LOT). Vue tridimensionnelle d'un joueur de champ courant pour attraper une balle arrivant sur sa droite ou sur sa gauche. La boîte trapézoïdale représente la projection de la perspective du plan de fond. La trajectoire optique est montrée avec les vecteurs des positions du joueur de champ qui passent à travers la balle. *Figure A* : Définition des angles optiques. α est l'angle optique vertical, β est l'angle optique latéral et Ψ est l'angle optique de l'image du plan (où $\tan\alpha/\tan\beta = \tan\Psi$, pour une projection plane). *Figure B* : La stratégie LOT, pour maintenir l'angle (Ψ) constant, ne s'effectue pas par un seul chemin. Le joueur de champ sélectionne un patron de course tel que le mouvement optique latéral de la balle reste proportionnel au mouvement optique vertical de la balle. Parce qu'ils sont égaux, les angles optiques latéraux produisent des distances plus petites pour les objets proches, le joueur de champ ralentit latéralement comme la balle approche. Le patron de course, qui en résulte, est légèrement courbé autour de la balle. t est le temps (d'après Shaffer & McBeath, 2002).

La stratégie LOT revient à maintenir ψ constant (angle optique de l'image du plan formé par α et β). Une trajectoire optique linéaire est obtenue par le maintien de la vitesse et de la direction de la course du joueur de champ permettant de maintenir une augmentation monotone des angles optiques vertical et latéral. Cette stratégie nécessite le maintien de l'équilibre entre le changement angulaire optique vertical et latéral mais ne nécessite pas la connaissance de la distance à la balle ou au plan de départ. Si la trajectoire optique de la balle courbe vers le bas, elle atterrira devant le joueur, vers le haut, elle tombera par-dessus et au-delà du joueur. La tâche de celui-ci est essentiellement de discriminer et de maintenir une trajectoire optique en ligne droite versus une trajectoire mono courbée. Aussi longtemps que le joueur peut préserver une trajectoire optique augmentant de manière linéaire, il maintiendra le contrôle de la balle et se déplacera vers la destination correcte (McBeath et coll., 1999 ; Shaffer & McBeath, 2002).

Dans leur expérience d'attrapés de balle irrattrapables, Shaffer et McBeath (2002) ont montré qu'en fait, la stratégie LOT est utilisée majoritairement, bien qu'elle ne soit pas la stratégie optique exclusive chez les joueurs de champ au base-ball. Cette stratégie n'est pas efficace, dans les cas de poursuite visuelle pour attraper une balle. Cette inefficacité peut fournir un critère qui indique quand les cibles sont irrattrapables et quand alors des stratégies alternatives peuvent être initiées. La stratégie LOT serait principalement utilisée quand les balles sont dirigées vers le côté du joueur. Le fait que les joueurs de champ maintiennent initialement un angle relatif constant de déplacement pour les deux types de balle, suggère que l'utilisation de cette stratégie garantisse un contact avec la balle, si elle est attrapable, et dirige le joueur vers le point de chute quand elle ne l'est pas (Shaffer & McBeath, 2002).

Les résultats de plusieurs études dont celle de McLeod et Dienes (1996) et Shaffer et McBeath (2002) ont montré un invariant angulaire. Si le joueur cherche à maintenir une variation angulaire constante pour attraper la balle au base-ball, il arrive au bon endroit au bon moment. Cette règle permet d'expliquer les freinages ou accélérations subites. Mais McLeod et Dienes (1996) ont observé que si la stratégie LOT est très largement utilisée, ce n'est pas la stratégie générale. La trajectoire optique linéaire proposée par la stratégie LOT ne dépend pas de la distance à laquelle la balle a été frappée. Les balles génèrent des trajectoires optiques que le joueur de champ devra maintenir linéaires s'il le choisit. Pourquoi les réponses des joueurs de champ, ou de toute personne courant pour attraper une balle, ne sont-elles pas toujours compatibles avec la stratégie LOT ?

Courir à une vitesse telle que l'angle d'élévation du regard augmente à un taux décroissant apparaît être un comportement universel lorsque les individus attrapent une balle. En effet, ce comportement a été montré pour les attrapés de balles lancées vers les sujets sur des distances courtes (Oudejans et coll., 1999), pour les attrapés de balles frappées sur de longue distance, comme au cricket ou au base-ball, qui viennent soit directement sur le joueur de champ (McLeod et Dienes, 1996) ou sur le côté (McBeath et coll., 1995). Mais il semble que les sujets doivent avoir un niveau correct dans cette habileté (McLeod et coll., 2001). En fait, ces auteurs suggèrent que l'angle du regard génère le signal pour un servomécanisme qui produit une vitesse de course telle que l'angle du regard augmente à un taux décroissant. Si l'angle du regard augmente trop rapidement ou trop lentement, le cerveau ajuste la vitesse du joueur de champ en conséquence (McLeod et coll., 2001). Les enfants ou les débutants au base-ball échoueraient dans leurs attrapés non pas, parce qu'ils ne sont pas sensibles à la variation du flux optique mais parce qu'ils n'auraient pas " découverts " cette relation qui lie l'information visuelle, obtenue à partir de l'observation de la trajectoire de la balle, à une

vitesse de course qui les conduira à l'endroit correct, indépendamment de leur position de départ ou de la trajectoire de la balle. L'apprentissage de l'attraper impliquerait la découverte de cette relation (McLeod & Dienes, 1996). De plus, les débutants doivent " découvrir " la relation qui lie le timing de l'objet en mouvement et le timing de leurs propres mouvements. Richards et Murphy (1988 in McLeod & Dienes, 1996) ont observé que les attrapeurs au cricket, préfèrent attraper une balle qui a été frappée très haut dans l'aire juste devant leurs yeux. Ils tendent leurs bras pour attraper la balle, comme un ajustement au dernier moment, s'ils ne sont pas au bon endroit. A partir de ces observations, McLeod et Dienes (1996) ont supposé que les joueurs de champ couraient vers l'endroit optimal pour l'attraper, en comprenant que quelques autres algorithmes existent pour contrôler les mouvements des bras qui permettent une correction juste comme la balle arrive, s'ils ne sont pas à l'endroit optimal. Si les comportements d'attrapés de balle sont compatibles avec les différentes stratégies exposées, il reste à déterminer de quelle manière l'individu estime les valeurs d'angle.

L'individu adapte donc son comportement à l'invariant optique. Toute modification du flux optique entraîne une modification du mouvement. L'idée générale est que l'information appropriée pour l'action (champs de flux optique) est générée par les déplacements, et utilisée pour contrôler et coordonner les forces musculaires (champs de force) (Savelsbergh, Davids et coll., 2003).

5- La dynamique du couplage perception-action

Kugler, Kelso et Turvey (1982) ont proposé une loi de contrôle qui exprime la relation entre perception et l'action. Le fonctionnement du couple perception-action se comprend par la médiation des champs de flux et des champs de force (figure 11).

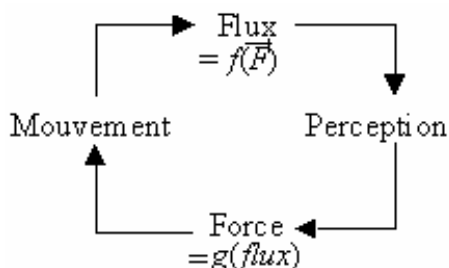


Figure 11. Champs de flux, champs de force et le fonctionnement du couple perception-action (d'après Kugler et coll., 1982).

- Les champs de flux sont les informations captées au niveau des récepteurs sensoriels. Ils fournissent des informations sur les transformations du système "individu-environnement".

Ils résultent du déplacement de l'individu, de la mobilité d'objets dans l'environnement ou de la combinaison des deux.

- Les champs de force, selon le principe que toute force appliquée sur un système entraîne sa déformation, ont pour origine l'identification de désorganisation du système " individu-environnement " et induisent la production d'actions motrices qui correspondent en définitive à une recherche d'une (ré)organisation de ce système. L'information est utilisée directement pour contrôler la structure coordinatrice, c'est-à-dire la structure fonctionnelle qui permet de contrôler un ensemble de muscles et d'articulations comme une seule unité. La forme d'un mouvement dépend de la quantité d'énergie qui va être produite, la force qui va être mise en jeu entraîne une similitude, toute variation des forces va entraîner une modification du mouvement en relation avec l'environnement. Par exemple, sur une surface rugueuse et plane l'individu adopte la marche, alors que sur la glace, il adopte le pas du patineur : la variation de l'environnement a amené un changement de la forme gestuelle.

La forme gestuelle émerge de l'organisation des membres et des articulations à l'intérieur d'unités fonctionnelles agencées pour des tâches spécifiques et fonctionnant sous des contraintes environnementales particulières (Thelen, 1986). Les formes gestuelles sont donc la traduction des contraintes du milieu sur un organisme qui les gère en fonction des structures coordinatrices. Ces structures contraignent les coordinations possibles des articulations des membres (Thelen, 1986), elles peuvent être décrites à travers la notion de degrés de liberté.

B- Coordination et développement moteur

Bernstein est le premier à avoir explicitement défini le mouvement en termes de coordination, d'interaction coopérative des parties du corps et des processus pour produire une réponse coordonnée. Cette conception aboutit à ce que les mouvements peuvent survenir d'une variété de patterns de contraction musculaire et qu'une série particulière de contractions musculaires peut ne pas toujours produire le même mouvement (Thelen, 1995) ces différences dépendent du contexte dans lequel la contraction musculaire survient. Le cerveau ne peut donc pas programmer à l'avance et spécifiquement toutes les interactions, basées sur les forces, qui varient en fonction du contexte et localement (Thelen, 1995). Une fois la décision de bouger prise, les sous systèmes et les éléments qui produisent la trajectoire du membre sont assemblés avec laxité (Kugler & Turvey, 1987) à partir de tout ce qui est disponible et le mieux adapté à la tâche. Ce fonctionnement permet au système une grande flexibilité afin de

s'adapter aux demandes de la tâche dans un environnement continuellement en changement, au cours du maintien d'une catégorie de mouvement adaptée au but. L'individu qui se déplace doit (seulement) spécifier les paramètres de déplacement du membre permettant d'atteindre la position finale.

Pour Bernstein (1967) l'atteinte du contrôle implique une maîtrise des nombreux degrés de liberté. En effet, les articulations, les tendons, le tronc, les muscles, opèrent les uns par rapport aux autres.

1- La dynamique de la coordination

a- Les degrés de liberté (DDL)

Bernstein (1967) a inspiré une alternative à l'approche quantitative de la coordination, en suggérant qu'elle est le résultat de la maîtrise des nombreux degrés de liberté, à partir desquels un mouvement peut être produit, qui transforme les organes en action en systèmes contrôlables. Le problème des degrés de liberté réfère aux mouvements possibles de tous les composants du système (muscles, tendons, articulations) de l'appareil moteur humain. Les degrés de liberté peuvent être de nature cinématique et dynamique (Bernstein, 1967).

Dans le cas du contrôle des différentes articulations, les degrés de liberté correspondent au type de mouvement qu'un segment du corps peut effectuer; à une possibilité (flexion du coude = 1 ddl. Épaule, hanche = 3ddl) (figure 12).

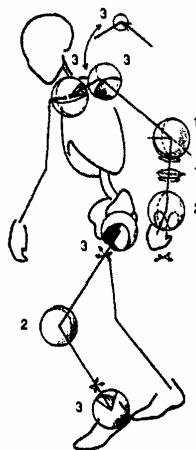
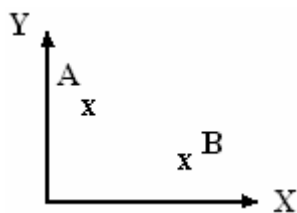


Figure 12. Degrés de liberté des différentes articulations. Les chiffres figurant en regard des articulations indiquent leur nombre respectif de degrés de liberté (d'après Dempster, 1955). La forme de l'articulation détermine la nature des mouvements qu'elle peut effectuer.

L'organisme réduit à leur strict minimum les possibilités de variations des articulations à l'intérieur du système, par un blocage d'une articulation ou d'une série d'articulations. Il s'agit de l'équation de contrainte qui permet une autorégulation au niveau de la périphérie où le nombre de degrés de liberté d'un système est obtenu par :

$$N = (D \times E) - C$$

Où D est le nombre de dimensions du système, E est le nombre d'élément du système et C, le nombre d'équation de contrainte.



Soit A et B, pouvant se déplacer librement selon la verticale (y) et l'horizontale (x), de manière complètement indépendante l'un de l'autre. En appliquant la formule à ce système à deux éléments, il en résulte quatre degrés de liberté. Si A et B sont liés, alors toute variation de l'un entraîne une variation de l'autre, il existe donc une équation de contrainte d'où trois degrés de liberté (Turvey et coll., 1982).

Sur cette base il a été supposé que les sujets puissent résoudre un nouveau problème moteur en fixant certains composants rigidement et/ou en couplant fortement leurs déplacements, réduisant ainsi le nombre des degrés de liberté initiaux. Selon le point de vue dynamique, le comportement moteur est considéré comme un système dont l'évolution est caractérisée en commun avec les systèmes physiques naturels auto-organisés. La réduction du nombre des degrés de liberté est attribuée au résultat de l'auto-organisation du système neuro-musculo-squelettique confronté aux contraintes dynamiques spécifiques de la tâche, plutôt qu'au résultat de prescriptions spatio-temporelles descendant d'un système de contrôle hiérarchique (Kugler et coll., 1982). Lors de la réalisation d'un mouvement le système implique des contraintes dynamiques, c'est-à-dire des contraintes biomécaniques, ostéo-musculaires et neurophysiologiques du déterminisme du réseau neuronal en relation avec les informations du milieu.

b- Les invariants dynamiques

- La géométrie du squelette : Quel que soit le mouvement adopté, l'anatomie de la colonne vertébrale a été dictée par la nécessité de réduire le nombre de degré de liberté à contrôler et amène au maintien de la tête dans une posture horizontale. Cette invariance de position transforme la tête en une plate-forme stabilisée, ce qui permet la suppression des

rotations de la tête, et donc de ne laisser dans le flux optique que des modifications du champ visuel liées aux translations. La stabilisation de la tête simplifie la fusion des informations visuelles et vestibulaires, elle diminue aussi le glissement rétinien et permet au réflexe vestibulo-oculaire de compléter la stabilisation du monde visuel sur la rétine (Berthoz, 1997). Par exemple lors de la locomotion ou de la course, la tête se retrouve stabilisée en rotation autour de sa position déterminée par la direction du regard (figure 13).

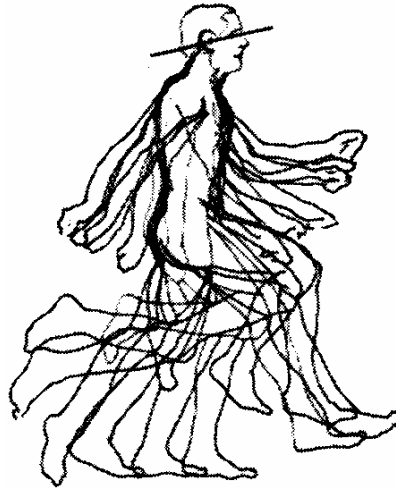


Figure 13. La tête est stabilisée pour contrôler la posture et la coordination des mouvements. Cette figure illustre un homme en train de courir et a été obtenue à partir de la superposition des photographies de Muybridge au même point de la tête (le méat auditif). D'après Berthoz (1997).

- La limitation des mouvements possibles : La biomécanique impose des solutions géométriques qui ont été organisées au cours de l'évolution. Cette architecture du squelette est représentée dans les circuits internes qui permettent de simuler mentalement le mouvement (Berthoz, 1997).

- La cinématique de phase : Les segments du corps ont des relations très précises entre eux. Lors de la réalisation dans l'espace, avec le bras, d'un huit, l'angle du bras augmente par rapport au corps et diminue par rapport à l'avant-bras. Un seul paramètre est alors à contrôler, en ne faisant varier que le rapport d'amplitude des deux angles et non la multiplicité des angles que font les segments entre eux (Berthoz, 1997).

La réduction des degrés de liberté pourrait avoir de larges implications pour la planification et l'exécution de mouvements en 3-D (Gielen, Vrijenhoek, Flash & Neggers, 1997). Cette réduction des degrés de liberté change un système complexe dans une tâche spécifique en une structure coordinatrice flexible. Laquelle structure est caractérisée par ces

invariants topologiques et facilement contrôlable via un petit nombre de variables (Turvey, Shaw & Mace, 1978). Variables essentielles pour Kugler et coll. (1982) ou paramètres d'ordre pour Schöner et Kelso (1988).

c- Variables essentielles

Une variable essentielle reflète les aspects qualitatifs du patron de coordination en résumant les relations entre les composants. L'analyse dynamique du système, représentée par les structures coordinatrices, nécessite que les invariants topologiques, références biomécaniques, ostéo-musculaires et neurophysiologiques, soient caractérisés par une ou plusieurs variables essentielles (Kugler et coll., 1982). Les variables essentielles spécifient les invariants topologiques qui seront utilisés pour réaliser la tâche et leur relation temporelle (Kelso & Schöner, 1988). Une structure coordinatrice peut être caractérisée par la nature et la valeur de ses variables essentielles. Le travail de Kelso a montré que l'identification de la variable essentielle tient compte de l'identification des états stables qui constituent la dynamique intrinsèque de la coordination. Par exemple, les états qui sont spontanément adoptés sous les effets des altérations dans un paramètre contrôle correspondent à une nouvelle valeur particulière de la variable essentielle. A partir de cette perspective, la dynamique intrinsèque du système sert de charpente de référence pour l'évaluation des transformations qualitatives dans la coordination (Schöner, Zanone & Kelso, 1992). La dynamique comportementale élaborée pendant l'apprentissage résulte de l'intégration, à l'intérieur de dynamiques intrinsèques du système, d'un ou plusieurs stades de coordination qui n'y figurent pas initialement (Zanone & Kelso, 1992). Le cours de ce processus de changement est la compétition entre ce que l'individu veut, ou ce qui lui est demandé de faire, et les tendances naturelles du système à préférer certains modes de coordination.

d- Variables de coordination

Les variables de coordination maintiennent leur forme spatio-temporelle (ex : timing relatif) et les variables de contrôle peuvent changer mais la forme est maintenue (ex : force ou vitesse). Les avancées récentes sur la coordination inter-segmentaire ont démontré que chez les adultes, des formes de couplage coopératif spontané entre les membres sont régies par la dynamique bien définie de la coordination, également appelée *dynamique intrinsèque ou tendances de coordination* (Schöner et coll., 1992 ; Zanone & Kelso, 1992). Ces tendances de coordination expriment la préférence d'une organisation pour adopter spontanément les

formes spécifiques de pattern plutôt que d'autres parce que ces formes sont plus stables, plus efficaces, ou plus confortables pour le système.

L'adulte peut sélectionner, coordonner, en fonction de la contrainte environnementale, l'ensemble ou une partie des différentes informations sensorielles. Les mouvements de bras des très jeunes enfants que l'on peut observer sont plus que des comportements de battements ou des comportements aléatoires. Ces mouvements de bras sont, en fait, dirigés par l'information perceptive. Les nouveaux-nés répondent à l'information spécifiant la " faisabilité " de la saisie avec des mouvements de bras, mais qui n'ont pas commencé à se développer comme patterns perceptivo-moteur effectifs. Les enfants plus grands montrent une précision accrue entre la perception et l'action. Leur activité est clairement en relation avec les caractéristiques visuellement spécifiées de l'objet qui leur est présenté (Rader & Vaughn, 2000).

Le champ de la psychologie écologique part donc de l'hypothèse d'une perception directe et d'un couplage entre perception et action (Gibson, 1958). Cette théorie défend l'idée que pour contrôler une action (intercepter un mobile) le sujet se déplace de manière à ce que sa perception du déplacement du mobile change de manière systématique. La stratégie du couplage spécifique continu entre perception et action lui permet d'être au bon endroit et au bon moment pour l'intercepter. La perception est un processus qui reste exploratoire et actif même lorsque l'individu utilise la connaissance d'affordances et les relations constantes qui les spécifient (Gibson & Pick, 2000).

Conclusion

Comme un organisme visuellement sensible se déplace en fonction de son environnement, la plupart de son activité est sous le contrôle direct de la vision. La perception, ressort être un processus actif d'obtention d'information car elle implique la perception et l'action, ainsi que la perception de soi-même dans la relation à quelque chose d'autre. Si pour les deux théories présentées, écologique et cognitive, le comportement de l'individu est basé sur sa relation à l'environnement, celui-ci déterminant le développement de l'individu, elles s'opposent quant au rôle de l'individu dans cette relation individu-environnement. La théorie écologique voit un isomorphisme entre l'individu et l'environnement. Cet isomorphisme conduit à une auto-organisation du système en fonction des contraintes, il n'y a pas besoin de contrôleurs de hauts niveaux, grâce au couplage perception-action. L'information visuelle est la résultante de la dynamique du système

individu-environnement. Elle est unique et spécifique à cette dynamique et aux dimensions du système. L'information visuelle est perçue directement, sans que le sujet ait besoin de recourir à une élaboration interne complexe (Gibson, 1958). L'interception d'un mobile implique que le sujet doive se déplacer de manière à ce que sa perception du déplacement du mobile change de manière systématique. La stratégie du couplage spécifique, continu entre perception et action lui permet d'être au bon endroit et au bon moment pour l'intercepter. Ce mode de fonctionnement repose sur une loi de contrôle qui agit sur un mode continu, contrairement au mode contrôle cognitif, où il y a prédiction.

A l'opposé, dans la théorie cognitive l'individu agit sur l'environnement, extrait les informations et les analyse. La motricité n'est plus couplée à la perception, elle est organisée, planifiée par l'individu en fonction des contraintes de la situation, d'où la nécessité du contrôle d'une structure hiérarchisée et des ressources. La notion de couplage perception-action fait place à celle de schéma de transmission entre une information sensorielle et une activité motrice. La perception n'est donc plus donnée directement ou entièrement dans les stimuli mais nécessite de recourir à des représentations perceptives et motrices pour agir.

Malgré leur opposition ces deux théories posent le rôle différencié de la motricité dans le développement de l'individu. L'individu se développe à travers le jeu et ses expériences motrices.

Chapitre 2

Développement de l'habileté d'interception

CHAPITRE 2 - DÉVELOPPEMENT DE L'HABILETÉ D'INTERCEPTION

Introduction

Les conduites motrices de l'Homme se développent tout au long de sa vie, les niveaux de coordination en sont les effets observables. Les performances motrices prennent forme et s'expriment à travers nos mouvements, l'activité tonique et l'activité posturale. La motricité agit sur le développement cognitif et affectif qui eux-mêmes influencent le développement moteur. Les aspects moteurs, cognitifs et affectifs se développent en parallèle et interagissent. Les modifications qui prennent place au cours du développement dans l'organisme sont responsables d'une partie au moins des modifications comportementales concernant les conduites perceptivo-motrices. Le trait d'union perceptivo-moteur signifie l'influence de l'activité motrice volontaire sur la perception et inversement, du développement des capacités perceptives sur l'activité motrice. Le développement des conduites perceptivo-motrices implique une interaction complexe entre les processus perceptifs, moteurs et cognitifs. L'étude de l'enfant, en psychologie, a eu pour objectif de comprendre les modifications comportementales et de déterminer conséquemment les capacités, le fonctionnement intellectuel et la personnalité de l'adulte. L'étude des processus a pour objectif de comprendre, quels sont les facteurs qui interviennent dans l'organisation du mouvement et sur lesquels nous pouvons agir pour développer la motricité des enfants. Le développement de la coordination est un des plus importants et fascinants problèmes dans l'étude du développement et de l'action. A tel point que Weiss (1941 in Newell, 1986) a caractérisé l'ontogenèse de la coordination comme étant essentiellement le problème de l'origine du développement du comportement. La discussion théorique du développement de la coordination est traditionnellement formulée en terme de débat maturation vs apprentissage. Le développement de la coordination a été pris comme synonyme du développement de mouvements fondamentaux et des patterns posturaux. L'omniprésence de l'ordre observé dans le développement de ces patterns de coordination a promu l'idée d'une série de stades ou d'étapes dans le développement moteur. Les stades suivent des lois telles que tous les individus (universalité) sont supposés passer par tous les stades dans un ordre ne variant pas (" intransitivité "). Lorsqu'ils sont à un stade, ils sont supposés montrer des comportements essentiellement de ce stade (stabilité). S'ils sont dans une phase de transition entre deux stades, ils devraient manifester des comportements caractéristiques uniquement des stades adjacents dans l'ordre hiérarchique des stades (Newell, 1986). La théorie des stades postule que le mouvement humain se développe dans une séquence de stades immuables. La notion

de stade de développement moteur est donc utilisée en référence à l'ordre et la régularité de l'émergence de patterns de mouvement spécifiques, issus de l'évolution de l'homme, dans la petite enfance et les premières années de la vie.

Traditionnellement, le développement moteur a été regardé comme un processus fondé sur le déploiement progressif de patterns prédéterminés dans le système nerveux central (Illingworth, 1966 in Hadders-Algra, 2002). L'idée que des patterns comportementaux apparaissent dans une séquence génétique ordonnée, résulte de la distinction de règles développementales générales, telles que les séquences de développement céphalo-caudal et proximo-distal (Gesell, 1929). Gesell (1929) a défendu l'idée que la motricité évolue strictement selon ces lois internes de la maturation neurologique et que le développement se fait selon un plan rigide. McGraw (1943) a considéré le développement moteur comme le résultat d'un contrôle cortical sur les réflexes d'ordre inférieurs. Le domaine du développement moteur s'est focalisé, principalement sur les patterns de coordination à la base de l'engagement dans les activités " phylogénétiques " ² telles que la position assise, la position debout, la marche, la course ou la saisie. Gesell et McGraw ont fourni une interprétation maturationnelle du développement moteur. Les nouvelles habiletés ne sont pas dues à la pratique et le développement moteur suit des stades ordonnés et invariants (Gesell, 1929). Le développement moteur est génétiquement programmé. Ces travaux ont servi de référence pour l'étude du développement de la coordination du très jeune enfant. Les premières études du mouvement de l'enfant faisaient référence, soit à la première enfance, soit à des analyses quantitatives des aptitudes. L'étude de la motricité et des coordinations en tant que telle est apparue avec Wild (1938) sur le lancer. Par la suite, des descriptions éthologiques sont apparues qui ont représenté les conduites motrices de l'enfant selon leur forme gestuelle et leurs changements qualitatifs. Elles sont décrites en fonction des niveaux de coordination. A partir d'études développementales sur le développement du lancer, les données de Robertson (1977, 1978) suggèrent un modèle de stades plus flexibles, où le développement moteur serait fondé sur le développement des composantes du mouvement, plutôt que sur celui de sa configuration dans sa globalité où les composantes ont des vitesses de développement différentes. Ce modèle aboutit à ce qu'un enfant évolue vers un niveau avancé dans une composante (e.g., action du tronc au lancer) pendant qu'un autre enfant peut manifester un niveau élevé dans une autre composante (e.g., action du bras), alors même qu'ils ont un même niveau général de l'habileté (e.g., lancer). Rosey et Keller (2003) ont observé

² Activités fondamentales à la survie de l'espèce humaine (Newell, 1986).

cette différenciation entre enfants d'une même catégorie d'âge, dans le développement de l'habileté du lancer à bras cassé pour sept catégories d'âges (3 à 9 ans). La définition de passages obligés et de passages différés des conduites motrices pour reprendre une problématique de la psychologie différentielle, pourrait être une évolution de ce travail.

L'approche traditionnelle de stade implique que tous les individus pour un même stade manifestent la même configuration corporelle. La proposition de Robertson (1977, 1978) de stades par composantes du mouvement plutôt que pour le mouvement global a abouti à un modèle plus dynamique et flexible de stades développementaux. Ainsi, le progrès développemental peut survenir dans une partie de l'habileté sans qu'il y ait de progrès dans une autre.

D'autres travaux, que ceux de Robertson, sur l'ensemble des habiletés motrices se sont développés avec la description des configurations motrices (Wickstrom, 1977 ; Gallahue, 1982 ; Robertson & Halverson, 1984). En France, Keller (1992) a proposé un ensemble de règles de développement des coordinations motrices : le nombre d'articulations mobiles du corps, leur agencement en fonction de la posture et de l'organisation de la posture par rapport aux dissociations des ceintures anatomiques et des synchronisations spatio-temporelles.

Si l'importance de la motricité a été mise en évidence avec les premiers psychologues de l'enfant, Wallon (1941) et Piaget (1977), elle est conçue comme la base du développement, respectivement, de la personnalité et de la cognition. L'étude des conduites motrices s'est appuyée sur le modèle du développement des structures logiques de Piaget (1977). Ces conceptions du développement ont eu pour conséquence d'associer le développement avec la suite des âges de l'enfant et d'aboutir à la description d'états successifs selon une transformation régulière. Pour Piaget (1977), l'intelligence se construit à partir de la motricité, de l'interaction du sujet avec les objets, elle suit une évolution progressive et l'enfant passe par des stades qui représentent une structure³ psychique. Piaget a spécifié quatre stades principaux correspondant aux différents âges du développement de l'enfant. Cette conception aboutit à un temps de développement au cours duquel, s'accumulent successivement des structures de plus en plus complexe où chaque niveau des structures constitue un des stades de l'ontogenèse de l'enfant.

Le premier stade, celui de l'intelligence sensori-motrice, décrit les enfants de la naissance jusqu'à dix-huit/vingt quatre mois. Ce stade de l'intelligence sensori-motrice est

³ Ensemble de pouvoirs coordonnés que le sujet a acquis et dont le théoricien peut formuler les lois abstraites.

celui de l'intelligence motrice aussi bien que pratique c'est-à-dire celui de l'action dans sa dimension constructive. Il se caractérise par la constitution progressive des schèmes impliqués dans toutes les activités faisant intervenir la perception et le mouvement. Pour Piaget, ce premier stade dans la construction de l'intelligence est capital car c'est à ce moment là que s'élaborent toutes les structures cognitives qui sont des éléments de base des constructions ultérieurs. Ce stade est décomposé en six sous-stades durant lesquels débute l'interaction avec le monde grâce aux réflexes innés (sous-stade 1) pour utiliser les représentations afin d'agir sur le monde (sous-stade 6). L'enfant est un apprenant actif : L'expérience, la motricité sont source du développement, de la construction des connaissances. En effet, pour Piaget (1977, pp. 64-65) " Ce n'est qu'en s'exerçant à percevoir les formes, le relief, la profondeur, à évaluer les distances, à ordonner les perspectives, bref en faisant fonctionner ses réflexes à propos des choses elles-mêmes que l'enfant parviendra au maniement correct de ces instruments " .

L'habileté motrice étudiée dans le cadre de ce travail de thèse étant l'habileté d'interception, qui nécessite une coordination entre la vision et la main, et une critique de la conception du développement par Piaget étant réalisée à travers la notion d'inhibition notamment l'étude de l'erreur " A- non B ", nous allons plus particulièrement présenter le développement de la préhension et de la coordination vision-préhension.

I- Le stade de l'intelligence sensori-motrice : Exemple du développement de la coordination visuo-motrice

Piaget distingue, dans les conduites commandées par la vision, un certain nombre de types allant du réflexe aux coordinations acquises entre les schèmes de vision et ceux des autres activités.

Le développement de la préhension apparaît au cours du sous-stade 2 (3-4 mois) qui se caractérise par les premières adaptations. A ce sous-stade, le bébé qui jusqu'à présent " regardait au lieu de contempler " (Preyer, 1887 in Piaget, 1977, p.62) à travers ces expériences visuelles petit à petit ne va plus regarder pour regarder mais regarder pour voir : la vision est en voie " d'objectivation " (Piaget, 1977). Les premières coordinations se font entre la vision et l'audition, puis entre la vision et la succion, la vision et la préhension, le toucher, etc. (Piaget, 1977). C'est cette coordination entre les schèmes qui donnera la signification aux situations et permettra à l'enfant vers sept-huit mois de ne plus regarder pour regarder mais de regarder pour agir. L'enfant va assimiler le nouvel objet aux schèmes balancer, froter, lancer. Cette coordination progressive va donner la signification des scènes

visuelles et les renforcer en les insérant dans un univers total. Piaget (1977) a déterminé cinq étapes dans le développement de la préhension.

La première étape correspond à celle des mouvements impulsifs et du " pur " réflexe. C'est l'étape pendant laquelle le nouveau-né ferme la main lorsque l'on exerce une légère pression sur la paume. La seconde étape est celle des premières réactions circulaires relatives aux mouvements des mains, antérieurement à toute coordination de la préhension proprement dite avec la succion ou la vision. Dans cette étape sont regroupés les actes de préhension pour la préhension (saisir et tenir les objets sans les voir ou les porter à la bouche), les réactions tactiles et kinesthésiques (e.g., gratter, remuer les doigts, les mains...), les coordinations entre la succion et les mouvements de la main (e.g., sucer les doigts), enfin les coordinations entre la vision et les mouvements généraux (e.g., regarder les doigts et la main). A ce stade, il semble n'y avoir qu'une coordination partielle c'est-à-dire la conjonction entre deux schèmes en partie indépendants : La main s'empare des objets et la bouche " attire " la main à elle (deuxième étape). La coordination entre la succion et la préhension (e.g., saisir un objet pour l'amener à la bouche) caractérise la troisième étape et reflète un progrès notable vers la préhension systématique et les coordinations entre la vision et la préhension (e.g., prendre pour regarder). Ces coordinations se forment au cours de la quatrième et cinquième étape et marquent la réussite définitive de la préhension (Piaget, 1977). Dans la troisième, la vision exerce une influence sur les mouvements de la main, la vision de la main semble augmenter l'activité de celle-ci ou limiter ses déplacements à l'intérieur du champ visuel, mais ne règle pas encore la préhension. En effet, l'enfant ne saisit les objets que lorsqu'ils les touchent par hasard, s'il regarde ses mains lorsqu'elles les tiennent déjà, la vision ne sert en rien à l'acte même de saisir. La préhension systématique dès que l'enfant aperçoit simultanément sa main et l'objet désiré correspond à la quatrième étape. L'enfant ne saisit plus seulement les objets qu'il touche ou qu'il suce mais il saisit ceux qu'il voit. Néanmoins, l'enfant ne saisit pas encore un objet lorsque sa main n'est pas simultanément visible ou la main seule visible n'entraîne pas la saisie (cinquième étape). La coordination de la vision et de la main est un processus continu dépendant de l'exercice fonctionnel.

La coordination de la vision et de la préhension (sous-stade 3, 4 à 8-9 mois) permet l'apparition des actions intentionnelles. L'intentionnalité, pour Piaget (1977) se définit par la conscience du désir ou la direction de l'acte⁴, cette conscience est fonction du nombre

⁴ C'est-à-dire que " le sujet, en possession des schèmes de coordination donnés de la préhension, de la vision etc., les utilise pour assimiler à lui l'ensemble de son univers, les multiples combinaisons qui s'offrent alors, entraînent les hiérarchies momentanées de fins et de moyens " (Piaget, 1977, p.133).

d'actions intermédiaires nécessitées par l'acte principal. L'adaptation intentionnelle débute dès que l'enfant dépasse le niveau des activités corporelles simples (e.g., sucer, écouter, émettre des sons) pour agir sur les choses et utiliser les relations des objets entre eux. Ce sous-stade est caractérisé par le comportement qui consiste à retrouver les gestes ayant exercé par hasard une action intéressante sur les choses. Dans ce stade les " moyens " ne sont différenciés des " fins " qu'après coup, lors de la répétition de l'acte réalisé. Il faut attendre le quatrième sous-stade (8-9 mois à 1 an) pour voir l'apparition de certaines conduites venir se superposer aux précédentes: L'enfant applique des moyens connus aux situations nouvelles (Piaget, 1977).

Le quatrième sous-stade est celui du début où l'enfant au lieu de ramener l'univers à soi, commence à se situer dans un univers indépendant de lui. C'est aussi celui, où la notion de permanence de l'objet apparaît, dans le sens où l'enfant devient capable de rechercher des objets disparus et donc de leur prêter un début de consistance indépendante du moi. Cette constitution de l'objet va de paire avec une élaboration du champ spatial. L'enfant commence à découvrir qu'un objet peut être la source d'une activité et pas seulement le corps propre. En conséquence, les séries temporelles commencent à être ordonnées en fonction de la succession des événements et plus seulement de celle des actions (Piaget, 1977). Il faut attendre le cinquième sous-stade (12 à 18 mois) pour voir les comportements de recherche de " moyens " nouveaux. Les effets nouveaux obtenus de manière fortuite ne sont plus seulement reproduits mais modifiés afin d'en explorer la nature. Cette découverte active de nouveaux " moyens " permet de parfaire la coordination des schèmes utilisés dans le quatrième sous-stade. Ce stade est caractérisé par l'utilisation d'anciens schèmes et par la recherche et la découverte de moyens nouveaux. L'enfant est maintenant capable de résoudre les problèmes nouveaux même si la solution n'est pas trouvée par déduction ou représentation, elle est assurée grâce au jeu combiné de la recherche expérimentale et de la coordination des schèmes (Piaget, 1977).

En conclusion, le développement de la coordination visuo-motrice s'appuie sur l'exercice des schèmes réflexes (de succion, de saisie, de vision). Par l'interaction de l'enfant avec l'environnement, les schèmes sont progressivement coordonnés entre eux, ce qui permet à l'enfant de se détacher de l'action et de commencer à dissocier les buts et les moyens de l'action (troisième sous-stade). L'intentionnalité apparaît par la différenciation des buts et des moyens au cours de l'action (quatrième sous-stade). Dans le cinquième sous-stade l'enfant adapte ses schèmes à une situation imprévue : dans le cas où l'enfant se trouve éloigné d'un objet qu'il veut saisir et que celui-ci est posé sur un tapis, alors l'enfant tire sur le tapis pour le saisir.

La conception de Piaget du développement implique l'apparition de structures caractérisant un stade qui s'explique par une accumulation, une complexification des conduites. Le développement de l'intelligence est un processus qui évolue à travers des stades qualitatifs, où les stades ultérieurs succèdent à des stades antérieurs car ils sont plus évolués et adaptés à l'environnement. Cette notion de stade fait ressortir le fait que les individus passent par les mêmes stades, dans un ordre fixe où chaque stade renvoie à une compétence générale plutôt que spécifique du point de vue de la réalisation de la tâche. Par exemple, le bébé est contraint d'attendre la coordination préhension-vision (possibilité de saisir un objet qu'il voit) pour comprendre le monde des objets. De même pour comprendre l'organisation de l'espace, il doit acquérir la locomotion autonome. La succession des stades, dans l'évolution de Piaget, manifeste l'influence des conduites passées sur l'état présent des conduites. L'expérience n'est pas imposée par l'environnement mais elle est action et construction progressives.

II- Temps de développement, aptitudes précoces et processus d'activation-inhibition

Cette conception linéaire du développement de Piaget, définie par " un ordre immuable entre les phases successives d'un déroulement temporel jalonné par la succession d'émergences fonctionnelles et de structures " (Netchine-Grynberg, 1999, p.4), a fait l'objet de nombreuses critiques. La théorie piagétienne est donc " *unidimensionnelle* ", tous les individus évoluent selon un même ordre et une même vitesse et " *unitaire* ", chaque étape est caractérisée par le processus par lequel est rempli la fonction (Lautrey & Caroff, 1999, p.155). Une fonction (e.g., catégorisation) peut être remplie par différents processus. L'enfant peut catégoriser des objets par le processus de mise en relation " schématique ". L'enfant peut mettre ensemble, par exemple, le fermier, le tracteur et la vache car ils appartiennent tous trois au schéma de la ferme. Un autre processus conduit à mettre ensemble les objets qui peuvent se substituer les uns aux autres pour remplir une même fonction au sein du schéma. L'enfant peut alors regrouper la vache, la poule ou le cochon parce qu'ils remplissent une même fonction dans le schéma de la ferme. Si une fonction peut être remplie par différents processus, chacun de ces processus correspond à une étape du développement (Lautrey & Caroff, 1999). La conception régulière du développement est " majorante et épurée où une structure rationnelle vient en remplacer une autre qui ne l'était pas ou l'était moins " (Houdé, 1999, p.184). Il est ressorti de ces critiques, des conceptions différentes du développement et plus particulièrement du développement moteur. Lautrey et Caroff (1999) défendent une conception pluraliste du développement où à une même étape du développement, il existe

dans le répertoire de chaque individu plusieurs processus susceptibles de remplir différemment une même fonction. Le mécanisme de transition dans le fonctionnement et le développement n'est plus alors la substitution mais la compétition ou l'interaction entre processus. La pluralité des processus susceptibles de remplir une même fonction dans une situation donnée implique leur mise en compétition/interaction. Le fait, que l'issue de cette compétition/interaction puisse être différente selon les individus, ouvre la possibilité de cheminements différents (Lautrey & Caroff, 1999). Les différences entre les individus ne peuvent être réduites à des différences de vitesse de développement, elles sont aussi qualitatives. L'idée de pluralité des processus susceptibles de remplir la même fonction conduit à la notion d'activation simultanée de plusieurs processus. L'individu va, alors, devoir sélectionner un seul des processus en compétition. " Il est peu vraisemblable cependant que des mécanismes automatiques suffisent à assurer la sélection d'un processus adapté dans tous les types de situation. Il est parfois nécessaire qu'un certain processus soit délibérément activé et/ou que les processus concurrents soient inhibés " (Lautrey & Caroll, 1999, p.160).

1- Aptitudes précoces : le reflet des décalages

La reprise des travaux de Piaget sur le développement de la logique de l'enfant a mis en évidence des variations dans les résultats. Ces variations portent sur le décalage chronologique, par rapport à l'âge de l'enfant observé dans la réussite à des épreuves dont les procédures et les conditions matérielles ont été quelque peu modifiées ou dans des tâches isomorphes. Les processus cognitifs attribués à un certain stade sont maintenant admis pour des âges plus précoces. La précocité des processus cognitifs est mise en évidence par la recherche d'aptitudes précoces. Pour Piéron (1973, p.32) " l'aptitude désigne le substrat constitutionnel d'une capacité, préexistant à celle-ci, qui dépendra du développement naturel de l'aptitude, de la formation éducative, éventuellement, et de l'exercice : seule la capacité peut être objet d'évaluation directe, l'aptitude étant une virtualité ".

La mise en évidence d'aptitudes précoces s'effectue notamment par l'utilisation du paradigme de l'habituation et de celui de l'évènement impossible. Le paradigme de l'habituation consiste à présenter un " stimulus " au bébé (objet, image, personne...) dont il va progressivement s'en désintéresser. Lorsqu'on lui présente quelque chose de nouveau, il va avoir un regain d'attention. Le principe du paradigme de l'évènement impossible est d'observer les réactions du bébé lors de situations impossibles qui transgressent certaines propriétés du réel. Si le bébé réagit à ces situations (regarde la scène impossible plus longtemps que la possible), on considère qu'il conçoit la propriété transgressée.

Cette précocité des aptitudes se retrouve dans le développement de la motricité, notamment dans le cas des coordinations visuo-motrices. Jouen, Lepecq, Gapenne et Bertenthal (2000) ont testé la sensibilité des nouveau-nés aux propriétés cinématiques du flux optique en mesurant les adaptations posturales des bébés. Ils ont montré que dès l'âge de 3 jours, des nouveau-nés maintenus assis dans un siège auto, sont sensibles à la vitesse du flux optique. La pression moyenne de la tête qu'effectuaient les nouveau-nés sur le dossier du siège changeait en fonction de la vitesse de déplacements de patterns de point. La réponse posturale des bébés est adaptée à la direction du flux optique. Quand ils sont exposés à un flux s'éloignant, ils réagissent avec une inclinaison vers l'arrière de la tête. De plus, la pression enregistrée augmente avec l'augmentation de la vitesse de déplacement du flux optique. Le degré auquel la réponse posturale et le déplacement visuel covarient dépend de la tâche, les stratégies et les buts du sujet, de la stabilité de la posture aussi bien que des contraintes biomécaniques additionnelles qui influencent la difficulté de la tâche (Bertenthal, Boker, & Xu, 2000). Bower (1971) a montré que le nouveau-né présente l'aptitude à la saisie manuelle dès l'âge de 6 jours s'il est maintenu en position assise. Fischman, Moore et Steele (1992) ont montré que les enfants de 4 mois atteignent avec succès un objet stationnaire et peuvent également anticiper la localisation future d'un objet en mouvement et faire une interception. Les études de Von Hofsten (1983) lors de l'étude des mouvements de saisie chez des bébés de 34 et 36 semaines et de Van der Meer, van der Meel et Lee (1994) lors d'une étude longitudinale d'enfants de 5 à 11 mois, ont confirmé cette capacité de coordination visuo-motrice. Van der Meer et coll. (1994) ont montré que les enfants dès 5 mois étaient capables de poursuivre visuellement un objet et de prédire sa réapparition si celui-ci passait derrière un obstacle. Von Hofsten (1983) a montré que des bébés assis, de 34 et 36 semaines, sont capables de saisir un objet qui se déplace c'est-à-dire de résoudre le problème d'anticipation et de timing. Les enfants poursuivraient le centre de la cible et les adultes l'intérieur de la périphérie de l'objet (Gredebäck, von Hofsten & Boudreau, 2002). A 11 mois, les bébés sont capables de coordonner leurs actions d'atteinte à la vitesse des trajectoires de l'objet même lorsque celui-ci disparaît sur une certaine partie de sa trajectoire.

La précocité des aptitudes de coordination visuo-motrice et les décalages chronologiques dans le développement cognitif et moteur ont mis en défaut la conception d'un développement par accumulation du modèle piagétien. Les auteurs se sont interrogés sur les types de processus qui pourraient intervenir et ceux d'activation-inhibition pourraient apporter un éclairage sur ces décalages.

2- Inhibition : le reflet d'un temps de développement où le nouveau côtoie l'archaïque

Olivier Houdé (1994), à partir des travaux de Pascual-Leone (1988), propose une formule du temps de développement dans la conception de Piaget.

a- Modèle de Pascual-Leone, inhibition et temps de développement

Le modèle de Pascual-Leone, dénommé théorie des opérateurs constructifs (TCO: Theory of Constructive Operators) dépend de deux systèmes : Le système subjectif, constitué d'un répertoire de schèmes symboliques est automatisé et le système métaconstructif constitué d'opérateurs silencieux, est attentionnel. Cette théorie analyse le fonctionnement cognitif de l'enfant en référence à deux modes de traitement de l'information : l'un automatique, l'autre attentionnel et contrôlé. Dans les deux cas, le premier opérateur en jeu est un opérateur de champ **F** ("Field") qui active les schèmes figuratifs et opératifs. L'influence de **F** peut être favorable à la résolution d'un problème (schèmes activés pertinents par rapport au problème) ou l'entraver (schèmes non-pertinents).

1- Le mode de fonctionnement automatique conduit à une application immédiate du groupe de schèmes dont la force d'activation cumulée est la plus grande. Dans la TCO, tout schème a un poids intrinsèque d'activation déterminé, notamment, par la composante *C* (contenus) des apprentissages, a une condition déclenchante *D* et une condition effective *E*).

2- L'autre mode de fonctionnement est attentionnel et contrôlé. C'est à ce niveau que la plasticité du cerveau permet l'intégration de nouvelles connaissances et la modification de ses structures fonctionnelles. Cette plasticité est directement dépendante de la capacité d'attention et d'un système modulaire dans la mémoire de travail. Ce système modulaire implique, l'opérateur de champ **F**, des schèmes exécutifs *E* (ou structure de contrôle) qui intègrent la représentation de la tâche et des consignes, un opérateur d'activation **M** qui sous le contrôle de *E*, augmente l'activation des schèmes pertinents et un opérateur d'inhibition **I** qui est chargé de désactiver les schèmes non-pertinents en synergie avec **M**. **I** est également sous le contrôle de *E*. Un schème non-pertinent est un schème dont la condition déclenchante *D* correspond à un aspect prégnant de la situation ce qui conduit à son activation immédiate par l'opérateur **F** et dont la condition effective *E* est une réponse erronée.

Le temps de développement (**D**), dans la conception de Piaget, est linéaire où un processus majorant substitue récursivement une structuration rationnelle (**R+**) à une structuration qui ne l'est pas ou moins (**R-**). D'où $D = f [(R-), (R+)]$, (formules introduites par Olivier Houdé, 1994). Pascual-Leone (1970), lui, spécifie en termes de schèmes exécutifs (*E*),

d'opérateurs d'inhibition (**I**) et d'activation (**M**), la programmation attentionnelle de **R+**. Cette spécification aboutit pour Houdé (1994) à $D = f [(R- = E \Rightarrow I-), (R+ = E+ \Rightarrow I+)]$, seul l'opérateur **I** est mentionné en raison du thème abordé.

Mais l'inhibition, dans ce modèle, est vue comme une conséquence et non pas comme ayant son rôle propre. Or ce qui semble difficile à l'enfant, lors de son développement, c'est précisément l'inhibition des apparences ou les schèmes " dangereux " (Houdé, 1994). Le schème dangereux correspond à l'introduction d'une discontinuité au sein de boucles acquises, lorsque celles-ci sont inadéquates. Olivier Houdé (1994) a travaillé, entre autre, sur le stade piagétien de l'erreur " A non-B ".

b- L'erreur " A non-B "

Piaget s'est interrogé sur le développement de la logique et sur comment et quand le bébé prend " conscience " de l'existence des objets en tant que tel, c'est-à-dire permanents et substantiels. Afin de répondre à cette interrogation, il a provoqué des conduites relatives à l'objet disparu. La recherche systématique de l'objet disparu n'apparaît qu'à partir du sous-stade IV (du stade de l'intelligence sensori-motrice), vers huit-dix mois, où des erreurs de localisation persistent. Le bébé ne cherche l'objet que là où il a disparu. Ces erreurs de localisation sont mises en évidence par le dispositif suivant : Devant le bébé, de huit-dix mois, sont placés deux caches (A et B) aussi facilement accessibles l'un que l'autre et un objet est introduit sous la cache A. Le bébé voit le placement de l'objet en A et le retrouve sans difficulté. Après quelques répétitions de cette situation, l'objet qui était caché en A est très visiblement caché derrière l'écran B ($A \Rightarrow B$), le bébé continue de rechercher l'objet derrière la cache A : c'est l'erreur dite " A non-B ". Pour Piaget (1954) le bébé, de huit-dix mois, n'a pas encore élaboré une véritable permanence de l'objet ($R-$, dans le modèle : $D = f [(R-), (R+)]$) ce qui explique l'erreur de celui-ci. Les découvertes relatives aux compétences précoces, notamment à travers le principe des réactions aux événements impossibles, conduisent à la contestation de cette interprétation.

c- Le paradigme de " l'évènement impossible "

Baillargeon (1987) a utilisé le paradigme de l'évènement impossible pour étudier la permanence de l'existence de l'objet, lorsque celui-ci est caché, chez des bébés de 3.5 et 4.5 mois (procédure expérimentale détaillée et illustrée dans la figure 14). Les bébés regardent plus longtemps l'évènement impossible (image 3) que l'évènement possible (image 2), alors

que le premier est identique à celui de la phase d'habituation (image 1) et que le second est nouveau.

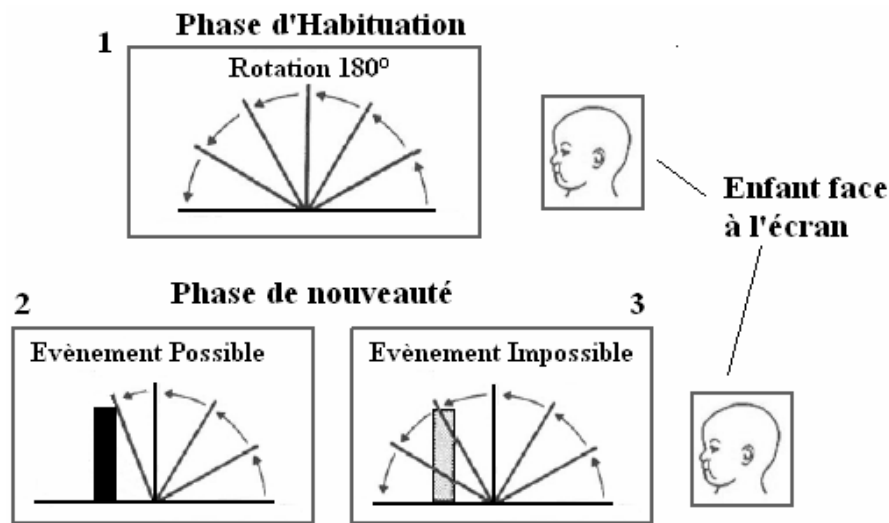


Figure 14. Procédure expérimentale de l'étude de la permanence de l'objet avec le paradigme de Baillargeon (1987). Tout d'abord il y a une phase d'habituation (image 1). Le bébé est placé face à un écran de bois relié par une charnière au plancher du dispositif de présentation, dans le plan fronto-parallèle, de sorte que cet écran puisse effectuer une rotation de 180°. Une boîte est placée derrière l'axe de rotation de l'écran, de telle manière que l'écran cache la boîte à moment donné (objet disparu) et que la rotation possible soit limitée à 112°. Le bébé est alors mis en présence d'un évènement possible (rotation à 112°, image 2) et d'un évènement impossible (rotation à 180°, image 3).

Baillargeon conclut de cette expérience que dès quatre-cinq mois, il y a unité et permanence de l'objet. Alors comment expliquer l'erreur " A non-B " chez le bébé de huit-dix mois ?

La persévérance du très jeune enfant (8-12 mois) à aller chercher l'objet caché en A, alors que celui-ci a été déplacé en B, s'explique par un défaut d'inhibition du geste programmé vers A. L'erreur " A non-B " du stade IV (du stade de l'intelligence sensori-motrice) de Piaget, lors de la recherche d'un objet caché, serait due au souvenir de l'action réussie (trouvé en A) qui l'emporterait encore sur la mémoire des déplacements de l'objet.

Les travaux d'Olivier Houdé (1994), conduisent à la conclusion que les erreurs de raisonnement ne relèveraient pas d'un défaut de logique mais d'un défaut de programmation exécutive de l'inhibition ($R+/E-\Rightarrow I-$). Les schèmes non-pertinents ou " dangereux " devant être inhibés pour que puisse être appliqué le schème pertinent ou la structure rationnelle. Le développement de l'enfant consisterait non seulement à activer ce qui existe déjà et le " rationnel " construit mais aussi à inhiber à tout moment une structure concurrente, présumée

révolue, susceptible de court-circuiter le " rationnel construit ". D'où la suggestion d'Olivier Houdé (1994), à partir des travaux de Michel Serres, que le temps de développement suit une courbe mouvante ayant des plis et des replis, permettant ainsi la proximité du moderne et l'archaïque.

Le processus d'inhibition fonctionne en synergie avec celui d'activation, et l'un et l'autre sont impliqués dans la sélection des informations dans la mémoire de travail. Derrière ce processus se dessine une avancée dans l'explication de la maladresse, l'incapacité " passagère " ou " continue " de sujets en face d'opérations, où le sujet serait incapable d'inhiber le schème parasite (sujet non efficient). L'inhibiteur inefficient se révélerait incapable d'inhiber une structure concurrente, non-pertinente, qui entre en interférence avec des connaissances " expérientielles " (Houdé, 1994, i.e., des comportements de routine). Diverses explications ont été proposées quant au pourquoi de l'erreur " A non-B ", entre autres, celles de Diamond (1991 in Houdé, 1994) et Bell et Fox (1992 in Houdé, 1994), relatives à un défaut exécutif de l'inhibition qui met l'accent sur l'implication du cortex frontal.

3- Inhibition et développement

Diamond (1991 in Houdé, 1994), argumente le défaut spécifique d'inhibition au niveau de la programmation motrice. L'erreur serait due non plus à l'irrationalité mais à l'inefficacité de l'inhibition : L'enfant est considéré comme un " inhibiteur inefficient ". Cette défectuosité est due au développement insuffisant du cortex préfrontal qui aboutirait à un défaut d'inhibition d'une tendance motrice dominante (ici le geste appris vers A) (Diamond, 1991 in Houdé, 1994). Les données de Bell et Fox (1992 in Houdé, 1994) confirment l'existence de ce lien entre l'erreur " A non-B " et le système frontal. De plus, ces auteurs considèrent que la réussite de la situation " AA→B " nécessite l'inhibition du premier geste programmé, coordonnée avec une capacité de mémorisation et de résistance à la *distraction* durant le délai de réponse. Les savoirs relatifs au statut de contenant de l'objet et à la non ubiquité des objets familiers seraient intégrés dans les structures de mémorisation d'expériences passées. Ces savoirs non inhibés en mémoire de travail, court-circuiteraient le traitement pertinent des informations spatio-temporelles (chez les enfants de huit-douze mois). L'erreur " A non-B " se voit expliquée par un défaut d'inhibition motrice causée par un défaut d'inhibition " conceptuelle ", sans que la permanence de l'objet soit remise en cause (Houdé, 1994).

a- Mise en évidence de l'inhibition

Les perturbations frontales sont révélées par une défaillance à inhiber les réponses et des troubles du comportement. L'utilisation excessive des caractéristiques environnementales, une tendance à être impulsif et un désintérêt pour la performance incorrecte reflètent également les dysfonctionnements du cortex frontal (Passler, Isaac & Hynd, 1985). Le cortex préfrontal assure la mise en relation des informations dans l'espace et dans le temps et inhibe les tendances dominantes à l'action. Sa fonction est d'assurer la construction de projets comportementaux dans les situations inhabituelles ou " pièges " (Houdé, 1994) et de sélectionner des schèmes appropriés tout en déterminant et en tenant compte des erreurs susceptibles d'intervenir dans la réalisation du projet. La mise en évidence de l'importance du cortex frontal dans les processus d'inhibition du comportement est basée en partie sur les tâches d'appariement retardé, telles que le paradigme Go/No-Go. Dans ce type de tâche une réponse est associée à un stimulus. Par exemple il est, tout d'abord, indiqué au sujet (avec un voyant spécial) la couleur ou le motif qui apparaîtra sur la bonne cible au moment de la réponse. Cet " échantillon " contient la seule information utile puisque la position finale est aléatoirement variée, d'essai en essai. Ces règles permettent de concevoir une épreuve purement temporelle en demandant au sujet de répondre rapidement ou lentement, en fonction de l'indice précoce (Lecas, 1992). Il y a présentation du stimulus puis celui-ci est masqué pendant un temps déterminé, la réponse n'est donnée qu'après cette période. Les sujets répondent d'autant plus systématiquement à tous les signaux présentés qu'ils sont jeunes. Avec l'âge, le délai d'attente avant de répondre n'interfère plus avec la réponse correspondant au signal présenté (réponse ou non-réponse) et le sujet répond de manière appropriée.

Luria (1966 in Passler et coll., 1985) a montré que de la lésion du cortex frontal résultait la persévération et un manque d'inhibition. La mise en évidence de la persévération de comportements et du manque d'inhibition est réalisée par la passation de tests spécifiques tels que le tri de cartes dans le Wisconsin Card Sorting Test (Heaton, Chelune, Talley, Kay & Curtin, 1993) ou le Trail Making Test de Reitan (1958). Ces deux tests nécessitent l'inhibition de comportements de routine par l'introduction de liaisons qui changent les routines acquises. Le Wisconsin Card Sorting Test est constitué de 4 cartes stimulus et 128 cartes réponses (2 x 64 cartes) qui dépeignent des figures de formes variables (triangle, étoiles, croix ou cercles), couleurs variables (rouge, verte, jaune ou bleue) et de nombre de figures variables (1, 2, 3 ou 4). Les 4 cartes stimulus avec les caractéristiques suivantes sont placées devant le sujet de gauche à droite : 1 triangle rouge, 2 étoiles vertes, 3 croix jaunes et 4 cercles bleus. Chaque carte réponse peut-être associée à une carte stimulus et une seule ou une combinaison des

trois paramètres stimulus (Couleur, Forme ou Nombre). Le sujet, avec le jeu de 64 cartes réponses, est invité à associer chaque carte consécutive avec l'une des 4 cartes stimulus à laquelle il pense qu'elle est bien assortie. Il est dit au sujet seulement si la réponse est bonne ou non, mais le principe correct d'association n'est jamais révélé. Une fois que le sujet a réalisé un nombre spécifié (10) d'associations correctes, le principe est changé (Forme ou Nombre) sans avertissement, poussant le sujet à inhiber la tendance à persévérer avec "l'ancien" principe et à utiliser les feedback de l'examineur ("Oui" ou "Non") pour déterminer le nouveau principe correct sortant. L'enfant persévère dans un principe d'association d'autant plus longtemps qu'il est jeune. Dans le Trail Making Test, il s'agit de tracer un trait continu sur une feuille de papier entre une suite numérique allant de 1 à 8 et une suite alphabétique allant de A à D, soit "1-A-2-B-3-C-4-D". Cette tâche nécessite l'inhibition des suites habituelles de la suite numérique et de l'alphabet. Dans la situation contrôle (renforcement de la suite logique numérique), les sujets doivent relier les huit chiffres distribués aléatoirement sur la feuille, 1 et 8 étant respectivement notés "début" et "fin". La variable mesurée est le temps d'exécution. Le sujet met davantage de temps pour relier, de manière alternative la suite de chiffre et la suite de lettre, que pour relier la suite numérique. Il met d'autant plus de temps qu'il est jeune.

b- Différents types d'inhibition

Luria (1966 in Passler et coll., 1985) a identifié plusieurs formes d'inhibition : la capacité à arrêter un comportement répétitif en cours, l'incapacité à commencer un nouveau patron de comportement qui est inconsistant avec une réponse stéréotypée sur-apprise et l'inhabileté à planifier, diriger et conduire un traitement cognitif. Luria a aussi identifié une inhibition attentionnelle. Elle propose que l'inhibition soit une construction générale qui affecte beaucoup d'aspects du comportement. Dans une revue de questions, Dempster (1995) a proposé trois types d'inhibition : motrice, perceptive et linguistique. Harnishfeger (1995), quant à lui, définit l'inhibition comme une suppression cognitive de base qui contribue à la réalisation des tâches en empêchant les informations des tâches non-pertinentes d'entrer ou d'être maintenues dans la mémoire de travail. L'efficacité du traitement est conceptualisée comme la vitesse d'activation alors que l'inhibition peut-être conceptualisée comme un processus qui bloque la propagation de l'activation, en gardant l'attention vivement focalisée sur la tâche actuelle (sous la main). Elle est considérée comme, la capacité à inhiber une réponse immédiate (c'est-à-dire l'impulsivité), la capacité à attendre un objet désiré ou un but, à inhiber un mouvement en réponse aux demandes de la tâche (Visser, Das-Smaal &

Kwakman, 1996). Harnishfeger et Bjorklund, (1993 in Harnishfeger, 1995), à partir d'une variété de paradigmes expérimentaux, ont démontré que l'efficacité inhibitoire se développe avec l'âge et qu'elle affecte le comportement. Par exemple, le contrôle inhibitoire est impliqué dans la permanence de l'objet chez les enfants, dans le contrôle verbal du comportement chez les tout petits enfants, dans le contrôle moteur et dans la mémoire ainsi que dans le traitement attentionnel des enfants. L'inhibition comportementale implique le contrôle intentionnel du comportement ouvert, non déguisé, par exemple, résister à une tentation ou accepter un délai à la gratification (Mischel, Shoda & Rodriguez, 1989), l'inhibition motrice et le contrôle impulsif (Luria, 1961 in Passler et coll., 1985). L'utilisation de l'inhibition cognitive, par les enfants, permet une meilleure inhibition motrice et facilite l'inhibition comportementale (Maccoby et coll., 1965). Si l'inhibition est un processus de suppression des schèmes non pertinents pour la tâche en cours, elle pourrait jouer un rôle dans le niveau de coordination dans une tâche motrice. L'amélioration du niveau de coordination dans une habileté motrice pourrait résulter de l'inhibition des organisations motrices antérieures ou des organisations motrices non pertinentes au moment de la réalisation de la tâche.

Les situations motrices complexes sont rarement étudiées. La tendance à contrôler l'impulsivité ou non lors de la réalisation d'une tâche de renvoi de balle avec raquette a une influence sur la performance (Keller & Ripoll, 2001, 2004). Suite à un travail prospectif, Keller et Rosey (2000) ont trouvé un lien entre cette tendance à contrôler ou non l'impulsivité et le processus d'activation-inhibition dans l'évolution du niveau de coordination dans les habiletés motrices telles le cloche-pied, l'équilibre et le lancer à bras cassé. L'évolution de ce travail a été de s'orienter vers les fonctions exécutives d'activation-inhibition qui pourraient être un des facteurs à l'origine de l'apparition de structures motrices.

Dans la perspective dynamique de la coordination, l'émergence d'un comportement n'est pas due à une inhibition cognitive de schèmes non pertinents mais à l'intégration dynamique des composants multiples des systèmes qui peuvent soit coopérer, soit être en compétition (Thelen, 1986, 1995, 2000). Cette intégration est conçue en termes de génération et " annihilation " par Newell, Kugler, Van Emmerik et McDonald (1989). La persévérance d'un comportement, comme celui observé dans le cas de l'erreur " A non-B ", est alors expliquée par le fait que ce comportement persévérant devient un comportement robuste, un mouvement d'atteinte, en même temps que celui-ci devient plus régulier, direct et fiable, en fait, habile (Thelen, 2000).

Le mouvement émerge, donc, à partir d'une influence de processus et de contraintes dans l'organisme et l'environnement (Thelen, 1995). Le comportement qui survient à un

certain moment est le résultat des relations des systèmes dynamiques. Les composants de ces systèmes peuvent être en compétition, inhiber ou faciliter un autre composant avec des implications pour la performance motrice. Une tâche peut être réalisée par une multitude de comportements qui dépendent du contexte (tâche à réaliser, contraintes physiques et support de l'environnement) et de l'état de maturation du système (Thelen, 1986).

III- L'interaction contexte-maturation

Dans l'approche dynamique, les configurations motrices émergent en fonction des diverses contraintes entre l'organisme et l'environnement. Le système ne s'adapte pas par une re-paramétrisation d'une structure mais par le choix de la structure qui correspond à un pattern stable de coordination et de contrôle, en fonction des contraintes environnantes (Thelen, 1986).

Les habiletés apparaissent dans certaines formes très rudimentaires avant de devenir pleinement fonctionnelles ou de se manifester dans des contextes nouveaux. La marche, ou le comportement, ne réside pas dans des formes privilégiées mais émerge à l'intérieur d'un contexte spécifique. Le changement développemental n'est donc pas planifié mais survient à l'intérieur d'un contexte comme le produit de multiples éléments se développant. La tâche de l'individu face à une situation est d'optimiser la performance à l'intérieur des limites imposées par les contraintes de la tâche. Il peut être vu en des termes dynamiques, comme une série de stades, d'étapes de stabilité, d'instabilité et de phases de changements dans l'environnement " attracteur "⁵, reflétant la probabilité qu'un pattern émergera sous des contraintes particulières. Ainsi, la disparition du réflexe (dans le cas de la marche) ne résulterait pas d'une inhibition corticale mais de la confluence des changements dans l'organisme et des contraintes de l'environnement (Thelen, 1995).

L'étude de Thelen et Fischer (1982) sur la manière dont la force musculaire peut être contrainte, illustre cette idée. Ces auteurs ont observé, que chez des enfants de 8 mois maintenus debout, les mouvements de marche, observés à un âge plus précoce, disparaissent. Néanmoins, lorsqu'ils sont allongés sur le dos, ils réalisent des coups de pied qui ont une cinématique similaire aux mouvements de marche. De plus, si les enfants sont maintenus debout dans l'eau, le pattern de la marche réapparaît. Si la disparition des réflexes était due à une inhibition corticale, pourquoi cette inhibition aurait lieu en position debout et pas dans la position allongée sur le dos ? Thelen explique cette disparition des mouvements de marche

⁵ Les états stables sont appelés des " attracteurs " dans la terminologie dynamique parce que le système s'établit dans ce pattern stable à partir d'une grande variété de positions initiales et tend à y retourner s'il est perturbé.

des nouveaux-nés comme une conséquence de la croissance disproportionnée des muscles de la jambe et des tissus adipeux. Les enfants, vers 8 mois, acquièrent une masse adipeuse supérieure à la masse musculaire, l'enfant n'a pas la force musculaire suffisante pour ce maintenir debout seul et " lutter " contre la pesanteur. L'interaction des contraintes organiques, proportions corporelles, niveau de développement des muscles..., et environnementales conduit à l'émergence ou à la disparition de comportements moteurs. L'émergence et la disparition des comportements ne sont pas seulement déterminées par les contraintes " neuro-maturationnelles ".

A partir des principes dynamiques, on peut prédire que le changement est annoncé par la perte de stabilité (Thelen, 1995) et que les contraintes du contexte influencent le comportement. Dans les systèmes dynamiques, les éléments interagissent entre eux selon des " voies " dynamiques et fluides et lors des périodes de transition, les petits changements chez l'individu ou dans le contexte peuvent conduire à des solutions très diverses. La sensibilité au contexte est une donnée très importante sur le statut développemental de l'enfant excepté, lorsque le système est dans une période de transition et que les éléments le constituant sont alors moins strictement couplés (Thelen, 2000). Les mouvements des enfants et leurs changements peuvent être considéré comme un système dynamique auto-organisé (Thelen, Corbetta & Spencer, 1996) dans lequel les mouvements sont le produit non seulement du système nerveux central, mais aussi des propriétés énergétiques et biomécaniques du corps et des demandes spécifiques, parfois changeantes, d'une tâche particulière. Les relations, entre les éléments du système, ne sont pas seulement hiérarchiques (commande du cerveau et réponse du corps). Elles sont largement distribuées, hétérarchiques, auto-organisées et non linéaires. Les nouvelles habiletés résultent de l'interaction entre les demandes de tâches nouvelles et la dynamique du mouvement déjà existant (Thelen et coll., 1996). Les mouvements surviennent à partir de la contiguïté de processus et de contraintes dans l'organisme et l'environnement. Les habiletés motrices ne résident pas dans des formes privilégiées mais émergent en ligne dans un contexte particulier (Thelen, 1995). Chaque habileté est donc le résultat d'aménagements et de modifications d'habiletés anciennement acquises qui constituent le répertoire de l'individu.

Les effets du contexte ; familiarisation avec l'environnement, les points de repère, la pratique, l'expérience des enfants ; permettent la construction d'un auto-référentiel par rapport au référentiel environnemental. Ce qui conduit à ce que certains enfants aient des référentiels environnementaux et d'autres non (Thelen, 2000).

Le système découvre de manière autonome les bonnes solutions aux demandes de la tâche à travers l'exploration de ses dynamiques intrinsèques en relation à la fonction spécifique qui doit être utilisée. Les systèmes sont ouverts à la modulation continue avec les changements dans l'information perceptive qui spécifie la nature de la tâche et les qualités de la dynamique intrinsèque (postures préférées, mouvements et niveaux d'énergie) (Thelen, Corbetta, Kamm, Spencer, Schneider & Zernicke, 1993). Le comportement est le produit de l'état de développement (maturation) des composants des systèmes dans l'espace de la tâche. Aucun niveau, par lui-même ne détermine le comportement mais dans la combinaison dynamique, un élément peut faciliter, inhiber ou masquer l'expression d'un autre. Au cours du développement ces relations se modifient et se manifestent en fonction du niveau de développement des unités qui y contribuent. La performance motrice est multidéterminée par l'interaction des patterns disponibles avec les contraintes du corps et dans un contexte particulier.

A- La conception dynamique du niveau de coordination – l'instabilité source de progrès

Un système assemblé lentement peut être spécifié de manière variable ou graduée pour s'adapter aux demandes de graduation de la tâche mais ces relations peuvent être non linéaires. Des solutions peuvent être plus stables que d'autres. Le développement de la motricité humaine est multi déterminé et dynamique. L'émergence d'une nouvelle habileté est annoncée par la perte de stabilité (Thelen & Fischer, 1982). Cette non linéarité du développement est le signe des processus dynamiques (Thelen, 1995). Dans les systèmes composés de plusieurs éléments hétérogènes, les changements dans un de ces éléments peuvent avoir des répercussions sur la totalité du système, produisant des modifications qualitatives dans les nouvelles formes de comportement. Ces réorganisations font alors partie intégrante de l'histoire du système et peuvent avoir, à nouveau, des effets en cascade et indirects au cours du développement (Thelen, 2000). La flexibilité des solutions individuelles et de leur modulation conséquente atteste de leur assemblage dynamique. Les membres se comportent comme un " ressort " dont le système nerveux central change la dynamique en fonction des conditions de réalisation afin d'atteindre l'état stable du membre ou des membres sollicités. Dans le cas de mouvement de la main, ni la trajectoire de la main, ni les angles des articulations ni les patterns musculaires ne sont explicitement planifiés avant le mouvement. L'habileté d'atteinte (d'approche manuelle) émerge à partir de la confluence de composants qui sont continus et manifestes : l'habileté à localiser visuellement un objet dans l'espace,

l'intention d'atteindre et de saisir l'objet et de le transporter à la bouche poussent au contrôle de la tête et du tronc ainsi qu'à l'augmentation de l'habileté à moduler la force et l'état stable du bras (Thelen et coll., 1993). Quand le comportement est habile, c'est-à-dire rapide, fluide, relié et exact, le couplage parmi les composants est stable. Quand les mouvements sont maladroits les sous-systèmes sont moins strictement assemblés, plus variables et plus facilement perturbés. En termes dynamiques, c'est une période d'émergence d'une nouvelle forme qualitative.

B- Conclusion

Le développement moteur résulte de l'interaction d'un programme de croissance (déterminants intrinsèques) et de l'ensemble des expériences réalisées par l'individu au contact des milieux physiques et sociaux (déterminants extrinsèques). L'expérience motrice s'avère capitale pour un développement adapté des comportements à l'environnement environnant. La perception de l'espace s'organise en même temps que celle des objets qu'il contient et grâce à eux. La coordination vision-préhension permet une première unification des espaces partiels et la marche contribue à l'organisation de la perception de l'espace. Par son intermédiaire, l'enfant expérimente l'interposition (un objet qui en masque partiellement un autre est situé en avant de lui), les effets de la perspective (i.e ; des droites parallèles paraissent se rejoindre à l'infini), il découvre les rapports entre la taille et la distance. Les coordinations visuo-motrices sont caractérisées par l'intégration de l'information visuelle avec l'action du membre, ou des membres, impliqué dans l'action. L'étude développementale des habiletés d'interception peut permettre de comprendre le développement des coordinations visuo-motrices. La conception dynamique (Thelen, 1986) postule que tout mouvement est le produit d'un ensemble de contraintes physiques, et que tout développement moteur a sa cause première dans les modifications que subissent les différents composant du système au cours de l'ontogenèse. Le système découvre de manière autonome les bonnes solutions aux demandes de la tâche à travers l'exploration de ses dynamiques intrinsèques en relation avec la fonction spécifique qui doit être réalisée. La conception cognitive du développement, quant à elle, postule que le mouvement résulte du développement des capacités cognitives car les processus cognitifs sont sous-jacents à la production d'une réponse motrice.

IV- Informations visuelles, proprioceptives et mouvements

A- Intégration de l'information visuelle et de l'information proprioceptive

Les tâches perceptivo-motrices, appelées tâches d'anticipation-coïncidence (Stadulis, 1971) peuvent se diviser en trois phases : Une phase de poursuite visuelle, une phase d'intégration sensori-motrice et une phase d'exécution. Les enfants passent au travers de stades distincts d'apprentissage dans le développement de la capacité d'anticipation-coïncidence. Le stade précoce correspond à la tâche d'anticipation-coïncidence vue comme en parties et non comme un tout : l'enfant dirige en premier son attention seulement vers la source du vol de l'objet (lanceur) et non vers les autres composants de la tâche. Dans le stade suivant, l'enfant fait attention à la source *et* à sa réponse motrice mais pas au vol de l'objet. L'enfant prête attention au vol de l'objet seulement lorsque la capacité à répondre a été obtenue. Alors, éventuellement, l'enfant ignore complètement ses mains visuellement et se concentre sur la source *et* le vol de l'objet (Kay, 1969). L'enfant ne regarde plus pour regarder (l'objet est un simple aliment pour le regard), ni ne regarde pour voir (l'objet est incorporé sans plus aux schèmes visuels déjà élaborés) mais il regarde pour agir, en fait pour assimiler l'objet aux schèmes du balancement, du frottement, de la chute, etc. L'utilisation des différentes modalités sensorielles conditionne l'efficacité de la réponse et au cours du développement, l'établissement de l'intégration intersensorielle apparaît comme une des sources du progrès moteur (Lefford, 1970). Hay (1970), dans une tâche de pointage manuel avec lunettes à prismes, fait ressortir une évolution dans le mode de contrôle au cours du développement de l'enfant. Cet auteur pose le problème de la prise en compte du feed-back visuel pendant un mouvement orienté vers une cible et plus particulièrement de l'intégration des informations visuelles dans le système. A cinq ans, le contrôle visuel n'intervient pratiquement qu'au moment de l'arrêt du mouvement. Il intervient beaucoup plus précocement à sept ans, puis revient à 9 et 11 ans à un niveau intermédiaire (légèrement plus précoce qu'à 5 ans). Des conclusions ont été tirées sur les types d'informations et de contrôle en fonction de ce type de pointage manuel. Un même type d'observation a été réalisé. Keller (1982), dans une situation de renvoi de balle type tennis, a montré que l'enfant de 5 ans une fois arrivé à l'endroit présumé du renvoi de balle, s'arrête ou se replace à un autre endroit pour prendre une information visuelle avant de déclencher le mouvement de frappe. A sept ans, il se dirige plus rapidement à l'endroit de la frappe, il l'exécute dans le mouvement de course sans la réaliser correctement. Enfin, à neuf ans, l'ensemble course-stabilisation et frappe de balle évolue vers un certain optimum où l'enfant choisit diverses stratégies pour s'ajuster par rapport à la balle.

Dans leur expérience sur les attrapés à une main, Fischman et coll. (1992) ont montré que les enfants de 5 ans ont une habileté rudimentaire d'attraper à une main, alors qu'elle est maîtrisée pour l'essentiel chez les enfants de 12 ans. La localisation de la balle influence la réussite dans les attrapés à une main ainsi que la sélection de l'orientation appropriée du bras et de la main. Les enfants dès cinq ans sont sensibles aux aspects perceptifs du lancer et répondent avec une orientation appropriée de la main. Néanmoins, l'enfant de 6, 7 et 8 ans ne semble pas pouvoir traiter adéquatement l'information visuelle (Williams, 1968). En effet, Alderson et coll. (1974), lors d'un attraper de balle à une main, avec des garçons de 7, 10 et 13 ans, ont montré que les enfants de 7 ans n'avaient pas de difficultés à évaluer les conditions environnementales, trajectoire de la balle, vitesse d'approche..., mais qu'ils en avaient à ajuster leur réponse à ces conditions. La capacité à intégrer l'information visuelle, en cours du mouvement, gagnerait en efficacité entre 7 et 8 ans dans le cas du pointage de cibles en vision centrale et en boucle visuelle fermée. Dans le cas de cibles en vision latéralisée, décentrée et de durée très brève, cette opération subit une réorganisation vers 8 ans (Hauert, Badan, Pellizzer & Sevino, 1999). Il apparaît que 8 ans est une période charnière dans le développement des représentations spatiales que l'enfant établit pour contrôler ses actions sur le milieu. En effet, les enfants de 8 ans sont plus affectés par l'absence de contrôle visuel de leur main durant des pointages visuo-manuels. Dans une situation de visée visuo-manuelle de cibles disposées en arc de cercle, Hay, Fleury et Bard (1986) ont montré qu'à 8 ans les réafférences proprioceptives semblent difficilement suppléer les réafférences visuelles.

Dans le cas de reproduction de déplacements de doigts, ayant été placés par un expérimentateur, avec des lunettes prismatiques, Orliaguet (1986) a observé que les enfants de 5 ans privilégiaient le mode proprioceptif pour l'espace proche du corps et le mode visuel pour l'espace éloigné ou controlatéral. Avec l'âge, il y a une diminution progressive puis disparition du " sous espace " proprioceptif au profit d'un espace unique où la vision est dominante (Orliaguet, 1986). Pour les enfants de 7 ans, le système de guidage visuel devient prépondérant, lequel au début perturbe la performance. A 9 ans, les enfants deviennent capables de mieux contrôler l'intégration des composants essentiels du mouvement. L'évolution de la prédominance visuelle ou proprioceptive est observée par la différence angulaire entre la position du doigt, lors de la phase de placement par l'expérimentateur et la position du doigt, lors de la phase de reproduction. La différence augmente avec l'âge des enfants. Les enfants de 5 ans, ont des différences angulaires plus faibles que les plus âgés, Orliaguet (1986) en déduit qu'ils utilisent de manière prédominante un mode de contrôle proprioceptif.

Vers 11 ans les deux sources d'afférences (vision et proprioception) interagissent pour permettre au système moteur d'être le plus efficace possible (Hay & Bard, 1999).

Les comportements, d'interception, d'attraper et de frapper, se produisent dans un environnement dynamique. Pour tous ces comportements l'individu doit déterminer un moment d'interception et engager une action qui coïncide avec l'objet en mouvement. Le déplacement d'un mobile, dans le champ visuel, induit des changements spatio-temporels importants dans l'environnement. Ces changements obligent le sujet, qui doit intercepter le mobile, à adapter ses stratégies de réponses aux caractéristiques propres de l'objet en déplacement (Bard, Fleury & Teasdale, 1995). La vitesse de déplacement du mobile est une de ces particularités à laquelle le sujet doit s'adapter.

B- La vitesse du stimulus affecte le mouvement

Bard et coll. (1995) ont demandé à des enfants de 6 et 10 ans de faire coïncider l'arrivée d'un lancer avec l'arrivée d'une cible mobile. Ils ont utilisé le Bassin Anticipation Timer (BAT). Le BAT est composé d'une série de lumières alignées sur une rampe dont l'allumage séquentiel produit un point lumineux en déplacement. La cible à intercepter est le mouvement apparent créé par l'allumage successif de diodes placées perpendiculairement à l'axe du regard. Les enfants devaient effectuer un lancer glissé de rondelle sur une table. La vitesse du stimulus lumineux était de 167 cm/s ou 222 cm/s et celui-ci provenait de la gauche ou de la droite de l'enfant. L'erreur temporelle constante, l'erreur spatiale absolue, le temps d'initialisation et le temps d'exécution ont été mesurés. Les résultats ont montré que la vitesse d'arrivée de l'objet affecte significativement la performance de tous les enfants. La vitesse du stimulus a un effet très important sur toutes les variables mesurées, exceptée sur la précision spatiale ceci quel que soit l'âge (Bard et coll., 1995). Ces effets de la vitesse sont retrouvés par Smeets et Brenner (1995) sur les temps de mouvement dans leur expérience de pointage d'araignée en mouvement (sur écran). Plus l'araignée se déplace rapidement, plus les mouvements de la main sont rapides, ce rapport est présent dès le début du mouvement. Les mouvements de fond d'écran ont aussi un impact sur la vitesse de la main, la vitesse du mouvement de la main apparaît basée sur l'information de vitesse (relative), tandis que la trajectoire du mouvement est basée sur l'information de position. Pour les cibles stationnaires, les sujets connaissent la position visée (but) dès le début. Pour les araignées mobiles, le bras commence à se déplacer vers une position prévue de la cible. La détermination de cette position n'est pas simple, parce qu'elle dépend des vitesses et des positions *et* de la main et de la cible.

Deux mécanismes compensent les erreurs faites dans l'évaluation initiale de la position de la cible. La vitesse à laquelle la main se déplace est ajustée dès le début, sur la vitesse de la cible, et la position prévue de la cible est ajustée pendant le mouvement. La trajectoire est ajustée sur la base de la position changeante de l'araignée, la perception de mouvement influence le mouvement entier. Ceci mène à la conclusion que la synchronisation et la trajectoire d'un mouvement ne sont pas coordonnées sur la base d'une variable perceptive simple (Smeets & Brenner, 1995).

Paradoxalement, les sujets sont généralement plus précis pour les vitesses les plus grandes et ce d'autant plus qu'ils sont jeunes. Mais il faut noter qu'ils répondent d'autant plus tard que la vitesse du mobile est élevée. D'une manière générale il semble que dans les tâches d'anticipation-coïncidence, les sujets se comportent de façon relativement stéréotypée, en ne tenant que partiellement compte des propriétés cinématiques du mobile et en répondant relativement plus tôt pour les trajectoires lentes et relativement plus tard pour les trajectoires rapides. Il apparaît d'ailleurs que cette stéréotypie est plus marquée chez les jeunes enfants et qu'avec l'âge les enfants parviennent à mieux adapter leurs réponses aux caractéristiques du mobile (Ripoll & Benguigui, 1999).

Les enfants de 5 ans, dans le cas d'attrapés de balle, ont tendance à répondre aussi rapidement que possible après le départ de celle-ci. Vers 9 ans, ils prennent un peu de temps avant de réagir pour saisir la balle (Williams, 1988). Ce temps supplémentaire permet l'amélioration du nombre de saisie. Pour Williams (1988), contrairement aux hypothèses cognitives et aux prises d'information visuelle, les limites des jeunes enfants, dans les tâches d'interception, ne résident pas dans le décodage des trajectoires de balle mais dans la difficulté à mettre en place la réponse. Williams (1985) a observé que les enfants de 5 ans produisent des réponses " stéréotypées " au niveau de la vitesse d'exécution, c'est-à-dire qu'ils utilisent la même vitesse de mouvement quelles que soient les situations expérimentales. Si ce phénomène disparaît au cours de la croissance, il reste latent, les vitesses élevées font réapparaître la tendance à employer des réponses " stéréotypées ".

Les enfants, dans les tâches de visée, de saisie ou d'interception montrent donc une évolution avec l'âge dans leur mode de contrôle de leur mouvement. Les cinématiques du mouvement reflètent les modes opérationnels ou la stratégie de contrôle utilisée, le temps de déclenchement du mouvement reflète le temps de programmation du mouvement et le temps de mouvement reflète la période de guidage visuel disponible pour le sujet (Fleury, Basset, Bard & Teasdale, 1998).

C- La cinématique du mouvement reflète le mode de contrôle (proactif-rétroactif) du mouvement

Bard, Paillard, Fleury, Hay et Larue (1990) ont montré, dans leur expérience de pointage de cibles fixes chez des 6, 8 et 10 ans, que la spécification du paramètre directionnel en l'absence des réafférences visuelles se développe précocement puisque l'erreur moyenne se situe autour de 3° pour les 6 ans et ne subit pas de changements importants par la suite. L'introduction d'une exigence supplémentaire d'amplitude n'affecte pas la précision directionnelle quelle que soit la condition visuelle. Cette compatibilité peut s'expliquer par le fait que la régulation visuelle des deux dimensions, direction et amplitude, ne s'effectue pas pendant les mêmes phases. La vision périphérique contrôlerait la phase initiale, la vision centrale la phase terminale de la trajectoire, lorsque la main arrive à proximité de la cible. Les 8 ans se révèlent plus lents, présentent des pics de vitesse moins élevés que les 6 et 10 ans ; leurs mouvements sont en général trop courts et ils présentent des phases de décélération plus longues que les autres groupes d'âge (Hay, Bard, Fleury & Teasdale, 1991). La spécification des paramètres spatiaux du mouvement connaît un développement plus long et plus complexe pour l'amplitude que pour la direction, avec d'importants changements stratégiques autour de 8 ans. Les résultats de Bard et coll. (1995) indiquent que lorsque la vision n'est pas disponible, dans une tâche de pointage, l'erreur de direction ne montre pas de changement majeur avec l'âge. Au contraire, l'erreur d'amplitude atteint un pic vers 8 ans, suggérant que le contrôle de l'amplitude est relié aux feed-back visuels à cet âge. L'amplitude, plus que la direction, est dépendante de régulations en cours de mouvement, donc de la maturation du freinage permettant une modulation de la vitesse adaptée à l'intégration de réafférences. L'amplitude semble, plus que la direction, sujette à des réajustements correcteurs, suggérant son appartenance à un référentiel spatial différent du fait de sa plus grande dépendance par rapport au codage de la position finale. Hay et Bard (1999) suggèrent que les messages proprio-musculaires, issus du déplacement du membre, sont utilisés à tous les âges (5, 7, 9 et 11, âges étudiés) pour contrôler en ligne l'adéquation entre l'amplitude du mouvement réel et celle du mouvement planifié. De plus, il ressort de leur étude que les enfants de 7 et 9 ans s'appuieraient essentiellement sur les messages proprioceptifs issus de la phase dynamique, à la fois pour contrôler rétroactivement l'amplitude de leurs mouvements et pour réactualiser le calibrage spatial de la position de leur main sur les cibles. Alors que les 5 et 11 ans semblent s'appuyer non seulement sur les informations actives mais aussi sur les informations statiques issues des positions d'arrêt sur les cibles à partir desquelles ils spécifient les amplitudes à parcourir. La stratégie mixte d'utilisation d'une information sur les positions de départ,

combinée avec un contrôle rétroactif impliquant l'utilisation d'informations dynamiques, serait efficace chez les enfants de 11 ans à la faveur d'une précision des messages proprioceptifs. Alors que chez les enfants de 5 ans les messages proprioceptifs encore peu différenciés entraîneraient toujours une erreur de pointage plus importante que chez les autres groupes d'âge. Le processus de contrôle proactif parvient à maturité plus tôt (vers 7 ans) que le rétroactif, qui interviendrait vers 11 ans (Hay et coll., 1986). Ces données corroborent l'idée que le contrôle de la direction et de l'amplitude des mouvements sont des processus distincts. Le contrôle de la direction dépendrait du processus proactif alors que l'amplitude serait régulée " en ligne " à travers le processus rétroactif (Rosenbaum, 1980).

V- Conclusion

Le temps de développement, avec Piaget, apparaît être régulier et linéaire, une fois qu'un schème ou un comportement se manifeste, il n'y a pas de régression possible. Les périodes de régression ne peuvent avoir lieu dans la conception de Piaget puisque l'apparition d'un schème entraîne celle d'autres schèmes plus évolués. Les expériences de l'enfant consolident les schèmes, puis les coordinations entre ces schèmes (e.g., vision-audition, vision-succion, vision-toucher...). Le développement de l'enfant s'effectue en fonction d'une succession de stades dans lesquels sont définis des comportements précis pour un âge donné. Par exemple la permanence de l'objet ne serait acquise que vers 8-10 mois (sous-stade IV de l'intelligence sensori-motrice). Or des études sur le développement cognitif (Baillargeon, 1987; Houdé, 1994) ont montré que les bébés dès 4-5 mois avaient déjà une certaine conscience de la permanence de l'objet. Ces études ont amené Houdé (1994) à expliquer l'erreur " A non-B " par une inefficacité des processus d'activation-inhibition due au développement non terminé du cortex préfrontal. Dans l'approche constructiviste, ce sont les nouvelles capacités de traitement de l'information qui entraînent une meilleure préparation du geste. Pour l'approche dynamique, l'émergence des conduites est le produit de l'interaction entre les contraintes de l'environnement, de la situation et du niveau de maturation du système et cette interaction aboutit à la non-linéarité des changements avec l'âge. Le comportement qui survient à un certain moment est le résultat des relations des systèmes dynamiques où les composants de ces systèmes peuvent être en compétition, inhiber ou faciliter un autre composant avec des implications pour la performance motrice (Thelen, 1995). Mais, il ressort de ces différentes approches que l'enfant se développe, apprend à s'adapter à son environnement grâce à ses expérimentations perceptives, ses interactions avec celui-ci. Les activités de perception, notamment celle de perception visuelle, apparaissent comme le

support du développement de l'enfant car la perception comprend l'organisation des informations sensorielles et l'incorporation d'une signification issue de l'expérience antérieure du sujet (Not, 1978). Les données présentées conduisent à concevoir le développement de l'habileté d'interception, non pas comme résultant d'une succession de stades dans un ordre immuable qui aboutit à un temps de développement linéaire mais plutôt comme résultant de l'affinement progressif des différents systèmes mis en jeu. Cet affinement se réaliserait par l'interaction de processus cognitifs (comme celui d'activation-inhibition) ou écologique-dynamique (invariance temporelle) en fonction de la tâche et du moment d'intervention au cours du développement. Dans une perspective cognitive, la fonction exécutive des processus d'activation-inhibition pourrait en partie expliquer l'apparition des comportements et les périodes de régressions que l'on peut observer au cours du développement moteur. Les erreurs et les périodes de régression ne seraient pas dues à l'utilisation de programmes moteurs erronés mais à un défaut d'inhibition. Les périodes de progrès ou de régression, et l'apparition de structures motrices seraient considérées comme la conséquence de l'inhibition ou non de schèmes non-pertinents. C'est pourquoi dans un premier temps, nous avons éprouvé la fonctionnalité des processus d'activation-inhibition sur le niveau d'une habileté d'interception par l'intermédiaire du mécanisme d'interférence rétroactive (interférence créée par un stimuli qui doit être inhibé). De plus, en référence aux travaux de Robertson (1977, 1978), si les enfants montrent des niveaux de coordination différents pour un même niveau d'organisation motrice dans une habileté pour une même catégorie d'âge, il apparaît qu'il y a des constantes obligées dans la combinaison des différentes composantes d'une habileté donnée (Rosey & Keller, 2003). Au cours du développement, malgré les différences dans les comportements, il y aurait des invariances structurelles. Dans un deuxième temps, nous avons cherché à déterminer ces invariances ainsi que les critères d'analyse de la coordination, toujours dans le cadre de l'habileté d'interception.

Cadre Expérimental

Chapitre 3

Expérimentations

CHAPITRE 3 –EXPÉRIMENTATIONS

I- Introduction : Choix d'un cadre écologique pour les 3 expérimentations

Le choix d'un cadre écologique *dans le sens de l'action* située s'est effectué D'une part, d'éprouver la fonctionnalité du processus d'activation-inhibition sur l'apparition des structures motrices et d'autre part de déterminer les critères d'analyse de la coordination de l'habileté d'interception par de très jeunes enfants en observant la globalité de leur conduite. Ce choix s'inscrit dans la volonté de considérer non seulement l'enfant mais aussi l'environnement dans lequel il évolue et surtout leur relation réciproque. Le terme écologique, ici, ne se confond pas avec la notion de l'approche écologique mais fait référence au courant de " l'action située " pour lequel, le comportement, l'action et la pensée, ne peuvent se comprendre que dans leur cadre d'élaboration c'est-à-dire la situation (Tijus, 2001). Cet environnement a été choisi pour la caractéristique dynamique du contexte de réalisation des habiletés de frappe qui influence la performance. De plus, nous rejoignons l'idée que les frappes de balle apparaissent être plus comme la résolution d'un problème perceptivo-moteur qu'une réaction à un stimulus (Hubbard & Seng, 1954).

Dans l'optique de respecter ces spécificités, nous avons aménagé l'espace des enfants à l'école de telle sorte qu'ils puissent interagir avec le monde extérieur, pour étudier le développement de leurs actions

Expérience 1

Étude transversale, de l'effet d'interférence sur la frappe en coup droit au tennis, pour cinq groupes d'enfants de 6 à 10 ans.

II- Expérience 1 : Étude transversale, de l'effet d'interférence sur la frappe en coup droit au tennis, pour cinq groupes d'enfants de 6 à 10 ans.

A- Introduction

Les enfants, au cours de leur développement, montrent des périodes où il peut y avoir la disparition d'une habileté, précédemment réalisée, pour la voir réapparaître dans un autre contexte ou plus tard. Ce phénomène peut refléter les réaménagements et les modifications d'habiletés anciennement acquises ou la compétition/interaction entre les anciennes habiletés et les nouvelles qui sont en cours de développement. L'enfant dispose de plusieurs programmes activés en même temps, pour un même geste qui interfèrent les uns avec les autres. Une tâche est considérée comme perturbante (ou facilitante) lorsqu'elle fait émerger (ou non) les schèmes qui interfèrent avec la tâche à réaliser (Pascual-Leone, 2000). L'interférence réfère à la cause directe de la dégradation, à savoir, le matériel interpolé (tâche non-pertinente). L'interférence c'est la compétition cognitive locale entre les multiples schèmes, laquelle peut empêcher l'accès aux arrangements de schèmes moins fortement activés (Harnishfeger, 1995). Les études de Kagan et coll. (1964), sur la résolution de problèmes, ont amené ces auteurs à définir le mode de traitement de l'information en deux types d'attitude : l'impulsif et le réfléchi. Ces auteurs y incluent la capacité à inhiber une réponse immédiate à réaliser un but ou à respecter une demande. Les sujets réfléchis ont la capacité d'inhiber leur première réponse, de la réévaluer puis de recommencer cette procédure avant de répondre. Maccoby et coll. (1965) incluent, dans ces deux attitudes, la capacité à inhiber les mouvements moteurs en réponse aux demandes de la situation : L'inhibition est spécifique aussi bien à la durée qu'à la situation. L'inhibition est définie comme une suppression cognitive de base, qui contribue à la réalisation des tâches en empêchant les informations des tâches non pertinentes d'entrer ou d'être maintenues dans la mémoire de travail. L'inhibition peut-être conceptualisée comme un processus qui bloque la propagation de l'activation, en gardant l'attention vivement focalisée sur la tâche actuelle. Avec la notion d'inhibition, l'erreur ne serait plus due à un défaut du programme mais à une incapacité à inhiber des structures concurrentes c'est-à-dire à un défaut d'inhibition. Les recherches de ces auteurs ont été, pour nous, le point de départ d'un travail prospectif sur l'établissement d'une relation, en premier lieu, entre le style cognitif impulsif-réfléchi et le niveau d'inhibition, puis de l'établissement d'une correspondance entre le développement des niveaux de coordination et la relation précédente, ceci chez les enfants de 3 à 5 ans. Il est ressorti de ce travail tout d'abord, que le processus d'activation-inhibition semble participer au style cognitif impulsif-

réfléchi et qu'il est le plus significatif dans le niveau des habiletés motrices (Keller & Rosey, 2000). Ce lien entre le style cognitif des enfants et le niveau de réponse motrice a été confirmé dans une expérience de Keller et Ripoll (2001) de renvoi balle avec une raquette de mini-tennis chez des enfants de 5, 7 et 9 ans. Les enfants, déterminés réfléchis au Matching Familiar Figures Test de Kagan, sont les meilleurs dans la tâche motrice de renvoi de balle avec raquette. Ces résultats nous ont amené à déterminer si les fonctions exécutives d'activation-inhibition pouvaient être un des facteurs à l'origine de l'apparition de structures motrices. Le développement des habiletés motrices serait considéré comme la conséquence de l'inhibition de schèmes non pertinents. L'inhibition est utilisée pour référer à la dégradation observée dans la rétention d'un matériel original. L'interférence dégrade la performance par la mise en place de stimuli distrayant (Dempster, 1995). De plus, au niveau développemental, la réalisation de rotation dans le renvoi de balle avec raquette est le reflet d'un niveau de coordination supérieur à une frappe réalisée sans rotation. C'est pourquoi, afin de tester notre hypothèse que l'apparition des comportements habiles serait la conséquence de l'inhibition de schèmes non pertinents, nous avons étudié le niveau de coordination, pour cinq catégories d'âges (6, 7, 8, 9 et 10 ans) à travers la mise en place d'une tâche d'interférence de renvois de balle avec une raquette de mini-tennis. Le niveau de rotation des enfants lors des renvois de balle après la passation de la tâche d'interférence devrait être inférieur à celui lors de la situation pré-test. De plus, les processus inhibiteurs devenant plus efficaces avec l'âge (Bjorklund & Harnishfeger, 1990) cette régression devrait être d'autant plus importante que l'enfant est jeune.

B- Méthode

1- Participants

145 enfants d'une école élémentaire de la région parisienne ont participé à l'expérimentation. L'expérience a eu lieu sous le préau de l'école des enfants. Il y avait un groupe de 29 enfants de 6 ans (16 garçons, $M = 5,10$ ans ± 8 mois et 13 filles, $M = 5,9$ ans, ± 7 mois), un groupe 36 enfants de 7 ans (16 garçons, $M = 7$ ans, ± 3 mois et 20 filles, $M = 7$ ans, ± 3 mois), un groupe 24 enfants de 8 ans (10 garçons, $M = 8,2$ ans, ± 5 mois et 14 filles, $M = 8$ ans, ± 3 mois), un groupe de 25 enfants de 9 ans (12 garçons, $M = 9,3$ ans, ± 2 mois et 13 filles, $M = 9,2$ ans, ± 4 mois) et un groupe 31 enfants de 10 ans (20 garçons, $M = 10,3$ ans, ± 5 mois et 11 filles, $M = 10,6$ ans, ± 2 mois).

Les enfants qui pratiquaient le tennis ou tennis de table plus deux fois par semaine et depuis plus de deux ans n'ont pas été retenus pour les analyses.

2- Matériel expérimental

Un ballon de basket (taille 5) a été lancé, à 1 m, sur la droite et sur la gauche de l'enfant. L'expérimentateur se trouvait à 5 m en face de l'enfant. La trajectoire du ballon n'a pas été cachée, permettant à l'enfant de lire la trajectoire (figure 15).

Une balle de tennis a été lancée à la droite du sujet, à 1 m, pour que l'enfant réalise un coup droit après le rebond de la balle. L'expérimentateur est placé de la même manière que dans la situation avec le ballon (figure 15).

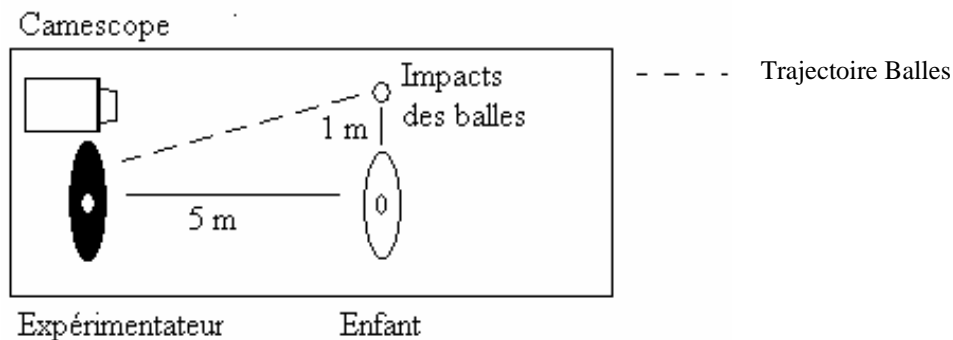


Figure 15. Vue de dessus du dispositif expérimental dans la tâche avec le ballon de basket et dans la tâche avec la raquette.

3- Procédure

La tâche expérimentale se déroule en 3 étapes (toutes les étapes sont filmées, seules les étapes 2 et 3 seront utilisées).

a- 1^{ère} étape

Il s'agit pour l'enfant de rattraper un ballon de basket (taille 5) à deux mains après un rebond. L'examinateur lance le ballon sur la droite (x 10) et sur la gauche (x 10) de l'enfant, afin de déterminer si l'enfant possède le schème moteur de se tourner pour récupérer le ballon qui vient sur sa droite ou sa gauche. Si l'enfant manifeste le schème moteur de rotation alors il effectuera la deuxième étape.

b- 2^{ème} étape

L'enfant doit renvoyer une balle de tennis, en direction de l'examinateur, avec une raquette de mini-tennis. L'examinateur lance une balle de tennis sur la droite (x 10) de l'enfant. Cette étape permet de déterminer si l'enfant montre toujours le schème moteur de rotation lors de renvois de balle avec la raquette de mini-tennis.

c- 3^{ème} étape –tâche d'interférence

Si l'enfant montre toujours le schème moteur de rotation pour renvoyer la balle alors l'examineur " active " le renvoi de balle de face (amorçage négatif) avec dix lancers de balle droit sur l'enfant qui doit renvoyer sans rebond (de volée) ou avec un rebond.

Les lancers de face se sont déroulés comme suit : Sans rebond (x 2), avec rebond, sans rebond, avec rebond (x 2), sans rebond, avec rebond, sans rebond (x 2). Puis tout de suite après cette série de 10 renvois, l'enfant doit de nouveau renvoyer la balle, après le rebond, qui lui vient sur son côté droit (x 3). On observe alors si l'enfant effectue de nouveau une frappe avec rotation. Les enfants ne réalisaient que trois frappes, après la tâche d'interférence (frappe de face), car lors de la pré-expérimentation, nous avons observé qu'à partir de la quatrième frappe en coup droit, les enfants avaient des niveaux de rotation similaires à ceux obtenus dans la deuxième étape.

La série de renvois de face est le distracteur, car on introduit un schème " dangereux ", frappe sans rotation, qui dans les renvois de face par rapport aux renvois de balle sur le côté, devient un schème pertinent, la balle arrivant directement sur l'enfant. La deuxième série de renvois de balle après rebond, sur le côté droit, permet d'estimer si la tâche d'interférence a une influence sur le niveau de rotation de l'enfant.

4- Recueil des données

Les enfants ont été filmés avec un caméscope placé face à l'enfant à hauteur de l'expérimentateur (à 5 m face à l'enfant). Les enfants étaient dans leur tenue du moment, il leur a été demandé de retirer leur manteau. Il n'a pas été posé de pastilles.

Le renvoi de balle avec raquette est composé de deux phases, une de déplacement vers la balle et une d'ajustement de la frappe. Seule, la phase d'ajustement au moment de la frappe a été évaluée. Le niveau de coordination a été défini par une note pour le niveau de rotation lors de l'approche de la balle.

Les films visionnés ont été analysés avec une grille de niveau de rotation contenant 5 niveaux (figure 16). Les séquences développementales utilisées, ont été déterminées par rapport aux configurations motrices de saisie de balle et des niveaux de coordination de l'habileté de frappe de balle type tennis proposés par Keller (1992 et 1995). Dans cette grille d'analyse, deux niveaux ont été ajoutés par rapport à la grille d'Haywood (1986 in Keller 1995) qui en contient 3 : la rotation du tronc sans déplacement du pied (étape 3) puis la rotation du tronc avec déplacement des membres inférieurs (étape 5). Ce mouvement est

d'abord réalisé par un mouvement de la jambe ipsilatérale au côté de l'arrivée de la balle, puis par un retrait de cette jambe suivi par un mouvement (jaillissement) de la jambe controlatérale (Keller, 1995).






	1- <i>Pas de rotation</i>	Pieds et tronc de face, déplacement seul du bras avec un mouvement de haut en bas (ou des bras, attraper du ballon).
	2- <i>Pas de rotation</i>	Pieds et tronc de face, déplacement du bras à l'horizontale.
	3- <i>Rotation du tronc</i>	Pieds de face, rotation seule du tronc.
	4- <i>Rotation du corps</i>	Rotation du corps avec déplacement de la jambe arrière en biais.
	5- <i>Rotation du corps</i>	Rotation du corps avec déplacement de la jambe arrière puis de la jambe avant, avec rotation différenciée (rotation pelvienne puis spinale).

Figure 16. Séquences développementales utilisées dans l'évaluation des niveaux de rotation dans les renvois de balle de tennis avec une raquette de mini-tennis. (D'après Keller, 1995).

Les valeurs des niveaux de rotation ont été obtenues de la manière suivante. Les dix frappes en coup droit ont été évaluées en fonction de cette grille. A chacune des dix frappes, de chacune des conditions expérimentales (avant le passage de la tâche d'interférence, puis après) une valeur numérique correspondant au niveau de rotation a été attribuée, ceci pour chaque enfant.

Les deux observateurs des films ont eu des résultats qui se sont corroborés entre 85 et 90%. Pour les 10% non corroborés, les deux observateurs re-visualisaient le film simultanément et non plus séparément, et évaluaient le niveau de rotation en commun.

5- Les variables étudiées

Dans cette expérimentation les variables dépendantes étudiées étaient :

- Le niveau de rotation dans la condition contrôle (RC) qui correspond à la moyenne des niveaux sur les dix frappes de coup droit réalisées avant le passage de la tâche d'interférence.

- Le niveau de rotation après le passage de la tâche d'interférence (RI) qui correspond à la moyenne des niveaux sur les trois frappes de coup droit réalisées après le passage de la tâche d'interférence (les dix renvois de face). La tâche post-test est réalisée pour évaluer l'effet de la tâche d'interférence sur le niveau de rotation dans les frappes de coup droit.

6- Analyses statistiques

Le traitement statistique des données a été réalisé au moyen du logiciel Statistica 6.0 sur un PC.

Une analyse de variance à trois facteurs : Age à 5 niveaux (6, 7, 8, 9, et 10 ans), Genre à 2 niveaux (garçons-filles) et Tâche d'interférence facteur répété à 2 niveaux (avant-après le passage de la tâche) a été appliquée pour mettre en évidence les effets des contraintes de la tâche sur la variable dépendante (niveau de rotation). Une analyse à posteriori " post-hoc ", des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, est réalisée dans le but de mettre en évidence la signification des variations par paire.

Le seuil de significativité est fixé à une valeur de probabilité d'hypothèse nulle $p < .05$. Dans les tableaux, les valeurs de cette probabilité sont indiquées par un astérisque (*).

C- Résultats

Se reporter à l'annexe 2 pour le détail des niveaux de rotation.

1- Présentation des moyennes et des écarts-types

Condition					Genre				
Contrôle (RC)					Interférence (RI)				
					Garçon (n= 74)		Fille (n= 71)		
n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
145	2.88	0.57	2.60	0.72	145	2.84	0.71	2.63	0.59

Tableau 1. Moyennes et écarts-types des niveaux de rotation en fonction des conditions (contrôle et interférence) et du genre (garçon et fille). N = effectif.

	Age (ans)									
	6 ans (n= 29)		7 ans (n= 36)		8 ans (n= 24)		9 ans (n= 25)		10 ans (n= 31)	
Conditions	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
Contrôle (RC)	2.37	0.74	2.91	0.44	3.07	0.44	3.13	0.43	2.99	0.45
Interférence (RI)	2.01	0.83	2.65	0.53	2.70	0.56	2.83	0.82	2.80	0.56

Tableau 2. Moyennes et écarts-types des niveaux de rotation pour chaque groupe d'âge (6, 7, 8, 9 et 10 ans) en fonction des conditions (contrôle et interférence). N = effectif.

2- Analyse de variance

Pour les 145 participants, une analyse de variance à trois facteurs : Age à 5 niveaux (6, 7, 8, 9, et 10 ans), Genre à 2 niveaux (garçons-filles) et Tâche d'interférence à 2 niveaux (avant-après le passage de la tâche) avec mesures répétées sur le dernier facteur, a été réalisée sur les niveaux de rotation (R) dans le renvoi de balle.

* Effets globaux

L'analyse de variance montre un effet significatif des trois facteurs étudiés sur le niveau de rotation.

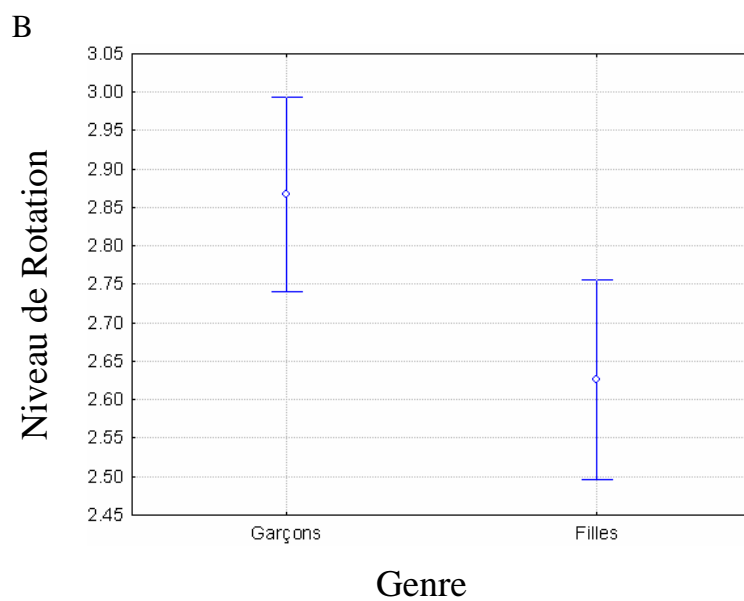
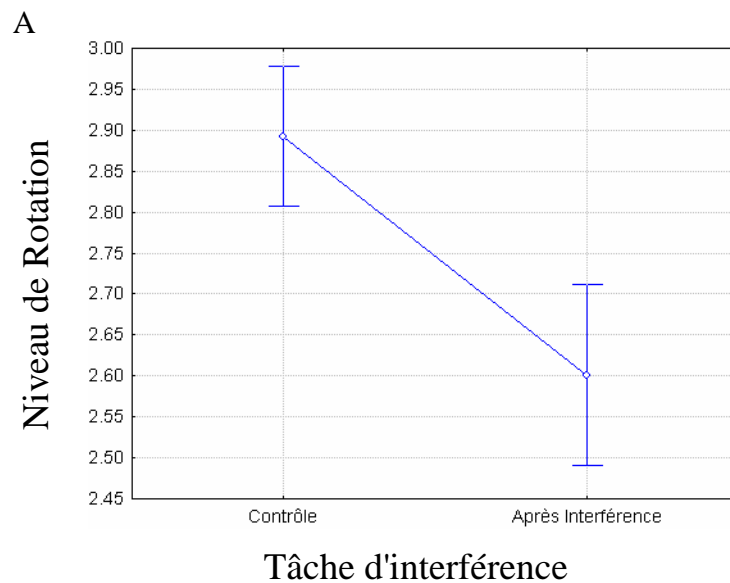
1- L'effet de la tâche d'interférence ($F_{1,135} = 52.6, p < .001$, figure 17A) est significatif. Le niveau moyen de rotation, après la passation de la tâche d'interférence (RI) est significativement plus faible qu'avant sa passation (RC) quel que soit l'âge et le genre.

2- L'effet du genre est significatif ($F_{1,135} = 6.26, p < .05$, figure 17B). Le niveau moyen de rotation des garçons est significativement supérieur à celui des filles.

3- L'effet de l'âge est significatif ($F_{4,135} = 9.47, p < .001$, figure 17C) indiquant que le niveau de rotation évolue avec l'âge. Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que :

- le niveau moyen de rotation des 6 ans est significativement plus faible que celui de tous les autres groupes d'âge (7, 8, 9 et 10 ans) (respectivement, $F_{2,134} = 1.71, p < .001$, $F_{2,134} = 1.01, p < .001$, $F_{2,134} = 2.76, p < .001$ et $F_{2,134} = 1.00, p < .001$).

Mais aucune des interactions n'est significative : âge x genre ($F_{4,135} = .734, p = .57$ n.s.), genre x tâche ($F_{1,135} = .163, p = .69$ n.s.) et âge x tâche ($F_{4,135} = .629, p = .64$ n.s.), âge x sexe x tâche ($F_{4,135} = .626, p = .64$ n.s.).



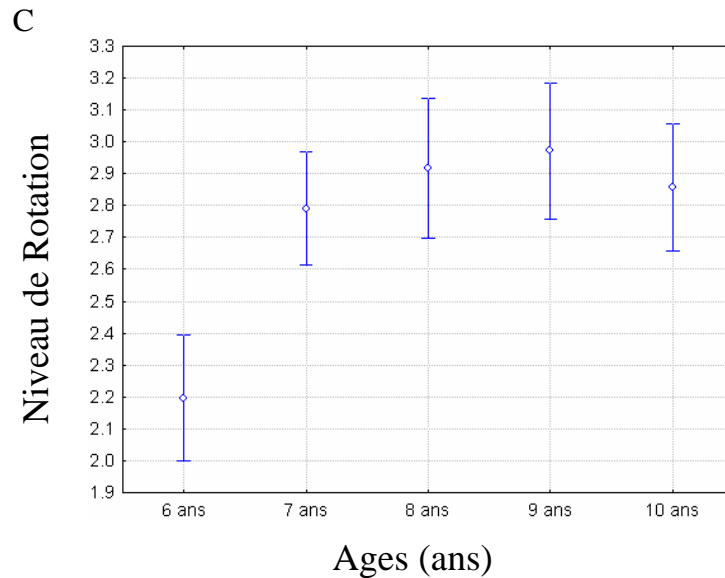


Figure 17. Niveaux moyens de rotation (R) dans le renvoi de balle en coup droit. *Graphe A* : Niveaux moyens de rotation (R) dans le renvoi de balle en coup droit en fonction du genre. *Graphe B* : Niveau moyen de rotation dans le renvoi de balle en coup droit avant (RC) et après (RI) la passation de la tâche d'interférence. *Graphe C* : Niveaux moyens de rotation (R) dans le renvoi de balle en coup droit en fonction de l'âge (ans).

Les résultats montrent, d'un côté un effet de la tâche d'interférence et d'un autre que le niveau de rotation augmente avec l'âge mais ils ne montrent pas d'interaction entre les deux facteurs. Par rapport à notre hypothèse que l'effet de la tâche d'interférence avec l'âge devait diminuer, les processus inhibiteurs devenant plus efficaces avec l'âge (Bjorklund & Harnishfeger, 1990), nous pouvons faire une analyse prospective, par des comparaisons deux à deux, afin de réorienter notre analyse. Les comparaisons deux par deux montrent que le niveau moyen de rotation après la tâche d'interférence (RI) n'est pas significativement différent de celui avant la passation de la tâche (RC) chez les garçons de 8 ans et 10 ans, (respectivement $F_{1,135} = 2.77, p = .10$ n.s. et $F_{1,135} = 2.56, p = .11$ n.s.) et chez les filles de 9 et 10 ans (respectivement, $F_{1,135} = 2.30, p = .13$ n.s. et $F_{1,135} = 2.32, p = .13$ n.s.).

* Résumé

Le niveau moyen de rotation, dans le renvoi de balle avec raquette, augmente significativement avec l'âge. Les garçons possèdent un niveau moyen de rotation significativement supérieur à celui des filles. Le niveau moyen de rotation, après l'exécution de la tâche d'interférence, diminue significativement pour tous les âges. Enfin, pour les garçons de 8 et 10 ans et pour les filles de 9 et 10 ans, il n'y a pas d'effet de la tâche d'interférence.

D- Discussion

Nos résultats montrent tout d'abord que si le niveau de coordination dans le renvoi de balle s'améliore avec l'âge, cette amélioration à partir de 9 ans plafonne. La stagnation du niveau de coordination, pourrait signifier que le progrès dans l'habileté de frappe type tennis, est plus lent à partir de 9 ans ou que cette habileté est acquise dès cet âge. Or le niveau de coordination est en moyenne de trois, à 9 ans, alors que la grille d'observation contient cinq niveaux de coordination ce qui renforce l'idée d'une progression lente dans l'habileté de frappe avec raquette et écarte celle de l'acquisition de l'habileté dès l'âge de 9 ans. La comparaison des niveaux de coordination entre les garçons et les filles montre une évolution plus généralement observée selon le type d'habiletés motrices. Dans certaines habiletés telles la course et le lancer, les garçons ont un niveau de coordination plus élevé que les filles (Branta, Haubenstricker & Seefeldt, 1984) alors que dans les habiletés de souplesse et d'équilibre, l'inverse est observé.

Ensuite, nos résultats montrent un effet significatif de la tâche d'interférence sur le niveau de coordination des enfants, le niveau de coordination diminue après le passage de la tâche d'interférence. L'effet d'interférence dépend de l'interrelation fonctionnelle des mouvements et reflète des opérations d'exécution de programmes concurrents (Adam, Nieuwenstein, Huys, Paas, Kingma, Willems & Werry, 2000). Dans notre expérience les programmes concurrents sont le renvoi avec rotation et le renvoi de face (sans rotation). Le second devenant pertinent dans la tâche d'interférence et concurrent dans la tâche de renvoi de balles arrivant sur le côté. Le processus d'activation-inhibition pourrait expliquer pourquoi les enfants persévèrent dans l'utilisation d'un renvoi sans rotation, pour les balles arrivant de nouveau sur le côté. Les enfants lors des renvois de balle avant la tâche d'interférence montrent un certain niveau de coordination. Dans les renvois de face ils adaptent leur réponse motrice en frappant sans rotation. Cette réponse est correcte par rapport à ce cas particulier de balles arrivant de face. Mais, lors des renvois de balle après la tâche d'interférence, ils frappent soit avec des niveaux de rotation plus faible, voire sans rotation pour les plus jeunes enfants. Alors, qu'ils ont montré un pattern de réponse avec rotation, qui est pertinent dans les renvois de balles arrivant sur le côté, ils ne le montrent plus ou moins bien. La tâche d'interférence affecte négativement le niveau de coordination. Il ne s'agit pas d'un processus d'apprentissage parce que celui-ci implique plusieurs séries de répétition ainsi que période de temps plus longue. De plus les deux séries de renvois de balle n'ont pas été utilisées pour améliorer la performance mais pour faire apparaître des comportements précis. L'interférence contextuelle n'est pas ici effective car l'effet d'interférence dans notre cas n'est pas lié à la

variabilité de pratique pour les deux conditions de renvois (de côté et de face). C'est pourquoi nous interprétons ce résultat comme indiquant que les enfants de 6 à 10 ans ne disposeraient pas d'un processus interne inhibiteur efficient, pour bloquer les effets d'un patron moteur (mouvement de face) de niveau inférieur du point de vue développemental.

L'interférence interagit également avec la spécificité de la tâche dans la mesure où l'effet d'interférence se manifeste sur la première phase d'exécution par orientation du corps dans l'espace vers la balle, mais pas pour la phase de frappe et de mise en coïncidence avec la balle. Dans une habileté motrice complexe, l'effet de l'interférence agirait spécifiquement sur la partie de la tâche concernée. Dans le cas de l'amorçage, des mécanismes influencent le traitement de l'information en fonction du contexte et peuvent porter sur des sous-catégories du mouvement ou sur un aspect de la réponse et la modifier (Alain, 1991).

Le manque d'interaction avec l'âge peut être expliqué par un manque de stabilité de l'habileté de frappe chez les 6 à 10 ans qui aboutit à des gestes non élaborés. Cette instabilité pourrait renforcer l'effet de la tâche d'interférence. Ces résultats peuvent être aussi expliqués par le fait que les processus inhibiteurs évoluent avec l'âge et seraient maîtrisés à 12 ans Passler, Isaac et Hynd (1985). L'analyse prospective a montré qu'il n'y a pas d'effet de la tâche d'interférence, sur le niveau de rotation, pour les garçons de 8 et 10 ans et pour les filles de 9 et 10 ans. Ce résultat corrobore celui trouvé par Passler, et coll. (1985) dans une tâche d'interférence rétroactive non-verbale. Bucky, Banta et Gross (1972) ont observé un développement du contrôle de l'inhibition motrice semblable, avec les tâches dénommées draw-a-line slowly et walk-a-line slowly, par ces auteurs, où celle-ci augmente lentement de 5 à 10 ans puis se stabilise de 12 à 20 ans. Les enfants de 6 et 7 ans ne disposeraient pas d'un processus interne inhibiteur efficient, mais il commencerait à le devenir entre 8 et 10 ans. L'analyse prospective réalisée suggère que les processus inhibiteurs puissent commencer à intervenir au cours du développement de l'habileté motrice, entre 8 et 10 ans, mais qu'ils ne sont pas suffisamment développés pour se traduire statistiquement avec certains groupes d'enfants lors de cette analyse. Il est possible que les différences deviennent significatives avec des enfants plus âgés (11 à 14 ans).

Pour l'approche écologique, la coordination est une propriété émergente des contraintes imposées par l'environnement sur les actions, plutôt qu'une conséquence d'une représentation ou de l'application d'un programme moteur. Néanmoins, dans notre étude, il semble que le contrôle cognitif des habiletés motrices, par l'intermédiaire des processus d'activation inhibition, puisse générer des patterns moteurs.

Les coordinations n'ont jamais été étudiées dans le champ de la psychologie cognitive mais les processus d'activation-inhibition nous permettent de les étudier. Ces processus apparaissent être une direction fondamentale pour l'apprentissage des habiletés motrices à l'école et impliquent que nous comprenions mieux leur rôle dans le développement des jeunes enfants.

Expérience 2

Étude longitudinale de la régulation visuelle de la frappe d'un ballon chez les enfants de 3 à 4 ans.

III- Expérience 2 : Étude longitudinale de la régulation visuelle de la frappe d'un ballon chez les enfants de 3 à 4 ans.

L'expérience 1 a montré que le processus d'activation-inhibition, à travers l'interférence rétroactive, influence le contrôle moteur. Ce résultat confirme (Keller & Rosey, 2003) que le processus d'activation-inhibition intervient dans l'organisation des coordinations motrices pour des habiletés, telles que le cloche-pied, l'équilibre et le lancer à bras cassé. Mais l'expérience 1 n'a pas montré que la dégradation de la performance était d'autant plus importante que l'enfant est jeune.

Pour Visser (1993) l'amorçage négatif apparaît être une mesure plus sensible que l'effet d'interférence rétroactive, nous avons donc cherché à éprouver la fonctionnalité des processus d'activation-inhibition sur le contrôle moteur d'une activité perceptivo-motrice, telle que la frappe manuelle d'un ballon chez des enfants de moins de 5 ans.

A- Introduction

Il nous fallait tout d'abord définir si ces enfants sont capables de frapper un mobile vers une cible. En effet, dans les tâches d'interception d'un mobile, telles que les attrapés ou les frappes, le problème est de localiser le mobile, de prédire sa trajectoire pour diriger la main (ou la raquette, la batte...) dans la bonne direction, d'estimer son temps d'arrivée et de déterminer le moment pertinent pour déclencher le geste permettant de le frapper. Ce qui pose la question de savoir sur quelle stratégie l'enfant s'appuie pour disposer des connaissances perceptives précédentes et comment il les utilise afin que son action soit synchronisée avec les événements, malgré les changements dans l'environnement. Le timing et la coordination des mouvements impliqués dans l'attraper d'objet en mouvement sont traditionnellement considérés comme étant des acquisitions cognitives qui se développent tardivement (Kay, 1970). Cet auteur dans une expérience d'attrapés de balle avec des enfants de 2, 5 et 15 ans a montré différents comportements selon l'âge. L'enfant de 2 ans n'anticipe pas les points d'arrivée de la balle, il réalise une action mais après que la balle soit arrivée ou l'ait dépassée (l'enfant se retourne pour aller chercher la balle qui est tombée). Néanmoins, il montre une importante coordination des doigts pour attraper la balle : il sait ce qu'il y a à faire mais il ne sait pas quand il faut le faire. L'enfant de 5 ans, quant à lui, sait où se positionner, comment placer ses mains et bouge ses mains pour attraper la balle. Il anticipe correctement la trajectoire de la balle et son vol ce qui lui permet, généralement, d'attraper la balle même si quelquefois ses doigts se referment trop lentement autour de la balle. A 15 ans la stratégie

générale de l'habileté attraper est établie. La posture n'est plus aussi rigide que pour les enfants de 2 et 5 ans, elle est plus appropriée pour l'action d'attraper et, les bras et les mains se déplacent plus librement pour attraper la balle. Les yeux sont centrés sur la balle, ne basculent pas vers les mains qui sont entièrement contrôlées à partir des connaissances que l'enfant a de la position de ses membres. A partir de l'observation de ces différences de comportements selon l'âge, Kay (1970) a considéré que les enfants avant 5 ans n'avaient pas de capacité cognitive d'anticipation parce qu'ils n'ont pas la capacité à traiter toutes les sources d'information (kinesthésique, proprioceptive et visuelle) (Kay, 1970). La maturité des habiletés d'attraper de balle ou de frappe avec raquette ne serait atteinte que vers 7-9 ans pour Gallahue (1982). Afin de mesurer les caractéristiques spatiotemporelles des mouvements de saisie, Von Hofsten (1983) a observé des bébés de 35 semaines. Il s'agissait pour ces bébés (assis) de saisir une " manette " jaune orange et or avec des petits yeux jaunes et noirs devant. L'objet se déplaçait horizontalement à 30, 45 ou 60 ms/sec, et s'arrêtait lorsqu'il était saisi. Il ressort de cette expérience que le bébé de 35 semaines (assis) est capable de saisir un objet qui se déplace c'est-à-dire de résoudre le problème d'anticipation et de timing. Mais, Keller et Fleurance (1987) ont montré que l'enfant de 3,5 ans de moyenne d'âge, même s'il est capable d'attraper des balles qui lui sont lancées de face, n'a qu'un faible taux de réussite (5% de réussite) pour atteindre cent pourcent de réussite vers 9 ans.

Si le bébé de 35 semaines est capable de saisir un objet en mouvement, il ressort que les enfants avant 5 ans, bien que capables de déterminer les conditions environnementales (où va arriver le mobile, quand va-t-il y arriver) n'arrivent pas à s'y adapter correctement (e.g., Kay, 1970 ; Keller & Fleurance, 1987). Les attrapés et les frappes seraient la conséquence d'un couplage temporel entre le déplacement du mobile et le contact avec celui-ci qui n'étant pas encore " mature " conduirait à des erreurs spatiales (e.g., l'enfant arrive trop tard ou trop tôt et donc échoue dans la saisie ou la frappe). Ce couplage temporel serait basé sur l'extraction de l'information temporelle (le temps restant avant que le mobile n'atteigne le sujet) qui est directement disponible, selon l'approche écologique, dans la variable tau. Cette variable spécifie le temps de contact entre le sujet et la balle, que la vitesse d'approche de la balle soit constante ou non (Lee, 1976 ; 1980 et Lee et coll., 1983). Cette information temporelle n'ayant pas besoin d'être traitée par le sujet (contrairement à l'approche cognitive), si la frappe de balle est la conséquence d'un couplage temporel, nous émettons l'hypothèse que des gestes de frappe manuelle devraient être observables chez des enfants de moins de 5 ans. La composante spatiale des frappes évoluerait postérieurement à la " maturation " de la composante temporelle.

Afin de déterminer d'une part, si les frappes sont la conséquence d'un couplage temporel et d'autre part quelle est la chronologie entre les composantes temporelle et spatiale, nous avons étudié les temps de déclenchement, les temps de mouvement de la main et les écarts main-ballon au moment du contact, dans le cas de frappes manuelles d'un ballon, chez des enfants de 3 et 4 ans. Si les actions sont basées sur l'information optique τ , les enfants devraient initier leurs actions à un temps invariant avant le contact, indépendamment de la vitesse du ballon. Si les enfants sont sur un mode de contrôle en boucle ouverte, les temps de mouvement de la main devraient être identiques quelle que soit la hauteur de chute du ballon. Enfin, si ils sont sur un mode de contrôle en boucle fermée, les temps de mouvement de la main devraient varier en regard du temps de chute du ballon.

B- Méthode générale à l'expérience 2 et aux études attenantes

1- Participants

Neuf enfants d'école maternelle de la région parisienne (3 garçons et 6 filles) ont participé à l'expérimentation. Ces enfants ont été divisés en deux groupes. Le groupe des enfants qui frappent le ballon dès la première session (FB) et le groupe développemental qui ne réussit pas dès la première session (GD1). Les enfants qui ont échoué à la première session de film, ont été filmés toutes les 2,5 mois (\pm , 2 semaines) jusqu'à ce qu'ils arrivent à frapper le ballon (GD2). Le suivi a duré un an. Les enfants du groupe FB ont aussi été filmés lors de la deuxième et troisième session de film. Pour certains enfants, il a été nécessaire d'effectuer une quatrième session. L'expérience a eu lieu sous le préau de l'école des enfants.

Sur les neuf enfants, quatre ont réussi à frapper le ballon dans les conditions expérimentales dès la première session, ces enfants étaient âgés de 4 ans ($M= 4$ ans, ± 2 mois) et les 5 enfants de 3 ans ($M= 3$ ans, ± 9 mois) ont échoué à cette première session.

2- Matériel expérimental

a- Pré expérimentation

Nous avons basé notre réflexion sur l'expérience de Lee et coll. (1983) où les sujets (23-25 ans) devaient frapper un ballon vers l'arrière avant qu'il ne touche le sol. Le ballon tombait de trois hauteurs (3 m, 5 m et 7.2 m). Ces auteurs n'ont pas trouvé que les mouvements des bras et des jambes étaient couplés aux informations visuelles (les corrélations étaient très basses).

Notre première intention était d'étudier l'attraper de balle, (très peu étudié chez le jeune enfant), en utilisant un ballon tombant à la verticale, au-dessus de la tête du sujet (comme dans l'expérience de Lee et coll., 1983) mais chez des enfants de 3-4 ans, afin d'étudier l'évolution de l'attraper.

En mettant les enfants dans la situation d'attraper un ballon tombant à la verticale, nous nous attendions à ce que les enfants (debout) attrapent le ballon lâché au-dessus d'eux or les enfants restaient les bras et les mains fixes à l'arrivée supposée du ballon. Même avec des trajectoires incurvées, ils gardaient leur posture préparatoire, rendant l'observation du comportement d'atteinte impossible. De plus, il y avait une tendance de la part de l'expérimentateur, à positionner le ballon juste à l'aplomb au-dessus des mains de l'enfant et/ou l'enfant plaçait ses mains sous le ballon. C'est pourquoi, dans notre expérience, il a été demandé aux enfants de frapper le ballon, et non plus de l'attraper, pour qu'ils aient à préparer le mouvement.

L'expérience de Lee et coll. (1983) a été aménagée pour aboutir à une chute d'un ballon, le long d'une rampe inclinée. Les enfants devaient frapper le ballon, vers un cerceau (afin d'orienter le geste), avant que celui-ci ne touche le sol. La rampe a permis de contrôler le temps mis par le ballon pour tomber.

Lors de notre pré expérimentation, nous avons observé que :

1- Les enfants (placés du même côté de la rampe) ne frappaient pas tous avec la même main et parfois changeaient de main pour frapper le ballon. Pour que les enfants soient tous dans les mêmes conditions de frappe, aient la même visibilité de la chute du ballon, nous avons déterminé la main préférentielle de frappe à partir de l'observation des frappes effectuées des deux côtés de la rampe. Plus de cinq frappes de suite réalisées avec la même main déterminait la main de frappe (choix complété par la demande de la main avec laquelle l'enfant écrit). Les gauchers étaient placés à droite de la rampe, les droitiers à gauche afin que la main utilisée pour frapper le ballon soit bien visible et que le déplacement de la main au cours de la frappe n'occulte pas une partie de la trajectoire du ballon (figure 18).

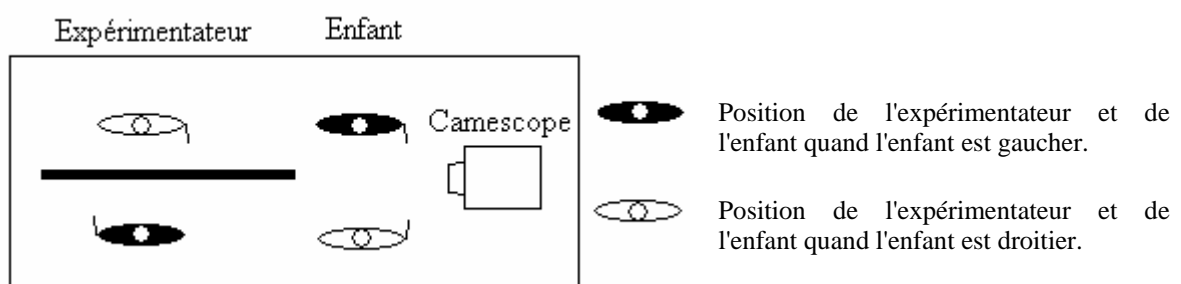


Figure 18. Vues de dessus du dispositif expérimental avec la position de l'enfant, de l'expérimentateur et du caméscope selon que l'enfant est droitier ou gaucher et de côté.

2- Les enfants, placés à 40 cm de la rampe, ne se déplaçaient pas pour frapper le ballon, voire n'initiaient aucun geste de frappe vers celui-ci. Or, le fait de reculer les enfants par rapport à la rampe, les a conduit à l'exécution d'un déplacement, d'un engagement pour frapper le ballon. Cette observation nous a amené, dans notre expérience, à la détermination de deux distances de départ pour l'enfant, par rapport à la rampe : une à 40 cm et l'autre à 60 cm.

b- Dispositif final

Un ballon de 24 cm de diamètre et pesant 30g a été lâché par l'expérimentateur du haut d'une rampe inclinée à 45° . Le ballon a été lâché de 1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m. L'endroit du lâché n'a pas été masqué, l'expérimentateur se trouvait du côté opposé à l'enfant par rapport à la rampe (figure 19). Les frappes étaient orientées vers un cerceau situé à 2 m face à l'enfant, à 1 m du sol. La consigne donnée aux enfants était d'envoyer le ballon, dans le cerceau, avant que le ballon ne touche le sol. Leur geste n'était pas contraint.

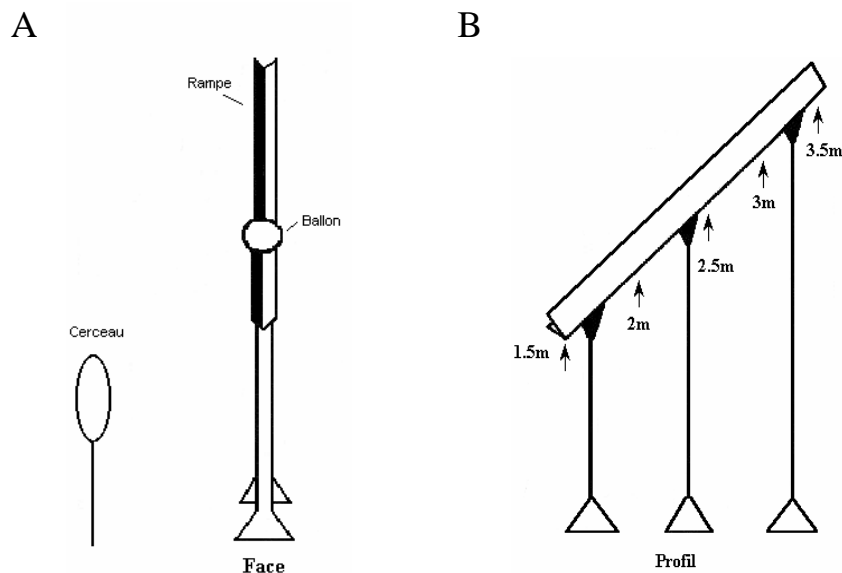


Figure 19. Vues du dispositif expérimental. *Figure A* : Vue frontale du dispositif expérimental. La rampe est perpendiculaire au cerceau. Le cerceau se trouve à 2 m du milieu de la rampe et à 1 m du sol. *Figure B* : Vue latérale du dispositif expérimental.

3- Procédure

Les enfants, placés perpendiculairement à la rampe, devaient frapper le ballon partant de 5 hauteurs différentes (3 m, 3.5 m, 2 m, 2.5 m, et 1.5 m dans cet ordre). L'ordre des lâchés a été déterminé de manière aléatoire mais a toujours été le même pour tous les enfants. Ils ont effectué deux séries de 15 frappes (3 par hauteur), la première série à 40 cm de la rampe, la seconde à 60 cm. Ils ont réalisé un total de 30 frappes, ceci à chaque session de film.

La trajectoire du ballon était visible en permanence. La question " prêt " était posée juste avant le lâcher du ballon afin de recentrer l'attention de l'enfant.

L'enfant devait se replacer après chaque frappe derrière le trait signalant la distance de départ. Aucune consigne n'était donnée quant à la position de départ à avoir. D'où des postures d'attente différentes : main placée directement au-dessus de la tête ou main le long du corps. Le ballon à la sortie de la rampe se retrouvait au-dessus de l'épaule du bras préférentiel. Le mouvement d'interception a consisté à diriger la main en direction de cette zone.

4- Recueil des données

Les enfants ont été filmés avec un caméscope placé dans l'axe de la rampe (figure 19). Les enfants étaient dans leur tenue du moment, il leur a été demandé de retirer leur manteau. Du fait du lieu de l'expérimentation (sous le préau de l'école) et de la tenue des enfants il n'a pas été possible de positionner des pastilles pour le pointage des articulations.

Dix-sept points ont été utilisés (figure 20). Les deux premiers correspondaient au milieu du bord extérieur du ballon face à l'enfant car le ballon a été considéré comme un marqueur, ainsi que le point le plus bas de la rampe (correspondant à 1.5 m) afin d'avoir un ordre de grandeur. Les quinze autres points étaient : la tête (milieu de la ligne oreille-œil), le cou, les deux épaules, le coude, le poignet et le bout des doigts de la main du bras qui frappait, les deux hanches, les deux genoux, les deux talons (correspondaient au bord du talon de la chaussure), les deux pieds (correspondaient au devant de la chaussure).

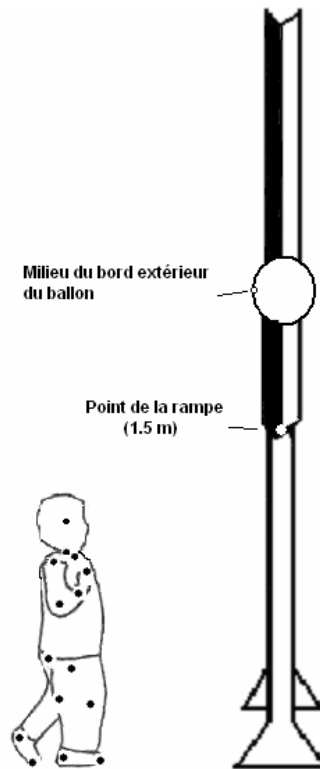


Figure 20. Les différents points utilisés pour le pointage image par image.

Les films ont été digitalisés puis un pointage image par image (20 ms) a été effectué avec le logiciel 3D vision. Comme il n'y a pas eu utilisation de marqueurs, le pointage a été effectué manuellement. Afin de prévenir au maximum les erreurs de pointage une manipulation a été effectuée au préalable du pointage. Le même point (la main) a été pointé 40 fois de suite. Une session a été réalisée pour chaque pointage, c'est-à-dire qu'une fois la main pointée, la session était fermée et enregistrée. Une nouvelle session était alors réalisée sur la même image du même film, à chaque fois. Au total 40 sessions de pointage de la main ont été effectuées. Ensuite, le calcul de l'écart-type des quarante valeurs de position de la main recueillies a été réalisé. Cette manipulation a montré un pourcentage d'erreur de 0.83% (tous les pointages ont été effectués par le même expérimentateur).

Les données des marqueurs, pour chaque point marqué, en x et y ont été obtenues à partir des courbes de l'accélération du point étudié. Les données recueillies ont été filtrées en utilisant un filtre Butterworth de second ordre avec une fréquence de lissage de 5Hz. Le point de départ de l'analyse d'image était le moment où le ballon commençait sa descente. La fin du mouvement a été prise au moment où la main entre en contact avec le ballon pour les enfants qui réussissaient ou lorsque le ballon touchait le sol pour les enfants qui échouaient dans la frappe ou qui ne bougeaient pas.

5- Les variables étudiées

Tous les temps ont été déterminés à partir du point de la main et du point correspondant au milieu du bord extérieur du ballon (face à l'enfant).

Dans cette expérimentation les variables dépendantes étudiées étaient :

- Le temps de déclenchement de la main (TDM) correspond au temps de déclenchement du mouvement de frappe. Ces temps ont été obtenus à partir des courbes d'accélération de la main. Lors de la visualisation des films nous avons observé que les enfants effectuaient des mouvements de la main d'avant en arrière au cours de la frappe du ballon. Nous avons décidé de prendre le moment où la main se dirige d'un mouvement continu vers le ballon comme le moment du début du mouvement. Ce moment correspond au dernier pic de la courbe d'accélération $|A|$ de la main avant le contact (figure 21).

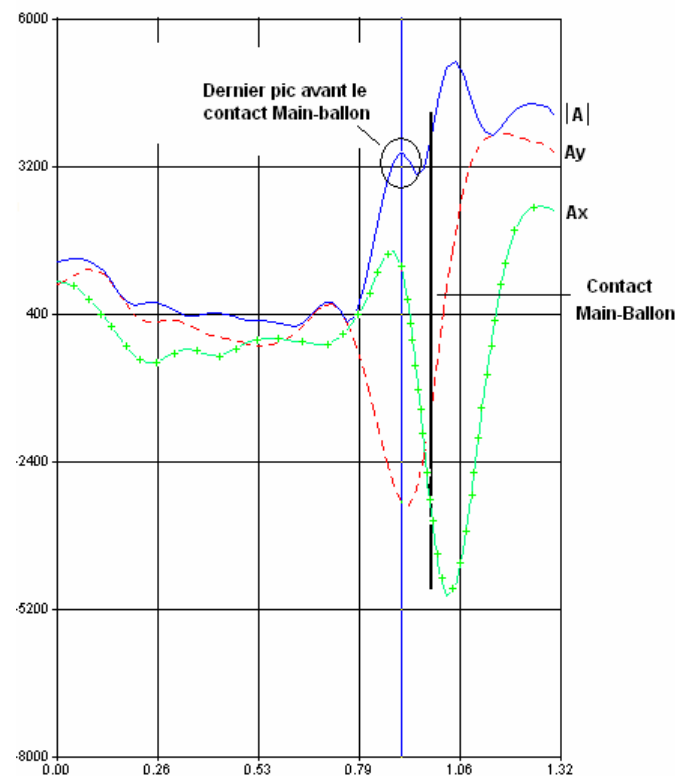


Figure 21. Exemple de détermination du temps de déclenchement de la main à partir de la courbe d'accélération de la main. Où A_x est la courbe d'accélération de la main selon l'axe x (+ +), A_y est la courbe d'accélération de la main selon l'axe y (- - -) et $|A|$ est la courbe d'accélération (—).

- Le temps de mouvement de la main (TMM) correspond au temps s'écoulant entre le déclenchement du mouvement de frappe et le contact avec le ballon.

- Le temps du contact de la main (TCMB) correspond au moment du contact de la main avec le ballon. Dans le cas où l'enfant engageait la frappe mais ne touchait pas le ballon,

ce temps correspondait au moment où la main interceptait la trajectoire verticale de la chute du ballon (figure 22) ou au moment où le ballon touchait le sol pour les enfants ne bougeant pas.

- Les écarts de la main au ballon au moment du contact (EMBC), correspondent à la distance entre le milieu du bord extérieur du ballon, face à l'enfant, et la main que le ballon soit ou non frappé.

Les temps sont exprimés en millisecondes (ms) et les écarts main-ballon en pixels.

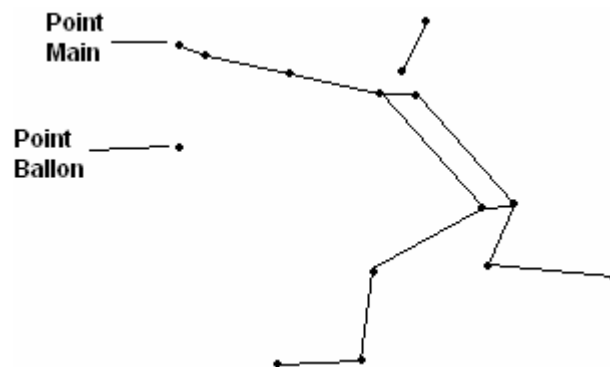


Figure 22. Exemple de moment de temps du contact (TCMB) quand l'enfant ne touche pas le ballon.

6- Différents comportements de frappe

La visualisation des films a fait ressortir différentes positions d'attente et différents comportements de frappe. Huit enfants montrent une frappe à bras cassé et un enfant une frappe par en dessous. Les huit enfants frappant à bras cassé, révèlent différentes positions d'attente : soit avec la main devant eux, soit avec la main levée, bras fléchi le coude au niveau de l'épaule, ou en dessous (annexe 3). Des différences apparaissent aussi, dans le nombre de pas (1 à 6) et dans l'organisation du ou de ces pas (ipsilatéral ou controlatéral) lors des frappes réalisées à 60 cm de la rampe. Lorsque les enfants effectuent plusieurs pas, différentes combinaisons d'organisation des pas apparaissent (par exemple, ipsilatéral-controlatéral/controlatéral-ipsilatéral). L'organisation qui est la plus réalisée est l'ipsilatérale.

7- Analyses statistiques

Le traitement statistique des données a été réalisé au moyen du logiciel Statistica 6.0 sur un PC.

Nous avons conduit, dans un premier temps, des régressions linéaires des variables dépendantes [temps de déclenchement de la main (TDM), temps de mouvement de la main

(TMM), temps de contact (TCMB) et écarts main-ballon au contact (EMBC)], en fonction de la variable indépendante (temps de chute du ballon) pour déterminer s'il existe un lien entre la durée de chute du ballon et les variables dépendantes.

Dans un deuxième temps, pour déterminer les effets des trois facteurs (groupe, distance et hauteur) et leurs interactions, étant donné que la distribution des données suit la loi normale et qu'il y a égalité des variances, des analyses de variance ANOVA et MANOVA (Groupes à 2 niveaux, distance à la rampe à 2 niveaux et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux) ont été appliquées sur les variables dépendantes [temps de déclenchement de la main (TDM), temps de mouvement de la main (TMM), temps de contact (TCMB) et écarts main-ballon au contact (EMBC)]. Parce que les données brutes des temps de mouvement de la main (TMM) à 40 et à 60 cm ne suivaient pas une distribution normale, elles ont subi une transformation logarithmique naturelle (Ln). Ce sont ces valeurs qui ont été utilisées pour les différents calculs. Une analyse à posteriori " post-hoc ", des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, a été réalisée dans le but de mettre en évidence la signification des variations par paire.

Le seuil de significativité est fixé à une valeur de probabilité d'hypothèse nulle $p < .05$.

Les résultats sont donnés pour chacune des variables. Pour chaque variable, les moyennes et les écarts-types en fonction des groupes, des distances à la rampe et des hauteurs de chute du ballon seront donnés.

C- Résultats

Les données ont été prélevées à partir de

- la première session pour les enfants qui réussissent dès la première fois (FB),
- la deuxième session pour ceux qui échouent (GD1)
- et la session pour laquelle les enfants du groupe GD1, réussissent toutes les frappes (GD2), la troisième ou la quatrième session. Se reporter à l'annexe 4, pour le détail des données.

1- Temps de mouvement de la main (TMM)

Afin de déterminer s'il existe un lien entre la durée de chute du ballon et le TMM, nous avons réalisé des régressions linéaires. Ce lien pouvant être différent selon la distance de l'enfant à la rampe (40 et 60 cm) nous avons réalisé ces régressions linéaires pour les deux distances à la rampe.

a- Régressions linéaires : Évolution des TMM selon la durée de chute du ballon

α- Régressions linéaires : Évolution des TMM selon la durée de chute du ballon à 40 cm

Les analyses de régressions linéaires ont été effectuées pour chacun des 3 groupes précédemment cités (FB, GD1, GD2) :

- Le groupe des enfants qui réussissent (FB) : Le TMM du groupe FB n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = 0.002x + 132$, $R^2 = .0003$, $p = .94$ n.s.) (figure 23),

- Le groupe des enfants qui échouent (GD1) : Le TMM du groupe GD1 n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = -0.08x + 114$, $R^2 = .08$, $p = .19$ n.s.) (figure 23),

- et le groupe qui réussit après avoir échoué (GD2) : Le TMM du groupe GD2 n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = -0.03x + 191$, $R^2 = .04$, $p = .32$ n.s.) (figure 23).

Les analyses de régression linéaires ne montrent pas des coefficients de corrélation atteignant la significativité. Elles démontrent qu'il n'y a pas d'association entre la variation du temps de mouvement de la main (TMM) et le temps de chute du ballon. L'évolution du TMM des enfants (qu'ils réussissent ou non) n'est pas lié au temps de chute du ballon.

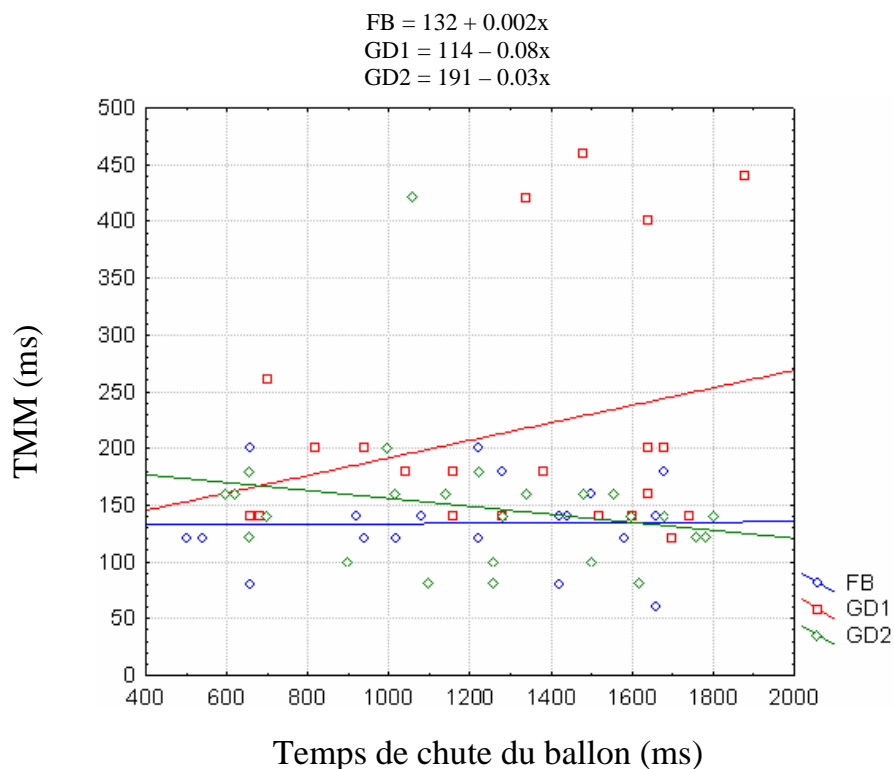


Figure 23. Régressions linéaires des temps de mouvement de la main (TMM, ms) des trois groupes (FB, GD1 et GD2), en fonction du temps de chute du ballon (ms) pour la distance à la rampe 40 cm. Les régressions linéaires de chaque groupe sont : $Y_{FB} = 132 + 0,002x$ (—○—), $Y_{GD1} = 114 - 0,08x$ (—□—) et $Y_{GD2} = 191 - 0,03x$ (—◇—).

β - Régressions linéaires : Évolution des TMM selon la durée de chute du ballon à 60 cm

Les analyses de régressions linéaires ont été effectuées pour chacun des 3 groupes précédemment cités (FB, GD1, GD2) :

- Le groupe des enfants qui réussissent (FB) : Le TMM du groupe FB n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = 0,03x + 90$, $R^2 = .07$, $p = .26$ n.s.) (figure 24),

- Le groupe des enfants qui échouent (GD1) : Le TMM du groupe GD1 n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = -0,06x + 251$, $R^2 = .11$, $p = .14$ n.s.) (figure 24),

- et le groupe qui réussit après avoir échoué (GD2) : Le TMM du groupe GD2 n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = 0,02x + 156$, $R^2 = .008$, $p = .66$ n.s.) (figure 24).

Les analyses de régression linéaires ne montrent pas des coefficients de corrélation atteignant la significativité. Elles démontrent qu'il n'y a pas d'association entre la variation du temps de mouvement de la main (TMM) et le temps de chute du ballon. L'évolution du TMM des enfants (qu'ils réussissent ou non) n'est pas lié au temps de chute du ballon.

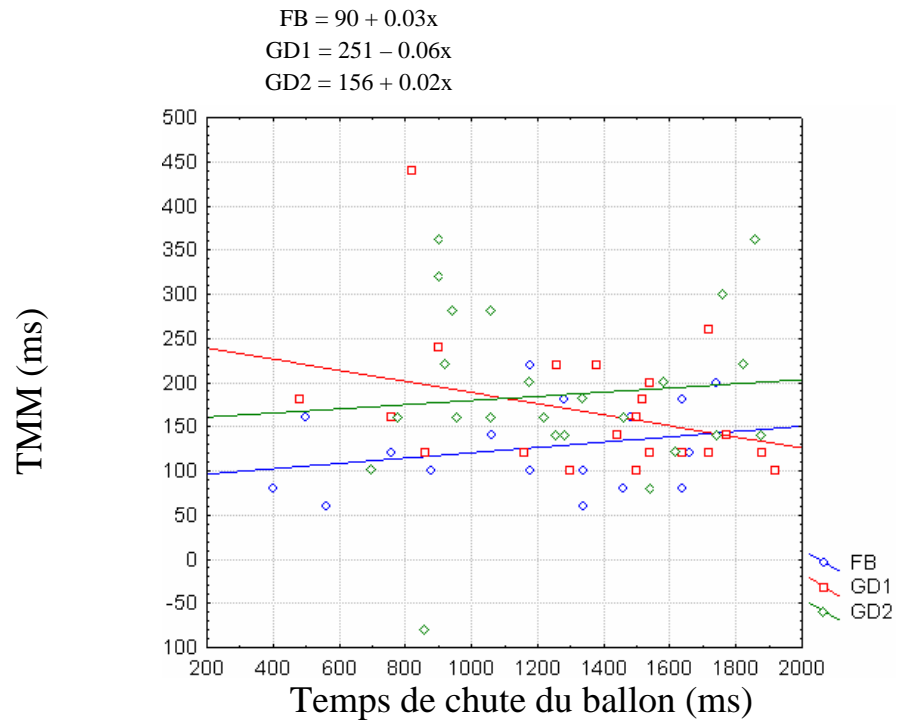


Figure 24. Régressions linéaires des temps de mouvement de la main (TMM, ms) des trois groupes (FB, GD1 et GD2), en fonction du temps de chute du ballon (ms) pour la distance à la rampe 60 cm. Les régressions linéaires de chaque groupe sont : $Y_{FB} = 90 + 0.03x$ (\diamond), $Y_{GD1} = 251 - 0.06x$ (\square) et $Y_{GD2} = 156 + 0.02x$ (\diamond).

b- Comparaison des temps de mouvement de la main (TMM) pour les deux distances à la rampe 40 cm vs 60 cm

a- Présentations des moyennes et des écarts-types

Groupes		Distances à la rampe (cm)						
		40cm			60cm			
	n	Moyennes	Écarts-types	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	130	42.26	4	134	37.33	127	47.71
GD1	5	190	95.50	5	213	106.96	167	77.47
GD2	5	167	83.28	5	148	65.57	186	95.35

Tableau 3. Moyennes et écarts-types des temps de mouvement de la main (TMM, ms) en fonction des groupes (FB, GD1 et GD2) et des distances à la rampe (40 et 60 cm). N = effectif.

Groupes		Hauteurs de chute du ballon (m)									
		1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	117	45.9	145	38.17	125	48.60	137	37.70	127	46.52
GD1	5	190	97.64	171	47.41	218	123.09	164	48.76	202	127.06
GD2	5	162	119.80	208	88.04	146	58.16	138	40.50	182	84.04

Tableau 4. Moyennes et écarts-types des temps de mouvement de la main (TMM, ms) pour chaque groupe (FB, GD1 et GD2) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

β - Analyses de variance

Les résultats des analyses de variance seront présentés tout d'abord pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2 (ces trois groupes sont indépendants) puis pour les groupes GD1-GD2. Les deux groupes GD1 et GD2 sont appariés car il s'agit des enfants suivis longitudinalement.

i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (FB-GD1 puis FB-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces trois facteurs et leur interaction sur les temps de mouvement de la main (TMM, ms).

*** Effets globaux**

L'analyse de variance ne révèle aucun effet :

- groupe (FB-GD1 : $F_{1,4} = 4.006, p = .11$ n.s. et FB-GD2 : $F_{1,5} = 1.75, p = .24$ n.s.),
- distance à la rampe (FB-GD1 : $F_{1,4} = 1.78, p = .25$ n.s. et FB-GD2 : $F_{1,5} = .08, p = .79$ n.s.),
- hauteur (FB-GD1 : $F_{4,16} = .55, p = .70$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,20} = 1.5, p = .23$ n.s.).

Les interactions groupe x distance (FB-GD1 : $F_{1,4} = .06, p = .82$ n.s. et FB-GD2 : $F_{1,5} = 5.80, p = .06$ n.s.), groupe x hauteur (FB-GD1 : $F_{4,16} = .03, p = .99$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,20} = 1.17, p = .35$ n.s.), et distance x hauteur (FB-GD1 : $F_{4,16} = .70, p = .60$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,20} = .51, p = .73$ n.s.) ne sont pas significatives.

La triple interaction groupe x distance x hauteur n'est pas significative (FB-GD1 : $F_{4,16} = 1.50, p = .25$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,20} = 2.73, p = .06$ n.s.).

ii- Groupes GD1-GD2

L'analyse de variance à trois facteurs [Groupes à 2 niveaux (GD1-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les trois derniers facteurs] n'a pu être réalisée sur les temps de mouvement de la main (TMM, ms) du fait de la non dispersion des données à 60 cm.

Étant donné que la distribution des données respecte la loi normale et qu'il y a égalité des variances nous avons pu réaliser une analyse de variance factorielle sur les trois facteurs (groupe, distance et hauteur).

* **Effets globaux**

L'analyse de variance factorielle ne montre aucun effet :

- groupe ($F_{1,75} = 1.22, p = .27 \text{ n.s.}$),
- distance à la rampe ($F_{1,75} = .03, p = .86 \text{ n.s.}$),
- hauteur ($F_{4,75} = .55, p = .70 \text{ n.s.}$).

L'interaction groupe x distance ($F_{1,75} = 5.11, p < .05$, figure 25) est significative. L'analyse post-hoc montre qu'à 40 cm le TMM moyen du groupe GD1 est significativement plus petit que celui du groupe GD2 et qu'à 60 cm le TMM moyen du groupe GD1 est significativement plus grand que celui du groupe GD2.

Les interactions groupe x hauteur ($F_{4,75} = .88, p = .48 \text{ n.s.}$) et distance x hauteur ($F_{4,75} = .18, p = .95 \text{ n.s.}$) ne sont pas significatives.

La triple interaction groupe x distance x hauteur n'est pas significative ($F_{4,75} = 1.47, p = .22 \text{ n.s.}$).

Double interaction : Groupe x Distance ($F_{1,75} = 5.11, p < .05$)

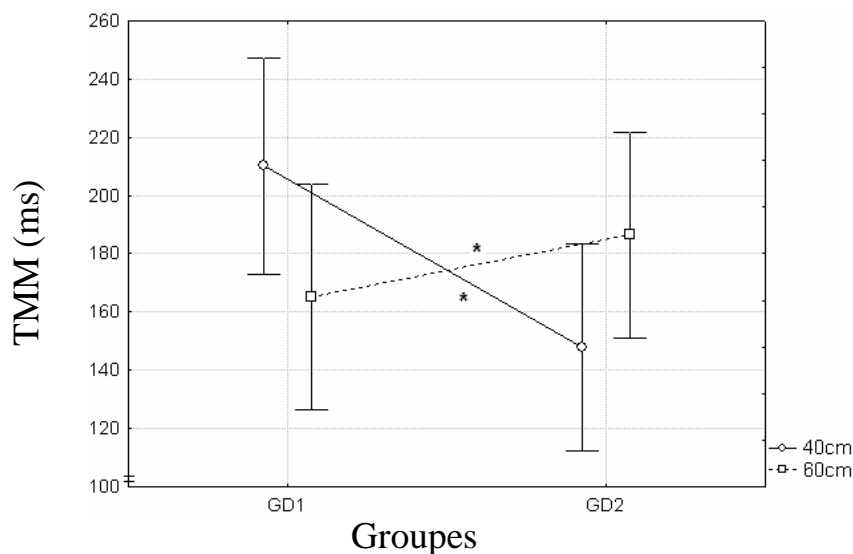


Figure 25. Présentation de la double interaction groupe x distance ($F_{1,75} = 5.11, p < .05$), sur les temps de mouvement de la main (TMM, ms) à 40 cm (—○—) et 60 cm (-□-). Différences significatives marquées par un astérisque (*).

Cette analyse factorielle pour les deux groupes GD1 et GD2 ayant montré une interaction groupe x distance significative, nous pensons qu'il peut y avoir un effet de groupe

sur le TMM moyen mais selon la distance, c'est pourquoi nous avons réalisé une analyse de variance pour chacune des distances.

c- Comparaison des temps de mouvement de la main (TMM) pour la distance à la rampe 40 cm

α- Présentations des moyennes et des écarts-types

Distances à la rampe (40 cm)			
	n	Moyennes	Écarts-types
FB	4	134	37.33
GD1	5	213	106.95
GD2	5	148	65.57

Tableau 5. Moyennes et écarts-types des temps de mouvement de la main (TMM, ms) pour la distance à la rampe 40 cm, en fonction des groupes (FB, GD1 et GD2). N = effectif.

Hauteurs de chute du ballon (m)											
Groupes	n	1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
		Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	130	50.33	130	11.55	155	41.23	130	34.64	125	50
GD1	5	176	53.67	185	10	268	158.49	170	34.64	252	154.66
GD2	5	172	177.54	204	49.80	180	58.31	132	144	232	97.57

Tableau 6. Moyennes et écarts-types des temps de mouvement de la main (TMM, ms) pour chaque groupe (FB, GD1 et GD2) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

β- Analyses de variance

Les résultats des analyses de variance seront présentés tout d'abord pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2 puis pour les groupes GD1-GD2.

i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2

Une analyse de variance à deux facteurs : Groupes à 2 niveaux (FB-GD1 puis FB-GD2) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur le dernier facteur, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces deux facteurs et leur interaction sur les temps de mouvement de la main (TMM, ms) pour la distance 40 cm.

*** Effets globaux**

L'effet du groupe est significatif pour FB-GD1 ($F_{1,6} = 6.25, p < .05$, figure 26). Le TMM moyen du groupe GD1 est significativement plus grand que celui du groupe FB. Mais il n'y a pas d'effet du groupe pour FB-GD2 ($F_{1,7} = .54, p = .48, n.s.$).

De plus, il n'y a pas d'effet de la hauteur (FB-GD1 : $F_{4,24} = .58, p = .68$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,28} = .81, p = .53$ n.s.) et l'interaction groupe x hauteur n'est pas significative (FB-GD1: $F_{4,24} = .132, p = .97$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,28} = 1.56, p = .21$ n.s.).

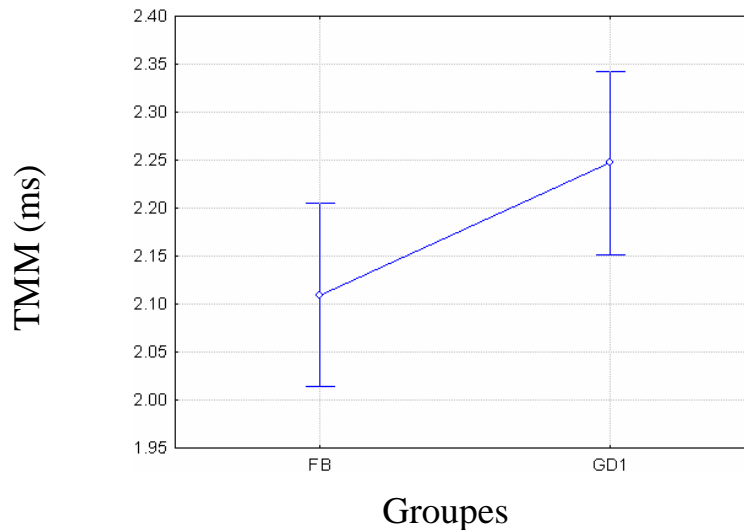


Figure 26. Temps moyens de mouvement de la main (TMM, ms) et erreurs-types à 40 cm, en fonction du groupe (FB-GD1).

ii- Groupes GD1-GD2

Une analyse de variance à deux facteurs : Groupes à 2 niveaux (GD1-GD2) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces deux facteurs et leur interaction sur les temps de mouvement de la main (TMM, ms) pour la distance 40 cm.

* Effets globaux

L'effet du groupe est significatif ($F_{1,3} = 16.99, p < .05$, figure 27). Le TMM moyen du groupe GD1 est significativement plus grand que celui du groupe GD2.

Mais, il n'y a pas d'effet de la hauteur ($F_{4,12} = .099, p = .98$ n.s.) et l'interaction groupe x hauteur n'est pas significative ($F_{4,12} = 1.28, p = .33$ n.s.).

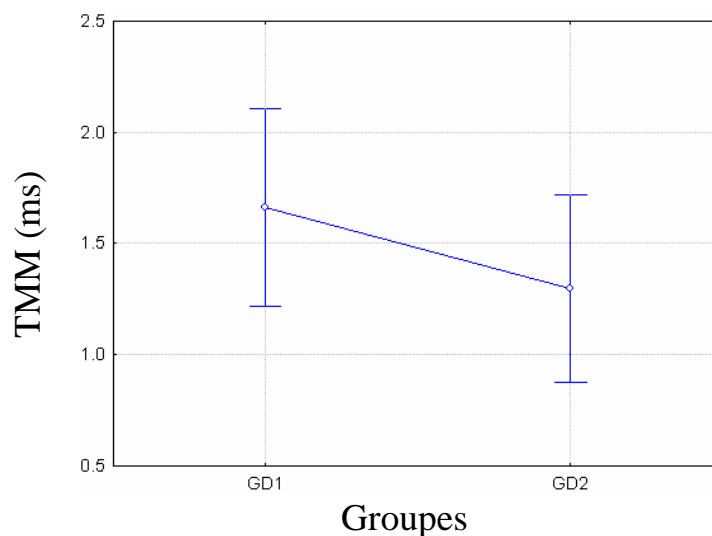


Figure 27. Temps moyens de mouvement de la main (TMM, ms) et erreurs-types à 40 cm, en fonction du groupe (GD1-GD2).

* Résumé

Pour la distance à la rampe 40 cm, les TMM moyens du groupe GD1 sont significativement plus long que ceux des deux groupes FB et GD2. Les TMM moyens des groupes FB et GD2 ne sont pas significativement différents.

d- Comparaison des temps de mouvement de la main (TMM) pour la distance à la rampe 60 cm

α- Présentations des moyennes et des écarts-types

	Distances à la rampe (60cm)		
	n	Moyennes	Écarts-types
FB	4	127	47.77
GD1	5	167	77.47
GD2	5	186	95.34

Tableau 7. Moyennes et écarts-types des temps de mouvement de la main (TMM, ms), pour la distance à la rampe 60 cm, en fonction des groupes (FB, GD1 et GD2). N = effectif.

Groupes	n	Hauteurs de chute du ballon (m)									
		1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
		Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	105	44.347	160	51.64	86	23.09	145	44.35	130	50.33
GD1	5	204	134.46	153	75.72	168	52.15	160	140	43	127.06
GD2	5	172	177.54	204	49.80	180	58.31	144	45.61	232	97.57

Tableau 8. Moyennes et écarts-types des temps de mouvement de la main (TMM, ms) pour chaque groupe (FB, GD1 et GD2) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

β - Analyses de variance

Les résultats des analyses de variance seront présentés tout d'abord pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2 puis pour les groupes GD1-GD2.

i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2

Une analyse de variance à deux facteurs : Groupes à 2 niveaux (FB-GD1 puis FB-GD2) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur le dernier facteur, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces deux facteurs et leur interaction sur les temps de mouvement de la main (TMM, ms) pour la distance 60 cm.

*** Effets globaux**

L'effet du groupe est significatif pour FB-GD1 ($F_{1,6} = 6.25, p < .05$, figure 28). Le TMM moyen du groupe GD1 est significativement plus grand que celui du groupe FB. Mais il n'y a pas d'effet du groupe pour FB-GD2 ($F_{1,7} = .54, p = .48$ n.s.). Les TMM moyens de chacun des deux groupes FB et GD2 ne sont pas différents.

De plus, il n'y a pas d'effet de la hauteur (FB-GD1 : $F_{4,24} = .58, p = .68$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,28} = .81, p = .53$ n.s.) et l'interaction groupe x hauteur n'est pas significative (FB-GD1 : $F_{4,24} = .132, p = .97$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,28} = 1.56, p = .21$ n.s.).

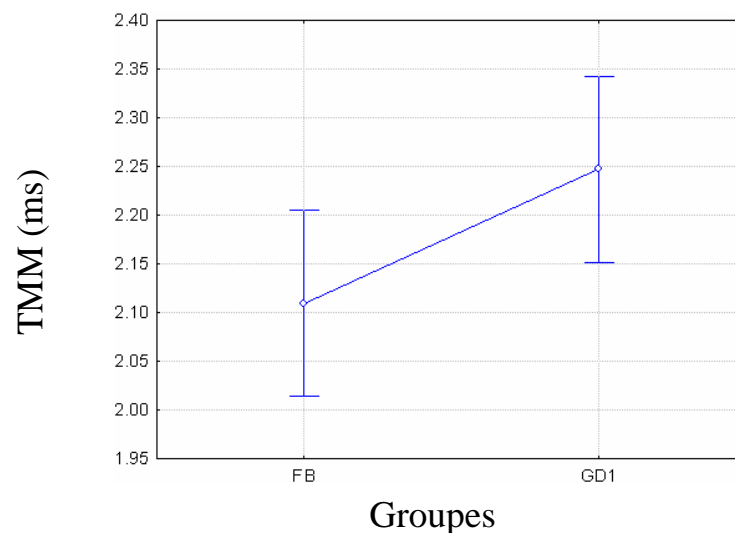


Figure 28. Temps moyens de mouvement de la main (TMM, ms) et erreurs-types à 60 cm, en fonction du groupe (FB-GD1).

ii- Groupes GD1-GD2

L'analyse de variance à deux facteurs [Groupes à 2 niveaux (GD1-GD2) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs] n'a pas pu être réalisée sur les temps de mouvement de la main (TMM, ms), du fait de la non dispersion des données pour la distance 60 cm. Étant donné que la distribution des données respecte la loi normale et qu'il y a égalité des variances nous avons pu réaliser une analyse de variance factorielle sur les trois facteurs (groupe, distance et hauteur).

* Effets globaux

L'analyse de variance factorielle ne montre aucun effet :

- groupe ($F_{1,37} = .62, p = .44 n.s.$),
- hauteur ($F_{4,37} = .24, p = .70 n.s.$).

L'interaction groupe x hauteur ($F_{4,37} = .69, p = .60 n.s.$) n'est pas significative.

* Résumé

Pour la distance à la rampe 60 cm, les TMM moyens du groupe GD1 sont significativement plus longs que ceux du groupe FB et GD2. Les TMM moyens des groupes FB et GD2 ne sont pas significativement différents, ni ceux des groupes GD1 et GD2.

2- Temps de déclenchement de la main (TDM)

Afin de déterminer s'il existe un lien entre la durée de chute du ballon et le TDM, nous avons réalisé des régressions linéaires. Ce lien pouvant être différent selon la distance de l'enfant à la rampe (40 et 60 cm) nous avons réalisé ces régressions linéaires pour les deux distances à la rampe.

a- Régressions linéaires : Évolution des TDM selon la durée de chute du ballon

α- Régressions linéaires : Évolution des TDM selon la durée de chute du ballon à 40 cm

Les analyses de régressions linéaires ont été effectuées pour chacun des 3 groupes précédemment cités (FB, GD1, GD2) :

- Le groupe des enfants qui réussissent (FB) : Le TDM du groupe FB est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = .99x - 132$, $R^2 = .99$, $p < .001$) (figure 29),

- Le groupe des enfants qui échouent (GD1) : Le TDM du groupe GD1 est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = .92x - 114$, $R^2 = .93$, $p < .001$) (figure 29),

- et le groupe qui réussit après avoir échoué (GD2) : Le TDM du groupe GD2 est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = 1.03x - 191$, $R^2 = .97$, $p < .001$) (figure 29).

Les analyses de régression linéaires montrent des coefficients de corrélation dont le seuil de signification est inférieur à .001. Elles démontrent une association très forte entre la variation du temps de déclenchement de la main (TDM) et le temps de chute du ballon pour chacun des trois groupes. Le TDM des enfants (qu'ils réussissent ou non) est lié de manière linéaire au temps de chute du ballon. Plus la hauteur de chute du ballon augmente, plus le TDM est grand, plus l'enfant déclenche la frappe tardivement.

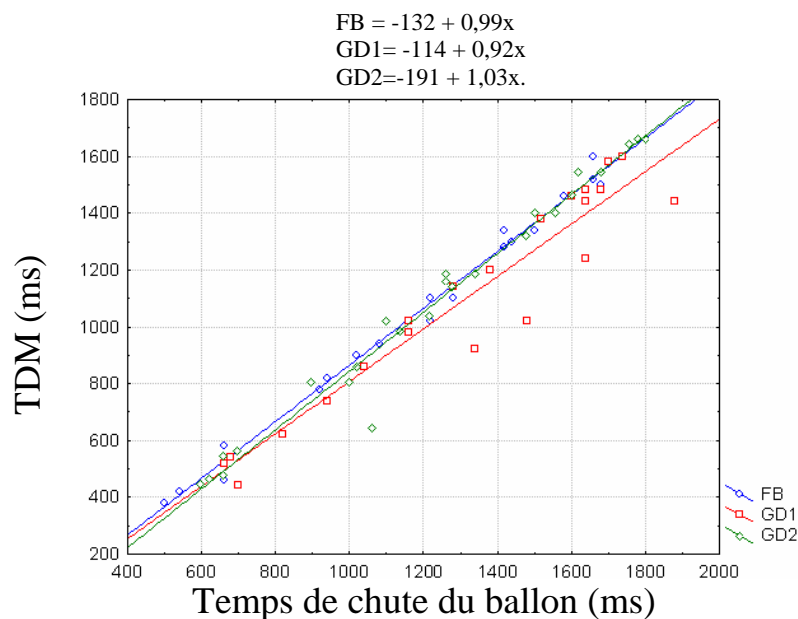


Figure 29. Régressions linéaires des temps de déclenchement de la main (TDM, ms) des trois groupes (FB, GD1 et GD2), en fonction du temps de chute du ballon (ms) pour la distance à la rampe 40 cm. Les régressions linéaires de chaque groupe sont : $Y_{FB} = -132 + 0,99x$ (\diamond), $Y_{GD1} = -114 + 0,92x$ (\square) et $Y_{GD2} = -191 + 1,03x$ (\diamond).

β - Régressions linéaires : Évolution des TDM selon la durée de chute du ballon à 60 cm

Les analyses de régressions linéaires ont été effectuées pour chacun des 3 groupes précédemment cités (FB, GD1, GD2) :

- Le groupe des enfants qui réussissent (FB) : Le TDM du groupe FB est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = .97x - 90$, $R^2 = .99$, $p < .001$) (figure 30),

- Le groupe des enfants qui échouent (GD1) : Le TDM du groupe GD1 est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = 1.06x - 248$, $R^2 = .97$, $p < .001$) (figure 30),

- et le groupe qui réussit après avoir échoué (GD2) : Le TDM du groupe GD2 est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = .98x - 156$, $R^2 = .93$, $p < .001$) (figure 30).

Les analyses de régression linéaires montrent des coefficients de corrélation dont le seuil de signification est inférieur à .001. Elles démontrent une association très forte entre la variation du temps de déclenchement de la main (TDM) et le temps de chute du ballon pour chacun des groupes. Le TDM des enfants (qu'ils réussissent ou non) est lié de manière linéaire au temps de chute du ballon. Plus la hauteur de chute du ballon augmente, plus le TDM est grand, plus l'enfant déclenche la frappe tardivement.

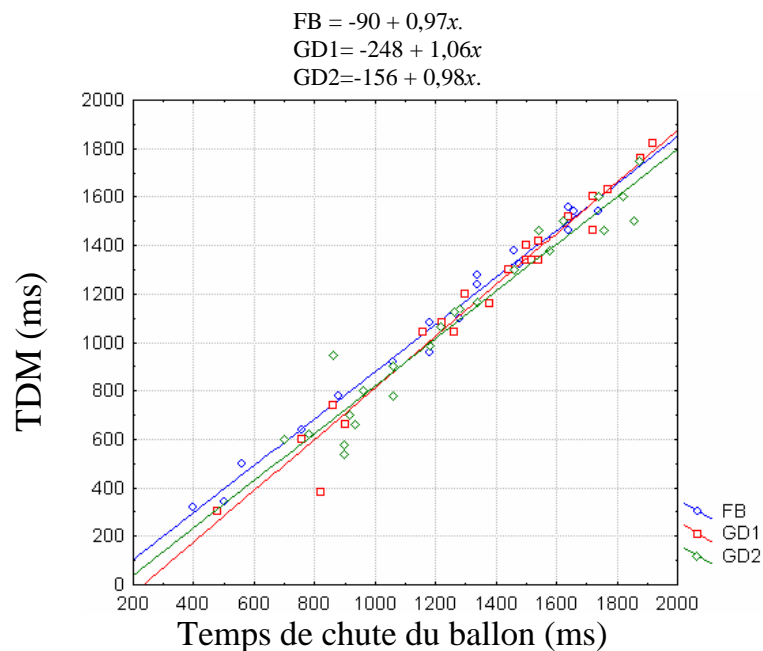


Figure 30. Régressions linéaires des temps de déclenchement de la main (TDM, ms), des trois groupes (FB, GD1 et GD2), en fonction du temps de chute du ballon (ms) pour la distance à la rampe 60 cm. Les régressions linéaires pour chaque groupe sont : $Y_{FB} = -90 + 0,97x$ (—◇—), $Y_{GD1} = -248 + 1,06x$ (—□—) et $Y_{GD2} = -156 + 0,98x$

(⇔).

γ- Définition de la relation entre le temps de déclenchement de la main, le temps de mouvement de la main

Les régressions multiples réalisées entre le temps de mouvement de la main (TMM) et le temps de chute du ballon, et entre le temps de déclenchement de la main (TDM) et le temps de chute du ballon ont montré que seul le TDM et le temps de chute du ballon sont liés. Le système perceptivo-moteur extrait les caractéristiques spatiales et temporelles de l'environnement afin de générer des invariants pour la réalisation d'un mouvement. En référence au travail de Lee et Reddish (1981), il ressort que nous obtenons un couplage perception-action entre le temps de déclenchement de la main (T_{DM}) et la durée de chute du ballon ($T_{de\ chute\ du\ ballon}$). Ce couplage perception-action varie en fonction de la vitesse du ballon qui dépend de la hauteur de chute du ballon tel que $T_{de\ chute\ du\ ballon} = a T_{DM} + TMM$ où TDM est fonction du temps de chute du ballon ($T_{de\ chute\ du\ ballon}$) (équation 1) et inclut dans le temps de chute du ballon selon l'équation 2.

$$\text{Équation 1 : } T_{DM} = aT_{de\ chute\ du\ ballon} + b$$

$$\text{Équation 2 : } T_{de\ chute\ du\ ballon} = T_{DM} + TMM$$

$$\text{Ou } T_{DM} = (aTMM + b)/(1-a), T_{DM} = a/(1-a)TMM + b/(1-a)$$

Cette relation est trouvée quel soit le groupe d'enfant et quelle que soit la distance à la rampe.

b- Comparaison des temps de déclenchement de la main (TDM) pour les deux distances à la rampe 40 cm vs 60 cm

α- Présentations des moyennes et des écarts-types

Groupes			Distances à la rampe (cm)					
			40cm			60cm		
	n	Moyennes	Écarts-types	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	1070	391.35	4	1042	374.16	1100	416.81
GD1	5	1116	401.08	5	1065	378.13	1168	424.87
GD2	5	1086	386.66	5	1076	407.02	1096	373.30

Tableau 9. Moyennes et écarts-types des temps de déclenchement de la main (TDM, ms) en fonction des groupes (FB, GD1 et GD2) et des distances à la rampe (40 et 60 cm). N = effectif.

		Hauteurs de chute du ballon (m)									
		1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
Groupes	n	Moyennes	Écartstypes	Moyennes	Écartstypes	Moyennes	Écartstypes	Moyennes	Écartstypes	Moyennes	Écartstypes
FB	4	455	113.51	900	107.43	1131	92.99	1345	55.29	1527	42.68
GD1	5	542	142.81	9270	180.77	1154	157.21	1471	90.06	1527	188.80
GD2	5	576	141.04	830	120.46	1062	155.91	1378	107.27	1586	93.83

Tableau 10. Moyennes et écarts-types des temps de déclenchement de la main (TDM, ms) pour chaque groupe (FB, GD1 et GD2) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

β - Analyses de variance

Les résultats des analyses de variance seront présentés tout d'abord pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2 puis pour les groupes GD1-GD2.

i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (FB-GD1 puis FB-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces trois facteurs et leur interaction sur les temps de déclenchement de la main (TDM, ms).

*** Effets globaux**

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif (FB-GD1 : $F_{4,16} = 121.41$, $p < .001$ et FB-GD2 : $F_{4,24} = 149.72$, $p < .001$, figure 31). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les TDM moyens sont tous significativement différents entre eux à toutes les hauteurs.

Il n'y a pas d'effet du facteur groupe (FB-GD1 : $F_{1,4} = 4.08$, $p = .11$ n.s. et FB-GD2 : $F_{1,6} = .27$, $p = .62$ n.s.), ni de la distance à la rampe (FB-GD1 : $F_{1,4} = 2.24$, $p = .21$ n.s. et FB-GD2 : $F_{1,6} = .92$, $p = .37$ n.s.).

Aucune des interactions n'est significative : groupe x distance (FB-GD1 : $F_{1,4} = .18$, $p = .69$ n.s. et FB-GD2 : $F_{1,6} = .15$, $p = .71$ n.s.), groupe x hauteur (FB-GD1 : $F_{4,16} = .62$, $p = .65$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,24} = 1.64$, $p = .20$ n.s.), et distance x hauteur (FB-GD1 : $F_{4,16} = 1.25$, $p = .32$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,24} = .05$, $p = .99$ n.s.).

La triple interaction groupe x distance x hauteur pour FB-GD1 n'est pas significative (FB-GD1 : $F_{4,16} = .49$, $p = .74$ n.s.).

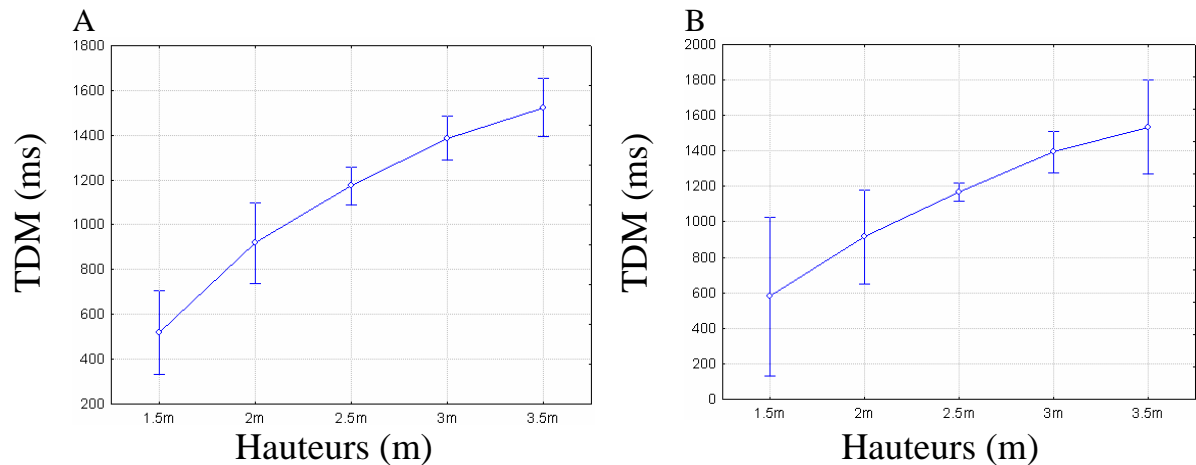


Figure 31. Temps moyens de déclenchement de la main (TDM, ms) et erreurs-types à 40 et 60 cm. *Graphe A* : TDM moyens (ms) et erreurs-types en fonction de la hauteur de chute du ballon (m) pour les groupes FB-GD1. *Graphe B* : TDM moyens (ms) et erreurs-types en fonction de la hauteur de chute du ballon (m) pour les groupes FB-GD2.

* Triple interaction FB-GD2

L'analyse de variance pour les groupes FB-GD2 montre une triple interaction groupe x distance x hauteur ($F_{4,24} = 2.98, p < .05$, figure 32). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, montrent uniquement des différences significatives des TDM moyens à une hauteur avec ceux à la hauteur immédiatement supérieure.

Mais ces différences ne sont pas significatives entre :

- 2.5 et 3 m pour FB à 40 cm ($F_{1,6} = 5.89, p = .05$ n.s.) et à 60 cm ($F_{1,6} = 2.15, p = .20$ n.s.),

- et 1.5 et 2 m pour GD2 à 60 cm ($F_{1,6} = 5.44, p = .06$ n.s.).

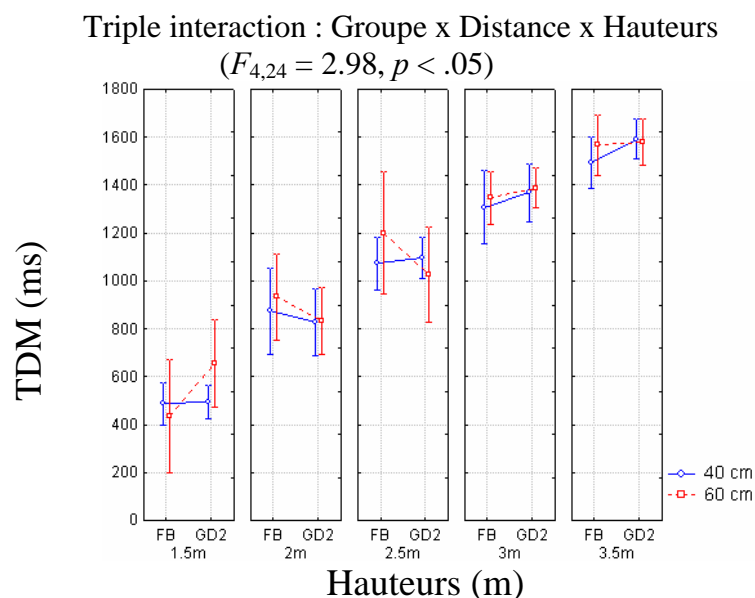


Figure 32. Présentation des temps de déclenchement de la main (TDM, ms) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Groupes (FB, partie gauche et GD2, partie droite) x Distance à la rampe (40 cm -○- et 60 cm -□-) x Hauteurs (1^{er} graphe 1.5m, 2^{ème} graphe 2m, 3^{ème} graphe 2.5m, 4^{ème} graphe 3m et 5^{ème} graphe 3.5m).

ii- Groupes GD1-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (GD1-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les trois facteurs, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces trois facteurs et leur interaction sur les temps de déclenchement de la main (TDM, ms).

* Effets globaux

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif ($F_{4,8} = 135.39, p < .001$, figure 33). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les TDM moyens sont tous significativement différents entre eux à toutes les hauteurs.

Mais, il n'y a pas d'effet du facteur groupe ($F_{1,2} = 2.09, p = .28$ n.s.), ni de la distance à la rampe ($F_{1,2} = 1.24, p = .38$ n.s.).

Aucune des interactions n'est significative : groupe x distance ($F_{1,2} = .24, p = .67$ n.s.), groupe x hauteur ($F_{4,8} = .55, p = .71$ n.s.), et distance x hauteur ($F_{4,8} = .58, p = .70$ n.s.).

La triple interaction groupe x distance x hauteur ($F_{4,8} = 1.53, p = .28$ n.s.) n'est pas significative.

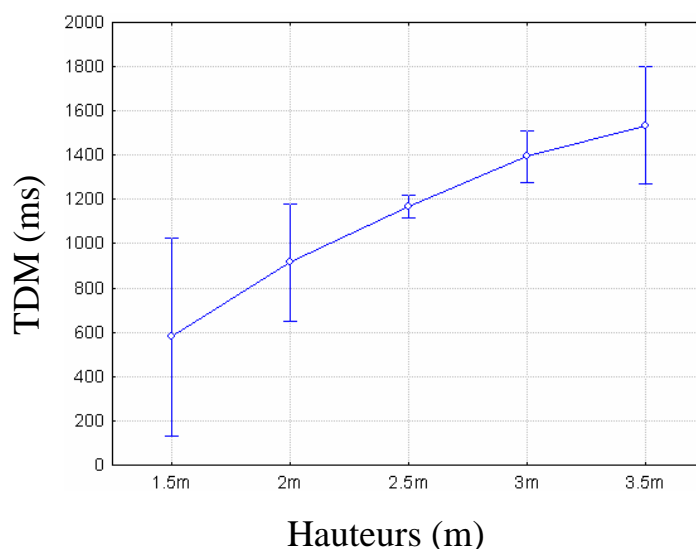


Figure 33. Temps moyens de déclenchement de la main (TDM, ms) et erreurs-types à 40 et 60 cm, pour les groupes GD1 et GD2, en fonction de la hauteur de chute du ballon (m).

* Résumé

Le TDM moyen à une hauteur est significativement plus petit que celui à la hauteur immédiatement supérieure.

3- Le temps de contact de la main avec le ballon (TCMB)

a- Comparaison des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB) pour les deux distances à la rampe 40 cm vs 60 cm

a- Présentations des moyennes et des écarts-types

	Groupes	Distances à la rampe (cm)						
		40cm			60cm			
	n	Moyennes	Écarts-types	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	1210	396.26	4	1181	380.05	1240	419.57
GD1	5	1327	390.64	5	1301	390.04	1354	397.49
GD2	5	1253	376.46	5	1224	388.33	1283	369.76

Tableau 11. Moyennes et écarts-types des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms) en fonction des groupes (FB, GD1 et GD2) et des distances à la rampe (40 et 60 cm). N = effectif.

Groupes	n	Hauteurs de chute du ballon (m)									
		1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
		Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	572	114.61	1045	135.96	1285	98.41	1482	71.26	1667	48.91
GD1	5	732	117.45	1136	154.28	1372	113.60	1648	92.47	1751	146.24
GD2	5	738	114.09	1038	103.04	1208	117.45	1516	86.30	1768	82.83

Tableau 12. Moyennes et écarts-types des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms) pour chaque groupe (FB, GD1 et GD2) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

β - Analyses de variance

Les résultats des analyses de variance seront présentés tout d'abord pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2 puis pour les groupes GD1-GD2.

i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (FB-GD1 puis FB-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces trois facteurs et leur interaction sur les temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms).

*** Effets globaux**

L'effet du groupe est significatif pour FB-GD1 ($F_{1,7} = 12, p < .01$, figure 34A) mais pas pour FB-GD2 ($F_{1,7} = 1.98, p = .20$ n.s.). Le TCMB moyen de FB est significativement plus petit que celui de GD1.

L'effet de la distance à la rampe est significatif pour FB-GD2 ($F_{1,7} = 5.72, p < .05$, figure 34B) mais pas pour FB-GD1 ($F_{1,7} = 4.46, p = .07$ n.s.). Le TCMB moyen à 40 cm est significativement plus petit qu'à 60 cm pour les groupes FB et GD2.

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif (FB-GD1 : $F_{4,28} = 315.42, p < .001$ et FB-GD2 : $F_{4,28} = 353.28, p < .001$, figure 35). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les TCMB moyens sont tous significativement différents entre eux à toutes les hauteurs.

Pour **FB-GD1** aucune interaction n'est significative :

- groupe x distance ($F_{1,7} = .015, p = .90$ n.s.), distance x hauteur ($F_{4,28} = .55, p = .70$ n.s.) et groupe x hauteur ($F_{4,16} = .03, p = .99$ n.s.).

La triple interaction groupe x distance x hauteur n'est pas significative ($F_{4,28} = .61, p = .65$ n.s.).

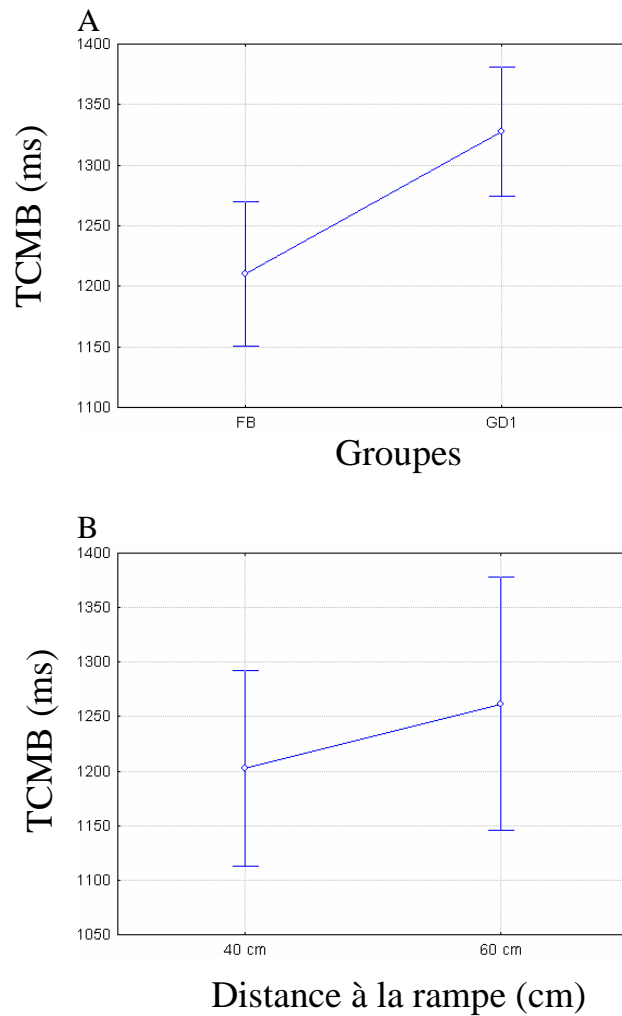


Figure 34. TCMB moyens (ms) et erreurs-types à 40 et 60 cm. *Graphe A* : TCMB moyens (ms) et erreurs-types en fonction du groupe (FB-GD1). *Graphe B* : TCMB moyens (ms) et erreurs-types en fonction de la distance à la rampe (cm) pour les groupes FB et GD2.

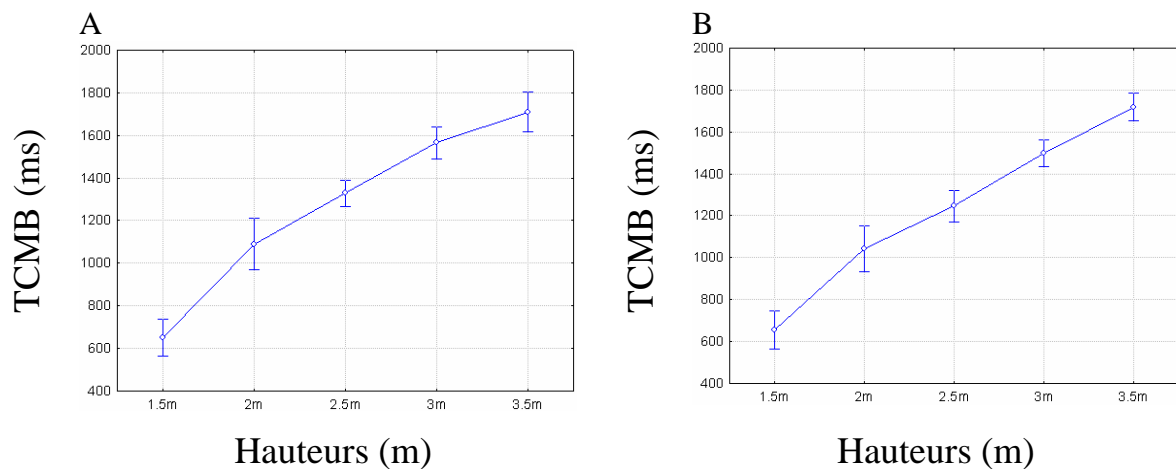


Figure 35. TCMB moyens (ms) et erreurs-types à 40 et 60 cm. *Graphe A* : TCMB moyens (ms) et erreurs-types en fonction des hauteurs de chute du ballon (m) pour les groupes FB et GD1. *Graphe B* : TCMB moyens (ms) et erreurs-types en fonction des hauteurs de chute du ballon (m) pour les groupes FB et GD2.

Pour **FB-GD2**, ni l'interaction groupe x distance ($F_{1,7} = .00002$, $p = .99$ n.s.), ni distance x hauteur ($F_{4,28} = .07$, $p = .98$ n.s.) ne sont significatives.

* Double interaction FB-GD2

L'interaction groupe x hauteur est significative ($F_{4,28} = 4.61$, $p < .01$, figure 36). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les TCMB moyens de FB et GD2 ne sont significativement différents entre eux qu'à 1.5 m ($F_{1,7} = 9.48$, $p < .05$) et 3.5m ($F_{1,7} = 6.45$, $p < .05$).

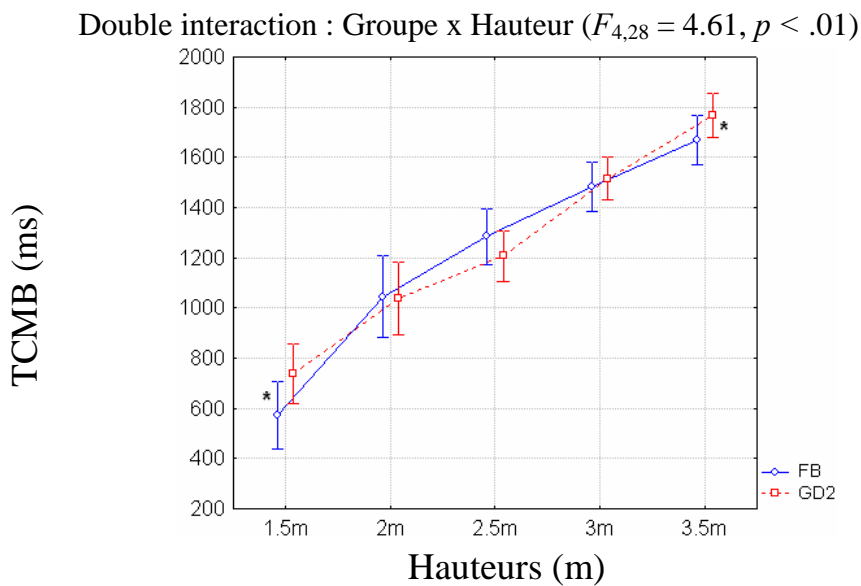


Figure 36. Présentation de la double interaction groupe x hauteur ($F_{4,28} = 4.61$, $p < .01$), sur les temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms) du groupe FB (—○—) et GD2 (-□-). Différences significatives marquées par un astérisque (*).

* Triple interaction FB-GD2

L'analyse de variance pour les groupes FB-GD2 montre une triple interaction groupe x distance x hauteur ($F_{4,28} = 3.47$, $p < .05$, figure 37). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent des différences significatives des TCMB moyens qu'aux hauteurs 1.5 et 3.5 m :

- Le TCMB moyen, à 60 cm, de FB est significativement différent de celui de GD2 respectivement (1.5 m : $F_{1,7} = 11.69$, $p < .05$ et 3.5m : $F_{1,7} = 10.68$, $p < .05$),

- Le TCMB moyen, de GD2 à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm respectivement (1.5 m : $F_{1,7} = 15.86$, $p < .01$ et 3.5m : $F_{1,7} = 21.21$, $p < .001$).

Triple interaction : Groupe x Distance x Hauteurs ($F_{4,28} = 3.47, p < .05$)

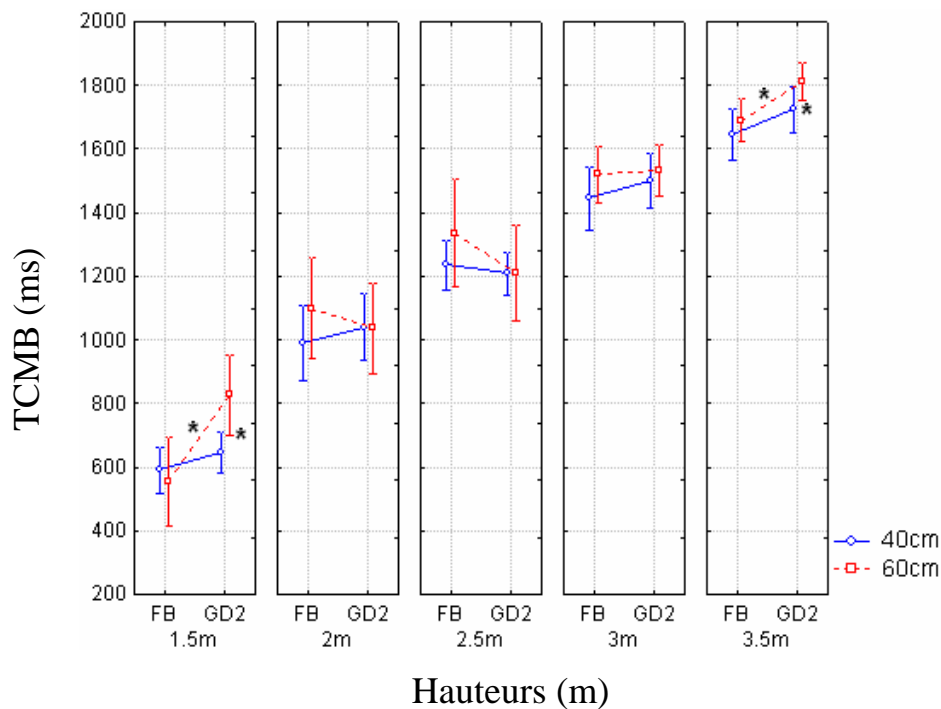


Figure 37. Présentation des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Groupes (FB, partie gauche et GD2, partie droite) x Distance à la rampe (40 cm —◇— et 60 cm -□-) x Hauteurs (1^{er} graphe 1.5m, 2^{ème} graphe 2m, 3^{ème} graphe 2.5m, 4^{ème} graphe 3m et 5^{ème} graphe 3.5m). Différences significatives marquées par un astérisque (*).

ii- Groupes GD1-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (GD1-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les trois derniers facteurs, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces trois facteurs et leur interaction sur les temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms).

* Effets globaux

L'effet du groupe est significatif ($F_{1,4} = 10.44, p < .05$, figure 38A). Le TCMB moyen de GD1 est significativement plus grand que celui de GD2.

Il n'y a pas d'effet de la distance à la rampe ($F_{1,4} = 3.5, p = .14 n.s.$).

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif ($F_{4,16} = 362.88, p < .001$, figure 38B). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les TCMB moyens sont tous significativement différents entre eux à toutes les hauteurs.

Aucune interaction n'est significative : groupe x distance ($F_{1,4} = .04, p = .84 n.s.$), distance x hauteur ($F_{4,16} = .66, p = .62 n.s.$) et groupe x hauteur ($F_{4,16} = 2.72, p = .07 n.s.$).

La triple interaction groupe x distance x hauteur n'est pas significative ($F_{4,16} = 1.46, p = .26 n.s.$).

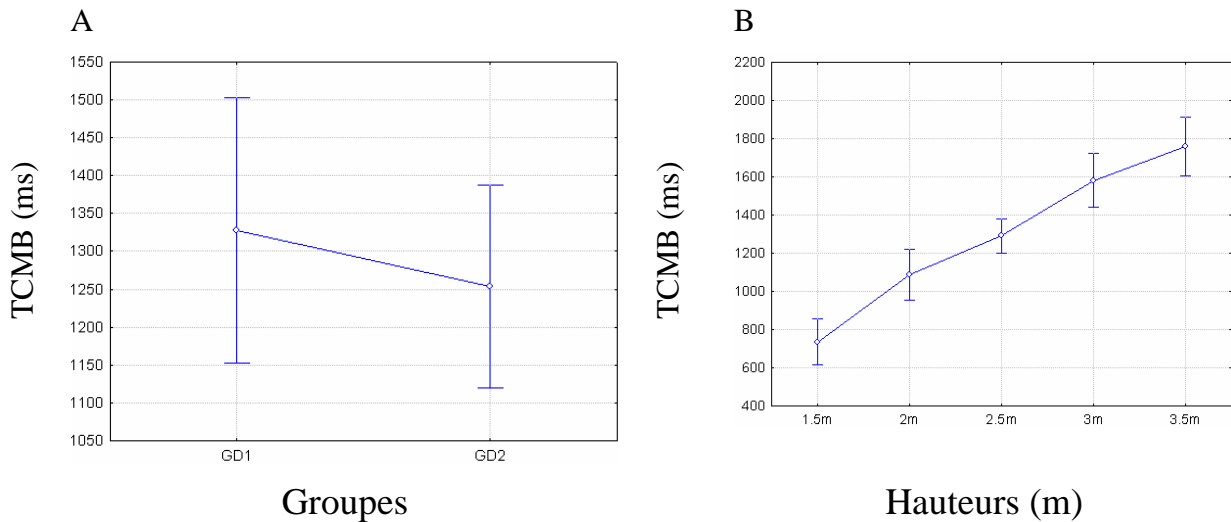


Figure 38. TCMB moyens (ms) et erreurs-types à 40 et 60 cm. *Grappe A* : TCMB moyens (ms) et erreurs-types en fonction du groupe (GD1-GD2). *Grappe B* : TCMB moyens (ms) et erreurs-types en fonction des hauteurs de chute du ballon (m) pour les groupes GD1 et GD2.

* Résumé

Les TCMB moyens du GD1 sont significativement plus grands que ceux des deux groupes FB et GD2. Les enfants qui échouent coïncident avec la trajectoire du ballon plus tard que ceux qui réussissent. Les groupes FB et GD2 ont des TCMB moyens similaires.

Le TCMB moyen à 40 cm est significativement plus petit qu'à 60 cm seulement pour les groupes FB et GD2.

Les TCMB moyens à une hauteur sont significativement plus petit que celui à la hauteur immédiatement supérieure pour les trois groupes.

4- Écart main-ballon (EMBC)

a- Comparaison des écarts main-ballon (EMBC) pour les deux distances à la rampe 40 cm vs 60 cm

α - Présentation des moyennes et des écarts-types

	Groupes		Distances à la rampe (cm)					
			40cm			60cm		
	n	Moyennes	Écarts-types	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	29	32.82	4	18	14.81	39	42.08
GD1	5	70	53.57	5	61	42.70	79	62.20
GD2	5	41	47.58	5	24	18.18	58	60.62

Tableau 13. Moyennes et écarts-types des écarts main-ballon au contact (EMBC, pixels) en fonction des groupes (FB, GD1 et GD2) et des distances à la rampe (40 et 60 cm). N = effectif.

Groupes	n	Hauteurs de chute du ballon (m)									
		1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
		Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	32	28.75	34	29.55	46	57.04	11	6.6	20	13.88
GD1	5	79	51.04	84	66.98	71	53.52	50	41.46	63	56.16
GD2	5	65	71.67	75	55.06	25	19.48	20	13.24	21	22.28

Tableau 14. Moyennes et écarts-types des écarts main-ballon au contact (EMBC, pixels) pour chaque groupe (FB, GD1 et GD2) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

β - Analyses de variance

Les résultats des analyses de variance seront présentés tout d'abord pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2 puis pour les groupes GD1-GD2.

i- Groupes FB-GD1 / FB-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (FB-GD1 puis FB-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces trois facteurs et leur interaction sur les écarts main-ballon au contact (EMBC).

*** Effets globaux**

L'effet du groupe est significatif pour FB-GD1 ($F_{1,7} = 19.66, p < .01$, figure 39A) mais pas pour FB-GD2 ($F_{1,7} = .53, p = .50$ n.s.). L'EMBC moyen du groupe GD1 est plus grand que celui du groupe FB. Les groupes FB et GD2 ont des EMBC moyens similaires.

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif (FB-GD1 : $F_{4,28} = 3.75, p < .05$, figure 37A et FB-GD2 : $F_{4,28} = 6.64, p < .001$, figure 39B). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les EMBC moyens ne sont significativement différents qu'entre :

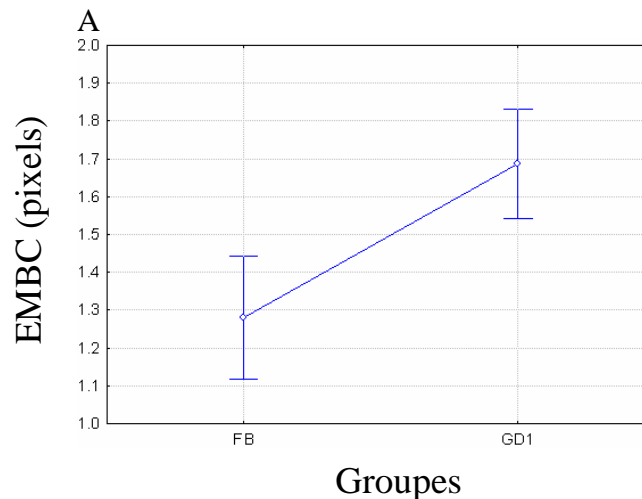
- 2.5 et 3 m ($F_{1,7} = 7.49, p < .05$) pour FB-GD1,
- et 2 et 3 m ($F_{1,7} = 15.08, p < .01$) et 2.5 et 3.5 m ($F_{1,7} = 5.68, p < .05$) pour FB-GD2.

Mais, il n'y a pas d'effet de la distance (FB-GD1 : $F_{1,7} = 2.11, p = .19$ n.s. et FB-GD2 : $F_{1,7} = 4.89, p = .06$ n.s.),

Aucune interaction n'est significative :

- groupe x distance (FB-GD1 : $F_{1,7} = .98, p = .35$ n.s. et FB-GD2 : $F_{1,7} = .23, p = .65$ n.s.),
- distance x hauteur (FB-GD1 : $F_{4,28} = 1.30, p = .30$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,28} = 1.84, p = .15$ n.s.)
- et groupe x hauteur (FB-GD1 : $F_{4,28} = .53, p = .71$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,28} = 2.23, p = .09$ n.s.)

La triple interaction groupe x distance x hauteur n'est pas significative (FB-GD1 : $F_{4,28} = .59, p = .67$ n.s. et FB-GD2 : $F_{4,28} = 1.47, p = .24$ n.s.).



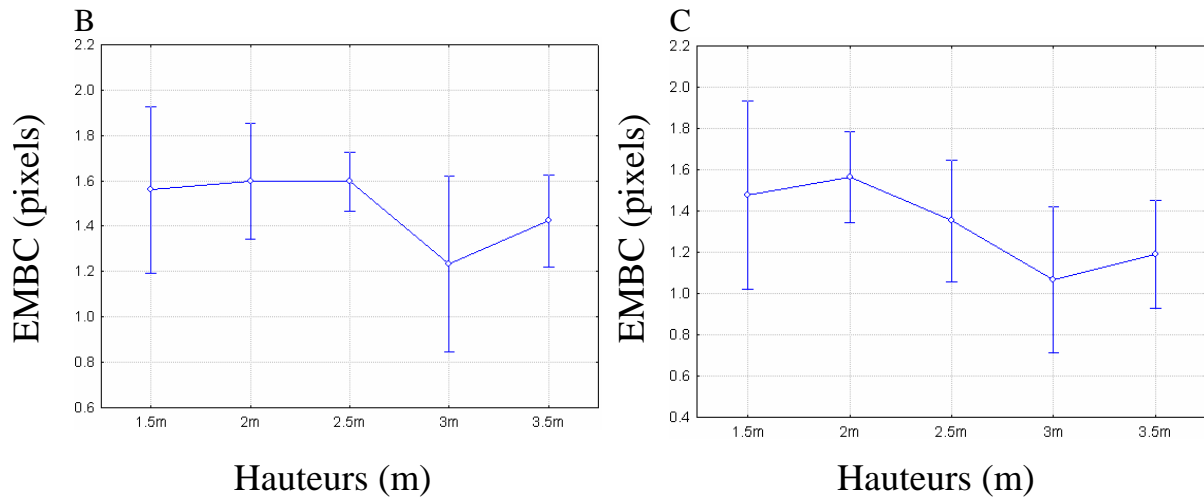


Figure 39. EMBC moyens (pixels) et erreurs-types à 40 et 60 cm. *Graphe A* : EMBC moyens (pixels) et erreurs-types en fonction du groupe (FB-GD1). *Graphe B* : EMBC moyens (pixels) et erreurs-types en fonction des hauteurs de chute du ballon (m) pour les groupes FB et GD1. *Graphe C* : EMBC moyens (pixels) et erreurs-types en fonction des hauteurs de chute du ballon (m) pour les groupes FB et GD2.

ii- Groupes GD1-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (GD1-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les trois facteurs, a été réalisée pour déterminer l'effet de ces trois facteurs et leur interaction sur les écarts main-ballon au contact (EMBC).

* Effets globaux

L'effet du groupe est significatif ($F_{1,4} = 12.30, p < .05$, figure 40A). L'EMBC moyen du groupe GD1 est plus grand que celui du groupe GD2.

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif ($F_{4,16} = 4.57, p < .05$, figure 40B). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les EMBC moyens ne sont significativement différents qu'entre 2 et 2.5m ($F_{1,7} = 13.98, p < .05$).

Mais, il n'y a pas d'effet de la distance ($F_{1,7} = 4.89, p = .06 n.s.$).

Les interactions groupe x distance ($F_{1,4} = .37, p = .57 n.s.$) et groupe x hauteur ($F_{4,16} = 1.95, p = .15 n.s.$) ne sont pas significatives.

La triple interaction groupe x distance x hauteur n'est pas significative ($F_{4,16} = .28, p = .89 n.s.$).

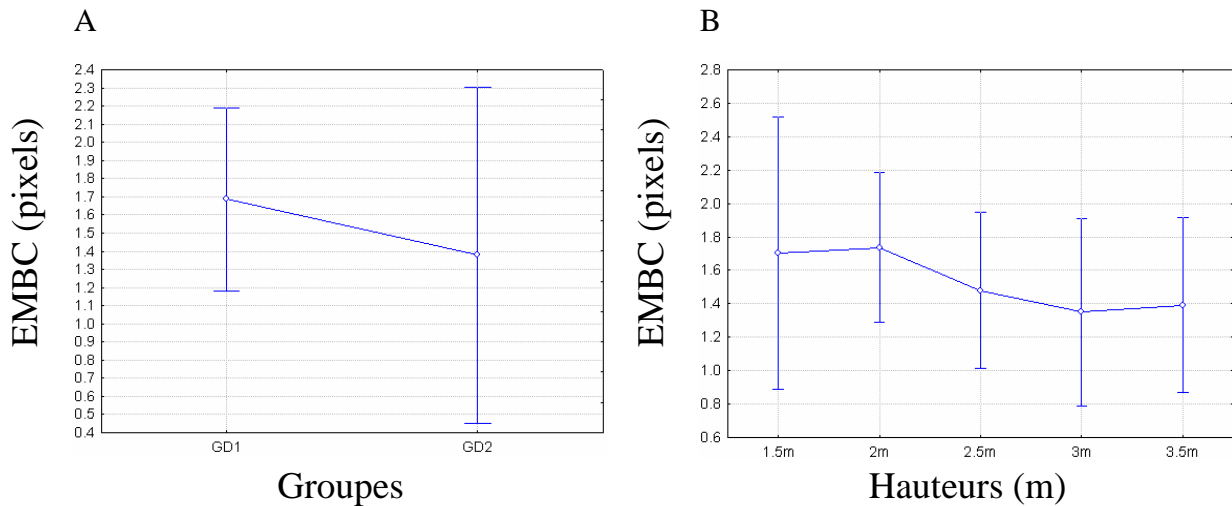


Figure 40. EMBC moyens (pixels) et erreurs-types à 40 et 60 cm. *Graphe A* : EMBC moyens (pixels) et erreurs-types en fonction du groupe (GD1-GD2). *Graphe B* : EMBC moyens (pixels) et erreurs-types en fonction des hauteurs de chute du ballon (m).

* Double interaction groupes GD1-GD2

L'effet de la hauteur est modulé par le facteur distance à la rampe, par l'interaction significative distance x hauteur ($F_{4,16} = 4.81, p < .01$, figure 41). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent qu'une différence entre les EMBC moyens à 40 cm et ceux à 60 cm pour la hauteur 2 m ($F_{1,4} = 20.57, p < .05$).

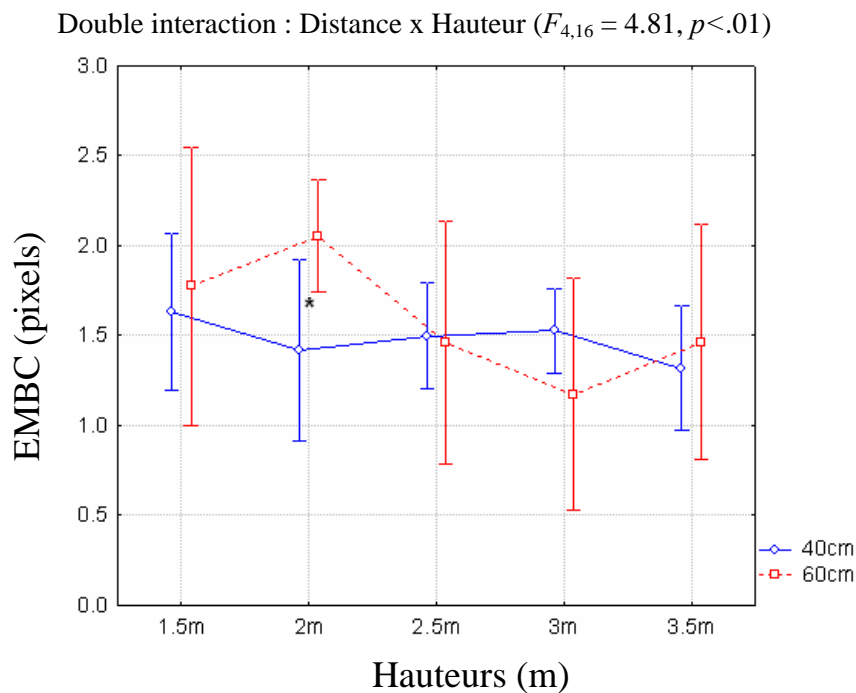


Figure 41. Présentation de la double interaction distance x hauteur ($F_{4,16} = 4.81, p < .01$), sur les écarts main-ballon (EMBC, pixels) à 40 cm ($\text{---}\diamond\text{---}$) et 60 cm ($\text{-}\square\text{-}$). Différences significatives marquées par un astérisque (*).

*** Résumé**

L'EMBC moyen du groupe GD1 est significativement plus grand que celui du groupe FB et du groupe GD2. Les groupes FB et GD2 ont des EMBC moyens similaires.

Les EMBC moyens sont significativement :

Plus grand à 2.5 m que ceux à 3 m pour FB-GD1,

Plus grands à 2 m que ceux à 3 m et, ceux à 2.5 m sont plus grands que ceux à 3.5 m pour FB-GD2,

Et plus grands à 2 m que ceux à 2.5 m pour GD1-GD2.

Enfin, les EMBC moyens à 40 cm ne sont significativement différents de ceux à 60 cm qu'à 2 m pour le GD1-GD2.

b- Effet d'ordre sur les écarts main-ballon (EMBC)

L'observation des courbes des EMBC (figures 39B, 39C et 40B) selon la hauteur de chute du ballon montre une forte tendance : L'EMBC moyen de la première hauteur (3m) est le plus petit, et est beaucoup plus petit que celui de la dernière hauteur (2.5m). Nous avons donc réalisé pour voir s'il existe un effet d'ordre, une analyse de variance groupes 2 (distance) x 5 (ordre de passage des hauteurs de chute du ballon) sur les EMBC pour chaque groupe.

Seuls les résultats, concernant l'effet d'ordre, sont rapportés car les effets de groupe et/ou de distances ont été démontrés dans les analyses précédentes.

*** Effets globaux**

A 40 cm, il n'y a pas d'effet d'ordre et ceci pour les trois groupes (FB : $F_{4,12} = .74$, $p = .58$ n.s. , GD1 : $F_{4,16} = .54$, $p = .71$ n.s. et GD2 : $F_{4,16} = .89$, $p = .49$ n.s.).

A 60 cm, il y a un effet d'ordre seulement pour le groupe GD2 ($F_{4,16} = 5.36$, $p < .01$, figure 42).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent que quatre différences significatives entre :

- l'EMBC moyen de la première hauteur (3m) et de la troisième (2m, $F_{4,16} = 15.49$, $p < .05$) et de la cinquième (1.5m, $F_{4,16} = 19.10$, $p < .05$) . L'EMBC moyen à la première hauteur est plus petit que celui de la troisième et de la cinquième,

- l'EMBC moyen de la deuxième hauteur (3.5m) et de la troisième (2m, $F_{4,16} = 16.33$, $p < .05$). L'EMBC moyen à la deuxième hauteur est plus petit que celui de la troisième,

- l'EMBC moyen de la troisième hauteur (2m) et de la quatrième (2.5m, $F_{4,16} = 7.96, p < .05$). L'EMBC moyen à la troisième hauteur est plus petit que celui de la quatrième hauteur.

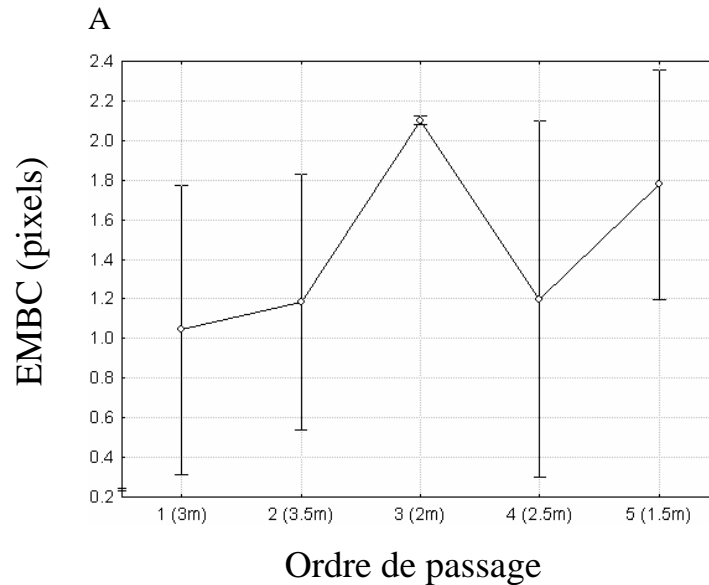


Figure 42. EMBC moyens (pixels) et erreurs-types à 60 cm en fonction de l'ordre de passage des hauteurs de chute du ballon (m) pour le groupe GD2.

40-60 cm

Il y a un effet d'ordre seulement pour le groupe GD2 ($F_{4,16} = 6.25, p < .01$, figure 43). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent que cinq différences significatives entre :

- l'EMBC moyen de la première hauteur (3m) et de la troisième (2m, $F_{4,16} = 8.95, p < .05$) et de la cinquième (1.5m, $F_{4,16} = 9.79, p < .05$). L'EMBC moyen à la première hauteur est plus grand que celui de la troisième et plus petit que celui de la cinquième,

- l'EMBC moyen de la deuxième hauteur (3.5m) et de la troisième (2m, $F_{4,16} = 36.34, p < .05$) et de la cinquième (1.5m, $F_{4,16} = 12.90, p < .05$). L'EMBC moyen à la deuxième hauteur est plus petit que celui de la troisième et de la cinquième,

- l'EMBC moyen de la troisième hauteur (2m) et de la quatrième (2.5m, $F_{4,16} = 12.01, p < .05$). L'EMBC moyen à la troisième hauteur est plus grand que celui de la quatrième hauteur.

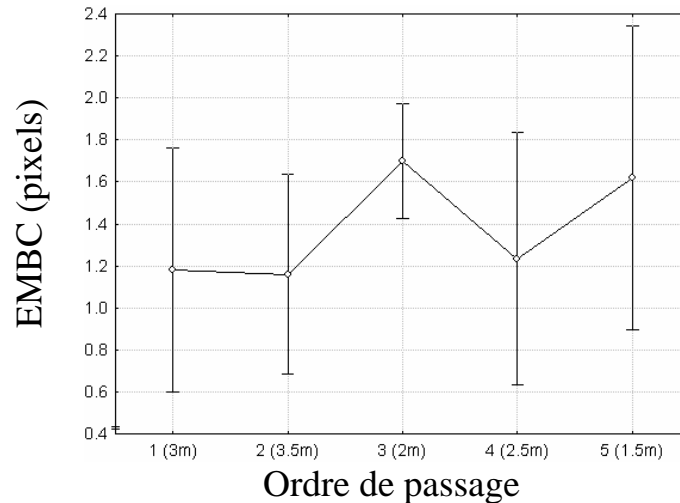


Figure 43. EMBC moyens (pixels) et erreurs-types à 40-60 cm en fonction de l'ordre de passage des hauteurs de chute du ballon (m) pour le groupe GD2.

* Résumé

A 60 cm, pour le groupe GD2 :

- l'EMBC moyen à la première hauteur (3m) est significativement plus grand que celui de la troisième (2m) et de la cinquième (1.5m),
- l'EMBC moyen à la deuxième hauteur (3.5m) est significativement plus petit que celui de la troisième (2m),
- l'EMBC moyen à la troisième hauteur (2m) est significativement plus petit que celui de la quatrième hauteur (2.5m) de chute du ballon.

40-60 cm, pour le groupe GD2 :

- l'EMBC moyen de la première hauteur (3m) est significativement plus grand que celui de la troisième (2m) et plus petit que celui de la cinquième (1.5m),
- l'EMBC moyen à la deuxième hauteur (3.5m) est significativement plus petit que celui de la troisième hauteur (2m) et de la cinquième hauteur de chute du ballon (1.5m).
- l'EMBC moyen de la troisième hauteur (2m) est significativement plus grand que celui de la quatrième hauteur (2.5m).

D- Discussion

Nos résultats montrent que, dans les deux groupes d'âge, la frappe résulte d'un couplage entre le temps de déclenchement de la main et la vitesse de chute du ballon, et que la

composante temporelle est chronologiquement antérieure à la composante spatiale dans le développement.

Les temps de mouvement de la main

Nos résultats montrent que les temps de mouvement de la main ne sont pas significativement différents selon les temps de chute du ballon. Il n'y a ni d'effet de la hauteur, ni de la distance à la rampe sur les TM de la main. Le temps nécessaire, pour effectuer le geste de frappe en lui-même, serait toujours le même quelle que soit la hauteur de chute du ballon. Ce ne serait pas la hauteur de chute du ballon, ni la distance de départ à la rampe qui déterminerait le TM de la main, les enfants dans notre expérience sont sur un mode de contrôle en boucle ouverte. Mais seulement dans le cadre de la réalisation effective du mouvement. En effet, nos résultats montrent que si les enfants ont un TM de la main constant quelle que soit la hauteur de chute du ballon, le moment de déclenchement de la frappe est fonction de la hauteur de chute. La stabilité du TM de la main dans le geste et l'adaptation du moment de déclenchement ont déjà été trouvées dans l'expérience de Hubbard et Seng (1954) avec des batteurs professionnels au base-ball. Les batteurs gardaient constant les paramètres temporels de leurs coups. Ils renvoyaient des balles à vitesses variables, uniquement en changeant la rapidité de leur déplacement (un pas était réalisé quand la balle quittait la main du lanceur), le temps de mouvement de frappe ne variait pas mais le temps de déclenchement était adapté à la vitesse de la balle.

Cette constance du TM de la main, par rapport à la hauteur de chute du ballon (donc par rapport à la vitesse de chute) trouvée à la fois dans les deux catégories d'âge (3 et 4 ans) dans notre expérience, va dans le sens de celle observée par Williams (1985) chez des enfants de 5 ans, lors de mouvement d'interception manuelle, quelle que soit la vitesse de déplacement d'un stimulus lumineux. La constance du TM, que nous avons observé, pourrait témoigner d'une rigidité motrice qui peut être due à une incapacité à modifier la vitesse du mouvement en fonction des fluctuations environnementales (Hay, 1979 et Hay & Bard, 1999). La non influence de la hauteur (vitesse de chute du ballon, de la durée de chute) peut s'expliquer par une automatisation précoce de la réponse en soi (Fleury, Basset, Bard & Teasdale, 1998). Mais il ne s'agirait pas tant d'une automatisation de la réponse que d'une influence des synergies musculaires, de la dynamique des segments (Kelso & Schöner, 1988) utilisée lors de la frappe. Suite à cette influence des synergies, les enfants de 3 et 4 ans, comme les enfants de 5 ans (Williams, 1985), utiliseraient donc une vitesse d'action " stéréotypée " (ou " préférée " par le système en fonction du niveau de développement, de la

tâche et de l'environnement, en référence à Newell, 1986). Une autre interprétation de cette constance du TM est que l'enfant ne modifie qu'une seule variable (le déclenchement du mouvement) et non le déclenchement du mouvement et le TM, ce qui permet de réduire le problème à un seul degré de liberté et par conséquent de diminuer la complexité du contrôle.

Les temps de déclenchement de la main

L'étude des temps de déclenchement de la main montre que celui-ci est dépendant de la durée de chute du ballon. La durée de chute augmentant, l'enfant déclenche plus tard quel que soit le groupe ou la distance de départ à la rampe. Il est à noter que les enfants utilisent des stratégies de coordination différentes pour frapper le ballon. Certains attendent le ballon avec la main au-dessus de l'épaule au niveau de la tête, d'autres avec le bras légèrement tendu, la main à hauteur de la tête. Un enfant attend avec la main en bas le long du corps et frappe par en dessous. Malgré cette différence de stratégies, il y a un couplage entre le déclenchement de la main et la durée de chute du ballon qui est invariant quel que soit le groupe et la hauteur de chute du ballon.

Ce couplage perception-action varie comme une fonction de la vitesse du ballon (qui est fonction de la hauteur de chute) tel que $T_{\text{frappe}} = aT_{\text{déclenchement}} + \text{temps de mouvement}$. Fonction qui n'est pas un artéfact car les régressions linéaires effectuées avec le temps de déclenchement du pied (expérience 2- étude 2) sont similaires à celles de la main.

Cette relation va dans le sens que la variable optique tau, en fonction de la distance à la surface, $\tau(x)$, est utilisée pour contrôler le temps restant avant le contact (sujet-objet) durant une approche sous condition de vitesse d'approche constante ou non (Lee & Reddish, 1981 ; Lee et coll., 1993, chez le fou de basant et le pigeon ou Lee et coll., 1983 et Savelsbergh et coll., 1991 chez les humains). En référence à ces auteurs, nous pouvons suggérer, dans notre cas de frappe de ballon avec la main, que la valeur de $\tau(x_{\text{main, ballon}})$ serait spécifiée de manière optique par la fonction tau de la séparation rétinienne des images de la main et du ballon.

Les écarts main-ballon

Les enfants les plus âgés frappent le ballon, à 40 cm avec une meilleure précision spatiale que les plus jeunes qui échouent. Si à 40 cm de la rampe, les EMBC des plus jeunes sont significativement supérieurs à ceux des plus âgés, cette différence n'existe plus à 60 cm. De plus, il a été montré que les TM ne sont pas différents selon la hauteur de chute du ballon ou la distance de départ par rapport à la rampe, ceci quel que soit l'âge des enfants. Cette invariance temporelle pourrait refléter une importance plus élevée de la coordination

temporelle plutôt que de la précision spatiale pour frapper un mobile (ici un ballon) (Fleury et coll., 1998). Les demandes de notre tâche imposent une synchronisation de coordination, entre la hauteur, la vitesse du mobile et le mouvement du bras. A partir du début du mouvement de frappe, le temps-au-contact est invariant qu'il y ait contact ou non avec le ballon (les temps-au-contact étant identiques quel que soit l'âge). La précision spatiale avec le ballon semble dépendre des synergies qui résultent de la maturation et des demandes de la tâche. L'erreur spatiale apparaît être une conséquence de l'erreur temporelle. Ces erreurs temporelles pourraient être dues à une différence de stratégie des enfants qui échouent.

Dans notre tâche de frappe de ballon, les plus jeunes enfants pourraient utiliser un repère spatial précis, en référence à Desmurget et Prablanc (1997), pour nous le bas de la rampe, pour contrôler leur mouvement de frappe. Si cette zone est stable quelle que soit la hauteur de chute du ballon, le ballon n'y arrive pas au même moment. La hauteur de chute augmentant, la vitesse du ballon augmente et l'enfant déclenche son geste trop tardivement pour que sa main arrive dans la zone spatiale de frappe (bas de la rampe) au bon moment. Nous supposons que les enfants plus âgés, pour réussir, baseraient le contrôle de la frappe sur un repère temporel (vitesse du ballon), leur permettant d'amener la main au bon moment pour qu'elle frappe le ballon. Au cours de son développement, de l'âge de 3 ans à l'âge de 4 ans, l'enfant passerait d'un repère spatial à un repère temporel ou alors, tout en gardant un repère spatial prendrait progressivement en compte la vitesse du ballon.

Conclusion

Dans notre expérience, les enfants dès 3 ans commencent à montrer une aptitude à intercepter le ballon. Le mouvement de frappe, quel que soit l'âge et quelle que soit la stratégie de frappe (par au-dessus ou par en-dessous), résulte d'un couplage entre le temps de déclenchement de la main et la durée de chute du ballon. Les erreurs spatiales (écart main-ballon) des enfants les plus jeunes pourraient être la conséquence des erreurs temporelles car ces enfants déclenchent leur mouvement de frappe plus tard que les enfants plus âgés qui réussissent. Par ailleurs, leur déclenchement de frappe évolue avec la hauteur de chute du ballon, ils déclenchent plus tardivement avec l'augmentation de la hauteur de chute. On peut supposer que le problème des plus jeunes enfants n'est pas tant d'évaluer correctement les conditions environnementales que d'ajuster correctement leur réponse à ces conditions. La meilleure précision spatiale des enfants plus âgés serait une conséquence d'un meilleur ajustement aux conditions environnementales permis par une meilleure prédiction temporelle. L'enfant doit d'abord régler le problème temporel (arriver au bon moment) pour pouvoir

réduire les erreurs spatiales. La maîtrise de la composante temporelle serait chronologiquement antérieure à la composante spatiale dans le développement de ce type de frappe.

Expérience 2 – Étude 1

Étude longitudinale, chez les enfants de 3 à 4 ans, du contrôle de la frappe manuelle d'un ballon et de la variabilité des positions de la main.

IV- Expérience 2- Étude 1: Étude longitudinale, chez les enfants de 3 à 4 ans, du contrôle de la frappe manuelle d'un ballon et de la variabilité des positions de la main.

Les résultats précédents ont montré que le mouvement de la main dans la frappe de ballon est couplé avec les informations visuelles concernant le temps de chute du ballon. Ces résultats soulignent le fait que les enfants de moins de 5 ans sont sensibles aux informations du flux optique. De plus, ils montrent que les frappes de ces enfants sont basées sur un couplage temporel. Ce couplage apparaît déterminant dans la réussite des frappes car les jeunes enfants (3 ans) qui échouent dans les frappes sont ceux qui arrivent au bon endroit mais trop tard ou trop tôt. Parallèlement, l'observation visuelle des films a montré que les frappes des enfants étaient caractérisées par une certaine variabilité de la position de la main, celle-ci étant plus ou moins importante selon l'âge de l'enfant. Cette observation nous a conduit à l'étude de la variabilité des positions de la main.

A- Introduction

Dans le cas des frappes avec déplacement, le participant doit détecter l'écart entre la position de la main dans sa relation avec l'objet cible et contrôler des changements de vitesse du bras. Brenner et Smeets (1996) ont montré que si les participants sont capables d'anticiper les déplacements des cibles dans le temps et de les attraper, ils n'anticipent pas de combien ils devront se mouvoir (Brenner et Smeets, 1996). Frapper une cible prend du temps, prend une centaine de millisecondes pour initier un mouvement (TR) et quelques autres centaines de millisecondes pour que la main atteigne la cible (TM). Si la cible est en mouvement, sa position changera pendant ce temps. Afin de se rendre compte du changement de position de la cible, le sujet pourrait prédire le déplacement restant sur la base de la vitesse de la cible et du temps au contact restant or ce n'est pas la stratégie utilisée (Brenner et Smeets, 1996). Smeets et Brenner (1995) ont trouvé qu'un déplacement dans l'arrière plan, qui change la vitesse perçue de la cible, ne change pas la trajectoire de la main quand elle frappe la cible. De plus, les trajectoires du déplacement de la main, vers des cibles mobiles, diffèrent systématiquement de celles vers des cibles statiques. Il apparaît que le mouvement de la main est continuellement ajusté en réponse aux changements de l'information visuelle sur la position de la cible. Plusieurs expériences (e.g., Lee et coll., 1983 ; Bootsma & Van Wieringen, 1990) suggèrent que le déplacement de la main soit effectivement sous contrôle visuel continu. Lee et coll. (1983) ont démontré que les mouvements du bras et de la jambe,

quand on saute pour frapper une balle en train d'accélérer, sont liés au taux d'expansion optique (la variable tau). De plus, Bootsma et Van Wieringen (1990) ont montré que la variabilité dans la direction du déplacement de la raquette, lors de frappes de coup droit chez des joueurs professionnels de tennis de table, diminue à l'approche du moment de contact avec la balle. La diminution de cette variabilité serait permise par l'amélioration de l'estimation de la position à laquelle la cible sera frappée. Cette estimation s'améliore, pendant le mouvement, parce que le temps pour lequel le déplacement est prédit (plutôt que perçu) diminue au moment où le participant perçoit proche l'instant de la frappe. Mais, il faut 110 ms pour que l'information visuelle influence le mouvement de la main (Smeets & Brenner, 1995), temps pendant lequel la cible se sera déplacée, les erreurs d'estimation vont être compensées par l'accélération du mouvement de la main vers la cible (Brenner & Smeets, 1996).

Pour la conception cognitive du traitement de l'information, la variabilité est source de bruit informationnel. Elle est interprétée comme un facteur limitant dans le contrôle, du système et en tant que tel, elle doit être éliminée, au moins minimisée (Newell & Corcos, 1993). Au contraire, pour l'approche dynamique ce " bruit " est vu comme une partie de la dynamique du système et la variabilité révèle le passage d'un niveau d'habileté à un autre. La variabilité peut être même bénéfique au système, dans le sens où elle faciliterait l'adaptation du système aux demandes de la tâche. Ce qui aboutit à une perspective intéressante pour le contrôle du mouvement : la variabilité des réponses fournit de l'information sur l'état du système (Newell & Corcos, 1993).

La diminution de variabilité, avant le contact, pourrait être un descripteur du niveau d'habileté dans les mouvements de frappe mais aussi plus généralement des approches manuelles. Afin de vérifier l'effet descripteur de la variabilité pour le niveau d'habileté et d'en déterminer la validité dans le développement des habiletés manuelles chez les enfants de 3 et 4 ans, nous avons étudié les écarts-types des positions de la main, au cours de frappes manuelles d'un ballon.

B- Méthode

1- Variable étudiée

Dans cette étude la variable dépendante étudiée était :

Les positions de la main (PoM) au cours de la frappe sont exprimées en pixels. Les différentes positions correspondent aux valeurs de la résultante (Do) des différentes positions de la main au cours de la frappe. Les écarts-types des positions de la main sont exprimés en

pixels. Ils ont été calculés car le changement des écarts-types évalue la variabilité. La variabilité est définie par l'écart-type d'un paramètre du système et il informe sur le degré de variabilité de ce paramètre (Newell & Corcos, 1993).

Pour estimer la dispersion du début de la trajectoire du ballon jusqu'au contact, les valeurs des trajectoires ont été définies en comparaison avec le temps au moment du contact, indiqué comme point zéro. La comparaison en fonction du point de contact avec le ballon de coordonnées (0,0) a été réalisée en référence à l'expérience de Lee, Davies, Green et Van Der Weel (1993) sur le contrôle visuel de l'approche des pigeons, dans laquelle, ces auteurs ont pris le moment du contact des pattes et de la perche comme point zéro.

2- Analyses statistiques

D'une façon générale, nous avons procédé au calcul des écarts-types des positions de la main au cours de la frappe (EPM) pour chacun des groupes concernés pour les deux conditions expérimentales (à 40 cm et 60 cm de la rampe).

Le traitement statistique des données a été réalisé au moyen du logiciel Statistica 6.0 sur un PC.

Pour déterminer les effets des trois facteurs (groupe, distance et hauteur) et leurs interactions, étant donné que la distribution des données suit la loi normale et qu'il y a égalité des variances, des analyses de variance ANOVA et MANOVA (Groupes à 2 niveaux, distance à la rampe à 2 niveaux et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux) ont été appliquées sur les écarts-types des positions de la main (EPM) au cours de la frappe. Une analyse à posteriori post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, a été réalisée dans le but de mettre en évidence la signification des variations par paire.

Le seuil de significativité est fixé à une valeur de probabilité d'hypothèse nulle $p < .05$. Dans les tableaux, les valeurs de cette probabilité sont indiquées par un astérisque (*).

C- Résultats

Les données ont été prélevées à partir des mêmes sessions que dans l'expérience 2.

- la première session pour les enfants qui réussissent dès la première fois (FB),
- la deuxième session pour ceux qui échouent (GD1)
- et la session pour laquelle les enfants du groupe GD1, réussissent toutes les frappes (GD2), la troisième ou la quatrième session. Se reporter à l'annexe 5, pour le détail des données, des écarts-types des positions de la main au cours du mouvement selon le groupe, la hauteur de chute du ballon (m) et la distance de l'enfant à la rampe (cm).

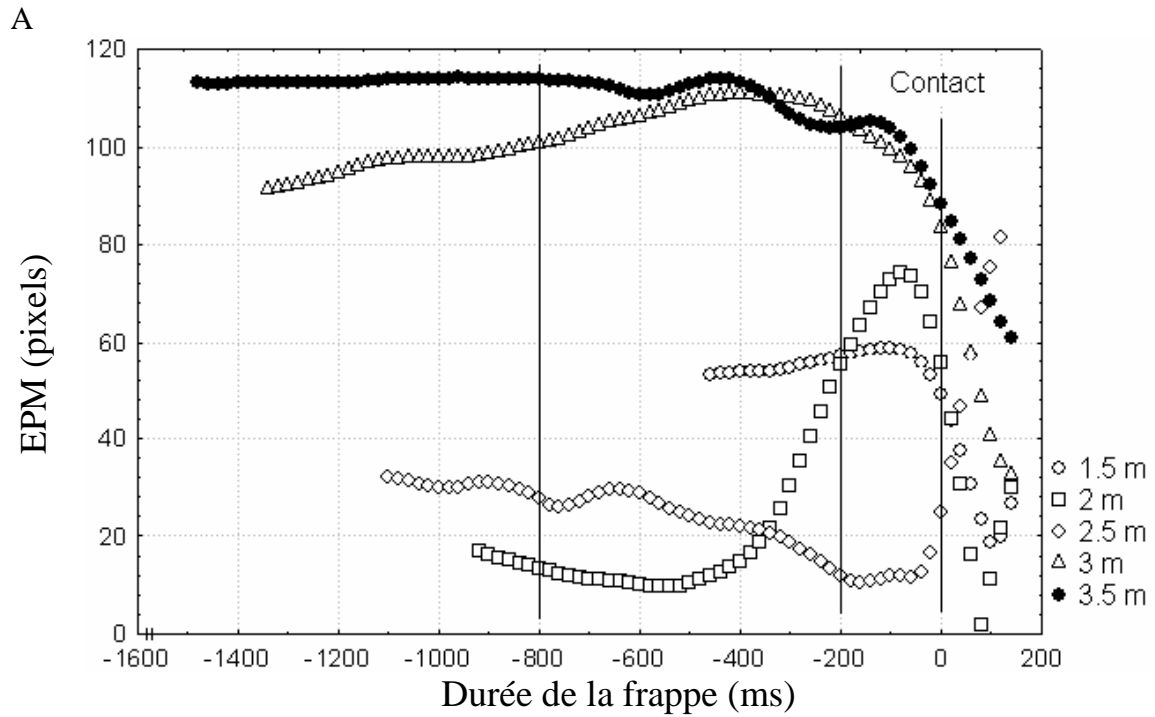
1- Courbes de la variabilité de la position de la main durant la frappe à 40 et 60 cm de la rampe

L'observation de l'ensemble des courbes des écarts-types des positions de la main (figures 44 et 45) laisse apparaître une variation de ces positions au cours du mouvement. La variabilité des écarts-types positions de la main diminue depuis le déclenchement de la frappe jusqu'au contact de la main avec le ballon pour remonter après le contact. Cette observation est valable pour tous les groupes et pour toutes les hauteurs.

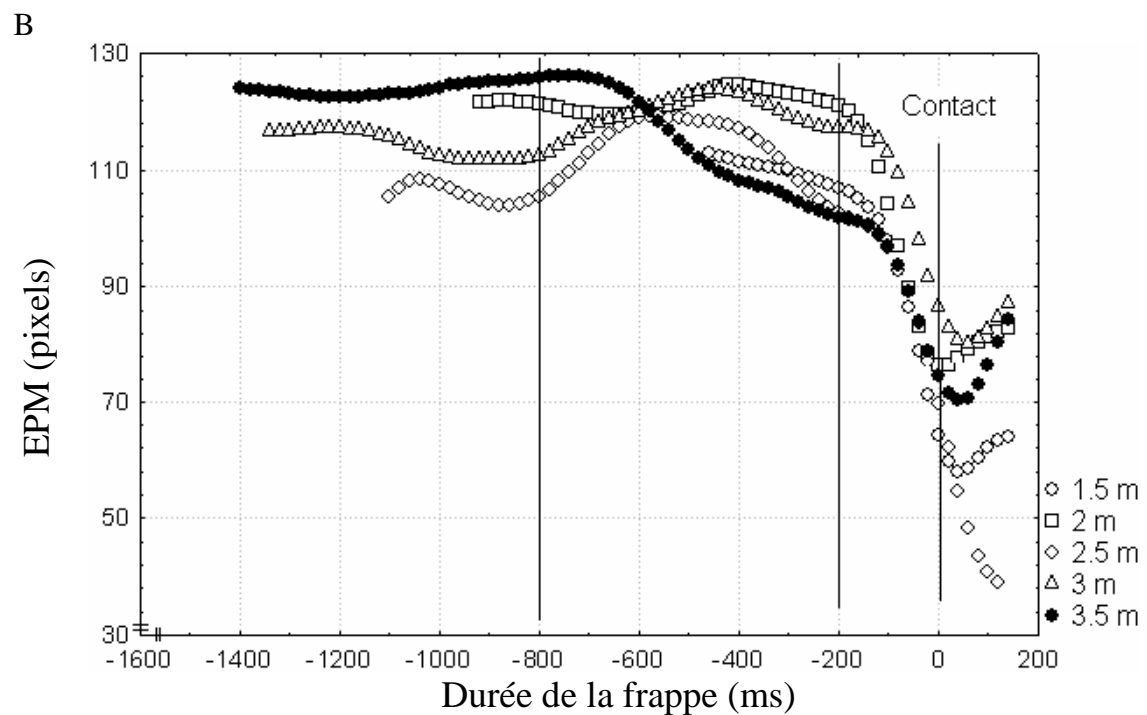
La fenêtre des valeurs montre trois phases dans le mouvement de frappe quel que soit le groupe d'enfant

L'observation des courbes pour la distance 40 cm de la rampe (figure 44) et celle des courbes à 60 cm (figure 45) montre une première phase (phase d'attente) qui s'étend jusqu'à - 800 ms avant le contact, à 40 cm de la rampe. La seconde phase (placement de la main) s'étend jusqu'à 200 ms avant le contact pour la distance à la rampe 40 cm. La variabilité augmente en conséquence du placement de la main. La troisième phase correspond à l'exécution du mouvement propre. La variabilité diminue de manière continue, à partir du déclenchement de la frappe (- 200 ms avant le contact) jusqu'au contact de la main avec le ballon, pour atteindre la valeur minimum au moment du contact ou 20 à 40 ms après le contact pour les deux distance à la rampe, pour toutes les hauteurs et quel que soit le groupe.

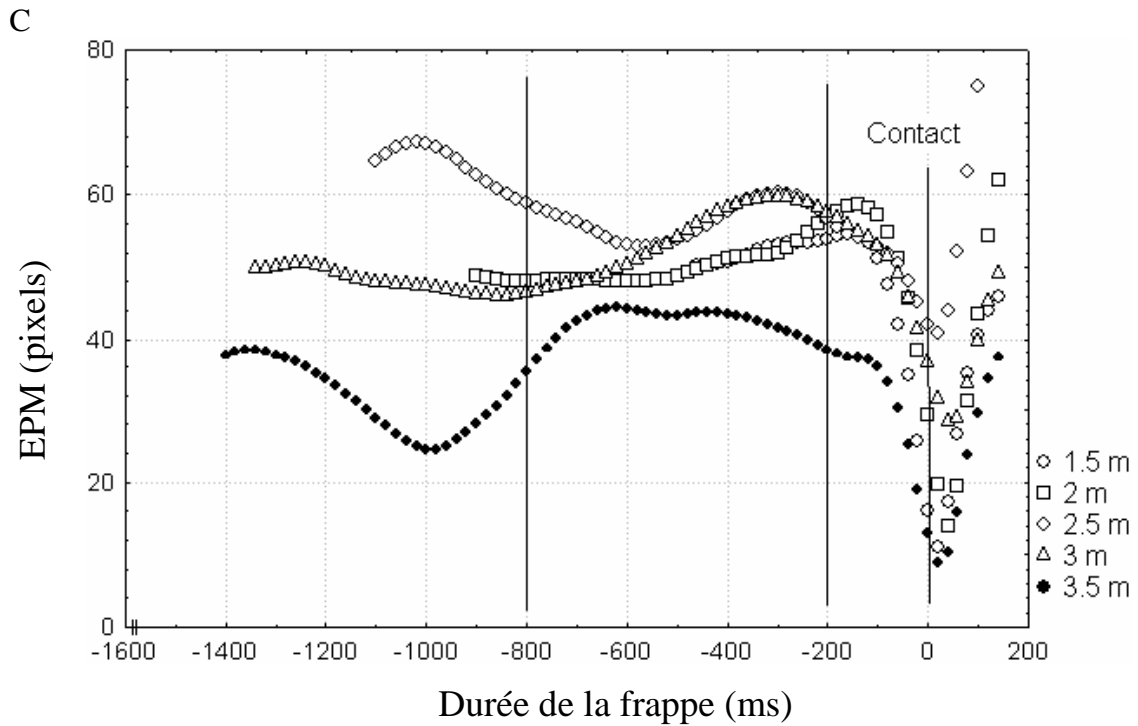
Il est à noter que, pour la distance à la rampe 60 cm, les deux premières phases (phase d'attente et phase de placement de la main) se trouvent confondues. Cette constatation peut s'expliquer par le fait qu'à 60 cm de la rampe, l'enfant place sa main au cours de son déplacement vers le ballon, ce déplacement n'existe pas pour les frappes à 40 cm de la rampe car les enfants frappent sans se déplacer.



Graphe A : Courbes des écarts-types des positions de la main (EPM) au cours de la frappe pour le groupe FB. Où 0 est le moment du contact entre la main et le ballon.

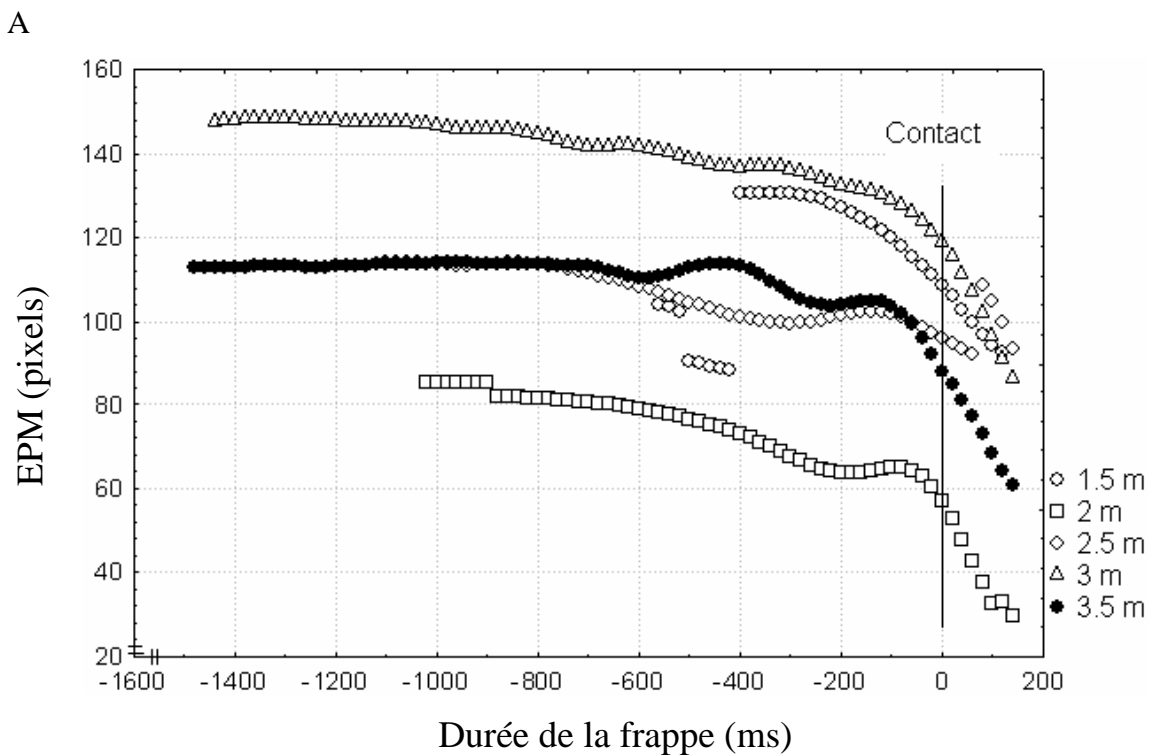


Graphe B : Courbes des écarts-types des positions de la main (EPM) au cours de la frappe pour le groupe GD1. Où 0 est le moment du contact entre la main et le ballon.

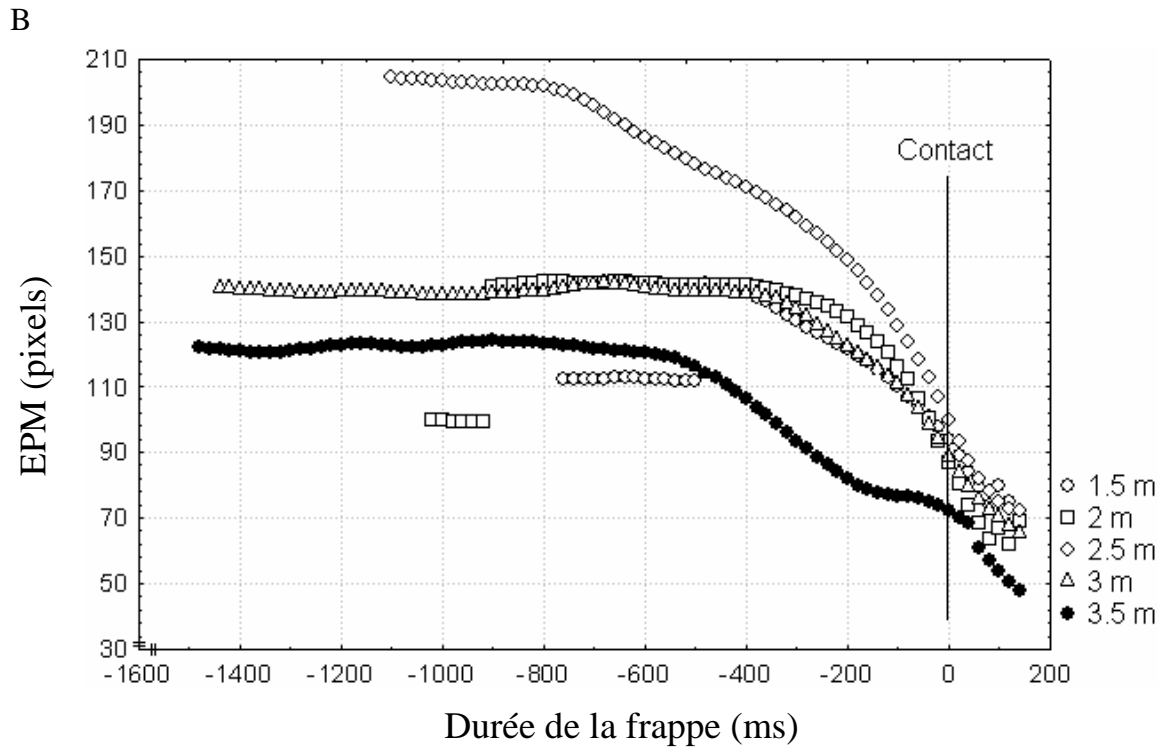


Graph C : Courbes des écarts-types des positions de la main (EPM) au cours de la frappe pour le groupe GD2. Où 0 est le moment du contact entre la main et le ballon.

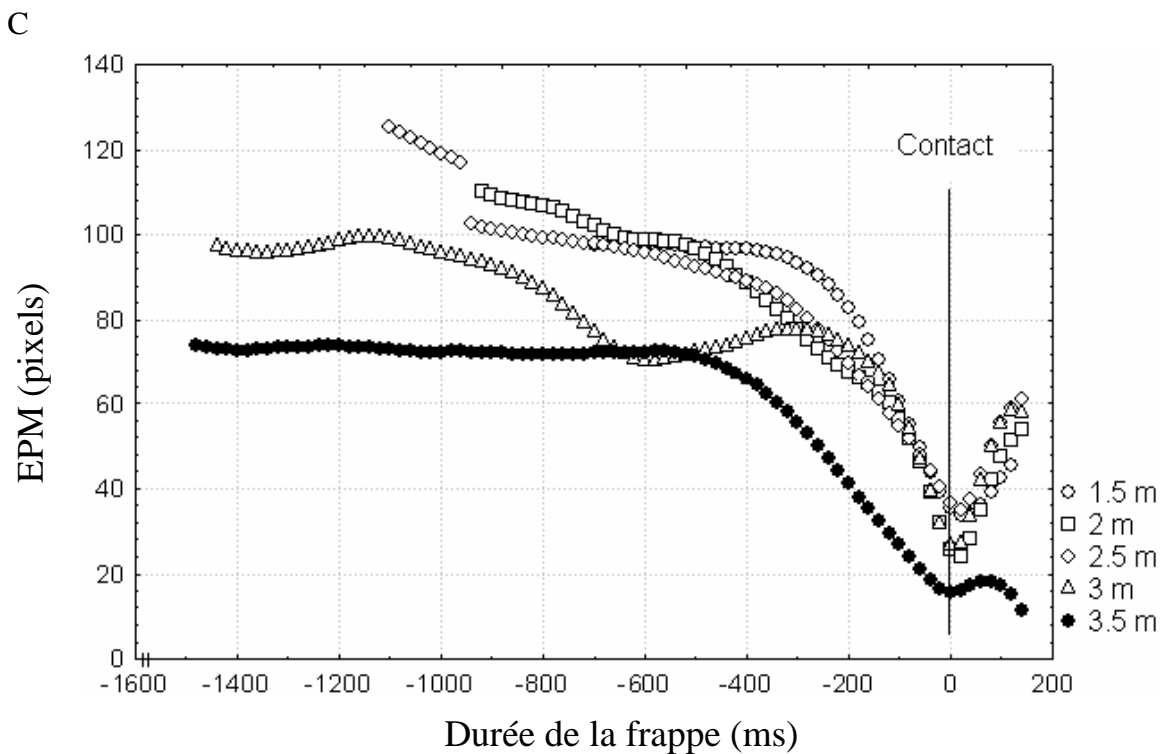
Figure 44. Courbes des écarts-types des positions de la main (EPM) au cours de la frappe pour la distance à la rampe 40 cm et pour toutes les hauteurs.



Graph A : Courbes des EPM (pixels) au cours de la frappe pour le groupe FB. Où 0 est le moment du contact entre la main et le ballon.



Graph B : Courbes des EPM (pixels) au cours de la frappe pour le groupe GD1. Où 0 est le moment du contact entre la main et le ballon.



Graph C : Courbes des EPM (pixels) au cours de la frappe pour le groupe GD2. Où 0 est le moment du contact entre la main et le ballon.

Figure 45. Courbes des écarts-types des positions de la main (EPM) au cours de la frappe pour la distance à la rampe 60 cm et pour toutes les hauteurs.

2- Comparaison de la variabilité de la position de la main durant la frappe à 40 cm de la rampe vs 60 cm de la rampe

a- Présentations des moyennes et des écarts-types

Groupes		Distances à la rampe (cm)						
		40cm			60cm			
	n	Moyennes	Écarts-types	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	84	36.18	4	64	35.78	103	23.78
GD1	5	111	23.49	5	103	16.91	118	26.68
GD2	5	55	19.79	5	47	12.29	62	22.75

Tableau 15. Moyennes et écarts-types des écarts-types de la position de la main au cours de la frappe (EPM, pixels) en fonction des groupes (FB, GD1 et GD2) et des distances à la rampe (40 et 60 cm). N = effectif.

Groupes		Hauteurs de chute du ballon (m)									
		1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
FB	4	86	34.13	54	19.51	59	41.68	116	17.54	103	8.72
GD1	5	109	20.10	116	20.47	121	31.40	116	16.52	92	13.95
GD2	5	60	23.68	57	18.85	61	15.66	58	14.95	38	15.75

Tableau 16. Moyennes et écarts-types des écarts-types de la position de la main au cours de la frappe (EPM, pixels) pour chaque groupe (FB, GD1 et GD2) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

b- Analyses de variance

Les résultats des analyses de variance seront présentés tout d'abord pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2 puis pour les groupes GD1-GD2.

a- Groupes FB-GD1 / FB-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (FB-GD1 puis FB-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées pour déterminer l'effet de ces trois facteurs et leur interaction sur les écart-types des positions de la main (EPM).

*** Effets globaux**

L'effet du facteur groupe est significatif (FB-GD1 : $F_{1,50} = 60.97, p < .001$ et FB-GD2: $F_{1,50} = 98.40, p < .001$, figure 46). L'EPM moyen groupe FB est significativement supérieur à celui du groupe GD2 mais significativement inférieur à celui du groupe GD1. Le groupe GD1 à la variabilité la plus élevée.

L'effet la distance à la rampe est significatif (FB-GD1 : $F_{1,50} = 1354.$, $p < .001$ et FB-GD2 : $F_{1,50} = 423.10$, $p < .001$, figure 47). Les EPM moyens sont significativement plus faibles pour les frappes réalisées en partant à 40 cm de la rampe qu'en partant à 60 cm.

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif (FB-GD1 : $F_{4,200} = 176.0$, $p < .001$ et FB-GD2 : $F_{4,200} = 219.59$, $p < .001$, figure 48). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que l'EPM moyen à une hauteur est significativement différent de celui des autres hauteurs.

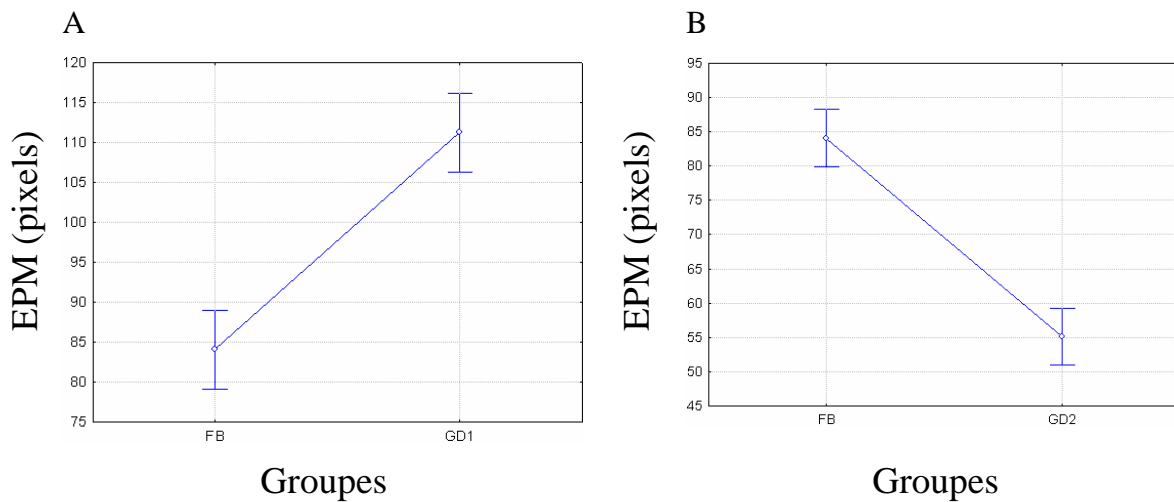


Figure 46. Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) selon le groupe.
Graphe A : Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) pour les groupes FB-GD1.
Graphe B : Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) pour les groupes FB-GD2.

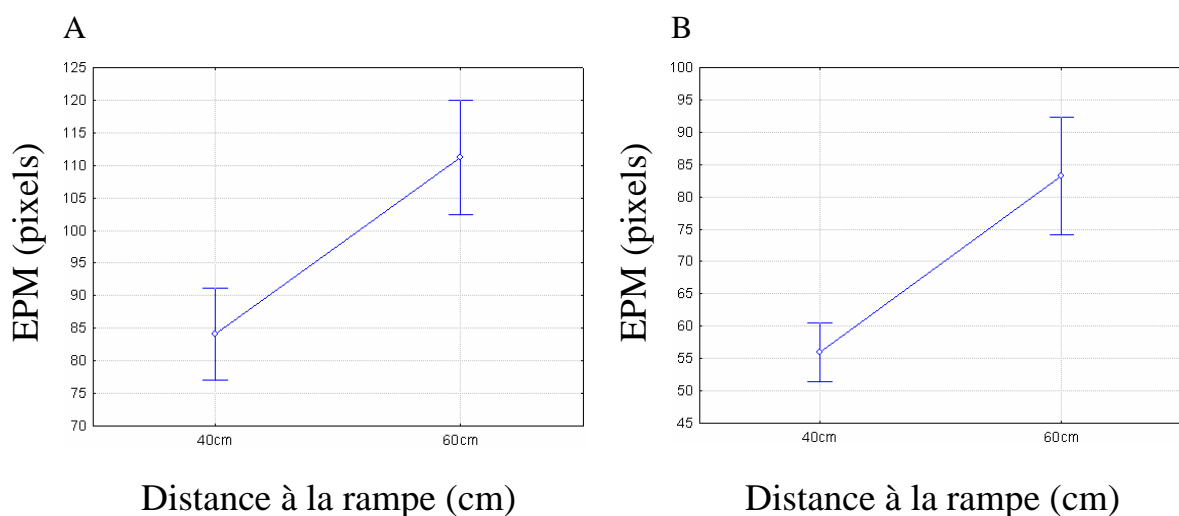


Figure 47. Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) à 40 et 60 cm.
Graphe A : Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) pour les groupes FB-GD1.
Graphe B : Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) pour les groupes FB-GD2.

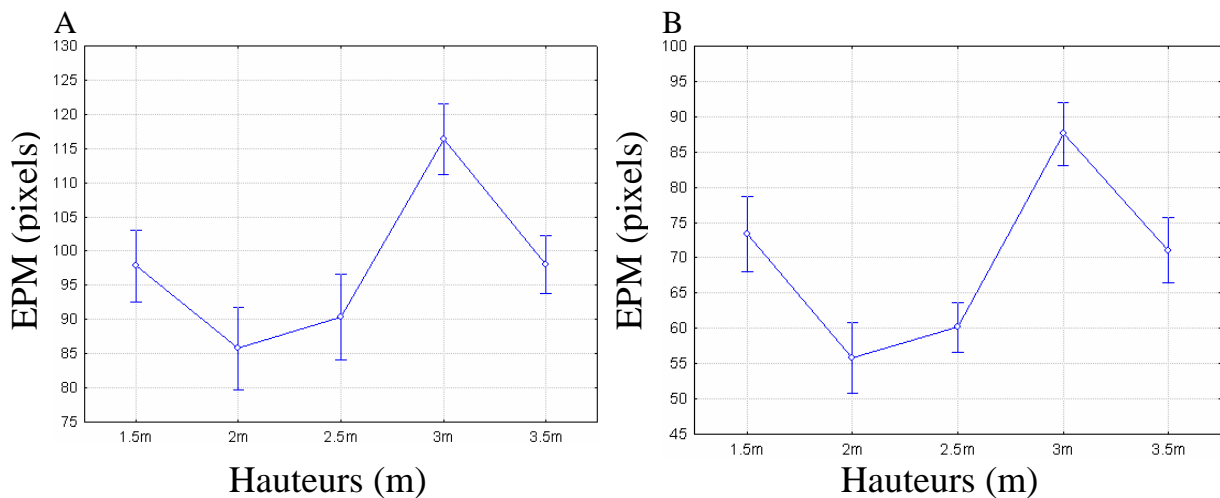


Figure 48. Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) en fonction de la hauteur de chute du ballon (m). *Grappe A* : Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) pour les groupes FB-GD1. *Grappe B* : Écart-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) pour les groupes FB-GD2.

* Double interactions

L'effet du groupe est modulé par :

- le facteur distance : groupe x distance (FB-GD1 : $F_{1,50} = 280.39$, $p < .001$ et FB-GD2 : $F_{1,50} = 82.61$, $p < .001$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que l'écart-type moyen des positions de la main (EPM) à 40 cm, est significativement différent de celui à 60 cm pour chaque groupe. La variabilité est significativement plus faible pour les frappes réalisées en partant à 40 cm de la rampe qu'en partant à 60 cm pour chacun des groupes. De plus, pour les deux distances à la rampe, l'EPM moyen du groupe FB est significativement différent de celui du groupe GD1 et du groupe GD2. Pour les deux distances à la rampe, la variabilité dans le mouvement de frappe du groupe FB est significativement plus forte que celle du groupe GD1 mais significativement plus petite que celle du groupe GD2.

- le facteur hauteur : groupe x hauteur (FB-GD1 : $F_{4,200} = 378.94$, $p < .001$ et FB-GD2 : $F_{4,200} = 361.58$, $p < .001$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que pour chaque groupe l'EPM moyen à une hauteur est significativement différent de celui à la hauteur immédiatement supérieure, excepté pour le groupe GD2 entre les hauteurs 2.5 et 3m où la variabilité n'est pas significativement différente ($F_{1,50} = 2.30$, $p = .13$ n.s.).

Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe est significativement différent de celui des autres groupes, excepté entre les groupes FB et GD1 à 3 m et pour FB et GD2 à 2 m et 2.5 m où les EPM moyens ne sont pas significativement différents (respectivement $F_{1,50} = .009, p = .93 \text{ n.s.}$; $F_{1,50} = .48, p = .49 \text{ n.s.}$ et $F_{1,50} = .47, p = .49 \text{ n.s.}$).

L'effet de la distance est modulé par le facteur hauteur : distance x hauteur (FB-GD1 : $F_{4,200} = 295.23, p < .001$ et FB-GD2 : $F_{4,200} = 161.99, p < .001$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que l'EPM moyen à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm pour toutes les hauteurs. La variabilité dans les positions de la main à 40 cm est plus faible qu'à 60 cm pour toutes les hauteurs pour chacun des groupes.

*** Triple interaction FB-GD1**

L'analyse de variance pour les groupes FB-GD1 montre une triple interaction groupe x distance x hauteur ($F_{4,200} = 26.68, p < .001$, figure 49).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent des différences significatives des EPM moyens à une hauteur avec ceux à la hauteur immédiatement supérieure, pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, excepté entre 1.5 et 2 m pour GD1 à 60 cm ($F_{1,50} = 2.73, p = .10 \text{ n.s.}$). Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm de la rampe, excepté à 3.5 m pour FB où l'EPM moyen est identique ($F_{1,50} = -0.00, p = 1.00 \text{ n.s.}$).

Triple interaction : Groupe x Distance x Hauteurs ($F_{4,200} = 26.68, p < .001$)

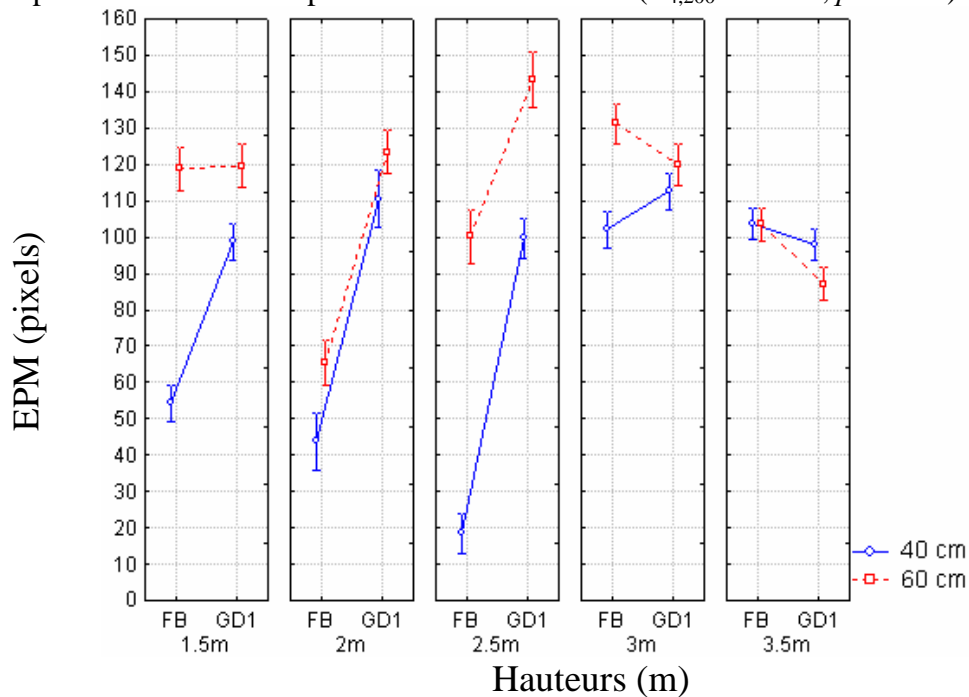


Figure 49. Présentation des écarts-types de la position de la main (EPM, pixels) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Groupes (FB, partie gauche et GD1, partie droite) x Distance à la rampe (40 cm —○— et 60 cm -□-) x Hauteurs (1^{er} graphe 1.5m, 2^{ème} graphe 2m, 3^{ème} graphe 2.5m, 4^{ème} graphe 3m et 5^{ème} graphe 3.5m).

* Triple interaction FB-GD2

L'analyse de variance pour les groupes FB-GD2 montre une triple interaction groupe x distance x hauteur ($F_{4,200} = 93.10, p < .001$, figure 50).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent des différences significatives des TDM moyens qu'à une hauteur avec ceux à la hauteur immédiatement supérieure, pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, excepté entre :

- 1.5-2m, 2-2.5m et 2.5-3m pour GD2 à 40 cm (respectivement, $F_{1,50} = 1.22, p = .27 n.s., F_{1,50} = 1.65, p = .20 n.s.$ et $F_{1,50} = 0.19, p = .67 n.s.$).

Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm de la rampe, excepté à 3.5 m pour FB où l'EPM moyen est identique ($F_{1,50} = 0.00, p = 1.00 n.s.$).

Triple interaction : Groupe x Distance x Hauteurs ($F_{4,200} = 93.10, p < .001$)

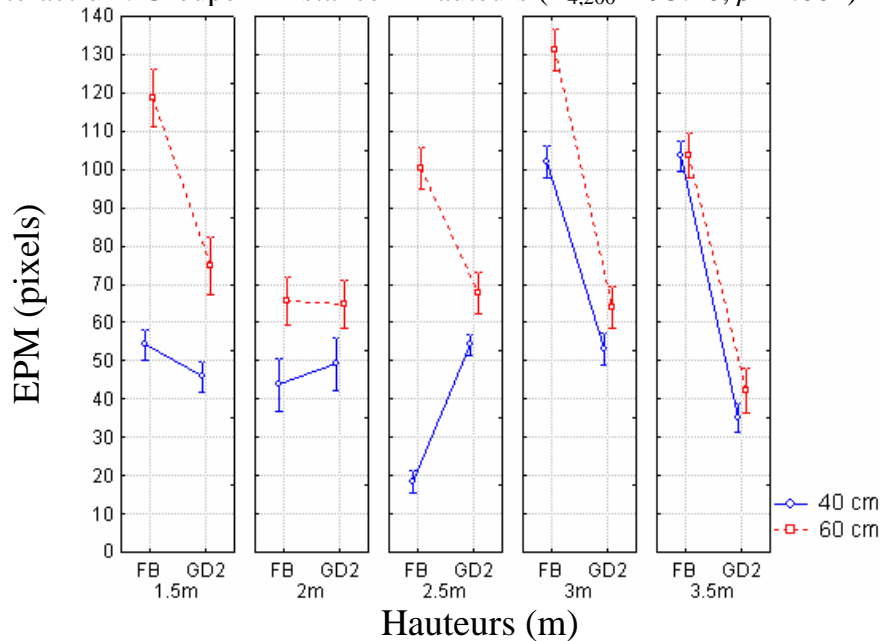


Figure 50. Présentation des écarts-types de la position de la main (EPM, pixels) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Groupes (FB, partie gauche et GD2, partie droite) x Distance à la rampe (40 cm $\text{---}\square\text{---}$ et 60 cm $\text{---}\square\text{---}$) x Hauteurs (1^{er} graphe 1.5m, 2^{ème} graphe 2m, 3^{ème} graphe 2.5m, 4^{ème} graphe 3m et 5^{ème} graphe 3.5m).

β - Groupes GD1-GD2

Une analyse de variance à trois facteurs : Groupes à 2 niveaux (GD1-GD2), distance à la rampe à deux niveaux (40-60 cm) et Hauteurs de chute du ballon à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) avec mesures répétées sur les trois facteurs, a été réalisée sur les écart-types des positions de la main (EPM).

* Effets globaux

L'effet du facteur groupe est significatif ($F_{1,25} = 7373., p < .001$, figure 51A). L'EPM moyen groupe GD1 est significativement supérieur à celui du groupe GD2.

L'effet la distance à la rampe est significatif ($F_{1,25} = 73.56, p < .001$, figure 51B). Les EPM moyens sont significativement plus faibles pour les frappes réalisées en partant à 40 cm de la rampe qu'en partant à 60 cm.

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif ($F_{4,100} = 321.46, p < .001$, figure 51C). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que l'EPM moyen à une hauteur est significativement différent de celui des autres hauteurs.

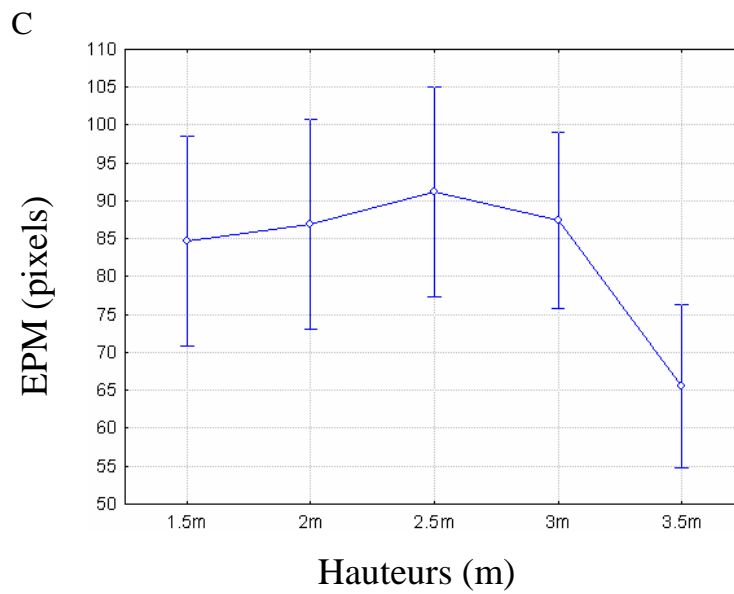
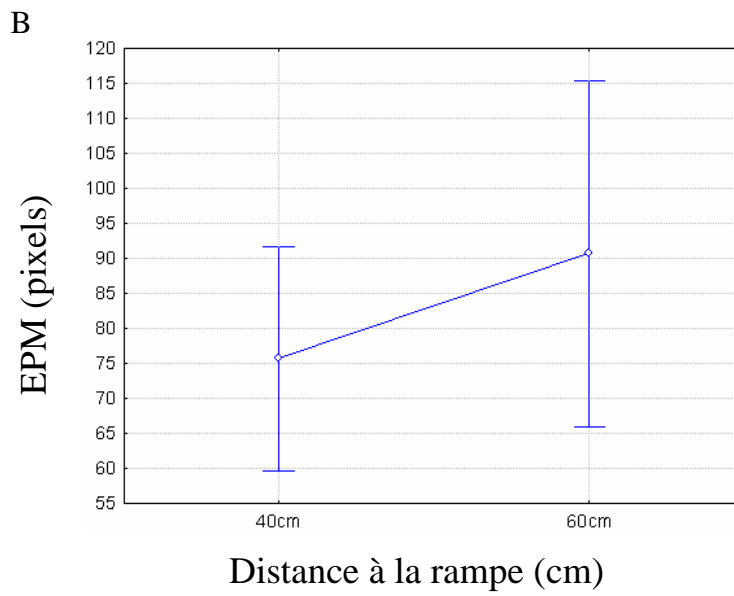
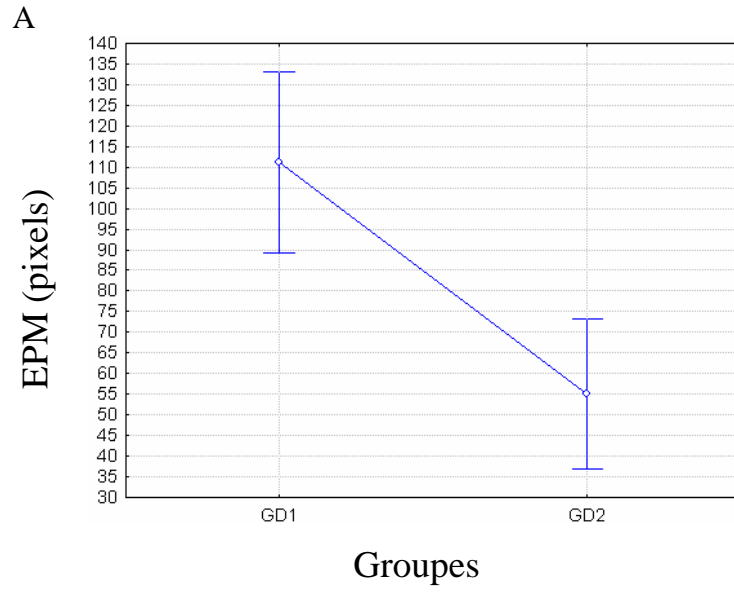


Figure 51. Écarts-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM). *Graphe A* : Écarts-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) en fonction du groupe (GD1-GD2). *Graphe B* : Écarts-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) en fonction de la distance à la rampe (40-60 cm). *Graphe C* : Écarts-types moyens et erreurs-types des positions de la main (EPM) en fonction de la distance la hauteur de chute du ballon (m).

L'interaction groupe x distance n'est pas significative ($F_{1,25} = .09, p = .76 n.s.$).

* **Double interaction**

L'effet du groupe est modulé par le facteur hauteur : groupe x hauteur ($F_{4,100} = 20.74, p < .001$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que pour chaque groupe l'EPM moyen à une hauteur est significativement différent de celui à la hauteur immédiatement supérieure.

Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen de GD1 et GD2 sont significativement différents entre eux.

* **Triple interaction**

L'analyse de variance pour les groupes GD1-GD2 montre une triple interaction groupe x distance x hauteur ($F_{4,100} = 228.23, p < .001$, figure 52).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent des différences significatives des EPM moyens à une hauteur avec ceux à la hauteur immédiatement supérieure, pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, excepté entre 2.5 et 3 m pour GD2 à 40 cm ($F_{1,25} = 2.11, p = .16 n.s.$). Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm de la rampe.

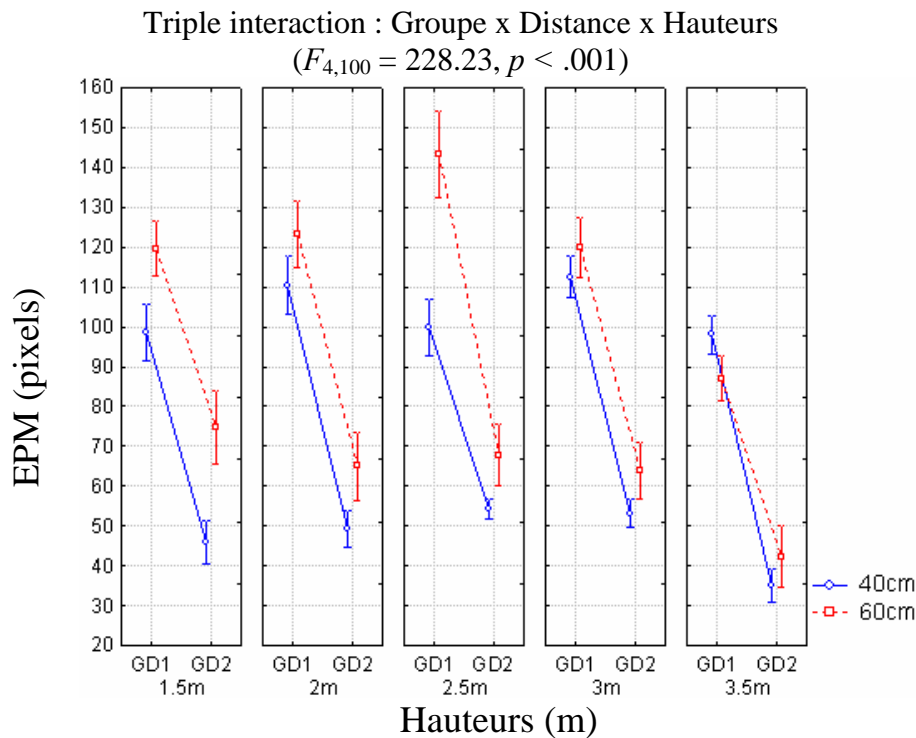


Figure 52. Présentation des écarts-types de la position de la main (EPM, pixels) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Groupes (GD1, partie gauche et GD2, partie droite) x Distance à la rampe (40 cm —○— et 60 cm -□-) x Hauteurs (1^{er} graphe 1.5m, 2^{ème} graphe 2m, 3^{ème} graphe 2.5m, 4^{ème} graphe 3m et 5^{ème} graphe 3.5m).

* Résumé

La variabilité du groupe GD1 est significativement supérieure à celle des groupes FB et GD2. La variabilité du groupe FB est significativement supérieure à celle du groupe GD2.

La variabilité est significativement plus faible pour les frappes réalisées en partant à 40 cm de la rampe qu'en partant à 60 cm et ceci pour chacun des groupes.

La variabilité à une hauteur est significativement inférieure de celle à la hauteur immédiatement supérieure pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, excepté :

- entre 1.5 et 2 m pour GD1 à 60 cm et,
- entre 1.5-2m, 2-2.5m et 2.5-3m pour GD2 à 40 cm.

La variabilité, d'un groupe à 40 cm pour toutes les hauteurs, est significativement différente de celle à 60 cm de la rampe, excepté à 3.5 m pour FB où elle est identique.

c- Effet d'ordre sur les EPM

L'observation des courbes des EPM (figures 44 et 46) selon la hauteur de chute du ballon montre deux tendances : L'EPM moyen de la première hauteur (3m) est le plus élevé

pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2, et pour les groupes GD1-GD2 l'EPM moyen à la deuxième hauteur (3.5m) est le plus petit.

Nous avons donc réalisé pour voir s'il existe un effet d'ordre, une analyse de variance groupes (FB-GD1, FB-GD2 et GD1-GD2) x 2 (distance) x 5 (ordre de passage des hauteurs de chute du ballon) sur les EPM.

Seuls les résultats, concernant l'effet d'ordre, sont rapportés car les effets de groupes et/ou de distances ont été démontrés dans les analyses précédentes.

Les résultats des analyses de variance seront présentés tout d'abord pour les groupes FB-GD1 et FB-GD2 puis pour les groupes GD1-GD2.

α- Groupes FB-GD1 / FB-GD2

*** Effets globaux**

L'effet d'ordre est significatif (FB-GD1 : $F_{4,200} = 176.50$, $p < .001$, FB-GD2 : $F_{4,200} = 219.59$, $p < .001$, figure 53). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que l'EPM moyen à une hauteur est significativement différent de celui de la hauteur suivante pour les trois groupes pris deux à deux.

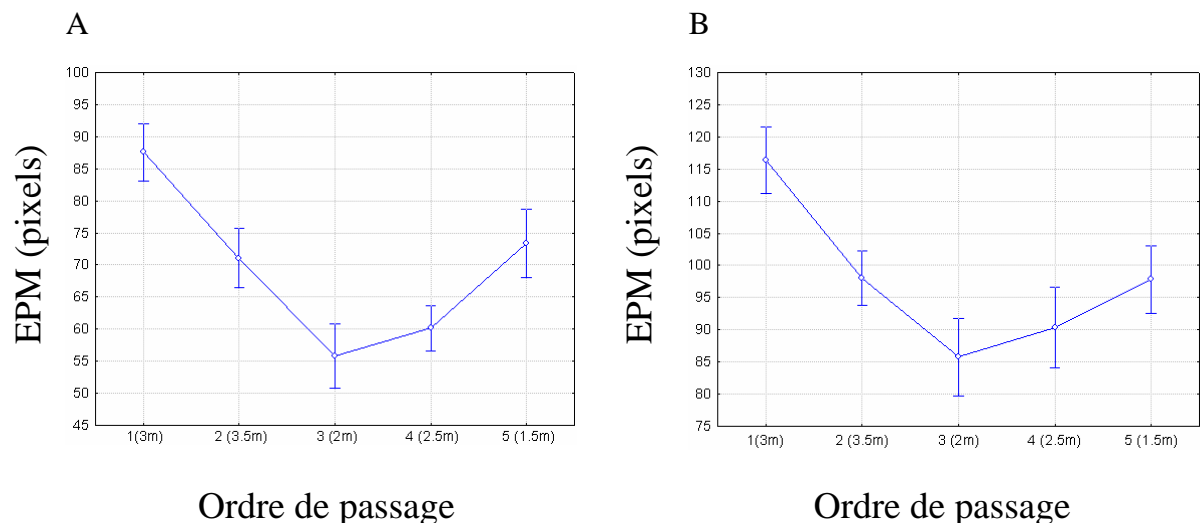


Figure 53. EPM moyens (pixels) et erreurs-types à 40-60 cm. *Graphe A* : EPM moyens (pixels) et erreurs-types en fonction de l'ordre de passage des hauteurs de chute du ballon (m) pour les groupes FB et GD1. *Graphe B* : EPM moyens (pixels) et erreurs-types, en fonction de l'ordre de passage des hauteurs de chute du ballon (m), pour les groupes FB et GD2.

*** Doubles interactions**

L'interaction groupe x ordre de passage est significative (FB-GD1 : $F_{4,200} = 378.94$, $p < .001$, FB-GD2 : $F_{4,200} = 361.58$, $p < .001$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises

deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que pour chaque groupe l'EPM moyen à une hauteur est significativement différent de celui à la hauteur suivante, excepté pour le groupe GD2 entre la quatrième hauteur (2.5m) et la dernière (1.5m) ($F_{1,50} = 0.16$, $p = .69$ n.s.).

Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe est significativement différent de celui de l'autre groupe, excepté entre les groupes FB et GD1 à la première hauteur (3 m : $F_{1,50} = .009$, $p = .93$ n.s.) et pour FB et GD2 à la troisième (2 m) et à la quatrième (2.5 m) hauteur où les EPM moyens ne sont pas significativement différents (respectivement ; $F_{1,50} = .48$, $p = .49$ n.s. et $F_{1,50} = .47$, $p = .49$ n.s.).

L'interaction distance x ordre de passage est significative (FB-GD1 : $F_{4,200} = 295.23$, $p < .001$ et FB-GD2 : $F_{4,200} = 161.99$, $p < .001$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que l'EPM moyen à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm à chaque hauteur. La variabilité à 40 cm est plus faible qu'à 60cm pour toutes les hauteurs pour chacun des groupes.

*** Triple interaction FB-GD1**

L'analyse de variance pour les groupes FB-GD1 montre une triple interaction groupe x distance x ordre de passage ($F_{4,200} = 26.68$, $p < .001$, figure 54).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent des différences significatives des EPM moyens à une hauteur avec ceux à la hauteur suivante, pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, excepté entre la quatrième (2.5m) et la dernière (1.5m) hauteur pour GD1 à 40 cm ($F_{1,50} = .26$, $p = .61$ n.s.). Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm de la rampe, excepté à la deuxième hauteur (3.5 m) pour FB où l'EPM moyen est identique ($F_{1,50} = -0.00$, $p = 1.00$ n.s.).

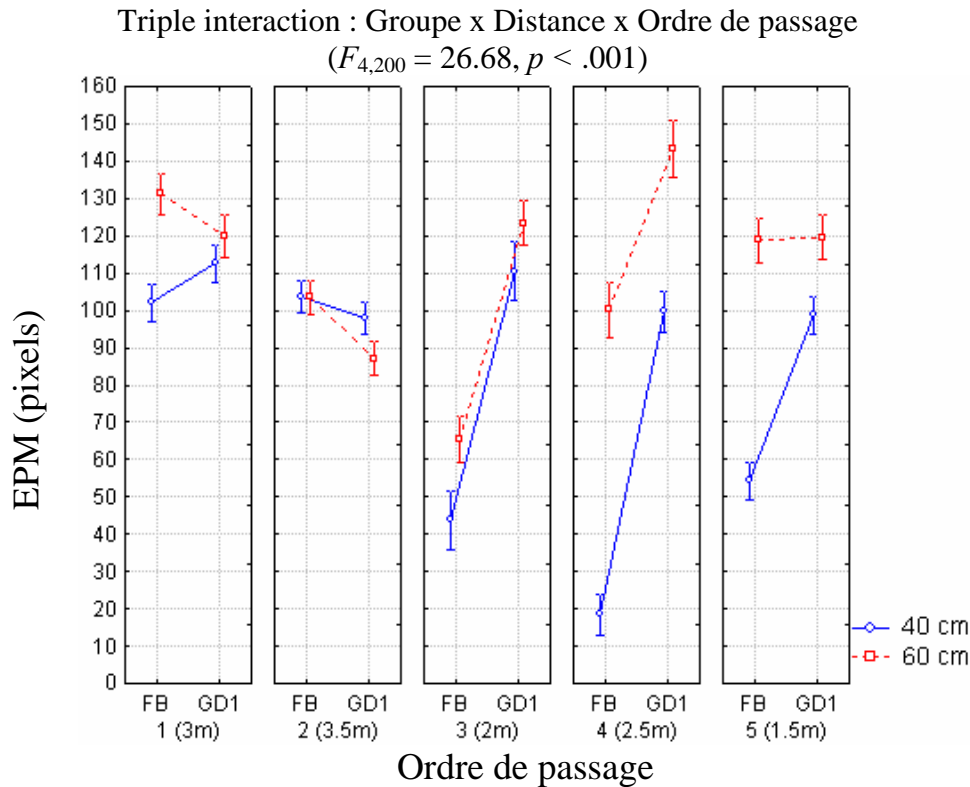


Figure 54. Présentation des écarts-types de la position de la main (EPM, pixels) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Groupes (FB, partie gauche et GD1, partie droite) x Distance à la rampe (40 cm —○— et 60 cm -□-) x Ordre de passage (1^{er} graphe 1^{ère} hauteur (3m), 2^{ème} graphe 2^{ème} hauteur (3.5m), 3^{ème} graphe 3^{ème} hauteur (2m), 4^{ème} graphe 4^{ème} hauteur (2.5m) et 5^{ème} graphe 5^{ème} hauteur (1.5m).

* Triple interaction FB-GD2

L'analyse de variance pour les groupes FB-GD2 montre une triple interaction groupe x distance x ordre de passage ($F_{4,200} = 93.10, p < .001$, figure 55).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent des différences significatives des EPM moyens à une hauteur avec ceux à la hauteur suivante, pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, excepté entre la troisième (2m) et la quatrième (2.5m) hauteur pour GD2 à 40 cm ($F_{1,50} = 1.65, p = .20 n.s.$). Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm de la rampe, excepté à la deuxième hauteur (3.5 m) pour FB où l'EPM moyen est identique ($F_{1,50} = 0.00, p = 1.00 n.s.$).

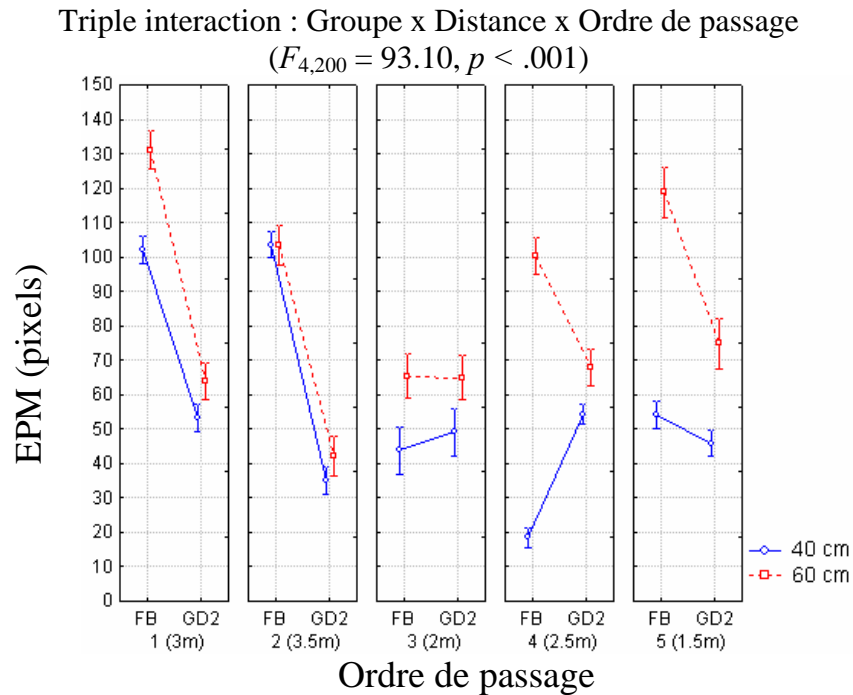


Figure 55. Présentation des écarts-types de la position de la main (EPM, pixels) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Groupes (FB, partie gauche et GD2, partie droite) x Distance à la rampe (40 cm $\text{---}\circ\text{---}$ et 60 cm $\text{-}\square\text{-}$) x Ordre de passage (1^{er} graphe 1^{ère} hauteur (3m), 2^{ème} graphe 2^{ème} hauteur (3.5m), 3^{ème} graphe 3^{ème} hauteur (2m), 4^{ème} graphe 4^{ème} hauteur (2.5m) et 5^{ème} graphe 5^{ème} hauteur (1.5m)).

β - Groupes GD1-GD2

L'effet d'ordre est significatif ($F_{4,100} = 321.46, p < .001$, figure 56). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que l'EPM moyen à une hauteur est significativement différent de celui de la hauteur suivante.

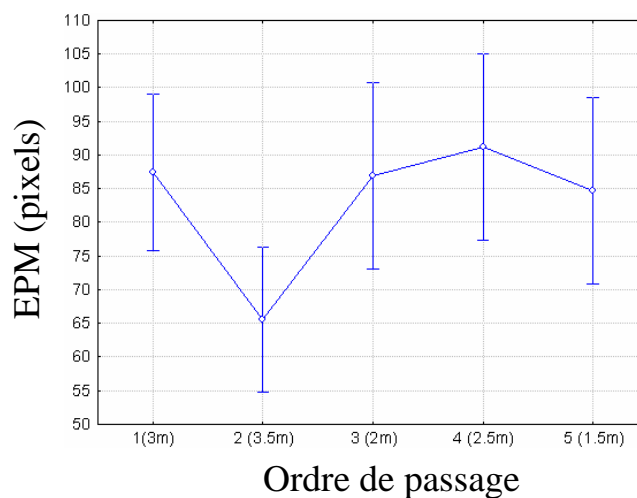


Figure 56. EPM moyens (pixels) et erreurs-types à 40-60 cm, en fonction de l'ordre de passage des hauteurs de chute du ballon (m), pour les groupes GD1 et GD2.

* Doubles interactions

L'interaction groupe x ordre de passage est significative ($F_{4,100} = 20.74, p < .001$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que pour chaque groupe l'EPM moyen à une hauteur est significativement différent de celui à la hauteur suivante, excepté pour le groupe GD2 entre la quatrième hauteur (2.5m) et la dernière (1.5m) ($F_{1,25} = .31, p = .58$ n.s.).

Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe est significativement différent de celui de l'autre groupe.

L'interaction distance x ordre de passage est significative ($F_{4,100} = 228.23, p < .001$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que l'EPM moyen à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm pour toutes les hauteurs, excepté pour la deuxième hauteur (3.5m) où la variabilité n'est pas significativement différente ($F_{1,25} = 1.11, p = .30$ n.s.). La variabilité à 40 cm est plus faible qu'à 60 cm pour toutes les hauteurs pour chacun des groupes, excepté pour la deuxième hauteur (3.5m).

* Triple interaction

L'analyse de variance pour les groupes GD1-GD2 montre une triple interaction groupe x distance x ordre de passage ($F_{4,100} = 162.69, p < .001$, figure 57).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent des différences significatives des EPM moyens à une hauteur avec ceux à la hauteur suivante, pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, excepté entre la quatrième (2.5m) et la dernière hauteur (1.5m) pour GD1 à 40 cm ($F_{1,25} = 1.54, p = .23$ n.s.). Ces analyses post-hoc montrent aussi que pour toutes les hauteurs l'EPM moyen d'un groupe à 40 cm est significativement différent de celui à 60 cm de la rampe.

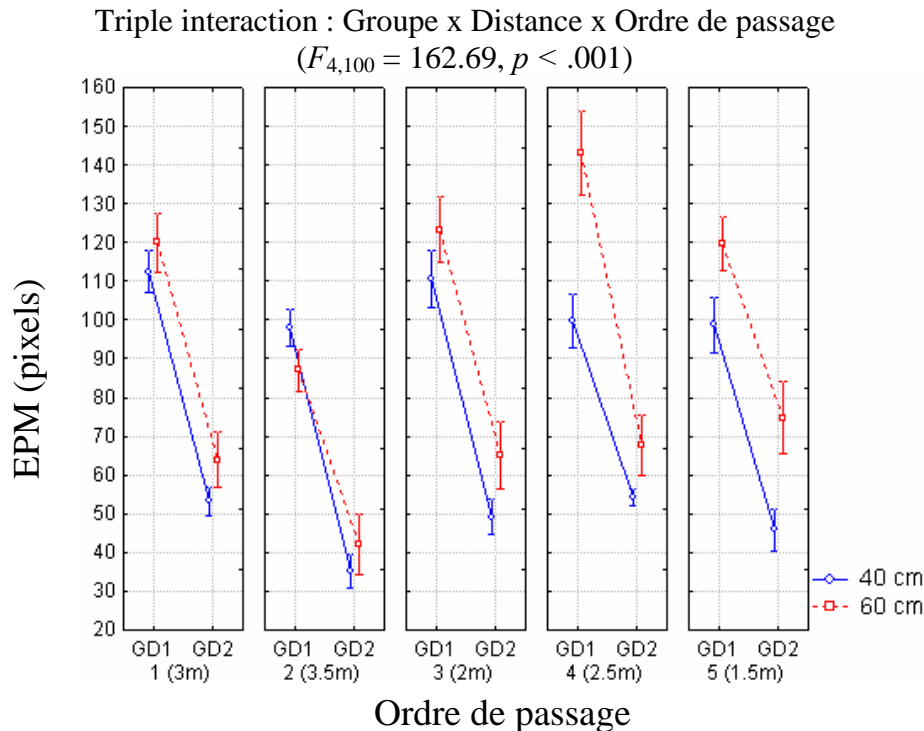


Figure 57. Présentation des écarts-types de la position de la main (EPM, pixels) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Groupes (GD1, partie gauche et GD2, partie droite) x Distance à la rampe (40 cm —○— et 60 cm -□-) x Ordre de passage (1^{er} graphe 1^{ère} hauteur (3m), 2^{ème} graphe 2^{ème} hauteur (3.5m), 3^{ème} graphe 3^{ème} hauteur (2m), 4^{ème} graphe 4^{ème} hauteur (2.5m) et 5^{ème} graphe 5^{ème} hauteur (1.5m).

* Résumé des triples interactions

La variabilité moyenne à une hauteur est significativement différente avec celle à la hauteur suivante, pour chaque groupe et pour chaque distance à la rampe, excepté, à 40 cm :

- entre la quatrième (2.5m) et la dernière (1.5m) hauteur pour GD1 et
- entre la troisième (2m) et la quatrième (2.5m) hauteur pour GD2.

La variabilité moyenne d'un groupe à 40 cm est significativement différente de celle à 60 cm de la rampe, pour toutes les hauteurs, excepté à la deuxième hauteur (3.5 m) pour FB où la variabilité moyenne est identique.

D- Discussion

L'expérience montre que la variabilité des positions de la main diminue à l'approche du contact entre la main et le ballon, quel que soit le groupe considéré, la distance à la rampe (40 cm et 60 cm) et la hauteur de chute du ballon. Il est à noter que la variabilité est plus faible à 40 cm qu'à 60 cm pour les trois groupes. Cette observation se traduit pour la distance à la rampe 60 cm par une " confusion " des deux premières phases (phase d'attente et phase de

placement de la main). Cette constatation peut s'expliquer par le fait qu'à 60 cm de la rampe, l'enfant place sa main au cours de son déplacement vers le ballon, ce déplacement n'existe pas pour les frappes à 40 cm de la rampe car les enfants frappent sans se déplacer. De plus, les résultats de notre expérience 2 ont montré que les temps de mouvement de la main ne sont pas dépendants de la distance à la rampe (40 cm ou 60 cm) ni de l'accroissement de la hauteur de chute du ballon (de 1.5 m à 3.5 m). La grande variabilité des positions de la main du début du mouvement de frappe pourrait être due à ce que le système moteur peut contrôler les mouvements d'atteinte en spécifiant en premier un pattern moteur primitif ou stéréotypé. Lorsque le participant réalise des visées manuelles, le système moteur abandonne le pattern moteur spatial en fin de mouvement, en faveur d'ajustements finaux lorsque la main approche de la cible (Haggard & Richardson, 1996). Dans notre expérience de frappe de ballon, les résultats montrent que les deux groupes qui réussissent (les enfants plus âgés), manifestent une variabilité des positions de la main plus faible que celui qui échoue (les plus jeunes enfants). L'explication peut être double, d'une part en référence à Haggard et Richardson (1996) cette différence de variabilité entre les deux groupes serait due au fait que les enfants les plus âgés, choisissent un pattern moteur primitif très proche de celui qui est nécessaire. Les plus jeunes, quant à eux, choisiraient un pattern primitif plus éloigné, qui nécessiterait un contrôle de la position de la main, par rapport à la cible, beaucoup plus important que pour le groupe qui réussit. D'autre part, cette différence de variabilité des positions de la main entre les groupes peut traduire le fait que les enfants les plus âgés utilisent mieux que les enfants plus jeunes les informations visuelles extrinsèques (distance et orientation de la cible). Les propriétés extrinsèques de l'objet sont nécessaires pour le transport de la main dans la bonne direction, dans une direction particulière et pour une distance particulière (Watt & Bradshaw, 2000).

Par ailleurs, une interprétation cognitive de cette différence de variabilité des positions de la main peut aussi signifier que les enfants qui réussissent utiliseraient un modèle interne " feedforward " du bras, pour obtenir des prédictions sur la position actuelle de la main, évitant les délais de " feed-back " qui servent à réduire certaines perturbations du pattern de mouvement planifié initialement. Enfin, ces enfants pourraient utiliser des " feed-back " kinesthésiques pour ajuster chaque mouvement individuel réalisé, en gardant ses patterns intrinsèques similaires au pattern moteur primitif. N'ayant pas de mesures kinesthésiques (activité électromyographique des muscles du bras qui frappe) cette dernière interprétation, de la variabilité plus faible dans les frappes manuelles des enfants les plus âgés, est à relativiser.

Notre étude a montré que la frappe tend à être réalisée sur un mode de contrôle prospectif, dont la variabilité temporelle diminue pendant l'exécution, comme dans les actions impliquant un couplage perceptif précis (Bootsma & Wieringen, 1990). Ensuite, la grande variabilité chez les enfants peut résulter de l'interaction entre l'habileté de perception et la coordination motrice (Starkes, 1986) où la variabilité du geste est inhérente à l'organisation du mouvement et ne peut être considérée comme du bruit informationnel. En effet, la variabilité existe pour tous les enfants, quel que soit l'âge, les plus âgés sont néanmoins plus stables dans les phases d'attente et de préparation du mouvement. Il est à noter que les enfants qui réussissent à frapper dès la première session ont une variabilité plus importante que ceux qui réussissent après pour les deux distances à la rampe. De plus, leur précision temporelle, définie par la variabilité au moment du contact, est plus faible que pour le groupe suivi longitudinalement. La diminution de la variabilité serait bien un critère d'analyse du développement de l'habileté d'interception qui existerait très précocement (dès 3 ans) et qui évoluerait au cours du développement par la pratique de diverses habiletés dont celle d'interception. Dans ce critère d'analyse, la précision temporelle, c'est-à-dire la variabilité la plus faible au moment du contact, serait le reflet du niveau d'habileté. L'étude de la variabilité des positions de la main et de sa précision temporelle, lors de la session réalisée six mois après, avec les enfants qui ont réussi dès la première session, serait la résultante d'une variabilité plus faible au cours de la phase d'attente et de la phase du placement de la main, suivie par une variabilité diminuant de manière continue entre le moment de déclenchement de la frappe jusqu'au moment du contact avec le ballon.

Le progrès serait lié à l'augmentation de la stabilité au cours de ces deux phases. La diminution de la variabilité pourrait donc être utilisée comme descripteur du développement des habiletés d'interception.

Expérience 2 – Étude 2

Étude longitudinale, chez les enfants de 3 à 4 ans, du contrôle de la frappe manuelle d'un ballon et de la coordination des articulations.

V- Expérience 2- Étude 2 : Étude longitudinale, chez les enfants de 3 à 4 ans, du contrôle de la frappe manuelle d'un ballon et de la coordination des articulations.

Dans la première partie de l'expérience 2, la coordination entre la perception visuelle et l'action manuelle, chez les enfants de 3 à 4 ans, a montré un fort couplage temporel. Le mouvement humain est une propriété émergente qui découle de l'agencement des nombreux degrés de liberté afin de réaliser une tâche donnée. Mais, si l'agencement des articulations est une contrainte pour le système, c'est l'interrelation du système avec l'environnement qui permet l'émergence d'une coordination

A- Introduction

Un haut niveau de coordination exprime un haut niveau de maîtrise de l'habileté motrice. Bernstein (1967) a défini la coordination comme la résolution du problème de la maîtrise simultanée de très nombreux degrés de liberté impliqués dans un mouvement particulier. L'agencement des degrés de liberté représente une contrainte pour le système. En effet, une réduction trop importante des degrés de liberté ne permet plus aux solutions adoptées par le contrôle moteur d'être flexibles et adaptées aux variations des conditions environnementales. Un couplage temporel strict, entre les degrés de liberté anatomiquement indépendants, diminue de manière drastique la complexité du contrôle du mouvement pour le système, en diminuant le nombre de paramètres indépendants qui doivent être contrôlés par celui-ci (Desmurget & Prablanc, 1997).

Le participant, lors de la réalisation d'un mouvement, doit coordonner les différentes articulations et donc les degrés de liberté. La posture adoptée n'est pas une configuration particulière du corps, elle n'a de sens et ne se définit que par la réponse imminente qu'elle annonce.

L'habileté motrice de frappe nécessite la coordination de nombreuses articulations, considérées en termes de degrés de liberté. L'ontogenèse des habiletés motrices peut être considérée comme l'accroissement du nombre des degrés de liberté mis en jeu car la coordination des articulations et des segments se fait en relation avec l'activité posturale, la dimension de préparation et de l'anticipation (Keller, 1992). Il ressort de la revue de question de Bertenthal et von Hofsten (1998), sur le développement des habiletés d'atteinte manuelle (chez le bébé jusqu'à l'enfant de 9 mois en position assise), que celui-ci implique un apprentissage pour satisfaire les demandes duelles de posture et de mouvement de stabilisation du tronc (cadre de référence) permettant la conduite de la main vers la cible. Cet

apprentissage est indispensable car le tronc participe souvent dans les actions de saisie. Le développement des habiletés de saisie dépend de différents facteurs : la perception de la distance à l'objet, l'apprentissage du déploiement de la force musculaire, la coordination des différents segments corporels avec d'autres facteurs biomécaniques, tels la gravité et la dynamique entre les segments, la sélection de la main qui saisira l'objet (Bertenthal & von Hofsten, 1998). Que ce soit dans les saisies ou les frappes manuelles, la relation entre les différents segments corporels et l'objet est en continuel changement pendant ces actions. Ces activités sont nécessairement un processus dynamique ayant besoin d'une prise en compte mutuelle et réciproque des actions et des informations pertinentes.

Notre expérience 2 a montré que la variabilité de la main diminue à l'approche du contact avec le ballon pour toutes les hauteurs de chute du ballon et quel que soit l'âge. Cette diminution a été observée quelle que soit la stratégie de frappe utilisée par l'enfant.

Par rapport à l'observation de variabilité de la main et de différents comportements de frappe nous avons cherché à déterminer s'il existait des points communs, des invariances, telle que des structures coordinatrices pour tous les sujets définies par les conditions de réalisation (environnementales et les contraintes de la tâche). Afin de le vérifier, les temps d'initiation des différentes articulations des membres inférieurs, de l'épaule, de la main, le moment du contact et de la pose du pied, ont été comparés dans le cas de frappes manuelles d'un ballon chez des enfants de 3 et 4 ans.

B- Méthode

1- Recueil des données

Dans cette étude nous n'avons utilisé que les sessions de film de la deuxième expérience où les enfants se trouvaient à 60 cm de la rampe. Ce choix a été réalisé parce que les enfants à la distance à la rampe 40 cm n'effectuaient pas (ou rarement) un pas pour frapper le ballon.

2- Les variables étudiées

Les variables dépendantes étudiées étaient :

- Le temps de déclenchement de la main (TDM) correspond au temps de déclenchement du mouvement de frappe. Ces temps ont été obtenus à partir des courbes d'accélération de la main. Lors de la visualisation des films nous avons observé que les enfants effectuaient des mouvements de la main d'avant en arrière au cours de la frappe du

ballon. Nous avons décidé de prendre le moment où la main se dirige d'un mouvement continu vers le ballon comme le moment du début du mouvement. Ce moment correspond au dernier pic de la courbe d'accélération $|A|$ de la main avant le contact (figure 21, p.96).

- Le temps déclenchement de chacune des articulations des membres inférieurs [pieds (TDP), genoux (TDG) et hanches (TDH)]. Les temps ont été obtenus à partir des courbes d'accélération de chaque articulation. Le point de début du mouvement des articulations a été défini comme le point où s'effectuait le premier changement de signe de la courbe d'accélération de l'articulation en fonction du premier déplacement du point sur l'image. Déclenchement qui a été pris selon que l'enfant ne faisait qu'un seul pas (ipsi ou controlatéral) ou plusieurs.

- Le temps de déclenchement de l'épaule du bras qui frappe (TDE). Les temps ont été obtenus à partir des courbes d'accélération de l'articulation. Le point de début du mouvement a été défini comme le point où s'effectuait le dernier changement de signe de la courbe d'accélération de l'articulation avant le contact.

- Le temps de la pose du pied (TPP). Les temps ont été obtenus à partir des courbes d'accélération du pied. Le point de fin du mouvement du pied a été défini comme le point où s'effectuait le changement de signe de la courbe d'accélération de l'articulation en fonction de la pose du pied sur l'image. Pose qui a été prise selon que l'enfant ne faisait qu'un seul pas (ipsi ou controlatéral) ou plusieurs. Dans le cas où l'enfant a effectué plusieurs pas, le temps de pose du pied correspond, au moment de la pose du pied du dernier pas réalisé.

- Le temps de contact de la main avec le ballon (TCMB). Les temps correspondent au moment du contact entre la main et le ballon.

Les temps sont exprimés en millisecondes (ms).

3- Analyses statistiques

Le traitement statistique des données a été réalisé au moyen du logiciel Statistica 6.0 sur un PC.

Quand l'enfant réalise plusieurs pas avant de frapper ce sont les temps correspondant au dernier pas avant la frappe qui ont été utilisés.

Nous avons conduit, une analyse de variance à mesures répétées à 2 facteurs : Articulations à 5 niveaux (pied, genou, hanche, épaule et main) et Hauteurs à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) pour mettre en évidence les effets des contraintes de la tâche sur les variables dépendantes [temps de déclenchement de la main (TDM) et des différentes articulations, temps de pose du pied (TPP) et temps de contact main-ballon (TCMB)]. Une

analyse à posteriori " post-hoc ", des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, est réalisée dans le but de mettre en évidence la signification des variations par paire.

Le seuil de significativité est fixé à une valeur de probabilité d'hypothèse nulle $p < .05$. Dans les tableaux, les valeurs de cette probabilité sont indiquées par un astérisque (*).

C- Résultats

Les données ont été prélevées à partir des mêmes sessions

- la première session pour les enfants qui réussissent dès la première fois (FB),
- la deuxième session pour ceux qui échouent (GD1)
- et la session pour laquelle les enfants du groupe GD1, réussissent toutes les frappes (GD2), la troisième ou la quatrième session.

Se rapporter à l'annexe 6 pour le détail des temps de déclenchement de la main (TDM), des temps de déclenchement de chacune des articulations des membres inférieurs [pied (TDP), genoux (TDG) et hanche (TDH)], des temps de déclenchement de l'épaule, des temps de la pose du pied (TPP), et des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB).

1- Temps d'initiation des articulations et hauteurs de chute du ballon

a- Présentations des moyennes et des écarts-types

Articulations									
Pied (n= 14)		Genou (n= 14)		Hanche (n= 14)		Épaule (n= 14)		Main (n= 14)	
Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
770	350.67	820	365.71	848	375.45	940	410.13	1122	399.19

Tableau 17. Moyennes et écarts-types des temps de déclenchement des articulations (pied, genou, hanche, épaule et main, ms). N = effectif.

Hauteurs de chute du ballon (m)											
		1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
Articulations	n	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
Pieds	14	298	241.07	658	219.54	811	177.14	905	278.71	1129	184.07
Genou	14	360	258.59	730	260.21	813	214.85	977	290.13	1180	204.20
Hanche	14	367	237.84	748	264.72	886	265.88	984	295.63	1223	191.98
Épaule	14	445	208.21	742	281.96	938	237.69	1188	222.39	1385	265.76
Main	14	560	182.46	915	164.75	1152	185.39	1412	91.01	1591	128.96

Tableau 18. Moyennes et écarts-types des temps de déclenchement des articulations (pied, genou, hanche, épaule et main, ms) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

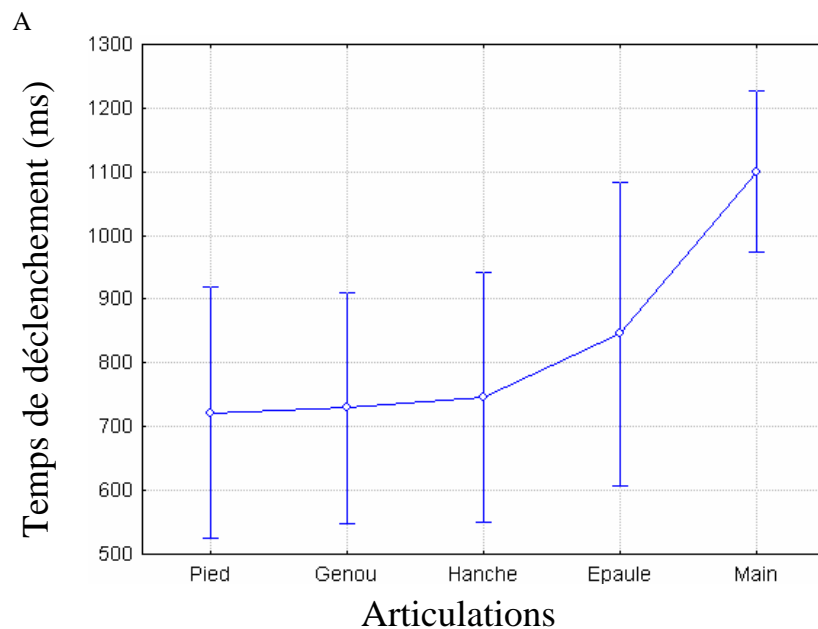
b- Analyse de variance à mesures répétées

Une analyse de variance à mesures répétées à 2 facteurs : Articulations à 5 niveaux (pied, genou, hanche, épaule et main) et Hauteurs à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m), a été réalisée pour déterminer l'effet de ces deux facteurs et leur interaction sur les temps de déclenchement des articulations.

*** Effets globaux**

L'effet de l'articulation est significatif ($F_{4,32} = 32.41$, $p < .001$, figure 59A). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent une différence significative de tous les temps moyens de déclenchement des articulations entre elles, excepté entre le pied et le genou, dont la différence entre les temps de déclenchement n'est pas significative ($F_{1,32} = .65$, $p = .65$ n.s.).

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif ($F_{4,32} = 36.58$, $p < .001$, figure 59B). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les temps moyens de déclenchement d'une hauteur sont significativement plus petits que ceux de la hauteur immédiatement supérieure et ceci pour toutes les hauteurs.



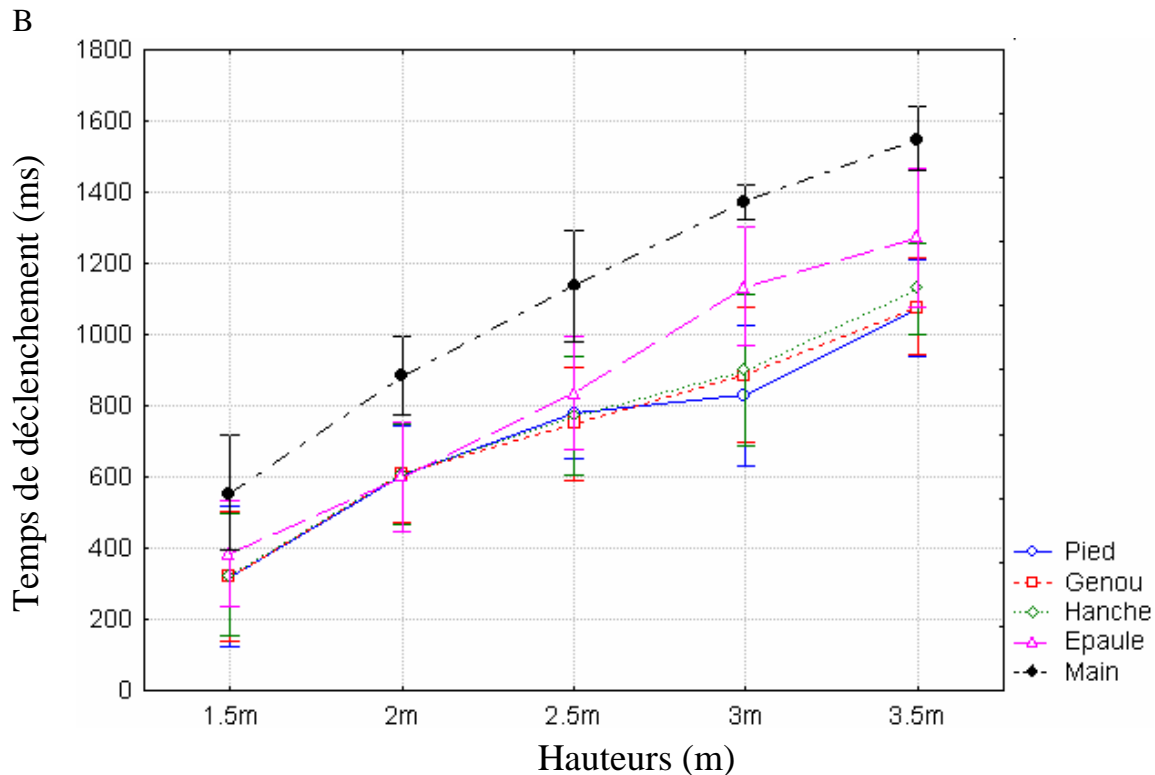


Figure 59. Temps moyens de déclenchement (ms) et erreurs-types des articulations. *Graphe A* : Temps moyens de déclenchement (ms) et erreurs-types des articulations du membre inférieur, de l'épaule et de la main au cours de la frappe. Le déclenchement du pied est antérieur à tous les autres qui se réalisent en cascade du pied jusqu'à la main. Le déclenchement de la main s'effectuant en dernier. *Graphe B* : Temps moyens de déclenchement (ms) et erreurs-types des articulations en fonction de la hauteur (m) de chute du ballon. Les temps de déclenchement augmentent comme la hauteur de chute du ballon augmente.

* Double interaction

L'effet de l'articulation est modulé par le facteur hauteur, par l'interaction significative articulations x hauteur ($F_{16,128} = 2.78$, $p < .001$) sur les temps de déclenchement des différentes articulations considérées.

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que : (tableau 19)

- Pour la hauteur 1.5m, il n'y a aucune différence significative entre les temps de déclenchement moyen de toutes les articulations considérées. Toutes les articulations se déclenchent en même temps pour les frappes à 1.5m.

- Pour les hauteurs 2m et 2.5m, il y a des différences significatives, entre les temps moyens de déclenchement du pied et de la main (respectivement $F_{1,8} = 17.60$, $p < .01$ et $F_{1,8} = 40.64$, $p < .001$) et entre ceux de l'épaule et de la main (respectivement $F_{1,8} = 20.29$,

$p < .001$ et $F_{1,8} = 23.59$, $p < .001$). Le déclenchement de la main s'effectue après celui du pied et de l'épaule. Le déclenchement du pied s'effectue en premier.

- Pour la hauteur 3m, il y a des différences significatives, entre les temps moyens de déclenchement du pied et de la main ($F_{1,8} = 40.93$, $p < .001$), entre ceux de l'épaule et de la main ($F_{1,8} = 14.48$, $p < .01$) et entre les temps de déclenchement du pied et de l'épaule ($F_{1,8} = 8.65$, $p < .05$). Pour la hauteur 3m, la main et l'épaule sont dissociées entre elles et leur déclenchement s'effectue après celui du pied.

- Pour la hauteur 3.5m, il n'y a que les temps moyens de déclenchement du pied et du genou qui ne sont pas significativement différents ($F_{1,8} = 12.30$, $p = .69$ n.s.). Toutes les articulations ont des temps de déclenchement différents, excepté le pied et le genou qui ont des temps moyens de déclenchement qui ne sont pas différenciés.

Hauteurs et articulations	p (Pied-Genou)	p (Pied-Hanche)	p (Pied-Epaule)	p (Pied-Main)	p (Genou-Hanche)	p (Epaule-Main)
1.5m	1.00	.85	.16	.05	.76	.11
2m	.83	.92	.89	.01*	.81	.001*
2.5m	.09	.71	.26	.001*	.16	.001*
3m	.38	.31	.01*	.001*	.63	.01*
3.5m	.69	.01*	.05*	.001*	.01*	.01*

Tableau 19. Récapitulatif des p des analyses post-hoc de l'interaction significative articulations x hauteur ($F_{16,128} = 2.78$, $p < .001$) sur les temps de déclenchement des différentes articulations considérées. Où les valeurs significatives sont marquées par un astérisque (*).

*** Résumé de la double interaction**

L'effet de l'articulation est modulé par le facteur hauteur, par l'interaction significative articulations x hauteur sur les temps de déclenchement des différentes articulations considérées.

Pour la hauteur 1.5m, il n'y a aucune différence significative entre les temps moyens de déclenchement de toutes les articulations considérées.

Pour les hauteurs 2 m et 2.5 m, il y a des différences significatives, entre les temps moyens de déclenchement de la main avec ceux du pied et de l'épaule.

Pour la hauteur 3 m, il y a des différences significatives, entre les temps moyens de déclenchement de la main et ceux du pied et de l'épaule. Les temps moyens de déclenchement du pied et de l'épaule sont significativement différents.

- Pour la hauteur 3.5 m, les temps moyens de déclenchement de toutes les articulations sont significativement différents, exceptés ceux du pied et du genou.

2- Régressions linéaires : Evolution des temps de déclenchement du pied selon la durée de chute du ballon

L'analyse précédente a montré que le geste de la frappe est initié par le pied pour toutes les hauteurs excepté pour 1.5m. De plus dans notre deuxième expérience, il a été montré que le temps de déclenchement de la main (TDM) est lié à la durée de chute du ballon. Le temps de déclenchement du pied (TDP) semble intuitivement lié à la durée de chute du ballon. C'est pourquoi afin de vérifier s'il existe un lien entre la durée de chute du ballon et le TD du pied, nous avons réalisé une régression linéaire sans les TDP à 1.5m.

L'analyse de régression linéaire a été effectuée pour les TDP étudiés précédemment :

- Les TDP des essais de frappe aux hauteurs 2m à 3.5m sont significativement corrélés avec le durée de chute du ballon, à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = .65x - 50$, $R^2 = .51$, $p < .001$) (figure 60),

L'analyse de régression linéaire montre un coefficient de corrélation dont le seuil de significativité est inférieur à .001. Elle démontre une forte association entre la variation du temps de déclenchement du pied (TDP) et la durée de chute du ballon. L'évolution du TDP est liée de manière linéaire à la durée de chute du ballon. Plus la hauteur de chute du ballon augmente, plus le TDP est grand, plus la frappe est déclenchée tardivement.

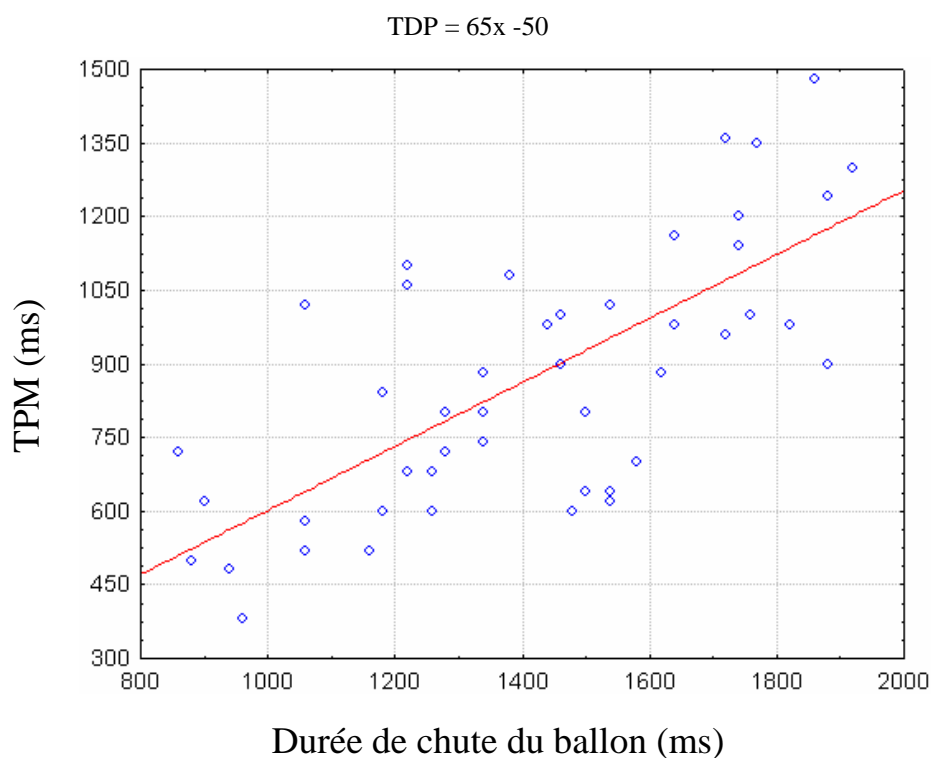


Figure 60. Régression linéaire des temps de déclenchement du pied (TDP, ms) pour les hauteurs 2m à 3.5m, en fonction de la durée de chute du ballon (ms). Le régression linéaire est : $Y_{TDP} = 65x - 65$.

3- Temps de déclenchement de la main (TDM), temps de la pose du pied (TPP) et temps du contact de la main avec le ballon (TCMB)

a- Présentations des moyennes et des écarts-types

Articulations					
Main (n= 14)		Pose du pied (n= 14)		Contact Main-Ballon (n= 14)	
Moyennes	Ecarts-types	Moyennes	Ecarts-types	Moyennes	Ecarts-types
1122	399.19	1227	381.67	1296	391.53

Tableau 20. Moyennes et écarts-types des temps de déclenchement de la main (ms), de la pose du pied (ms) et du moment du contact main-ballon (ms). N = effectif.

Hauteurs de chute du ballon (m)											
		1.5m		2m		2.5m		3m		3.5m	
Articulations	n	Moyennes	Ecarts-types	Moyennes	Ecarts-types	Moyennes	Ecarts-types	Moyennes	Ecarts-types	Moyennes	Ecarts-types
Main	14	560	182.46	915	164.75	1152	185.39	1412	91.01	1591	128.96
Pose du pied	14	650	264.37	1047	139.22	1268	129.74	1389	226.34	1648	166.83
Contact	14	724	169.74	1098	142.17	1320	151.91	1562	92.11	1776	115.00
Main-Ballon											

Tableau 21. Moyennes et écarts-types des temps de déclenchement de la main (ms), de la pose du pied (ms) et du moment du contact main-ballon (ms) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = effectif.

b- Analyse de variance à mesures répétées

Une analyse de variance à mesures répétées : Périodes à 3 niveaux (déclenchement de la main, pose du pied et contact) x Hauteurs à 5 niveaux (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m) a été réalisée pour déterminer l'effet de ces deux facteurs et leur interaction sur les temps de déclenchement de la main (TDM), de pose du pied (TPP) et de contact de la main avec le ballon (TCMB).

*** Effets globaux**

L'effet de la période est significatif ($F_{2,14} = 9.61$, $p < .01$, figure 61A). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent que les TDM moyens et les TPP moyens ne sont pas significativement différents ($F_{1,7} = 3.08$, $p = .12$ n.s.), ni les TPP moyens et TCMB moyens ($F_{1,7} = 4.54$, $p = .07$ n.s.). Par contre les TDM moyens et les TCMB moyens sont significativement différents ($F_{1,7} = 56.92$, $p < .001$). Le contact main-ballon est effectué après le déclenchement de la main et la pose du pied est simultanée au déclenchement de la main.

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif ($F_{4,28} = 70.45$, $p < .001$, figure 61B). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de

comparaison planifiée, montrent que les temps de déclenchement d'une hauteur sont significativement plus petits que ceux de la hauteur immédiatement supérieure et ceci pour toutes les hauteurs.

L'interaction période x hauteur de chute du ballon n'est pas significative ($F_{8,56} = .64, p = .74 n.s.$).

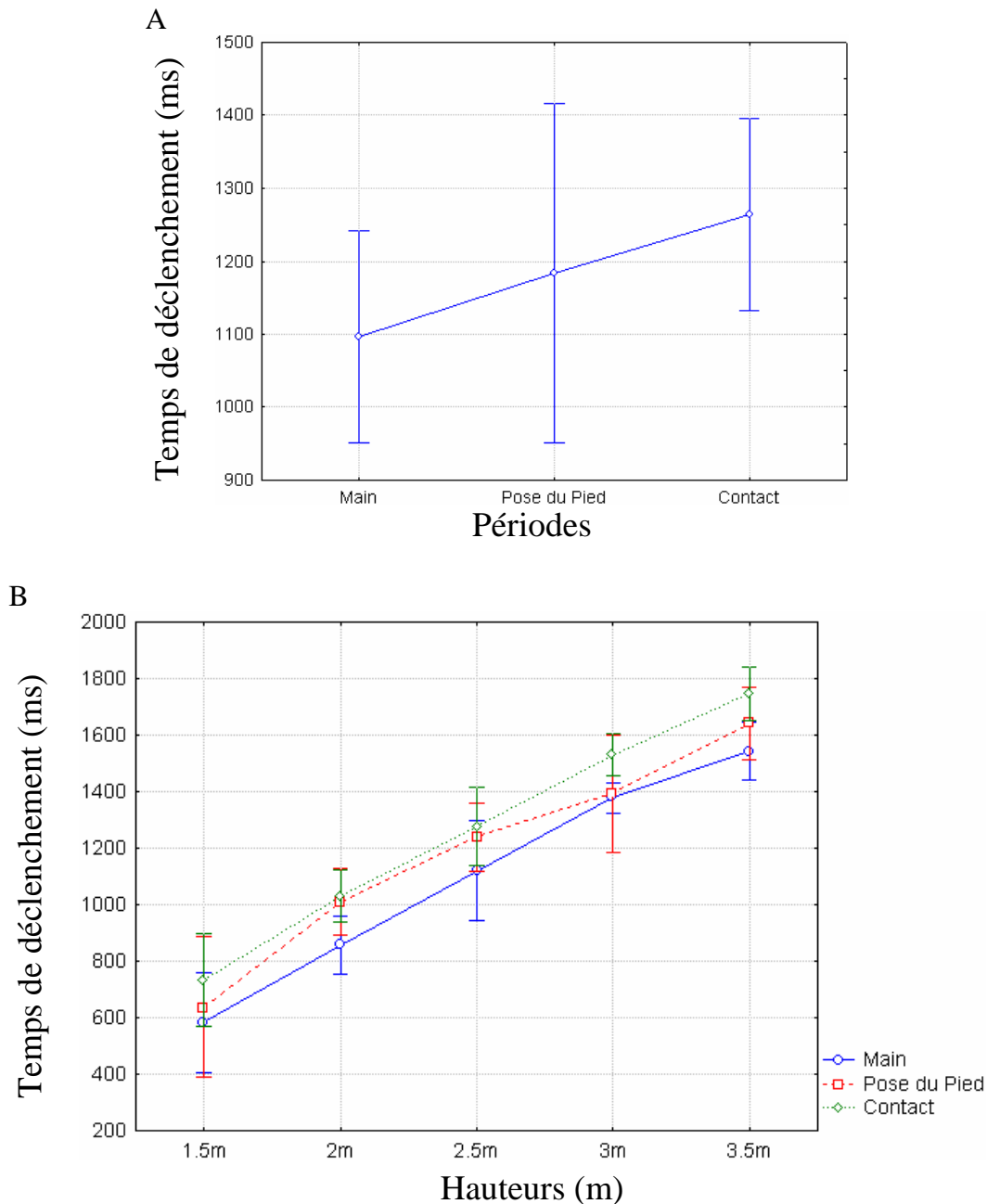


Figure 61. Temps moyens (ms) de déclenchement de la main (TDM), de la pose du pied (TPP) et de la contact de la main avec le ballon (TCMB). *Grappe A* : TDM moyen (ms), TPP moyen (ms) et TCM moyen (ms) au cours de la frappe. Le TDM moyen est antérieur au TPP moyen, lui-même antérieur au TCMB moyen. *Grappe B* : TDM moyen (ms), TPP moyen (ms) et TCMB moyen (ms) au cours de la frappe et en fonction de la

hauteur de chute du ballon (m). Pour toutes les hauteurs, le TDM moyen est antérieur au TPP moyen, lui-même antérieur au TCMB moyen. Les temps augmentent comme la hauteur de chute du ballon augmente.

* **Résumé**

Les TDM moyens et les TCM moyens sont significativement différents. Les temps de déclenchement augmentent avec l'accroissement de la hauteur.

D- Discussion

En ce qui concerne le développement, Assaiante et Amblard (1998) ont élaboré un modèle d'interprétation de l'ontogenèse des stratégies d'équilibre de la naissance à l'âge adulte. Ce modèle fonctionne suivant deux principes : le premier est le choix du référentiel à partir duquel est organisée la posture. Le sujet peut assurer son équilibre sur un mode ascendant (des pieds à la tête), fondé sur la proprioception ou sur un mode descendant (de la tête aux pieds) axé sur les informations visuelles. Le deuxième principe est la maîtrise des degrés de liberté des différentes articulations du corps, en particulier de l'ensemble tête-tronc, qui fonctionne soit en bloc, soit de manière dissociée.

Organisation ascendante du mouvement, degrés de liberté et hauteurs

Nos résultats montrent que le déclenchement de la main s'effectue significativement toujours après le déclenchement du membre inférieur. Le pied et le genou se déclenchent simultanément avant la hanche, elle-même se déclenchant avant l'épaule (pour les hauteurs, 2.5, 3 et 3.5 m). Cette organisation temporelle ascendante se rapproche de celle du contrôle de la posture et du mouvement décrite chez le jeune enfant par plusieurs auteurs : par Assaiante et Amblard (1993, 1998 ci-dessus) dans le cas du contrôle de l'équilibre et lors de la locomotion, par Jensen (1994) dans le saut et par Whitall (1989) dans la course.

Cette organisation temporelle apparaît pour toutes les frappes, quel que soit l'âge et quelles que soient la distance à la rampe (40 cm – 60 cm) et pour les quatre plus hautes hauteurs. Ce sens de l'organisation est le même que celui observé quand le sportif est en appui sur ces jambes. Cette synchronisation est un facteur essentiel de l'efficacité motrice souvent évoqué dans les problèmes de rythme dans les activités physiques et sportives (Keller, 1992). Il est étonnant de retrouver une telle organisation étant donné le jeune âge des enfants. Il pourrait s'agir d'une loi d'organisation interne, qui serait effective à partir du moment où l'enfant serait en position debout et que l'équilibre postural serait acquis.

Les enfants montrent, de plus, des patterns de coordinations qui varient en fonction des hauteurs de chute du ballon. En effet, une dissociation au niveau du temps d'initiation des différentes articulations du membre inférieur apparaît pour les trois hauteurs les plus élevées (2.5, 3 et 3.5 m). Ces patterns de réponse sont observés chez tous les enfants, quelle que soit la forme de la frappe (par au-dessus ou par en dessous) et indépendamment du nombre de pas que l'enfant effectue avant de frapper. Par contre, à 1.5 m et 2 m, la dissociation disparaît, pour laisser place à un pattern de réponse " en bloc ". Ce pattern se manifeste par une minimisation du nombre des degrés de liberté, devant être contrôlés durant la frappe.

Cette variation de patterns de coordination (en bloc ou dissocié) peut être explicitée en appliquant le principe de la théorie de la régression au développement, où face à la complexité de la situation, l'enfant est contraint de revenir à un stade inférieur (ici la frappe en bloc). En effet, la pression temporelle est très forte à 1.5 m et 2 m, ce qui complexifie la tâche, l'enfant est dans l'obligation d'engager la totalité de son corps en bloc et donc de réduire les degrés de liberté. Avec l'augmentation de la hauteur de chute du ballon, la durée de chute de celui-ci augmente, la pression temporelle diminue, le déclenchement du geste est retardé. En fait, lorsque la hauteur de chute augmente, la complexité diminue et l'enfant peut alors manifester une organisation des coordinations plus élaborée, qui se traduit par une augmentation du nombre de degrés de liberté lors du contrôle du mouvement. Enfin, l'observation des films de notre étude montre deux types de stratégie utilisés par rapport à la main de frappe : l'une avec un pas ipsilatéral par rapport à la main de frappe et l'autre avec un pas controlatéral. La stratégie majoritaire est celle du pas ipsilatéral juste avant la frappe du ballon.

En résumé, pour les enfants de 3 à 4 ans, l'organisation du contrôle articulaire de la frappe manuelle est dynamique. Le mode de contrôle (en bloc ou dissocié) de cette organisation est déterminée par les contraintes de la tâche.

Expérience 3

**Étude de l'effet du changement de taille du ballon
sur la frappe manuelle.**

VI- Expérience 3 : Étude de l'effet du changement de taille du ballon sur la frappe manuelle.

Un des objectifs de notre travail est de tester notre hypothèse que le développement des habiletés motrices serait la conséquence de l'inhibition de schèmes non pertinents. Dans notre première expérience, utilisant le paradigme de l'interférence rétroactive, nous avons montré que le processus d'activation-inhibition influence le contrôle moteur dans le cas de renvoi de balle avec raquette. Mais nous n'avons pas trouvé que cette influence était d'autant plus importante que l'enfant soit âgé. Pour Visser (1993) l'amorçage négatif (negative priming) étant une mesure plus sensible que l'effet d'interférence, nous avons décidé d'éprouver la fonctionnalité du processus d'activation-inhibition sur le contrôle moteur d'une tâche perceptivo-motrice chez des enfants de moins. Dans cette perspective, il fallait tout d'abord définir si ces enfants étaient capables de frapper un mobile vers une cible, car pour Kay (1970) les enfants avant cinq ans n'ont pas de capacités d'anticipation-coïncidence. Ayant montré, dans l'expérience 2, que les enfants dès 3 ans sont capables de frapper un ballon tombant vers eux, nous pouvons mettre en place cette troisième expérimentation qui utilise le paradigme de l'amorçage négatif

Les paradigmes de l'amorçage mettent en compétition deux stimuli dont l'un doit être ignoré. Tipper (1985) a introduit la notion d'amorçage négatif. Le mécanisme d'amorçage (priming) a un effet facilitateur grâce à un effet attendu alors que l'amorçage négatif traduit un effet inhibiteur par un stimulus qui est (a priori) ignoré. Le stimulus pertinent ("prime") dans une première étape devient le stimulus non-pertinent ("probe") dans la série suivante. Les paradigmes de l'amorçage ayant été mis en jeu dans le cadre d'expériences perceptives (Tipper, 1985, 1992 ; Treisman, 1992) nous avons décidé de tester la situation d'amorçage négatif en manipulant la variable perceptive dans le cadre d'une frappe de ballon. La variable perceptive choisie est la taille du ballon, ce choix a été réalisé en référence à l'approche écologique sur la perception et aux résultats de notre deuxième expérience.

A- Introduction

Le temps d'arrivée d'un mobile est directement disponible dans la variable optique tau (Lee, 1976, 1980) déterminée ici par la balle. Mais, ce facteur ne constitue qu'un aspect de l'environnement et l'effet du contexte " total " n'est pas mis en jeu, s'il ne se limite qu'à la balle. La préparation de la réponse motrice est influencée par :

- la taille de la cible vers laquelle le mouvement est dirigé,

- la distance et la direction de la cible à partir de sa position de départ,
- et le membre qui a été choisi pour réaliser l'action (Lee, Elliott & Carnahan, 1987).

Dans le cas des saisies, l'ouverture de la main est conforme aux caractéristiques de l'objet à saisir, la taille de l'objet influence l'ouverture de la main (von Hofsten & Rönqvist, 1988 ; Savelsbergh et coll., 1991). Todd (1981) a voulu déterminer les informations visuelles qui étaient importantes dans la détermination du lieu d'arrivée d'un objet qui tombe. Les sujets devaient observer des simulations d'objet carré (représenté par des points) s'approchant d'eux, selon une trajectoire parabolique, sur un écran d'ordinateur, à 72 cm. Les objets se déplaçaient selon des vitesses différentes, avaient des tailles différentes et les sujets devaient dire, si les objets allaient tomber devant eux ou juste au point d'observation. Lorsque l'objet se trouve réduit à un point, l'habileté des sujets à prédire le lieu d'arrivée de celui-ci se trouve fortement diminuée. Dans cette condition, les sujets n'ont que 64 pour-cent de prédictions correctes au lieu de 83 et 95 pour-cent, dans les conditions où la taille et l'accélération de l'objet sont disponibles. Les 95 pour-cent sont obtenus dans la condition où la taille de l'objet change au fur et à mesure de son déplacement. De plus, les sujets, lors de la verbalisation de la stratégie utilisée (taux d'expansion ou accélération de l'objet), ont expliqué qu'ils décidaient sur le taux d'expansion juste avant la fin de la simulation et non sur l'accélération du mobile. Todd (1981) conclut que c'est l'information, concernant le changement de taille de l'objet (c'est-à-dire sur le taux d'expansion optique), qui est nécessaire pour juger précisément du lieu d'arrivée d'un mobile.

Savelsbergh et coll. (1991) dans leur expérience de capture de balle de diamètre différent (le ballon de baudruche se dégonfle pendant l'approche), ont émis l'hypothèse que la fermeture des mains s'effectue par rapport aux indices visuels. Si l'information utilisée pour le timing de l'action de fermeture des doigts était effectivement τ , les sujets devraient fermer les doigts, pour la balle se dégonflant pendant l'approche, plus tard relativement à la fermeture pour les balles de taille constante. Ce retard dans la fermeture des doigts est dû à ce que le taux relatif de " dilatation " devrait spécifier un temps au contact plus long. Ces auteurs ont trouvé, que pour les balles de petites tailles, il y a déclenchement de la fermeture de la main plus tôt (-60 ms du contact) que pour celles de grande taille pour lesquelles il a lieu plus tard (-40 ms du contact). Que ce soit sous vision monoculaire ou binoculaire, la coïncidence est significativement plus tardive pour la balle se dégonflant que pour les balles de taille constante (Savelsbergh et coll., 1991). Le ballon se dégonfle à 100 ms de l'attraper si l'adaptation était due à une régulation cognitive, le déclenchement de la fermeture de la main aurait été engagé à 200 ms, il n'aurait pu y avoir d'adaptation. Or, il y a un changement il

s'agit d'une régulation visuelle. La coïncidence est donc basée sur le taux de " dilatation " perçu du contour optique généré par la balle en approche (Bootsma & Peper, 1992). Bien que les balles aient des diamètres différents, ces auteurs ont montré que les écartements pouce et index variaient en fonction de ces différents diamètres. Le patron de fermeture s'adapte en fonction du diamètre de la balle, la conclusion de cette étude est qu'il y a une adaptation continue du geste et cette adaptation est due au couplage perception-action.

Nos études sur la régulation de la frappe, la variabilité et la coordination ont montré que le mouvement de frappe est régulé par le couplage perception-action, et que le contexte influence l'organisation articulaire.

Dans le but de mettre en jeu le paradigme de l'amorçage négatif et de déterminer si le processus d'activation-inhibition intervient dans la perception du mobile et dès lors, dans quelle mesure il influence le mouvement de frappe nous avons utilisé le même protocole que dans notre deuxième expérience en modifiant la taille du ballon et la position de la rampe par rapport à l'enfant. Un changement dans la taille du ballon, au cours de son approche, devrait conduire à un temps de déclenchement plus tardif et une durée de mouvement plus longue à la différence d'une situation " naturelle " (ou écologique), où l'objet conserve une taille constante, alors que la distance de l'objet et la taille de son image rétinienne sont changées. Afin de le vérifier, les temps de déclenchement, de mouvement et de contact de la main, ainsi que les écarts entre la main et le ballon au moment du contact, ont été comparés.

B- Méthode

1- Participants

Huit enfants, dont cinq de l'expérience précédente, d'une école maternelle de la région parisienne (4 garçons et 4 filles) ont participé à l'expérimentation. L'expérience a eu lieu sous le préau de l'école des enfants.

Ces enfants étaient âgés de 4 ans ($M = 4$ ans, ± 3 mois).

2- Matériel expérimental

Un ballon, de 24 cm de diamètre et pesant 30g, était lâché par l'expérimentateur du haut d'une rampe inclinée à 45° (même rampe que dans l'expérience 2). Le ballon était lâché de 2, 2.5, 3 et 3.5m. L'ordre des lâchés est le même que dans l'expérience 2 et a toujours été le même pour tous les enfants.

Dans le but de voir si la modification de l'environnement a bien une influence sur le mouvement réalisé, la position de la rampe par rapport à l'enfant et la taille du ballon ont été modifiées.

Tout d'abord en ce qui concerne la position de l'enfant par rapport à la rampe. L'enfant a été positionné soit perpendiculairement à la rampe (figure 62A) soit face à la rampe (figure 62B). L'endroit du lâché n'a pas été masqué. L'expérimentateur se trouvait du côté opposé à l'enfant par rapport à la rampe, dans le cas où l'enfant est de côté par rapport à celle-ci (figure 63A). L'expérimentateur se trouvait du côté opposé de la rampe par rapport au caméscope, dans le cas où l'enfant est face à la rampe (figure 63B).

Les gauchers étaient placés à droite de la rampe, les droitiers à gauche dans la condition où ils se trouvent de côté par rapport à celle-ci.

Les frappes étaient orientées vers un cerceau situé à 2 m du milieu de la rampe à 1 m du sol. La consigne donnée aux enfants était d'envoyer le ballon, dans le cerceau, avant qu'il ne touche le sol.

Pour le ballon, dans la condition où il se dégonfle au cours de sa chute, l'embout du ballon était ouvert pour que l'air s'échappe au cours de la chute du ballon.

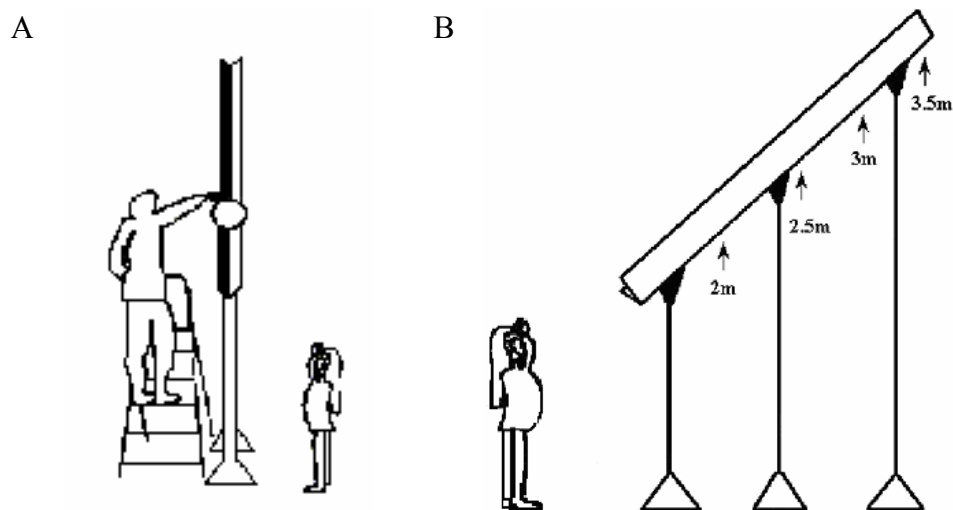
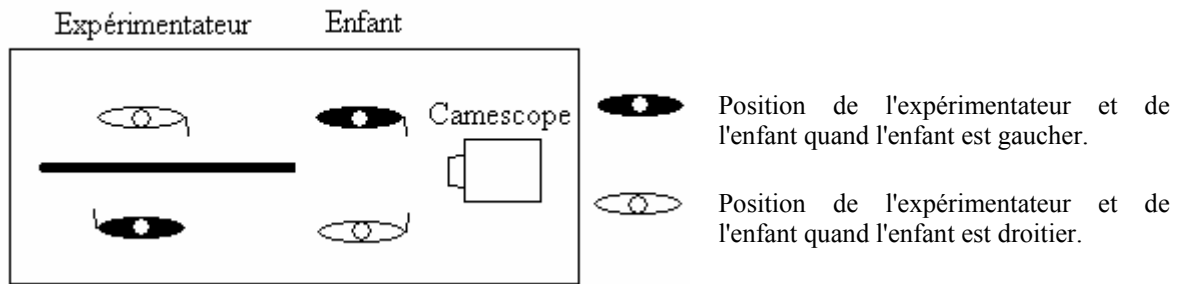


Figure 62. Vues du dispositif expérimental. *Figure A* : Vue frontale du dispositif expérimental dans le cas où la rampe est perpendiculaire à l'enfant. *Figure B* : Vue latérale du dispositif expérimental dans le cas où l'enfant est face à la rampe.

A



B

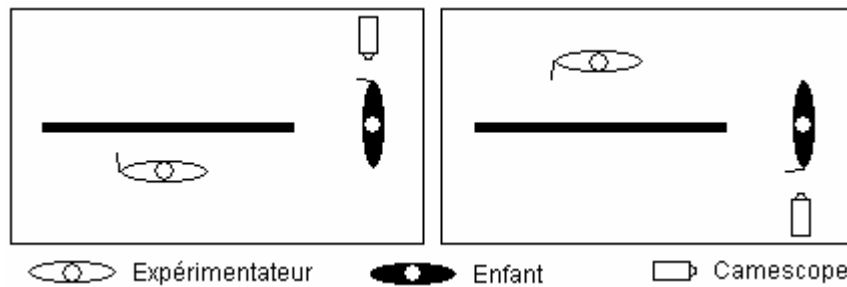


Figure 63. Vues de dessus du dispositif expérimental. *Figure A* : Vue de dessus du dispositif expérimental avec la position de l'enfant, de l'expérimentateur et du caméscope selon que l'enfant est droitier ou gaucher et de côté. *Figure B* : Vue de dessus du dispositif expérimental avec la position de l'enfant, de l'expérimentateur et du caméscope selon que l'enfant est droitier ou gaucher et de face.

3- Procédure

Les enfants, placés de côté par rapport à la rampe puis de face, devaient frapper le ballon partant de 4 hauteurs différentes (3m, 3.5m, 2m et 2.5m dans cet ordre). Ils ont effectué deux séries de 8 frappes (2 par hauteur), la première série avec le ballon qui ne changeait pas de taille pendant sa course, la seconde avec le ballon qui se dégonflait pendant sa chute. Les deux séries étaient réalisées pour les deux conditions de rampe. Les enfants ont réalisé un total de 32 frappes. Il n'y a eu qu'une session de film.

Les enfants ont commencé soit de face, soit de côté par rapport à la rampe, de manière alternée.

La trajectoire du ballon était visible tout le temps. La question " prêt " était posée juste avant le lâché du ballon pour recentrer l'attention de l'enfant.

L'enfant devait se replacer, après chaque frappe, derrière le trait signalant la distance d'attente (40 cm). Aucune consigne n'a été donnée quant à la position d'attente à avoir. D'où des postures d'attente différentes : main placée directement au-dessus de la tête ou main le long du corps. Le choix de la main de frappe pour les enfants a été décidé après l'observation des frappes effectuées des deux côtés de la rampe, plus de cinq frappes de suite avec la même

main déterminait la main de frappe (complétée par la demande de la main avec laquelle l'enfant écrit).

Le ballon à la sortie de la rampe se retrouvait au-dessus de l'épaule du bras préférentiel dans la condition où l'enfant est de côté par rapport à la rampe et devant lui au-dessus de la tête lorsque l'enfant est face à la rampe. Le mouvement d'interception consistait à diriger la main en direction de cette zone.

4- Recueil des données

Les enfants ont été filmés avec un caméscope placé dans l'axe de la rampe lorsque l'enfant est de côté par rapport à la rampe. Le placement de l'enfant à droite ou à gauche de la rampe était effectué selon sa main préférentielle pour que celle-ci soit toujours visible par le caméscope.

Les enfants étaient dans leur tenue du moment, il leurs a été demandé de retirer leur manteau. Du fait du lieu de l'expérimentation (sous le préau de l'école) et de la tenue des enfants, il n'a pas été possible de positionner des pastilles pour le pointage des articulations.

Dix sept points ont été utilisés (figure 64). Le premier correspondait au milieu du bord extérieur du ballon face à l'enfant (quand l'enfant est de côté par rapport à la rampe) et au milieu du bord du ballon face au caméscope (quand l'enfant est face à la rampe) car le ballon était considéré comme un marqueur. Le deuxième point correspondait au point le plus bas de la rampe (correspondant à 1,5 m) pour avoir un ordre de grandeur. Les 15 autres points étaient: la tête (milieu de la ligne oreille-œil), le cou, les deux épaules, le coude, le poignet et le bout des doigts de la main du bras qui frappait, les deux hanches, les deux genoux, les deux talons (correspondaient au bord du talon de la chaussure), les deux pieds (correspondaient au devant de la chaussure).

Les films ont été digitalisés puis un pointage image par image (20 ms) a été effectué avec le logiciel 3D vision.

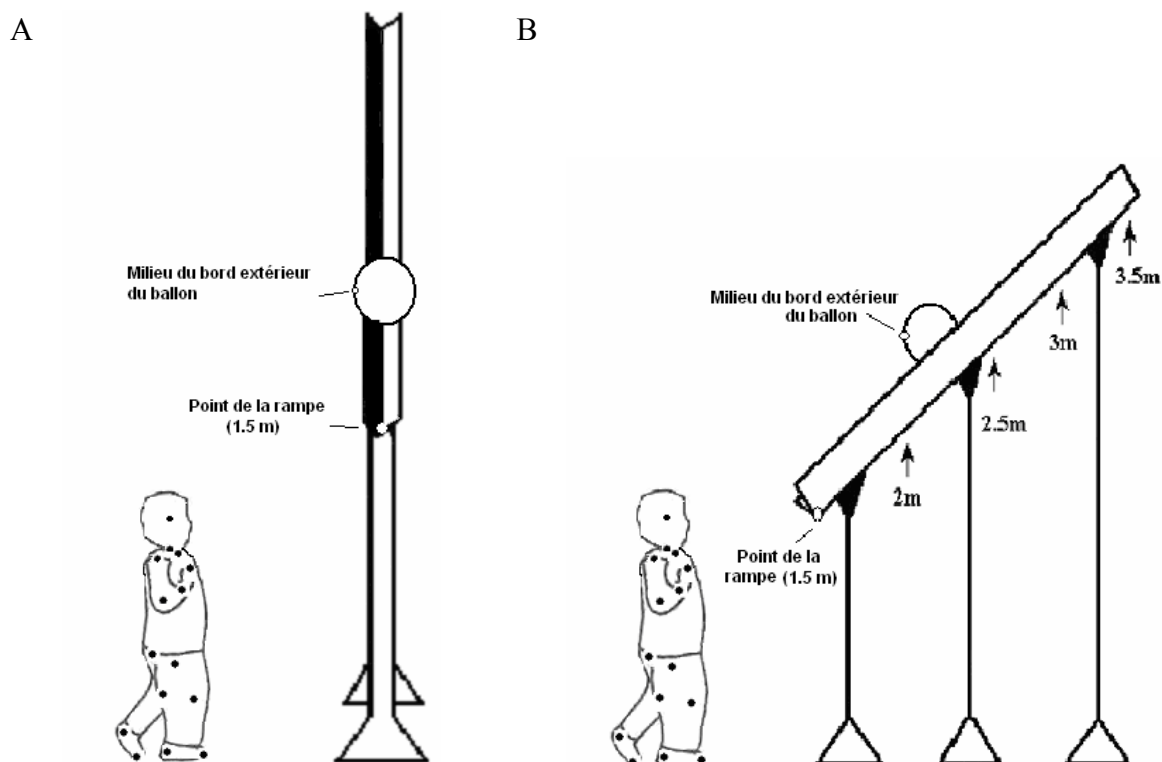


Figure 64. Points utilisés pour le pointage image par image. *Figure A* : Points utilisés pour le pointage image quand l'enfant est face à la rampe. *Figure B* : Points utilisés pour le pointage image quand l'enfant est de côté par rapport à la rampe.

Les données des marqueurs en x et y ont été obtenues à partir des courbes de l'accélération du point étudié. Les données recueillies ont été filtrées en utilisant un filtre Butterworth de second ordre avec une fréquence de lissage de 5Hz. Le point de départ de l'analyse d'image était le moment où le ballon commençait sa descente. La fin du mouvement a été prise au moment où la main entre en contact avec le ballon pour tous les enfants.

De plus, il a été observé que le ballon quand il est dégonflé tombe plus vite que quand il est de taille constante. Afin de contrôler s'il existe un effet de la vitesse de chute du ballon (celui-ci pouvant parasiter l'effet de la taille du ballon qui est notre propos), les différents temps de chute, hauteur par hauteur, de côté-face, gonflé-dégonflé ont fait l'objet d'une matrice de corrélation. Le test de Fischer appliqué aux temps de chute du ballon dans la condition gonflé/ dégonflé ne sont pas significativement différents entre eux.

$CG/CGDF = F_{(1,62)} = 1,05, p = .88 \text{ n.s.}$, $FG/FGDF = F_{(1,62)} = 1,13, p = .73 \text{ n.s.}$ et $G/DGF = F_{(1,62)} = 1,09, p = .72 \text{ n.s.}$

5- Les variables étudiées

Dans cette expérimentation les variables dépendantes étudiées étaient :

- Le temps de déclenchement de la main (TDM) correspond au moment où la main se déplace vers l'avant en direction du ballon, sans mouvement vers l'arrière. Les temps ont été obtenus à partir des courbes d'accélération de la main. Le moment de déclenchement correspond au dernier pic de la courbe d'accélération de la main avant le contact.

- Le temps du contact de la main (TCMB) correspond au moment du contact de la main avec le ballon.

- Le temps de mouvement de la main (TMM) correspond au temps s'écoulant entre le déclenchement du mouvement de frappe et le contact avec le ballon.

- Les écarts de la main-ballon au moment du contact (EMBC), qui correspondent à l'écart entre le milieu du bord extérieur, face à l'enfant, du ballon et la main.

Les temps sont exprimés en millisecondes (ms) et les écarts main-ballon en pixels.

6- Analyses statistiques

Le traitement statistique des données a été réalisé au moyen du logiciel Statistica 6.0 sur un PC.

Nous avons conduit, dans un premier temps, des régressions linéaires des variables dépendantes [temps de déclenchement de la main (TDM), temps de mouvement de la main (TMM), temps de contact (TCMB) et écarts main-ballon au contact (EMBC)], en fonction de la variable indépendante (temps de chute du ballon) pour déterminer s'il existe un lien entre la durée de chute du ballon et les variables dépendantes.

Dans un deuxième temps, des analyses de variance [gonflement du ballon à 2 niveaux (Gonflé-Dégonflé), position de l'enfant par rapport à la rampe à 2 niveaux (Côté-Face) et hauteurs de chute du ballon à 4 niveaux (2, 2.5, 3 et 3.5m)] ont été appliquées sur les variables dépendantes [temps de déclenchement de la main (TDM), temps de mouvement de la main (TMM), temps de contact (TCMB) et écarts main-ballon au contact (EMBC)], pour déterminer les effets des trois facteurs et leurs interactions. Une analyse à posteriori " post-hoc ", des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, a été réalisée dans le but de mettre en évidence la signification des variations par paire.

Le seuil de significativité est fixé à une valeur de probabilité d'hypothèse nulle $p < .05$. Dans les tableaux, les valeurs de cette probabilité sont indiquées par un astérisque (*).

Les résultats sont donnés pour chacune des variables. Pour chaque variable, les moyennes et les écarts-types en fonction des groupes, des distances à la rampe et des hauteurs de chute du ballon seront donnés.

C- Résultats

Les données ont été prélevées sur la session de film, sur un essai par hauteurs, dans chaque condition.

Se rapporter à l'annexe 7 pour le détail des données, des temps de déclenchement de la main (ms), temps de mouvement de la main (ms), temps de contact (ms), écarts main-ballon (pixels) obtenus en fonction de la condition expérimentale.

1- Temps de mouvement de la main (TMM)

Afin de déterminer s'il existe un lien entre la durée de chute du ballon et le TMM, nous avons réalisé des régressions linéaires.

a- Régressions linéaires : Évolution des TMM selon la durée de chute du ballon

Les analyses de régressions linéaires ont été effectuées pour chacune des quatre conditions :

- Condition ballon gonflé-de côté (GC) : Le TMM dans la condition GC n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = -.004x + 136$, $R^2 = .0008$, $p = .87$ n.s., figure 65),

- Condition ballon dégonflé-de côté (DGC) : Le TMM dans la condition DGC n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = .06x + 65$, $R^2 = .07$, $p = .12$ n.s., figure 65),

- Condition ballon gonflé-de face (GF) : Le TMM dans la condition GF n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = .02x + 75$, $R^2 = .02$, $p = .44$ n.s., figure 65),

et Condition ballon dégonflé-de face (DGF) : Le TMM dans la condition DGF n'est pas corrélé avec le temps de chute du ballon, la régression linéaire s'exprime ($y = .03x + 37$, $R^2 = .04$, $p = .28$ n.s., figure 65).

Les analyses de régression linéaires ne montrent pas des coefficients de corrélation atteignant la significativité. Elles démontrent qu'il n'y a pas d'association entre la variation du

temps de mouvement de la main (TMM) et le temps de chute du ballon. L'évolution du TMM des enfants (qu'ils réussissent ou non) n'est pas lié au temps de chute du ballon.

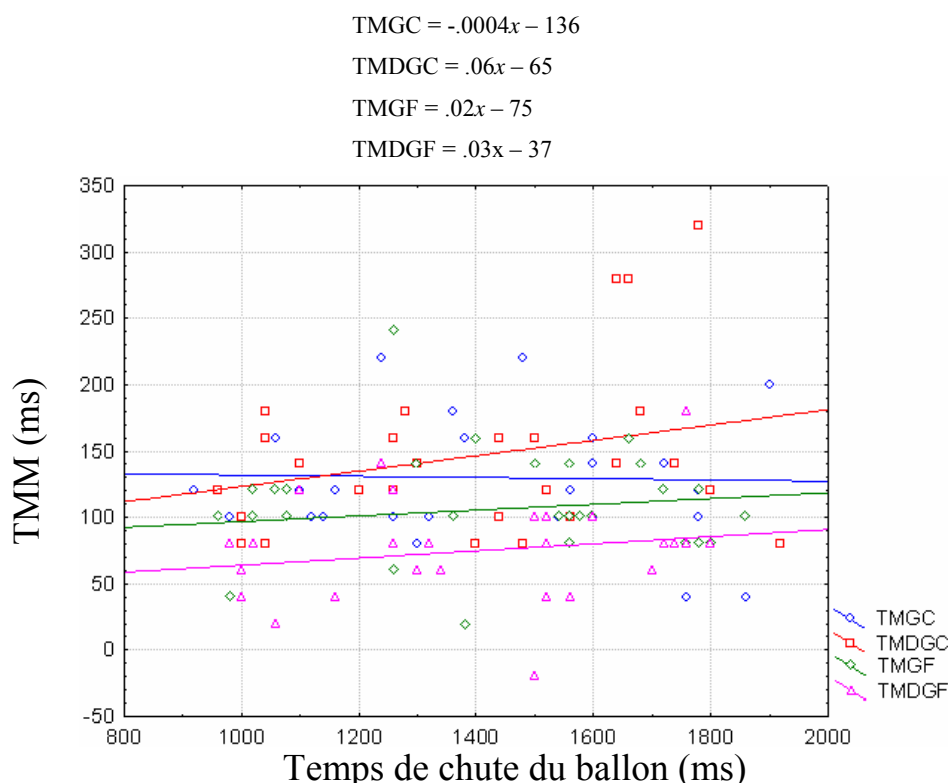


Figure 65. Régressions linéaires des temps de mouvement de la main (TMM, ms), des quatre conditions (GC, DGC, GF, DGF) en fonction du temps de chute du ballon (ms). *TMGC* : TMM avec ballon gonflé et enfant de côté par rapport à la rampe avec $y = -.0004x - 136$ (—◇—). *TMDGC* : TMM avec ballon dégonflé et enfant de côté par rapport à la rampe avec $y = .06x - 65$ (—□—). *TMGF* : TMM avec ballon gonflé et enfant face à la rampe avec $y = .02x - 75$ (—◇—). *TMDGF* : TDM avec ballon dégonflé et enfant face à la rampe avec $y = .03x - 37$ (—△—).

b- Présentation des moyennes et des écarts-types

Ballon		Position par rapport à la rampe					
Gonflé		Dégonflé		Côté		Face	
Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
118	46.01	110	59.73	138	51.97	90	43.2

Tableau 21. Moyennes et écarts-types des temps de mouvement de la main (TMM, ms) en fonction du ballon (gonflé et dégonflé) et de la position de l'enfant par rapport à la rampe (côté et face). N = 8.

Conditions	Hauteurs de chute du ballon (m)							
	2m		2.5m		3m		3.5m	
	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
Gonflé-Côté (CG)	110	23.90	140	45.36	135	41.06	122	44.64
Gonflé-Face (GF)	85	33.38	102	75.17	110	33.81	107	33.70
Dégonflé-Côté (DGC)	122	36.15	130	30.24	155	80.53	152	71.66
Dégonflé-Face (DGF)	65	31.62	92.5	30.12	62	42.00	82	44.64

Tableau 22. Moyennes et écarts-types des temps de mouvement de la main (TMM, ms) pour les quatre conditions (GC, DGC, GF, DGF) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = 8.

c- Analyse de variance à mesures répétées

Une analyse de variance à trois facteurs à mesures répétées : Gonflement du ballon à 2 niveaux (gonflé-dégonflé), Position de l'enfant à la rampe à 2 niveaux (côté-face) et Hauteurs de chute du ballon à 4 niveaux (2, 2.5, 3 et 3.5 m) a été réalisée pour déterminer les effets des trois facteurs et leurs interactions sur les temps de mouvement de la main (TMM, ms).

*** Effets globaux**

L'effet de la position de l'enfant par rapport à la rampe côté-face est significatif (CF, $F_{1,7} = 16.23$, $p < .01$, figure 66). Le TMM moyen est significativement plus court quand l'enfant est face à la rampe que lorsqu'il est de côté.

Mais ni l'effet du ballon gonflé-dégonflé (GDF, $F_{1,7} = .565$, $p = .48$ n.s.), ni de la hauteur ($F_{3,21} = 1.72$, $p = .19$ n.s.) ne sont significatifs.

Cette analyse de variance à mesures répétées ne montre aucune double interaction : Gonflé-dégonflé x Côté-Face ($F_{1,7} = 3.98$, $p = .09$ n.s.), Gonflé-dégonflé x Hauteurs ($F_{3,21} = .23$, $p = .87$ n.s.) et Côté-Face x Hauteurs ($F_{3,21} = .42$, $p = .74$ n.s.).

La triple interaction Gonflé-dégonflé x Côté-Face x Hauteurs ($F_{3,21} = 1.49$, $p = .25$ n.s.) n'est pas significative.

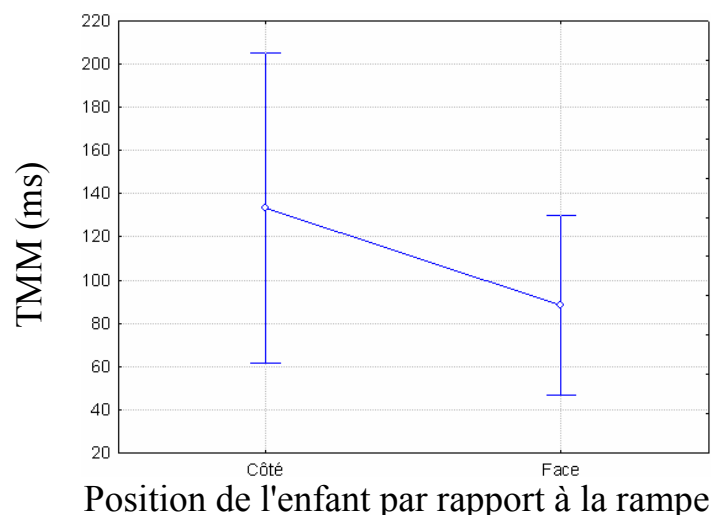


Figure 66. Présentation des temps de mouvement de la main (TMM, ms) en fonction de la position de l'enfant par rapport à la rampe (côté – face).

*** Résumé**

Les TMM moyens sont significativement plus longs lorsque l'enfant est de côté par rapport à la rampe que lorsqu'il est de face.

2- Temps de déclenchement de la main (TDM)

Afin de déterminer s'il existe un lien entre la durée de chute du ballon et le TDM, nous avons réalisé des régressions linéaires.

a- Régressions linéaires : Évolution des TDM selon la durée de chute du ballon

Les analyses de régressions linéaires ont été effectuées pour chacune des quatre conditions :

- Condition ballon gonflé-de côté (GC) : Le TDM dans la condition GC est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = 1.00x - 136$, $R^2 = .97$, $p < .001$, figure 67),

- Condition ballon dégonflé-de côté (DGC) : Le TDM dans la condition DGC est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = .94x - 65$, $R^2 = .97$, $p < .001$, figure 67),

- Condition ballon gonflé-de face (GF) : Le TDM dans la condition GF est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = .98x - 75$, $R^2 = .98$, $p < .001$, figure 67),

et Condition ballon dégonflé-de face (DGF) : Le TDM dans la condition DGF est significativement corrélé au temps de chute du ballon à l'intérieur d'une régression linéaire ($y = .97x - 37$, $R^2 = .98$, $p < .001$, figure 67). Plus la hauteur de chute augmente, plus le temps au contact est grand, plus l'enfant déclenche tardivement la frappe et ce pour les quatre conditions.

Les analyses de régression linéaire montrent des coefficients de corrélation dont le seuil de signification est inférieur à .001. Elles démontrent une association très forte entre la variation du temps de déclenchement de la main (TDM) et le temps de chute du ballon pour les quatre conditions. Le TDM des enfants, qu'ils soient de côté ou face à la rampe, que le ballon se dégonfle ou non, est lié de manière linéaire au temps de chute du ballon. Plus la hauteur de chute du ballon augmente, plus le TDM est grand, plus l'enfant déclenche la frappe tardivement.

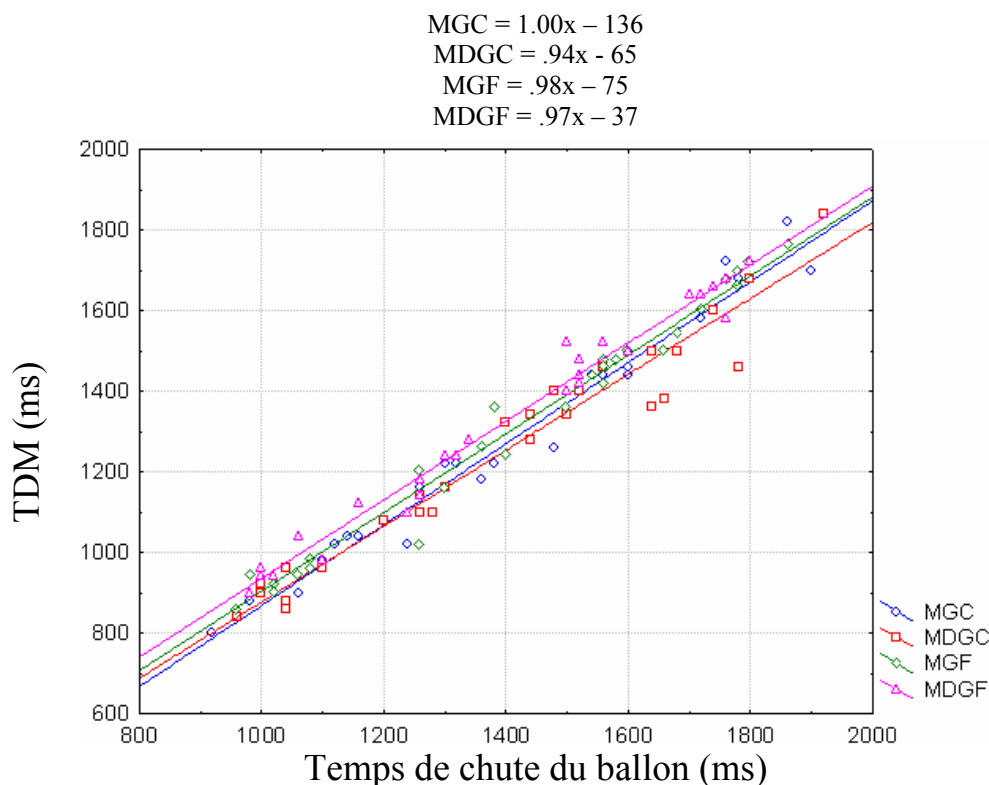


Figure 67. Régressions linéaires des temps de déclenchement de la main (TDM, ms), des quatre conditions (GC, DGC, GF, DGF). *MGC* : TDM avec ballon gonflé et enfant de côté par rapport à la rampe avec $y = 1.00x - 136$ (—◇—). *MDGC* : TDM avec ballon dégonflé et enfant de côté par rapport à la rampe avec $y = .94x - 65$ (—□—). *MGF* : TDM avec ballon gonflé et enfant face à la rampe avec $y = .98x - 75$ (—○—). *MDGF* : TDM avec ballon dégonflé et enfant face à la rampe avec $y = .97x - 37$ (—△—).

b- Présentation des moyennes et des écarts-types

Ballon		Position par rapport à la rampe					
Gonflé		Dégonflé		Côté		Face	
Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
1311	285.28	1291	265.11	1273	277.06	1329	271.13

Tableau 23. Moyennes et écarts-types des temps de déclenchement de la main (TDM, ms) en fonction du ballon (gonflé et dégonflé) et de la position de l'enfant par rapport à la rampe (côté et face). N = 8.

Conditions	Hauteurs de chute du ballon (m)							
	2m		2.5m		3m		3.5m	
	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
Gonflé-Côté (CG)	952	86.15	1162	67.14	1427	71.66	1682	83.11
Gonflé-Face (GF)	950	60.47	1235	114.02	1467	56.51	1675	76.16
Dégonflé-Côté (DGC)	915	55.29	1195	111.99	1377	52.85	1600	135.22
Dégonflé-Face (DGF)	980	69.28	1197	58.98	1467	45.28	1667	50.07

Tableau 24. Moyennes et écarts-types des temps de déclenchement de la main (TDM, ms) pour les quatre conditions (GC, DGC, GF, DGF) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = 8.

c- Analyse de variance à mesures répétées

Une analyse de variance à trois facteurs à mesures répétées : Gonflement du ballon à 2 niveaux (gonflé-dégonflé), Position de l'enfant à la rampe à 2 niveaux (côté-face) et Hauteurs de chute du ballon à 4 niveaux (2, 2.5, 3 et 3.5 m) a été réalisée pour déterminer les effets des trois facteurs et leurs interactions sur les temps de déclenchement de la main (TDM, ms).

*** Effets globaux**

L'effet de la hauteur de chute du ballon est significatif ($F_{3,21} = 612.85, p < .001$, figure 68). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent une différence significative entre tous les TDM moyens de toutes les hauteurs, respectivement : 2m et 2.5m ($F_{1,7} = 8275, p < .001$), 2.5m et 3m ($F_{1,7} = 129.46, p < .001$), 3m et 3.5m ($F_{1,7} = 147.88, p < .001$), 2m et 3m ($F_{1,7} = 1721,43, p < .001$), 2m et 3.5m ($F_{1,7} = 1361,84, p < .001$) et entre celui à 2.5m et 3.5m ($F_{1,7} = 597,10, p < .001$). Le TDM moyen à une hauteur est significativement plus petit que celui à la hauteur immédiatement supérieure. Le déclenchement de la frappe se fait significativement plus tard avec l'augmentation des hauteurs.

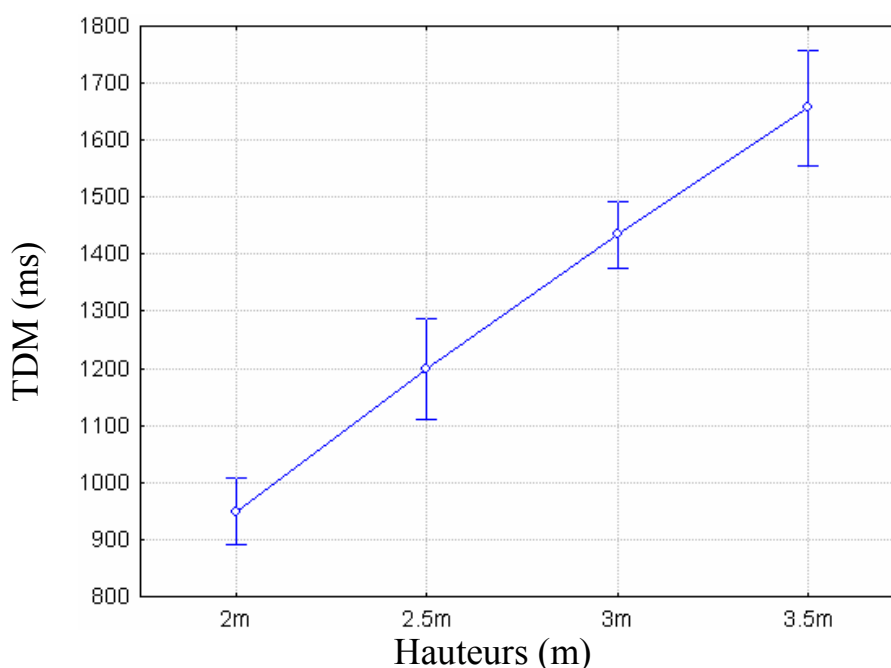


Figure 68. Temps moyens de déclenchement de la main (TDM, ms) et erreurs-types en fonction de la hauteur.

Mais, ni les effets du ballon gonflé-dégonflé (GDG, $F_{1,7} = 2.82, p = .14 n.s.$) ni de la position de l'enfant par rapport à la rampe côté-face (CF, $F_{1,7} = 1.63, p = .24 n.s.$) ne sont significatifs.

L'analyse ne montre aucune double interaction : Gonflé-dégonflé x Côté-Face ($F_{1,7} = .89, p = .38 n.s.$), Gonflé-dégonflé x Hauteurs ($F_{3,21} = .60, p = .62 n.s.$) et Côté-Face x Hauteurs ($F_{3,21} = .97, p = .42 n.s.$).

* Triple interaction

L'analyse de variance montre une interaction statistiquement significative (figure 69) entre les trois facteurs : Gonflé-dégonflé x Côté-Face x Hauteurs ($F_{3,21} = 3,35, p < .05$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent que deux différences significatives.

Ces deux différences portent sur le facteur hauteur pour la hauteur 3m (chronologiquement la première hauteur) pour :

- la condition de face/ballon gonflé-dégonflé (F-GDGF, $F_{1,7} = 14.92, p < .01$).
- la condition ballon gonflé/côté-face à la rampe (G-CF, $F_{1,7} = 13.46, p < .01$).

Il est à noter que, même si ces différences ne sont pas significatives pour les autres hauteurs, la tendance reste la même.

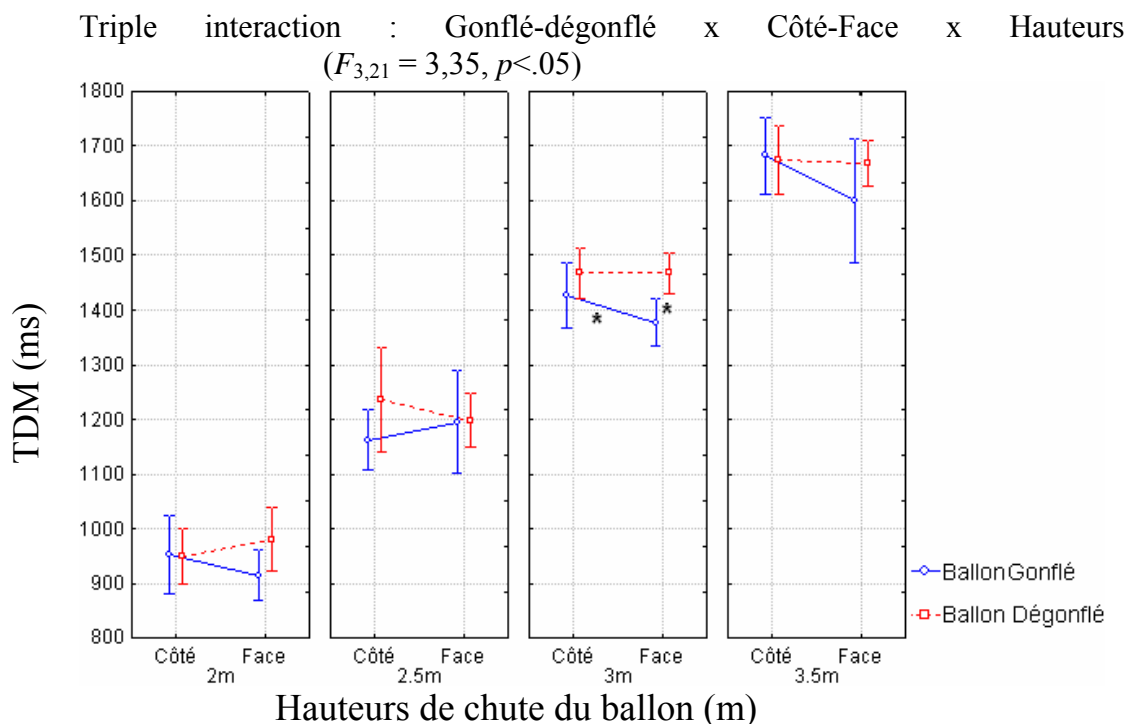


Figure 69. Présentation des temps de déclenchement de la main (TDM, ms) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Taille du ballon (Gonflé-dégonflé) x Position de l'enfant (Côté, partie gauche, et Face,

partie droite) x Hauteurs (1^{er} graphe 2m, 2^{ème} graphe 2.5 m, 3^{ème} graphe 3 m et 4^{ème} graphe 3.5 m). Différences significatives marquées par un astérisque (*).

*** Résumé de la triple interaction**

Pour la hauteur 3m (première hauteur de chute),

- Dans la condition face à la rampe, le TDM moyen quand le ballon se dégonfle est significativement plus grand que lorsque le ballon reste de taille constante. L'enfant déclenche la frappe significativement plus tardivement quand le ballon se dégonfle.

- Quand le ballon reste de taille constante et que l'enfant est face, le TDM moyen est significativement plus court que lorsqu'il est de côté. L'enfant déclenche significativement plus tôt la frappe quand il est de face.

3- Le temps de contact de la main avec le ballon (TCMB)

a- Présentation des moyennes et des écarts-types

Ballon		Position par rapport à la rampe					
Gonflé		Dégonflé		Côté		Face	
Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
1429	283.87	1402	269.39	1411	278.95	1420	275.10

Tableau 25. Moyennes et écarts-types des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms) en fonction du ballon (gonflé et dégonflé) et de la position de l'enfant par rapport à la rampe (côté et face). N = 8.

Conditions	Hauteurs de chute du ballon (m)							
	2m		2.5m		3m		3.5m	
	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
Gonflé-Côté (CG)	1062	81.72	1302	49.50	1560	41.40	1805	71.51
Gonflé-Face (GF)	1035	47.51	1327	154.90	1575	47.51	1775	59.28
Dégonflé-Côté (DGC)	1037	52.85	1325	95.47	1532	83.45	1752	101.95
Dégonflé-Face (DGF)	1045	60.24	1290	40	1530	33.81	1750	30.24

Tableau 26. Moyennes et écarts-types des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms) pour les quatre conditions (GC, DGC, GF, DGF) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = 8.

b- Analyse de variance à mesures répétées

Une analyse de variance à trois facteurs à mesures répétées : Gonflement du ballon à 2 niveaux (gonflé-dégonflé), Position de l'enfant à la rampe à 2 niveaux (côté-face) et Hauteurs de chute du ballon à 4 niveaux (2, 2.5, 3 et 3.5 m) a été réalisée pour déterminer les effets des trois facteurs et leurs interactions sur les temps de coïncidence de la main avec le ballon (TCMB, ms).

* Effets globaux

L'effet du ballon gonflé-dégonflé est significatif (GDG, $F_{1,7} = 6.37$, $p < .05$, figure 70A). Le TCMB moyen ballon gonflé est significativement plus grand que celui ballon dégonflé.

Il n'y a pas d'effet de la position côté-face (CF, $F_{1,7} = .126$, $p = .73$ n.s.)

L'effet de la hauteur est significatif ($F_{3,21} = 622.98$, $p < .001$, figure 70B).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, montrent une différence significative entre le TCMB moyen à 2m et 2.5m ($F_{1,7} = 180.60$, $p < .001$), 2.5m et 3m ($F_{1,7} = 161.62$, $p < .001$), et 3m et 3.5m ($F_{1,7} = 209.46$, $p < .001$). Le TCMB moyen à une hauteur est significativement inférieur de celui à la hauteur immédiatement supérieure.

Aucune des doubles interactions Gonflé-dégonflé x Côté-Face ($F_{1,7} = 3.98$, $p = .09$ n.s.), Gonflé-dégonflé x Hauteurs ($F_{3,21} = .23$, $p = .87$ n.s.) et Côté-Face x Hauteurs ($F_{3,21} = .42$, $p = .74$ n.s.) n'est significative.

La triple interaction Gonflé-dégonflé x Côté-Face x Hauteurs ($F_{3,21} = .81$, $p = .50$ n.s.) n'est pas significative.

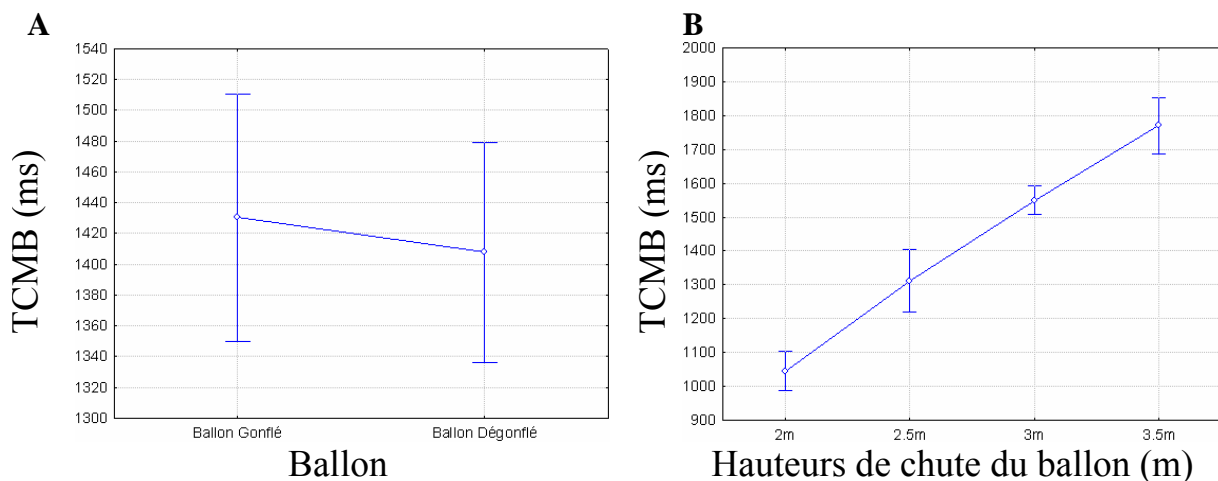


Figure 70. Temps moyens de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms) et erreurs-types. *Graphe A:* TCMB moyens (ms) et erreurs-types en fonction du ballon (gonflé ou dégonflé). *Graphe B :* TCMB moyens (ms) et erreurs-types en fonction des hauteurs de chute du ballon (m).

* Résumé

L'enfant frappe significativement plus tard le ballon lorsque celui-ci est gonflé que lorsqu'il dégonflé.

Le TCMB moyen à une hauteur est significativement inférieur de celui à la hauteur immédiatement supérieure.

4- Écart main-ballon au contact (EMBC)

a- Présentations des moyennes et des écarts-types

Ballon				Position par rapport à la rampe			
Gonflé		Dégonflé		Côté		Face	
Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
11	9.52	13	10.69	14	10.10	10	9.95

Tableau 27. Moyennes et écarts-types des écarts main-ballon (EMBC, pixels) en fonction du ballon (gonflé et dégonflé) et de la position de l'enfant par rapport à la rampe (côté et face). N = 8.

Conditions	Hauteurs de chute du ballon (m)							
	2m		2.5m		3m		3.5m	
	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types	Moyennes	Écarts-types
Gonflé-Côté (CG)	16	8.49	17	18.12	9	6.64	15	8.79
Gonflé-Face (GF)	8	7.20	5	3.58	10	6.04	7	5.76
Dégonflé-Côté (DGC)	21	7.80	11	5.55	14	10.03	10	8.63
Dégonflé-Face (DGF)	16	13.33	13	15.37	5	5.04	17	11.56

Tableau 28. Moyennes et écarts-types des écarts main-ballon (EMBC, pixels) pour les quatre conditions (GC, DGC, GF, DGF) en fonction des hauteurs de chute du ballon (m). N = 8.

b- Analyse de variance à mesures répétées

Une analyse de variance à trois facteurs à mesures répétées : Gonflement du ballon à 2 niveaux (gonflé-dégonflé), Position de l'enfant à la rampe à 2 niveaux (côté-face) et Hauteurs de chute du ballon à 4 niveaux (2, 2.5, 3 et 3.5 m), a été réalisée pour déterminer les effets des trois facteurs et leurs interactions sur les écarts main-ballon (EMBC, pixels).

* Effets globaux

L'effet de la hauteur est significatif ($F_{3,21} = 3.15, p < .05$, figure 71). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent qu'une différence significative entre les EMBC moyens à 2 m et 3 m ($F_{1,7} = 8.26, p < .05$). Les autres différences ne sont pas significatives 2 m et 2.5 m ($F_{1,7} = 3.79, p = .09 n.s.$), 2m et 3.5m ($F_{1,7} = 2.19, p = .18 n.s.$), 2.5 m et 3 m ($F_{1,7} = .97, p = .36 n.s.$), 2.5 m et 3.5 m ($F_{1,7} = .22, p = .65 n.s.$) et 3 m et 3.5 m ($F_{1,7} = 3.26, p = .11 n.s.$). L'EMBC moyen ne dépend pas de la hauteur de chute du ballon sauf entre 2 m et 3 m où celui à 2 m est significativement plus grand qu'à 3 m.

Cette analyse à mesures répétées ne montre ni d'effet du ballon gonflé-dégonflé (GDG, $F_{1,7} = 1.79, p = .22 n.s.$) ni de la position de l'enfant par rapport à la rampe côté-face (CF, $F_{1,7} = 3.46, p = .10 n.s.$), ni aucune double interaction (respectivement, Gonflé-dégonflé

x Côté-Face, $F_{1,7} = 3.82$, $p = .09$ n.s. ; Gonflé-dégonflé x Hauteurs, $F_{3,21} = .46$, $p = .71$ n.s. et Côté-Face x Hauteurs, $F_{3,21} = .39$, $p = .76$ n.s.).

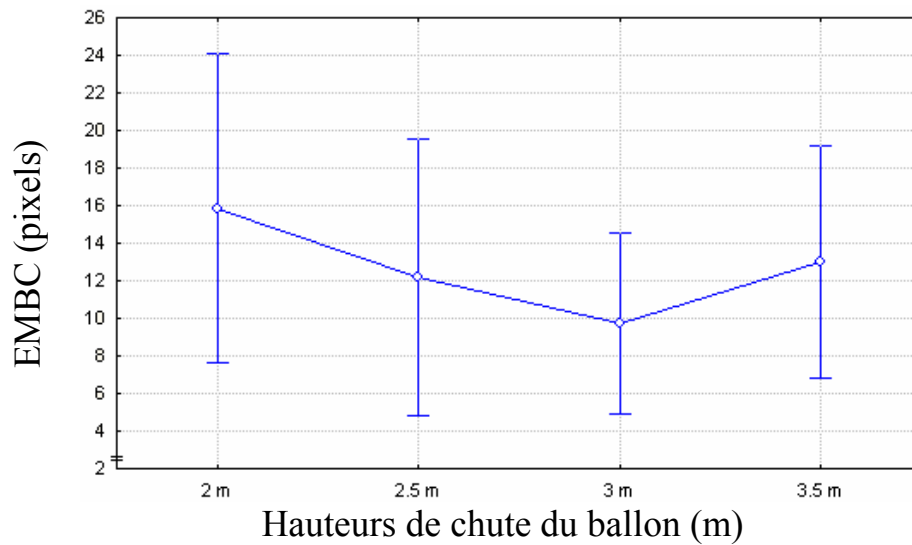


Figure 71. Ecarts main-ballon moyens (EMBC, pixels) et erreurs-types en fonction des hauteurs de chute du ballon (m).

* Triple interaction

L'analyse à mesures répétées montre une interaction statistiquement significative (figure 72) entre les trois facteurs : ballon gonflé-dégonflé x côté-face x hauteurs ($F_{3,21} = 5.19$, $p < .01$). Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent que deux différences significatives. Ces différences sont à la hauteur 3.5 m pour Face-Gonflé/dégonflé ($F_{1,7} = 6.11$, $p < .05$) et Gonflé-Côté/face ($F_{1,7} = 5.46$, $p < .05$).

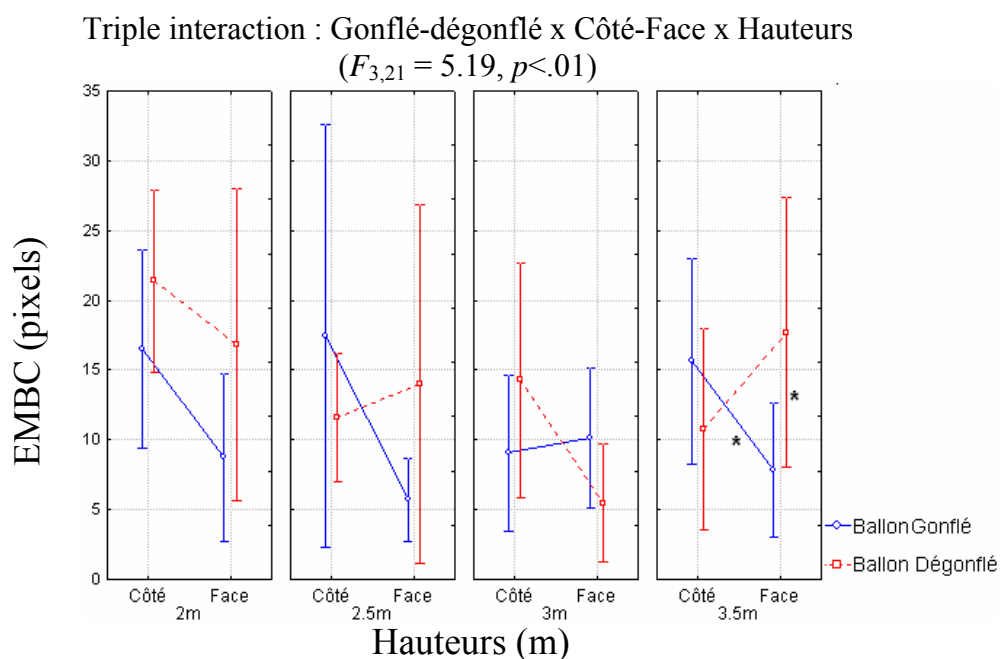


Figure 72. Présentation des écarts main-ballon moyens (EMBC, pixels) sur 4 graphes de la triple interaction des facteurs : Taille du ballon (Gonflé-dégonflé) x Position de l'enfant (Côté, partie gauche-Face, partie droite) x Hauteurs (1^{er} graphe 2m, 2^{ème} graphe 2.5 m, 3^{ème} graphe 3 m et 4^{ème} graphe 3.5 m). Différences significatives marquées par un astérisque (*).

*** Résumé de la triple interaction**

Pour la hauteur 3.5 m

- Quand l'enfant est de face, l'EMBC moyen, quand le ballon se dégonfle, est significativement plus grand que lorsque le ballon reste de taille constante.
- Quand le ballon reste de taille constante et que l'enfant est de face, l'EMBC moyen est significativement plus petit que lorsqu'il est de côté.

c- Effet d'ordre sur les EMBC

L'observation du graphe des EMBC (figure 71) selon la hauteur de chute du ballon montre une forte tendance : L'EMBC moyen de la première hauteur (3m) est le plus petit. Nous avons donc réalisé pour voir s'il existe un effet d'ordre, une analyse de variance à 3 facteurs : Gonflement du ballon à 2 niveaux (gonflé-dégonflé), Position de l'enfant à la rampe à 2 niveaux (côté-face) et Ordre de passage des hauteurs de chute du ballon à 4 niveaux (3, 3.5, 2 et 2.5 m) sur les EMBC.

Seuls les résultats concernant l'effet d'ordre sont rapportés car les effets de groupes et/ou de distances ont été démontrés dans les analyses précédentes.

*** Effets globaux**

L'effet d'ordre est significatif ($F_{3,21} = 3.16$, $p < .05$).

Les comparaisons post-hoc, des variables prises deux à deux par le test de comparaison planifiée, ne montrent que deux différences significatives entre l'EMBC moyen de la première hauteur (3 m) et de la troisième (2 m, $F_{1,7} = 8.26$, $p < .05$) et entre l'EMBC moyen de la première hauteur (3 m) et de la quatrième (2.5 m, $F_{1,7} = 653.07$, $p < .001$). L'EMBC moyen à la première hauteur est plus petit que celui à la troisième et à la quatrième hauteur de chute de ballon.

*** Résumé de l'effet d'ordre**

L'EMBC moyen à la première hauteur (3 m) est significativement plus petit que celui à la troisième (2 m) et à la dernière (2.5 m).

D- Discussion

Temps de déclenchement de la main

Les résultats de cette expérience montrent dans une triple interaction, un effet de la taille du ballon sur les temps de déclenchement de la main. Le déclenchement de la frappe est effectué plus tard quand le ballon se dégonfle que lorsqu'il est de taille constante. Cet effet apparaît seulement lorsque l'enfant est face à la rampe, pour la hauteur 3 m.

Le déclenchement du mouvement est couplé à la variable optique tau qui est définie par la taille de l'image rétinienne (angle formé par la séparation de deux points de l'image du ballon) divisée par le taux de variation de cette image (différence de la valeur de cet angle à deux moments " t " de l'approche du ballon). Lorsque le ballon reste de taille constante, les variations de l'angle sont également constantes, alors que dans le cas où le ballon change de taille au cours de son approche, ces variations traduisent une réalité erronée par rapport à la situation de référence. Cette erreur est due à la perception du ballon, avec une taille inférieure (qui signifie un éloignement) qui entraîne une perception illusoire de la distance du ballon par rapport au corps de l'enfant. L'enfant a l'impression que le ballon est plus loin qu'il ne l'est en réalité, ce qui l'amène à retarder le déclenchement de la frappe, voire à le déclencher quand le ballon touche sa main.

Le fait que la diminution de la taille du ballon ait uniquement une influence sur le mouvement de face, peut s'expliquer par la quantité de flux informationnel dont dispose l'enfant. Face à la rampe, l'enfant dispose principalement du flux optique, déterminé par la taille du ballon, sur son déplacement car l'environnement ambiant, constitué par la rampe et le ballon, est restreint à ceux-ci. Par contre, quand l'enfant est de côté par rapport à la rampe, il dispose de l'information visuelle sur la progression du ballon par rapport à la rampe et à lui-même, l'environnement ambiant est élargi et l'information visuelle concernant la taille du ballon se trouve dès lors moins prégnante car relativisée par la globalité du contexte. L'enfant n'est alors plus influencé par la diminution de la taille du ballon, d'où le manque de différence dans les temps de déclenchement de la main, entre les conditions ballon gonflé-dégonflé, quand l'enfant est de côté par rapport à la rampe. L'absence de différence pour les hauteurs inférieures à 3m pourrait s'expliquer par la pression temporelle forte qui ne permet pas d'adaptation temporelle différenciée suffisamment importante pour être, soit conséquente sur le système perceptivo-moteur, soit mise en évidence pour l'analyse. Cette différence n'existe seulement que de face et pour la hauteur 3m. Ce fait peut s'expliquer car la hauteur 3m est la première hauteur de chute, et l'enfant, lors de la condition ballon dégonflé à 3m, sort d'une

série de 15 essais avec un ballon gonflé dans ce cas la taille du ballon est le stimulus pertinent pour déclencher sa frappe, et déclenche son geste avec un retard. Lorsque, le ballon chute de la hauteur suivante (3.5m) l'enfant vient de réaliser 3 frappes et inhiberait le schème non pertinent, la taille du ballon. Dans la condition de côté, il n'y a aucun effet de taille du ballon, quelle que soit la hauteur. Ce résultat peut s'expliquer parce que de côté, l'enfant se trouve dans un environnement ambiant est élargi et l'information visuelle concernant la taille du ballon s'en trouverait moins prégnante, et l'enfant ne serait donc pas gêné par la différence de taille du ballon.

Les temps de mouvement de la main

Les temps de mouvement (TM) de la main sont significativement plus courts quand le ballon se dégonfle que quand il est de taille constante mais seulement dans le cas où l'enfant est face à la rampe. Quand il est de côté, il n'y a pas d'effet de la taille du ballon sur les TM de la main. Ces résultats sont différents de ceux trouvés par Savelsbergh et coll. (1991) sur la fermeture de la main lors d'une saisie d'une balle se dégonflant au cours de son approche (seule la main est libre de ses mouvements). Dans leur expérience, le TM de fermeture de la main, quand le ballon se dégonfle, est supérieur à celui dans le cas où le ballon est de taille constante. Dans la frappe, la fenêtre temporelle qui correspond au moment optimal de contact est de l'ordre de 5 à 10 ms au-delà de laquelle l'efficacité des frappes diminue (Mc Laughlin, 1986). Dans l'expérience de Savelsbergh, et coll. (1991) les TM des saisies ne sont pas contraints par cette fenêtre temporelle. C'est pourquoi les TM observés dans leur expérience sont plus longs que ceux observés dans la notre. Cette différence de TM peut être expliquée par le fait que l'enfant ne peut pas retarder indéfiniment le déclenchement de la frappe au risque de ne pas frapper dans la fenêtre temporelle très courte.

Le TM de la main est significativement plus court lorsque l'enfant est de face que lorsqu'il est de côté par rapport à la rampe. De plus, dans l'expérience 2, il ressort que le TM de la main n'est pas dépendant de la hauteur de chute de la balle, ni de la distance (40 cm ou 60 cm) à laquelle se trouve l'enfant par rapport à la rampe et des présents résultats. Il apparaît que le TM de la main est dépendant de la direction de l'évènement (face ou de côté par rapport à l'observateur).

Les temps de contact de la main et du ballon

Les temps de contact sont significativement plus tardifs quand le ballon se dégonfle que lorsqu'il est de taille constante mais seulement quand l'enfant est face à la rampe. Ce

décalage pourrait être dû au fait que le TM de la main est indépendant de la hauteur et de la distance à la rampe. Le TM de la main se trouvant être constant, comme le mouvement est déclenché plus tard, l'enfant frappe le ballon plus tard. En fait, le mouvement de frappe, une fois déclenché s'exécute jusqu'à la fin.

Les écarts main-ballon

Les écarts main-ballon sont plus grands quand le ballon se dégonfle que lorsqu'il est de taille constante mais seulement dans la condition où l'enfant est face à la rampe. Cette diminution de précision s'explique par le fait que les enfants déclenchent plus tardivement leur mouvement et qu'ils n'ont donc pas le temps d'adapter leur geste à la position du ballon.

Conclusion

Le principal résultat de cette étude est que la diminution de la taille du ballon pendant sa chute retarde le déclenchement du geste mais uniquement lorsque les enfants sont faces à la rampe pour la hauteur de 3m, la première hauteur de chute. Cette observation confirme les résultats de nos précédentes expériences, qu'il existe un couplage entre le temps de déclenchement de la main et le temps d'arrivée du ballon, ce couplage serait basé sur la variable optique tau, qui dans un contexte restreint (le ballon vient directement sur l'enfant) prédominerait pour déterminer à quel moment déclencher son geste. Par contre, cette variable optique n'apparaît pas être à la base de cette détermination, ou tout du moins prédominante, dans un environnement global. En effet, les temps de déclenchement de la main ne sont pas similaires entre les deux conditions de gonflement du ballon, quand les enfants sont de face mais ces temps sont similaires dans les deux conditions de gonflement, quand l'enfant est de côté. Ces résultats montrent que la variable optique tau ne serait pas l'information principale dans la détermination du déclenchement du geste lorsque l'environnement est global, non restreint.

VII- Discussion Générale

L'objectif de ce travail était de déterminer les facteurs participant au développement de la coordination dans les habiletés d'interception et plus particulièrement dans celle de l'habileté de frappe (manuelle et avec raquette). Cette habileté complexe se retrouve dans un grand nombre d'activités sportives telles que le golf, les sports de raquette, le base-ball, le volley-ball. Dans ce type d'activités sportives, la réalisation de frappes nécessite la mise en coïncidence de la main (ou d'un objet) avec le mobile qui est en déplacement. L'habileté de frappe nécessite un contrôle sensori-moteur élaboré afin que les mouvements réalisés soient réguliers et adaptés à l'environnement. Le développement des coordinations visuo-motrices apparaît d'une grande importance dans la mise en coïncidence de la main et du ballon. De la manière d'envisager le développement des coordinations, découle des conceptions différentes quant au rôle et à la place de la perception dans l'explication de leur développement. En effet, quand la psychologie cognitive conçoit le comportement comme un processus actif, basé sur le traitement et l'extraction de l'information visuelle pour agir, la psychologie écologique le conçoit comme le résultat d'un isomorphisme entre l'individu et l'environnement aboutissant à un couplage entre la perception et l'action. La conception cognitive du développement aboutit à l'idée d'un développement régulier de capacités cognitives, quasi inexistantes à la naissance, telle que l'anticipation, dépendant du développement des structures fonctionnelles. Or nous avons observé que dans leurs jeux, les très jeunes enfants peuvent manifester des aptitudes précoces dans les coordinations visuo-motrices impliquées dans les habiletés de frappe ainsi que des périodes de régression dans leur coordination au cours du développement.

L'analyse de la manière avec laquelle les enfants de 3 à 10 ans ont répondu à la réalisation de frappes manuelles d'un ballon ou de balles de tennis avec une raquette de mini-tennis a révélé des phases critiques de changements dans le développement de l'habileté de frappe en ce qui concerne la régulation visuelle du mouvement, la variabilité de la position de la main et l'instabilité dans la réalisation de ce mouvement et des coordinations mises en place.

La régulation visuelle

L'expérience 2 a montré que dès 3 ans, les enfants commencent à montrer une aptitude à frapper manuellement un ballon tombant de différentes hauteurs. Cette expérience et la troisième montrent que ce mouvement de frappe résulte d'un couplage entre le temps de déclenchement de la main et la vitesse de chute du ballon quel que soit : l'âge, la distance à la

rampe (40 cm ou 60 cm), le côté d'arrivée du stimulus (de côté ou de face) et la hauteur de chute du ballon (1.5 m à 3.5 m). Il est à noter que ce couplage, entre le déclenchement de la main et la vitesse de chute du ballon, fonctionne pour les deux stratégies de frappe (par au-dessus ou par en dessous) et quelle que soit la position d'attente des enfants (main au-dessus de l'épaule, bras le long du corps ou tendu devant soi). Le temps de frappe varie comme une fonction de la durée de chute du ballon tel que le T_{frappe} est égal au $T_{\text{déclenchement de la frappe}} + T_{\text{de mouvement}}$. Cette fonction n'est pas un artéfact car elle a été mise en évidence quelle que soit la position d'attente de l'enfant, pour les temps de déclenchement du pied dans l'organisation de la coordination et lorsque la taille du ballon se modifie au cours de sa chute. Cette fonction montre que le geste de la main, chez les enfants de 3 à 4 ans, est régulée par la variable optique tau (Lee, 1976, 1980). Mais la variable tau pourrait ne prévaloir que dans le cadre d'un environnement restreint, en effet, le changement de la taille du ballon (diminution), au cours de son approche, entraîne un retard du déclenchement du geste de frappe mais seulement lorsque l'enfant est face à la rampe. La taille relative perçue de l'objet prédominerait dans l'ajustement du geste de la main vers le ballon quand l'enfant est face à la trajectoire de balle mais pas lorsqu'il est de côté et qu'il dispose alors d'un environnement plus global.

Par ailleurs, si les enfants dès 3 ans montrent une aptitude à frapper le ballon, ils montrent une précision spatiale significativement plus petite que les enfants de 4 ans. Ces enfants de 3 ans, lorsqu'ils atteignent l'âge de 4 ans, ont une précision spatiale similaire à celle des enfants de 4 ans. A 3 ans, les erreurs spatiales des enfants s'avèrent être la conséquence des erreurs temporelles qui seraient dues à la difficulté des enfants, à cet âge, à ajuster leur réponse aux conditions environnementales et non pas à une mauvaise évaluation de celles-ci. En effet, les enfants dès 3 ans déclenchent plus tardivement le mouvement de frappe avec l'augmentation de la hauteur de chute, ils évaluent bien les changements environnementaux.

D'autre part, si pour les deux catégories d'âge (3 et 4 ans) les enfants modifient le déclenchement de la frappe en fonction de la hauteur de chute du ballon, le temps de mouvement de la frappe, lui, est constant, quelles que soient la hauteur de chute du ballon, la distance à la rampe et la taille du ballon. Cette constance du temps de mouvement de la frappe, pourrait témoigner d'une rigidité motrice due à une incapacité à modifier la vitesse du mouvement en fonction des fluctuations environnementales (Hay, 1979 et Hay & Bard, 1999). Cette incapacité à modifier la vitesse d'exécution pourrait être le reflet de l'influence des synergies musculaires, de la dynamique des segments (Kelso & Schöner, 1988) utilisée lors de la frappe. Dans une perspective dynamique, les enfants de 3 et 4 ans, seraient "

contraints " par les synergies, d'utiliser une vitesse d'action " stéréotypée ". Cette vitesse d'action " stéréotypée " serait le produit de l'interaction entre le niveau de développement de l'enfant (contraintes organiques), du contexte de réalisation (contraintes environnementales) et de la tâche (contraintes de la tâche). Nous retrouvons cette idée de contraintes externes sur l'exécution du mouvement, dans nos résultats de l'étude de l'organisation de la coordination lors du mouvement de la frappe. En effet, les enfants des deux catégories d'âge (3 et 4 ans) montrent des patterns de coordination différents avec l'accroissement des hauteurs de chute du ballon.

Organisation du contrôle segmentaire

Les actions segmentaires varient en fonction de la hauteur de chute du ballon. L'observation plus précise de l'organisation des articulations entre elles (expérience 3) a montré que le pied se déclenche toujours en premier suivi par un déclenchement ascendant des autres articulations pour aboutir à celui de la main quelle que soit la hauteur et pour les deux catégories d'enfants. Le déclenchement de l'action par le bas s'observe le plus souvent quand le sportif est en appui sur ses jambes. Le déclenchement commence par les membres inférieurs pour se propager vers le haut du tronc et se transmettre jusqu'à l'extrémité du ou des membres supérieurs (Keller, 1992). La synchronisation réalisée quand la contraction musculaire se transmet d'un bout à l'autre du corps, est un facteur essentiel de l'efficacité motrice. La difficulté de réalisation de cette synchronisation est souvent évoquée avec les problèmes de rythme (Keller, 1992). Les enfants qui ont participé à notre étude montrent cette organisation temporelle ascendante du mouvement pour toutes les hauteurs de chute du ballon, excepté pour la plus basse (1.5 m). Une différence est observée au niveau de la succession temporelle des temps d'initiation des articulations au cours de cette organisation ascendante. Pour les hauteurs 1.5 et 2 m, si les enfants ont une organisation ascendante, ils manifestent un pattern de réponse " en bloc ", ce pattern fait place à un pattern dissocié à partir de la hauteur 2.5 m. A partir de la conception de Newell (1986), que trois types de contraintes (organiques, environnementales et de la tâche) déterminent le pattern de coordination, nous suggérons que l'apparition des deux patterns de coordination, " en bloc " et dissocié observés dans le cadre de notre expérience, résulte des contraintes temporelles. Pour les lâchers du ballon à 2.5, 3 et 3.5 m, l'enfant dispose de temps pour réaliser sa frappe et engager de manière déliée les différentes articulations. Par contre, lorsque le ballon est lâché d'1.5 m ou 2 m, la complexité de la situation est très élevée (forte pression temporelle),

l'enfant n'a plus le temps d'articuler son organisation segmentaire, il est contraint d'engager en un seul " bloc " la totalité de son corps, de réduire les degrés de libertés à contrôler.

La variabilité de la position de la main

La variabilité de la position de la main dans le mouvement de frappe montre différents changements qui représentent trois périodes, une d'attente, une de préparation et une qui correspond à la frappe proprement dite.

Pendant la période d'attente, l'enfant se maintient dans une attitude expectative, qui dépend de la hauteur de chute du ballon. En effet, cette attitude apparaît seulement pour les trois plus grandes hauteurs de chute du ballon (2.5, 3 et 3.5m). Pour les deux plus petites hauteurs de chute (1.5 et 2m), l'enfant se déplace immédiatement sous la contrainte de temps pour préparer la phase de frappe. La période de préparation est caractérisée par une augmentation continue de la variabilité où l'enfant commence à se déplacer tout en préparant le bras avec des mouvements de la main d'avant en arrière. Ces fluctuations ne sont pas des mouvements précis de frappe, mais elles préparent la phase de frappe et impliquent l'intentionnalité de l'enfant. Cette fluctuation ne serait pas du " bruit " , comme le considère la théorie cognitive, mais une composante fonctionnelle de l'habileté d'interception (théorie écologique-dynamique) elle peut même être bénéfique au système dans le sens où elle faciliterait l'adaptation de celui-ci aux demandes de la tâche (Kelso, 1997). La variabilité de la position de la main fournirait de l'information sur l'état du système (Newell & Corcos, 1993). De plus, nous avons montré que la variabilité de la position de la main est significativement plus élevée lorsque les enfants sont à 60 cm qu'à 40 cm de la rampe. Cette augmentation résulte du déplacement des enfants vers le ballon, qu'ils ne font pas à 40 cm car ils peuvent frapper le ballon sans s'avancer vers celui-ci. Il est à noter que les enfants qui réussissent (les plus âgés), dans tous les cas, ont une variabilité de la position de la main inférieure à celle des enfants plus jeunes.

Les fluctuations observées dans notre étude pourraient être une manifestation de la difficulté des enfants à sélectionner la bonne conduite à employer, à inhiber les conduites concurrentes. Cette défaillance à sélectionner un pattern moteur de réponse, reflétée par les hésitations observées au cours de la réalisation du geste, peut être expliquée de deux manières. La perspective dynamique du développement, considère que l'émergence d'un comportement est due à l'intégration dynamique des composants multiples des systèmes qui parfois coopèrent et parfois sont en compétition (Thelen, 1986, 1995, 2000). A partir de cette idée, nous supposons que la variabilité de la position de la main résulte de l'interaction entre

les contraintes de la tâche et le niveau de " maturation " du contrôle que les enfants ont de leur corps, notamment en ce qui concerne le bras. La différence de variabilité de la position de la main, entre les enfants de 3 ans et ceux de 4 ans, pourrait être due au fait que les enfants les plus âgés ont un niveau de contrôle de leur corps supérieur à celui des plus jeunes. Cette supériorité de contrôle permettrait alors aux plus âgés d'être moins perturbés par les contraintes de la tâche et donc de montrer une stabilité plus importante dans le mouvement de frappe que les plus jeunes enfants.

Au contraire, dans une perspective cognitive, à partir de la notion d'activation-inhibition, défendue par Houdé (1994), l'apparition d'un comportement résulterait de l'activation de ce qui existe déjà mais aussi de l'inhibition cognitive d'une structure concurrente susceptible de court-circuiter le comportement construit. Le processus d'inhibition fonctionne en synergie avec celui d'activation.

Dans cette perspective, la variabilité de la position de la main, et notamment les hésitations observées dans la période de préparation du geste, serait la conséquence de l'incapacité des enfants à inhiber le pattern moteur concurrent, non pertinent. Avec l'âge, les processus devenant plus efficaces (Bjorklund & Harnishfeger, 1990), l'enfant inhibe les patterns moteurs non pertinents pour la tâche qu'il a à réaliser. La notion d'inhibition pourrait expliquer la variabilité dans les comportements moteurs ainsi que les périodes de régression observées au cours du développement des habiletés motrices. L'expérience 1 est une illustration de cette suggestion. Dans cette expérience, le niveau de coordination, dans les renvois de balle avec raquette, diminue après la réalisation de renvois de face. Les enfants précédemment capables de réaliser un renvoi de balle avec un certain niveau de coordination, ont des difficultés (pour les plus jeunes) à réaliser de nouveau le même niveau de coordination. Cette incapacité à inhiber le pattern de niveau inférieur et non pertinent dans la tâche proposée ne s'observe plus chez les enfants plus âgés (9-10 ans). Avec la notion d'inhibition, la variabilité dans le geste et la régression de la performance ne seraient pas dues à un défaut de programme mais à une incapacité à inhiber des structures concurrentes en développement.

Ces deux approches pourraient être complémentaires plutôt qu'opposées dans l'explication du développement du comportement et plus particulièrement dans celui des coordinations, dans le sens où le développement résulterait de l'interaction des deux.

Enfin, l'étude de la variabilité des positions de la main montre que celle-ci diminue à l'approche du contact entre la main et le ballon, pour les deux catégories d'âge (3 et 4 ans) et

pour les enfants de 3 ans quand ils atteignent l'âge de 4 ans, quelles que soient la distance à la rampe (40 cm et 60 cm) et la hauteur de chute du ballon. De plus, il est intéressant de noter que le point le plus bas de la variabilité est à 20-40 ms après le contact. Il se pourrait que l'enfant ne sélectionne pas sa main ou le bord du ballon comme point final, mais plutôt le centre ou la prolongation du ballon qui pourrait être en fait le point final de la frappe. L'expression " traverser " la balle souvent employée, dans le langage sportif de terrain, dans les sports de raquette, au base-ball ou au golf, prendrait tout son sens. Cette variabilité observée reflète une régulation du geste au cours de son exécution.

L'évolution de la variabilité des coordinations et l'établissement d'un couplage temporel pour l'habileté de frappe au cours de l'étude longitudinale se superpose à celle de l'étude transversale. Les variations dans les comportements sont donc bien dus au développement et non pas aux différences inter-individuelles.

Conclusion

Dès 3 ans, les enfants commencent à montrer une aptitude dans les habiletés d'interception. Ce début d'aptitude se révèle par une invariance de l'organisation temporelle du geste qui se manifeste par un couplage entre le déclenchement de la frappe et la hauteur de chute du ballon, et une diminution de la variabilité de la trajectoire de la main à l'approche du contact quel que soit l'âge, la distance à la rampe et la hauteur de chute du ballon. Ces invariants temporels permettraient d'évaluer le niveau d'habileté des enfants dans la frappe d'un mobile et corroborent l'idée que le développement des patrons moteurs, comme les couplages temporels, se manifeste très tôt. De plus, les informations visuelles et les contraintes de l'environnement jouent un rôle prédominant dans l'élaboration et l'organisation des structures de coordination. Le fait que le mouvement soit adapté à la variable optique tau, permet de préciser le délai visuo-moteur dans une situation en contrôle continu. L'optimisation de l'habileté à intercepter un mobile semble liée à la diminution de la variabilité. Le progrès serait lié à l'augmentation de la stabilité au cours des deux premières phases de la frappe de la balle. La diminution de la variabilité pourrait donc être utilisée comme descripteur du progrès dans le développement moteur.

Les différents résultats sur le couplage temporel, la variabilité dans le mouvement, les différences de niveau de coordination selon le contexte, soulignent que le développement de l'habileté est un processus dynamique demandant un traitement mutuel et réciproque des perceptions et des actions pertinentes. La perspective dynamique et, en particulier, l'idée que les nouvelles habiletés doivent surgir des modifications des tendances de coordination déjà

existantes peut aboutir à d'importants éclairages sur les processus développementaux. La théorie des systèmes dynamiques explique des changements non-linéaires tels que le déphasage quand les paramètres perturbent la stabilité des patterns courants et offre une stratégie réglée par des principes pour découvrir et tester les agents spécifiques du changement. La notion d'inhibition pourrait, elle aussi expliquer la non linéarité du développement, où les périodes de régressions refléteraient des patterns concurrents amenant à une période d'instabilité dans l'habileté motrice.

Pour conclure, l'habileté motrice serait la conséquence de la stabilisation de l'interaction entre les processus mises en jeu. Ces processus pourraient être cognitifs (comme celui d'activation-inhibition) ou écologique-dynamique (invariance temporelle et diminution de la variabilité) en fonction de la tâche ou du moment d'intervention au cours du développement. Mais à ce stade de notre travail nous ne sommes pas capables de définir le rôle de chacun dans le développement.

Références

RÉFÉRENCES

- Adam, J.J., Nieuwenstein, J.H., Huys, R., Paas, F.G.W.C., Kingma, H., Willems, P., & Werry, M. (2000). Control of rapid aimed hand movement: the one-target advantage. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(1), 295-312.
- Adams, J.A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111-149.
- Alain, C. (1991). Existence of independent priming types and their longevity characteristics. *International Journal of Sport Psychology*, 22, 334-359.
- Alderson, G.J.K., Sully, D.J. & Sully, H.G. (1974). An operational analysis of a one handed catching task using high speed photography. *Journal of Motor Behavior*, 6(4), 217-226.
- Assaiante, C. (1998). La construction des stratégies d'équilibre chez l'enfant au cours d'activités posturo-cinétiques. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 41(5), 239-249.
- Assaiante, C., & Amblard, B. (1993). Ontogenesis of head stabilization in space during locomotion children: influence of visual cues. *Experimental Brain Research*, 93, 499-515.
- Babler, T.G., & Dannemiller, J.L. (1993). Role of image acceleration in judging landing location of free-falling projectiles. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 15-31.
- Baillargeon, R. (1987). Object permanence in 3.5 and 4.5-month-old infants. *Developmental Psychology*, 23, 655-664.
- Bard, C., Fleury, M., & Teasdale, N. (1995). Développement et apprentissage de la coordination visuo-manuelle chez l'enfant de 6 à 11 ans. In H. Ripoll, J. Bilard, M. Durand, J. Keller, M. Lévêque & P. Therme, *Psychologie du sport. Questions actuelles* (pp.79-100). Paris : Edition de la Revue EPS.
- Bard, C., Paillard, J., Fleury, M., Hay, L., & Larue, J. (1990). Positional versus directional control loops in visuomotor pointing. *European bulletin of cognitive psychology*, 10(2), 145-156.
- Bartlett, F.C. (1932). Remembering: "a study in experimental and social psychology". Cambridge University Press.

- Bell, M.A., & Fox, N.A. (1992). The relation between frontal brain electrical activity and cognitive development infancy. In O. Houdé, Développement, Rationalité et Inhibition. Habilitation à diriger des recherches. Université de Paris V.
- Bernstein, N.A. (1967). Some emergent problems of the regulation of motor acts. In H.T.A. Whiting (Ed). *Human motor actions (Bernstein reassessed)* (pp. 343-371). Amsterdam: N.Holland, Advances in Psychology, 2nded°.
- Bernstein, N.A. (1996). On motor control. In M.L. Latash & M.T. Turvey (Eds), *Dexterity and its development* (pp. 25-44). LEA. New Jersey.
- Bertenthal, B.I., & Hofsten, von C. (1998). Eye, head and trunk control: The foundation for manual development. *Neuroscience and Behavioral Reviews*, 22(4), 515-520.
- Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris : Odile Jacob.
- Bjorklund, D.F., & Harnishfeger, J.P. (1990). The resources construct in cognitive development: diverse sources of evidence and a theory of inefficient inhibition. *Developmental Review*, 10, 48-71
- Bootsma, R.J., & Van Wieringen, P.C.W. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(1), 21-29.
- Bower, T.G.R. (1971). The object in the world of the infant. *Scientific American*, 225(4), 30-38.
- Branta, C., Haubenstricker, J., & Seefeldt, V. (1984). Age changes in motor skills during childhood and adolescence. *Exercise Sport Science Review*, 12, 467-520.
- Brenner, E., & Smeets, J.B.J. (1996). Hitting moving targets: co-operative control of "when" and "where". *Human Movement Science*, 15, 39-53.
- Broadbent, D.E. (1958). Perception and communication. In B. Cadet, *Psychologie cognitive* (pp. 39). Paris : In Press Editions.
- Bucky, S.F., Thomas, J.B., & Gross, R.B. (1972). Development of motor impulse control and reflectivity. *Perceptual and Motor Skills*, 34, 813-814.
- Carlton, L.G. (1981). Processing visual feedback information for movement control. *Journal of Experimental Psychology*, 7(5), 1019-1030.
- Carlton, L.G., & Carlton, M.J. (1987). Response amendment latencies during discrete arm movements. *Journal of Motor Behavior*, 19(2), 227-239.
- Castellio, U., Paulignan, Y., & Jeannerod, M. (1991). Temporal dissociation of motor responses and subjective awareness. A study in normal subjects. In Y. Rossetti & Y.

- Coello, *Contraintes temporelles des relations perception-action* (pp.369-382). *Psychologie Française*, 45(4).
- Cohen, B. (1974). The vestibulo-ocular reflex arc. In R.R.D. Oudejans, C.F. Michaels, F.C. Bakker & K. Davids, Shedding some light on catching in the dark: Perceptual mechanisms for catching fly balls. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(2), 531-542.
- Connolly, K. (1970). Response speed, temporal sequencing and information processing in children. In K. Connolly, *Mechanisms of motor skill development* (pp. 161-192). London: Academic press.
- Corbetta, D. (1999). Apprentissage et organisations neuromotrices chez le bébé. In I. Olivier & H. Ripoll, *Développement psychomoteur de l'enfant et pratiques physiques et sportives* (pp.21-39). Paris : Edition de la Revue EPS
- Dempster, F.N. (1995). Interference and inhibition: An historical perspective. In F.N. Dempster & C.J. Brainerd (Eds.), *Interference and inhibition in cognition* (pp. 3 - 26). San Diego, CA: Academic Press.
- Dempster, W.T. (1955). Space requirements of the seated operator: geometrical, kinematics and mechanical aspects of the body with special reference to the limbs. WADC technical report 55-159, Wright air development center.
- Desmurget, M., & Prablanc, C. (1997). Postural Control of Three-Dimensional Prehension Movements. *Journal of Neurophysiology*, 77, 452-464.
- Di Marco, M., Garulli, A., Prattichizzo, D., & Vicino, A. (2003). A set theoretic approach for time-to-contact estimation in dynamic vision. *Automatica*, 39, 1037-1044.
- Diamond, A. (1991). Neuropsychological insights into the meaning of object concept development. In O. Houdé, *Développement, Rationalité et Inhibition. Habilitation à diriger des recherches*. Université de Paris V.
- Fischman, M.G., Moore, J.B., & Seele, K.H. (1992). Children's one-hand catching as a function of age, gender, and ball location. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 63(4), 349-355.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Fitts, P.M. (1964). Perceptual-motor skill learning. In A. W. Melton (Ed.), *Categories of human learning*: London: Academic Press.
- Fleishman, E.A., & Rich, S. (1963). Role of kinaesthetic and spatial-visual abilities in perceptual-motor learning. *Journal of Experimental Psychology*, 66(1), 6-11.

- Fleury, M., Basset, F., Bard, C., & Teasdale, N. (1998). Target speed alone influences the latency and temporal accuracy of interceptive action. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 52(2), 84-91.
- Gallahue, D.L. (1982). *Understanding motor development in children*. New York: Wiley & Sons.
- Gardner, H.G. (1993). *Histoire de la révolution cognitive : la nouvelle science de l'esprit*. Paris : Editions Payot.
- Gesell, A; (1929). Maturation and infant behaviour pattern. *Psychological Review*, 36, 307-319.
- Gibbs, C.B. (1954). Servo principles in sensory organisation and the transfer of skill. In H.T.A. Whithing, *Sports de balle et apprentissage : Aspect psychologique* (p.18). Canada : Les presses de l'Université du Québec.
- Gibson, E.J., & Pick, A.D. (2000). *An ecological approach to perceptual learning and development*. New-York: Oxford University Press.
- Gibson, J.J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, 49, 182-194.
- Gibson, J.J. (1986). *The ecological approach to visual perception*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gielen, C.C.A.M., Vrijenhoek, E.J., Flash, T., & Neggers, S.F.W. (1997). Arm Position Constraints During Pointing and Reaching in 3-D Space. *Journal of Neurophysiology*, 78, 660-673.
- Goodale, M.A., Humphrey, G.K. (1998). The objects of action and perception. *Cognition*, 67, 181-207.
- Grealy, M.A. (2002). Perception et action dans le domaine du sport. In Y. Coello & J. Honoré, *Percevoir, s'orienter et agir dans l'espace : approche pluridisciplinaire des relations perception-action* (pp.115-131). Marseille : Solal.
- Gredebäck, G., von Hofsten, C., & Boudreau, J.P. (2002). Infants' visual tracking of continuous circular motion under conditions of occlusion and non-occlusion. *Infant Behavior & Development*, 25, 161–182.
- Hadders-Algra, M. (2002). Variability in infant motor behavior: A hallmark of the healthy nervous system. *Infant Behavior and Development*, 25, 433-451.
- Haggard, P., & Richardson, J. (1996). Spatial patterns in the control of human arm movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(1), 42-62.

- Harnishfeger, K.K. (1995). The development of cognitive inhibition. Theories, definitions, and research evidence. In F.N. Dempster & C.J. Brainerd (Eds.), *Interference and inhibition in cognition* (pp. 175-206). San Diego, CA: Academic Press.
- Harnishfeger, K.K., & Bjorklund, D.F. (1993). The ontogeny of inhibition mechanisms: A renewed approach to cognitive development. In M.L. Howe & R. Pasnak (Eds), *Emerging themes in cognitive development: Vol.1. Foundations* (pp.28-49). New-York: Springer-Verlag.
- Hauert, C.L., Badan, M., Pellizzer, G., & Sevino, O. (1999). Le développement perceptivo-moteur : quelques apports des études de pointage et de visée visuo-manuels. In I. Olivier & H. Ripoll (Eds), *Développement psychomoteur de l'enfant et pratiques physiques et sportives* (pp.61-80). Paris : Edition de la revue EPS.
- Hay, L. (1979). Une analyse spatio-temporelle de mouvements simples chez l'enfant. Thèse de doctorat - Université d'Aix-Marseille II, faculté des sciences de Marseille, Marseille, France.
- Hay, L., & Bard, C. (1999). Rôle de la proprioception dans la perception et le contrôle des mouvements chez l'enfant. In I. Olivier & H. Ripoll (Eds), *Développement psychomoteur de l'enfant et pratiques physiques et sportives* (pp.81-96). Paris : Edition de la revue EPS.
- Hay, L., Bard, C., Fleury, M., & Teasdale, N. (1991). Kinematics of aiming in direction and amplitude: A developmental study. In C. Bard, M. Fleury & N. Teasdale, *Développement et apprentissage de la coordination visuo-manuelle chez l'enfant de 6 à 11 ans* (pp85). In *Psychologie du sport. Questions actuelles* (pp.79-100). Paris : Edition de la Revue EPS.
- Hay, L., Fleury, M., & Bard, C. (1986). La coordination visuo-manuelle entre 6 et 10 ans spécification, contrôle et évaluation du mouvement en direction et en amplitude. *Psychologie Française*, 31(1), 15-22.
- Haywood, K.M. (1986). Life span motor development. In J. Keller, *Le développement du contrôle des habiletés motrices chez l'enfant* (pp.107). In *Psychologie du sport. Questions Actuelles*. Paris : Edition de la Revue EPS.
- Heaton, R.K., Chelune, G.J., Talley, J.L, Kay, G.G., & Curtin, G. (1993). *Wisconsin Cars Sorting Test Manuel " Revised and expanded "*. Psychological Assesement Ressources, Inc.
- Helmholtz, H.von. (1962). Treatise on pysical optics. In H.G. Gardner, *Histoire de la révolution cognitive : la nouvelle science de l'esprit*. Paris : Editions Payot.

- Hick, W.E. (1952). On the rate of gain of information. In R. Kerr, *Psychomotor learning*. Saunders College Publishing.
- Hofsten, von C. (1983). Catching skills in infancy. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9(1), 75-85.
- Houdé, O. (1994). *Habilitation à diriger des recherches*. Université de Paris V.
- Houdé, O. (1997). Numerical development: From the infant to the child. Wynn's (1992) paradigm in 2- and 3-Year olds. *Cognitive Development*, 12(3), 373-391.
- Houdé, O. (1999). Executive performance/competence, and inhibition in cognitive development. Object, number, categorization and reasoning. *Developmental Science*, 273-275.
- Hubbard, A.W., & Seng, C.N. (1954). Visual movements of batters. *Research Quarterly*, 25, 42-57.
- Illingworth, R.S. (1966). *The development of the infant and young child: Normal and abnormal development* (3rd ed.). Edinburgh: Livingstone.
- Jensen, J.L., Phillips, S.J., & Clark, J.E. (1994). For young jumpers, differences are in the movement's control, not its coordination. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 65(3), 258-268.
- Kagan, J., Rosman, B.L., Day, D., Albert, J., & Phillips, W. (1964). Information processing in the child: Significance of analytic and reflective attitudes. *Psychological Monographs: General and Applied*, 78(1) (Whole 578), 1-37.
- Kay, H. (1969). The development of motor skills from birth to adolescence. In E.A. Bilodeau (Ed), *Principles of skills acquisition* (pp. 133-157). New-York: Academic Press.
- Kay, H. (1970). Analysing motor skill performance. In K. Connolly, *Mechanisms of motor skill development* (pp.139-159). London: Academic press.
- Keele, S.W. (1968). Movement control in skilled performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387-403.
- Keele, S.W. (1977). Current status of the motor program concept. In R.W. *Psychology of motor behavior and sport* (pp.2-16). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Keele, S.W., & Posner, M.I. (1968). Processing of visual feed-back in rapid movement. *Journal of Experimental Psychology*, 77, 155-158.
- Keller, J. (1982). Influence d'un trait de personnalité sur le traitement de l'information au tennis. Mémoire pour le diplôme de l'INSEP, Paris.
- Keller, J. (1992). *Activité physique et sportive et motricité de l'enfant*. Paris : Vigot (coll. Sport + enseignement).

- Keller, J. (1993). L'apprentissage moteur. In E. Thill, R. Thomas & J. Caja, *Manuel de l'éducateur sportif* (pp. 302-361). Paris : Vigot Collection Sport et Enseignement, (8^e Edition).
- Keller, J. (1995). Orientation méthodologique pour l'étude du développement des habiletés motrices de l'enfant. In J. Bertsch & C. Le Scanff (Eds.), *Apprentissages et conditions d'apprentissage* (pp.261-278). Paris : P.U.F.
- Keller, J., & Fleurance, P. (1987). Adaptation fonctionnelle à l'espace déterminé par les trajectoires de balle chez l'enfant de 3 à 9 ans. In M. Laurent & P. Therme (Eds), *Recherche en activités physiques et sportives 2* (pp.111-122). Marseille : Centre de recherche en A.P.S.
- Keller, J., & Ripoll, H. (2001). Reflective-Impulsive style and conceptual tempo in a gross motor task. *Perceptual and Motor Skills*, 92, 739-749.
- Keller, J., & Ripoll, H. (2004). Stability of reflective-impulsive style in coincidence-anticipation motor tasks. *Learning and Individual Differences*, 14, 209-218.
- Keller, J., & Rosey, F. (2000). Style impulsif-réfléchi, processus d'inhibition et motricité. *Actes du congrès International de SFPS*, INSEP, Paris, France.
- Kelso, J.A.S. (1997). Relative timing in brain and behavior: some observations about the generalised motor program and self-organised coordination dynamics. *Human Movement Science*, 16, 453-460.
- Kelso, J.A.S., & Clark, J.E. (1980) (Eds), *The development of movement control and co-ordination*. USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- Kelso, J.A.S., & Schönner, G. (1988). Self-Organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, 7, 27-46.
- Kerr, R. (1982). *Psychomotor learning*. Saunders College Publishing.
- Kugler, P.N., & Turvey, M.T. (1987). *Information, natural Law, and the self-assembly of rhythmic movement*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kugler, P.N., Kelso, J.A.S., & Turvey, M.T. (1982). On the control and co-ordination of naturally developing systems. In J.A.S Kelso & J.E. Clark (Eds), *The development of movement control and co-ordination* (pp.5-78). USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- Lautrey, J., & Caroff, X. (1999). Une approche pluraliste du développement cognitif : la conservation revisitée. In G. Netchine-Grynberg, *Développement et fonctionnement cognitifs chez l'enfant* (pp. 155-179). Paris : Presse Universitaire de France.
- Lecas, J.C. (1992). *L'attention visuelle : de la conscience aux neurosciences*. Psychologie et Sciences Humaines. Mardaga.

- Lee, D.N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5, 437-459.
- Lee, D.N. (1978). The functions of vision. In L. Pick, Jr. & E. Saltzman (Eds), *Modes of perceiving and processing information* (pp. 159-170). New York: Wiley.
- Lee, D.N. (1980). Visuo-motor coordination in space-time. In G.E Stelmach and J. Requin (Eds), *Tutorials in Motor Behavior* (281-293). Amsterdam: North-Holland.
- Lee, D.N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception and Psychophysics*, 15(3), 529-532.
- Lee, D.N., & Reddish, P.E. (1981). Plummeting gannets: A paradigm of ecological optics. *Nature*, 293, 293-294.
- Lee, D.N., Craig, C.M., & Grealy, M.A. (1999). Sensory and intrinsic coordination of movement. *Proceeding of the Royal Society* (London, B), 266(1432), 2029-2035.
- Lee, D.N., Davies, M.N.O., Green, P.R., & Van Der Weel, F.R. (1993). Visual control of velocity of approach by pigeons when landing. *Journal of Experimental Biology*, 180, 85-104.
- Lee, D.N., Simmons, J.A. & Saillant, P.A. (1995). Steering by echolocation: a paradigm of ecological acoustic. *Journal Comparative Physiology A*, 176, 34-354.
- Lee, D.N., Young, D.S., Reddish, P.E., Lough, S., & Clayton, T.M.H. (1983). Visual timing in hitting an accelerating ball. *Journal of Experimental Psychology*, 35(A), 333-346.
- Lee, T.D., Elliott, D., & Carnahan, H. (1987). The preparation of actions and parameters of action: A fixed or variable process? *Acta psychologica*, 66(1), 83-102.
- Lefford, A. (1970). Sensory, perceptual and cognitive factors in the development of voluntary Actions. In K. Connolly, *Mechanisms of motor skill development* (pp. 207-224). London: Academic press.
- Luria, A.R. (1966). Higher cortical functions in man. In M.A. Passler, W. Isaac, & G.W. Hynd, *Neuropsychological development of behavior attributed to frontal lobe functioning in children. Developmental Neuropsychology*, 1(4), 349-370.
- Maccoby, E.E., Dowley, E.M., Hagen, J.W., & Degerman, R. (1965). Activity level and intellectual functioning in normal preschool children. *Child Development*, 36, 761-770.
- MacNeilage, P.F., & MacNeilage, L.A. (1973). Central processes controlling speech production during sleep and waking. In R.A. Schmidt, *A schema theory of discrete motor skill learning. Psychological Review*, 82(4), 225-260.

- Marr, D. (1982). Vision: a computational investigation in the human representation and processing of visual information. In B. Cadet, *Psychologie cognitive* (pp.115-118). Paris : In Press Editions.
- Marteniuk, R.G. (1976). *Information processing in motor skills*. New-York: Holt Rinehart Winston.
- Mc Laughlin, C. (1986). Vision and the timing of interceptive proceeding of the VIIIth. Commonwealth and International Conférence on Sport, Physical Education, Recreation and Danse. Glasgow, July the 18-23th. In J. Wathins, T. Reil and L. Burwitz (Eds), *Sports Sciences* (pp.337-342)
- McBeath, M.K., Shaffer, D.M., & Kaiser, M.K. (1995). How base-ball outfielders determine where to run to catch fly balls. *Science*, 268, 569-573.
- McGraw, M.B. (1943). *Neuromuscular maturation of the human infant*. New York: Hafner.
- McLeod, P., & Dienes, Z. (1996). Do fielders know where to go to catch the ball or only how to get there? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(3), 531-543.
- McLeod, P., Reed, N., & Dienes, Z. (2001). Toward a unified fielder theory: What we do not yet know about how people run to catch a ball. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(6), 1347-1355.
- McLeod, P., Reed, N., & Dienes, Z. (2002). The optic trajectory is not a lot of use if you want to catch the ball. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(6), 1449-1501.
- Mischel, W., Shoda, Y., & Rodrigez, M.L. (1989). Delay of gratification in children. *Science*, 244, 933-938.
- Netchine-Grynberg, G. (1999). *Développement et fonctionnement cognitifs : Vers une intégration*. Paris : Presse Universitaire de France.
- Newell, K.M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M.G. Wade & H.T.A. Whiting (Eds.), *Motor development in Children: Aspects of coordination and control* (pp. 341-360). Boston, M.A.: Martinus Nijhoff.
- Newell, K.M., & Corcos, D.M. (1993). Issues in Variability and motor control. In K.M. Newell, & D. Corcos, *Variability and motor control* (pp.1-12). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Newell, K.M., Kugler, P.N., van Emmerick, R.E.A., & MacDonald, P.V. (1989). Search strategies and the acquisition of coordination. In S.A. Wallace (Ed), *Perspectives on the*

- coordination of movement* (pp. 85-122). Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland).
- Not, L. (1978). Le développement perceptif. In M. Bataille, M. Cariou, C. Laterrasse, M.C. Mate & L. Not, *Psychologie du développement à l'usage des éducateurs* (pp.53-66). Travaux de l'université de Toulouse – Le Mirail, sérieA, Tome VII
- Orliaguet, J.P. (1986). Facteurs spatiaux et dominance sensorielle lors de la perception de la position de la main chez l'enfant. *Psychologie Française*, 31(1), 23-27.
- Oudejans, R.R.D., Michaels, C.F., Bakker, F.C., & Davids, K. (1999). Shedding some light on catching in the dark: Perceptual mechanisms for catching fly balls. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(2), 531-542.
- Paillard, J. (1994). L'intégration sensori-motrice et idéomotrice. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (eds). *Traité de Psychologie Expérimentale* (Chap. III.6. pp. 925-961). Presses Universitaires de France. Paris.
- Pascual-Leone, J. (1970). A mathematical model for the transition rule in Piaget's developmental stages. *Acta Psychologica*, 32, 301-345.
- Pascual-Leone, J. (1988). Organismic processes for neo-Piagetian theories: a dialectical causal account of cognitive development. In O. Houdé, *Développement, Rationalité et Inhibition*. Habilitation à diriger des recherches. Université de Paris V.
- Pascual-Leone, J. (2000). Reflexions on working memory: Are the two models complementary? *Journal of experimental child psychology*, 77, 138-154.
- Passler, M.A., Isaac, W., & Hynd, G.W. (1985). Neuropsychological development of behavior attributed to frontal lobe functioning in children. *Developmental Neuropsychology*, 1(4), 349-370.
- Piaget, J. (1954). *The construction of reality in the child*. N.Y. Basic Books.
- Piaget, J. (1977). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Actualités Pédagogiques et Psychologiques, Delachaux et Niestlé Editeurs (9^{ème} édition), Paris : France.
- Pieron, H. (1973). *Vocabulaire de la psychologie*. PUF (5^{ème} édition).
- Preyer. (1886). L'âme de l'enfant. In J. Piaget, *La naissance de l'intelligence chez l'enfant* (p.62). Actualités Pédagogiques et Psychologiques, Delachaux et Niestlé Editeurs (9^{ème} édition), Paris : France.
- Rader, N., & Vaughn, L.A. (2000). Infant reaching to a hidden affordance: Evidence for intentionality. *Infant Behavior & Development*, 23, 531–541.

- Richards, V., & Murphy, P. (1988). Viv Richards' cricket master-class. In P. McLeod & Z. Dienes. Do fielders know where to go to catch the ball or only how to get there? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(3), 531-543.
- Ripoll, H., & Benguigui, N. (1999). Effets du développement de l'enfant et de la pratique sportive sur la maîtrise des tâches d'interception. In I. Olivier & H. Ripoll (Eds), *Développement psychomoteur de l'enfant et pratiques physiques et sportives* (pp.185-212). Paris : Edition de la revue EPS.
- Robertson, M. A. (1977). Stability of stage categorization across trials: Implications for the stage theory of overarm throw development. *Journal of Human Movement Studies*, 3, 49-59.
- Robertson, M. A., & Halverson, L. E. (1984). *Developping chidren. Their changing movement*. Philadelphia: Lea & Febiger.
- Robertson, M.A. (1978). Longitudinal evidence for developmental stages in the forceful overarm throw. *Journal of Human Movement Studies*, 4, 167-175.
- Rosenbaum, D.A. (1980). Human movement initiation: specification of arm, direction and extent. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109(4), 444-474.
- Rosey, F., & Keller, J. (2003). Variabilité et développement du lancer à bras cassé chez l'enfant de 3 à 9 ans. *Journées Nationales d'Etude de la Société Française de Psychologie du sport* (20-21 Mars), Agir, *Connaître et Accompagner : interrogations sur les modèles organisateurs de la psychologie du sport*. Paris : Espace Charléty, France.
- Salmela, J.H., & Alain, C. (1973). Performance humaine, habiletés motrices et manipulation d'information : Vue d'ensemble. *Mouvement*, 7(4) 173-177.
- Salmela, J.H., & Alain, C. (1973). Performance humaine, habiletés motrices et manipulation d'information : Application. *Mouvement*, 8(1-2), 45-50.
- Savelsbergh, G.J.P., Davids, K., Van der Kamp, J., & Bennett, S.J. (2003). Theoretical perspectives on the development of movement co-ordination in children. In G.J.P. Savelsbergh, K. Davids, J. Van der Kamp, & S.J. Bennett, *Development of movement co-ordination in children applications in the fields of ergonomics* (pp.1-14). Health Sciences and Sport.
- Savelsbergh, G.J.P., Rosengren, K., Van der Kamp, J., & Verheul, M. (2003). Catching action development. In G.J.P. Savelsbergh, K. Davids, J. Van der Kamp, & S.J. Bennett, *Development of movement co-ordination in children applications in the fields of ergonomics* (pp.191-212). Health Sciences and Sport.

- Savelsbergh, G.J.P., Whiting, H.T.A., & Bootsma, R.J. (1991). Grasping Tau. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(2), 315-322.
- Schmidt, R.A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225-260.
- Schöner, G., & Kelso, J.A.S. (1988). Dynamics pattern generation in behavioral and neural systems. *Science*, New series, 239(4847), 1513-1520.
- Schöner, G., Zanone, P.G., & Kelso, J.A.S. (1992). Learning as change of coordination dynamics: Theory and experiment. *Journal of Motor Behavior*, 24, 29-48.
- Seefeldt, V. (1980). Development of motor patterns: implications for elementary school physical education. In C.H. Nadeau, R. Halliwell, M. Newell, & C. Roberts (Eds), *Psychology of Motor Behavior and sport* (pp.314-323). Champaign IL: Human Kinetics.
- Shaffer, D.M., & McBeath, M.K. (2002). Base-ball outfielders maintain a linear optical trajectory when tracking uncatchable fly balls. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(2), 335-348.
- Shannon, C.E., & Weaver, W. (1949). The mathematical theory of communication. In B. Cadet, *Psychologie cognitive* (pp. 38). Paris : In Press Editions.
- Siegler, R.S. (1999). *Intelligences et développement de l'enfant : Variations, évolution, modalités*. Belgique : De Boeck Université.
- Smeets, J.B.J., Brenner, E. (1995). Perception and action are based on the same visual information: Distinction between position and velocity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1), 19-31.
- Stadulis, R.E. (1971). Coincidence-anticipation behavior of children. In R.E. Stadulis, Motor skill analysis: Anticipation-anticipation. *Quest*, 17, 70-73.
- Stadulis, R.E. (1972). Motor skill analysis: Coincidence-anticipation. *Quest*, 17, 70-73.
- Starkes, J.L. (1986). Catching and spatially locating a ball in flight: variables underlying their development. *Perceptual and Motor Skills*, 63, 1275-1286.
- Starkes, J.L. (1987). Skill in field hockey: the nature of the cognitive advantage. *Journal of Sport Psychology*, 9, 146-160.
- Sugden, D.A. (1980). Movement speed in children. *Journal of Motor Behavior*, 12(2), 125-132.
- Thelen, E. (1986). Development of coordinated movement: Implications for early human development. In M.G. Wade & H.T.A. Whiting (Eds.), *Motor development in Children: Aspects of coordination and control* (pp. 107-124). Boston, M.A.: Martinus Nijhoff.
- Thelen, E. (1995). Motor Development: A new synthesis. *American Psychologist*, 50 (2), 79

- Thelen, E. (2000). Many roads lead to Rome: locomotion and dynamics. *Infancy*, 1, 221-224.
- Thelen, E., & Fischer, D.M. (1982). Newborn stepping: An explanation for a "disappearing reflex". *Developmental Psychology*, 18(5), p. 760-775.
- Thelen, E., Corbetta, D., & Spencer, J.P. (1996). Development of reaching during the first year: Role of movement speed. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 1059-1076.
- Thelen, E., Corbetta, D., Kamm, K., Spencer, J.P., Schneider, K., & Zernicke, R.F. (1993). The transition to reaching: Mapping intention and intrinsic dynamics. *Child Development*, 64, 1058-1098.
- Tijus, C. (2001). *Introduction à la psychologie cognitive*. Nathan Université : Paris
- Tipper, S.P. (1985). The negative priming effect: Inhibitory priming by ignored objects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 37(A), 571-590.
- Todd, J.T. (1981). Visual information about moving objects. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 7(4), 795-810.
- Treisman, A. (1992). Perceiving and re-perceiving objects. *American Psychologist*, 47, 862-875.
- Trésilian, J.R. (1994). Perceptual and motor processes in interceptive timing. In M. Fleury, F., Basset, C., Bard, & N. Teasdale. (1998). Target speed alone influences the latency and temporal accuracy of interceptive action. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 52(2), 84-91.
- Turvey, M.T., Shaw, R.E., & Mace, W. (1978). Issues in a theory of action: Degrees of freedom, coordinative structures and coalitions. In J. Requin (Ed), *Attention and Performance VII*(pp.557-595). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Tyldesley, D.A., & Whiting, H.T.A. (1975). Operational timing. *Journal of Human Movements Studies*, 1, 172-177.
- Van der Meer, A.L.H., van der Weel, F.R., & Lee, D.N. (1994). Prospective control in catching by infants. *Perception*, 23, 387-302.
- Visser, M., Das-Smaal, E., & Kwakman, H. (1996). Impulsivity and negative priming: Evidence for diminished cognitive inhibition in impulsive children. *British Journal of Psychology*, 87, 131-140.
- Wallon, H. (1941) (Ed, 1968). *L'évolution psychologique de l'enfant*. Paris : A.Colin.
- Watt, S.J., & Bradshaw, M.F. (2000). Binocular cues are important in controlling the grasp but not the reach in natural prehension movements. *Neuropsychologia*, 38, 1473-1481.

- Weiss, P. (1941). Does sensory control play a constructive role in the development of motor coordination. In K.M. Newell, *Constraints on the development of coordination*. In *Motor development in Children: Aspects of coordination and control* (pp. 341-360). Boston, M.A.: Martinus Nijhoff.
- Whitall, J. (1989). A developmental study of the interlimb coordination in running and galloping. *Journal of Motor Behavior*, 21(4), 409-428.
- Whiting, H.T.A. (1979). *Sports de balle et apprentissage : Aspect psychologique*. Canada : Les presses de l'Université du Québec.
- Wickstom (1977). *Fundamental motor patterns*. Philadelphia: Lea & Febiger, 3rd Ed.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics*. N.Y.: Wileys & Sons.
- Wiener, N. (1961). *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*. In H.G. Gardner, *Histoire de la révolution cognitive : la nouvelle science de l'esprit*. Paris : Editions Payot.
- Wild, M. (1938). The behaviour patterns of throwing and some observations concerning its course of development in children. *Research Quarterly*, 9, p. 20-24.
- Williams, J.G. (1973). Perceptual-motor development in children. In C. Bard, M. Fleury, G. Ouellet & L. Carrière, *Composantes du comportement d'anticipation- coïncidence des enfants de 6 à 11 ans*. In *Psychology of motor behavior and sport* (pp.291-299).
- Williams, K. (1985). Ages differences on a coincidence-anticipation task: influence of stereotypic or "preferred" movement speed. *Journal of Motor Behavior*, 17(4), 389-410.
- Williams, K. (1988). Development in object interception. In J.E. Clark & J.H. Humphrey, *Advances in motor development research* (pp.201-217). New-York: A.M.S. Press
- Zaal, F.T.J.M., & Michaels, C.F. (2003). The information for catching fly balls: judging and intercepting virtual balls in a CAVE. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 29(3), 537-555.
- Zanone, P.G., & Kelso. J.A.S. (1992). Evolution of behavioral attractors with learning: Nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 403-421.

Annexes

ANNEXE 1

Liste des abréviations utilisées

Expérience 1

RC : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *avant* le passage de la tâche d'intéférence.

RI : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *après* le passage de la tâche d'intéférence.

Expérience 2

EMBC : Ecart de la main au ballon au moment du contact.

FB : Enfants qui réussissent dès la première session.

GD1 : Enfants qui échouent lors de la première session.

GD2 : Enfants qui réussissent après avoir échoué lors de la première session.

TCMB : Temps du contact de la main avec le ballon.

TDM : Temps de déclenchement de la main.

TMM : Temps de mouvement de la main.

Expérience 2- Etude 1

EMBC : Ecart de la main au ballon au moment du contact.

EPM : Ecart types des positions de la main.

FB : Enfants qui réussissent dès la première session.

GD1 : Enfants qui échouent lors de la première session.

GD2 : Enfants qui réussissent après avoir échoué lors de la première session.

PoM : Positions de la main au cours de la frappe.

Expérience 2- Etude 3

PoM : Positions de la main au cours de la frappe.

TCMB : Temps du contact de la main avec le ballon.

TDE : Temps d'initiation de l'épaule du bras qui frappe.

TDG : Temps d'initiation du genou.

TDH : Temps d'initiation de la hanche.

TDM : Temps de déclenchement de la main.

TDP : Temps d'initiation du pied.

TPP : Temps de la pose du pied.

Expérience 3

CG : L'enfant est de *côté* par rapport à la rampe et le ballon est de *taille constante*.

CDG : L'enfant est de *côté* par rapport à la rampe et le ballon *se dégonfle* au cours de son approche.

FG : L'enfant est *face* à la rampe et le ballon est de *taille constante*.

FDG : L'enfant est *face* à la rampe et le ballon *se dégonfle* au cours de son approche.

CF : Comparaison de la position de l'enfant par rapport à la rampe (*Côté-Face*).

GDG : Comparaison des tailles du ballon (*Gonflé-Dégonflé*)

ANNEXE 2

Données des niveaux de rotation dans les renvois de balle avec raquette de mini-tennis en fonction de l'âge et du genre pour les deux conditions (avant et après le passage de la tâche d'interférence)

Groupe des 6 ans

Groupe 6 ans	Genre	RC	RI
6	1	2.9	2
6	1	2.5	2
6	1	1.7	1.6
6	1	1.4	1.3
6	1	1.3	1
6	1	1.7	1
6	1	1.8	1.6
6	1	1.3	1
6	1	2	2
6	1	2.5	2
6	1	2	1.3
6	1	4	4
6	1	2.2	2
6	1	3.9	3.3
6	1	3	3
6	1	3	3
6	2	2	1
6	2	1.5	1
6	2	1.6	1
6	2	1.9	1
6	2	2	1.6
6	2	3.1	2.3
6	2	3.1	3
6	2	2.9	2.3
6	2	3	3
6	2	2	2.6
6	2	2.9	2.6
6	2	2.8	2.3
6	2	2.8	2.6

Où,

RC : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *avant* le passage de la tâche d'interférence.

RI : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *après* le passage de la tâche d'interférence.

Groupe des 7 ans

Groupe 7 ans	Genre	RC	RI
7	1	2.8	2.6
7	1	2.4	1.6
7	1	3	3
7	1	3.1	2.6
7	1	3.9	3.6
7	1	3.7	4
7	1	2.7	2.6
7	1	3.1	2.6
7	1	2.9	3
7	1	2.7	3
7	1	2.9	2
7	1	3.6	3.3
7	1	2.6	2.3
7	1	2.9	3
7	1	3	3
7	1	3	2.3
7	2	2.8	3
7	2	3	3
7	2	3	3
7	2	3.3	2.3
7	2	2.3	1.6
7	2	2.3	2.6
7	2	3.1	2.6
7	2	3	2.3
7	2	3.2	3.3
7	2	2	2
7	2	3.4	2.6
7	2	3.1	3
7	2	2.1	2
7	2	2	2
7	2	3.1	2.6
7	2	3.3	3
7	2	2.3	2
7	2	3.1	2.5
7	2	3.1	2.6
7	2	2.8	3

Où,

RC : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *avant* le passage de la tâche d'interférence.

RI : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *après* le passage de la tâche d'interférence.

Groupe des 8 ans

Groupe 8 ans	Genre	RC	RI
8	1	2.8	2.3
8	1	4	3.3
8	1	3.3	3
8	1	3.3	3.3
8	1	3.1	3
8	1	2.8	2.3
8	1	3.1	3
8	1	3.9	4
8	1	3	2.6
8	1	3	3
8	2	2.3	2.6
8	2	3	3
8	2	3	3
8	2	3.2	3
8	2	2.9	2
8	2	2.9	3
8	2	2.7	2.6
8	2	3.8	2.6
8	2	2.8	2
8	2	2.3	2
8	2	3.4	3.3
8	2	2.6	1.6
8	2	3.6	2
8	2	2.9	2.3

Où,

RC : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *avant* le passage de la tâche d'interférence.

RI : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *après* le passage de la tâche d'interférence.

Groupe des 9 ans

Groupe 9 ans	Genre	RC	RI
9	1	3.7	4
9	1	3.4	2.6
9	1	3	1.3
9	1	2.7	2.6
9	1	3.8	3.3
9	1	3.2	3
9	1	3.9	4
9	1	4	4
9	1	2.9	2
9	1	3.2	3
9	1	2.9	3
9	1	3.3	2.3
9	2	3.3	3
9	2	2.8	3
9	2	2.8	1.6
9	2	3	3
9	2	3	2.3
9	2	2.8	3.9
9	2	3	2.3
9	2	2.8	2.6
9	2	3.1	3
9	2	2.4	1
9	2	3	3
9	2	2.9	3
9	2	2.4	3

Où,

RC : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *avant* le passage de la tâche d'interférence.

RI : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *après* le passage de la tâche d'interférence.

Groupe des 10 ans

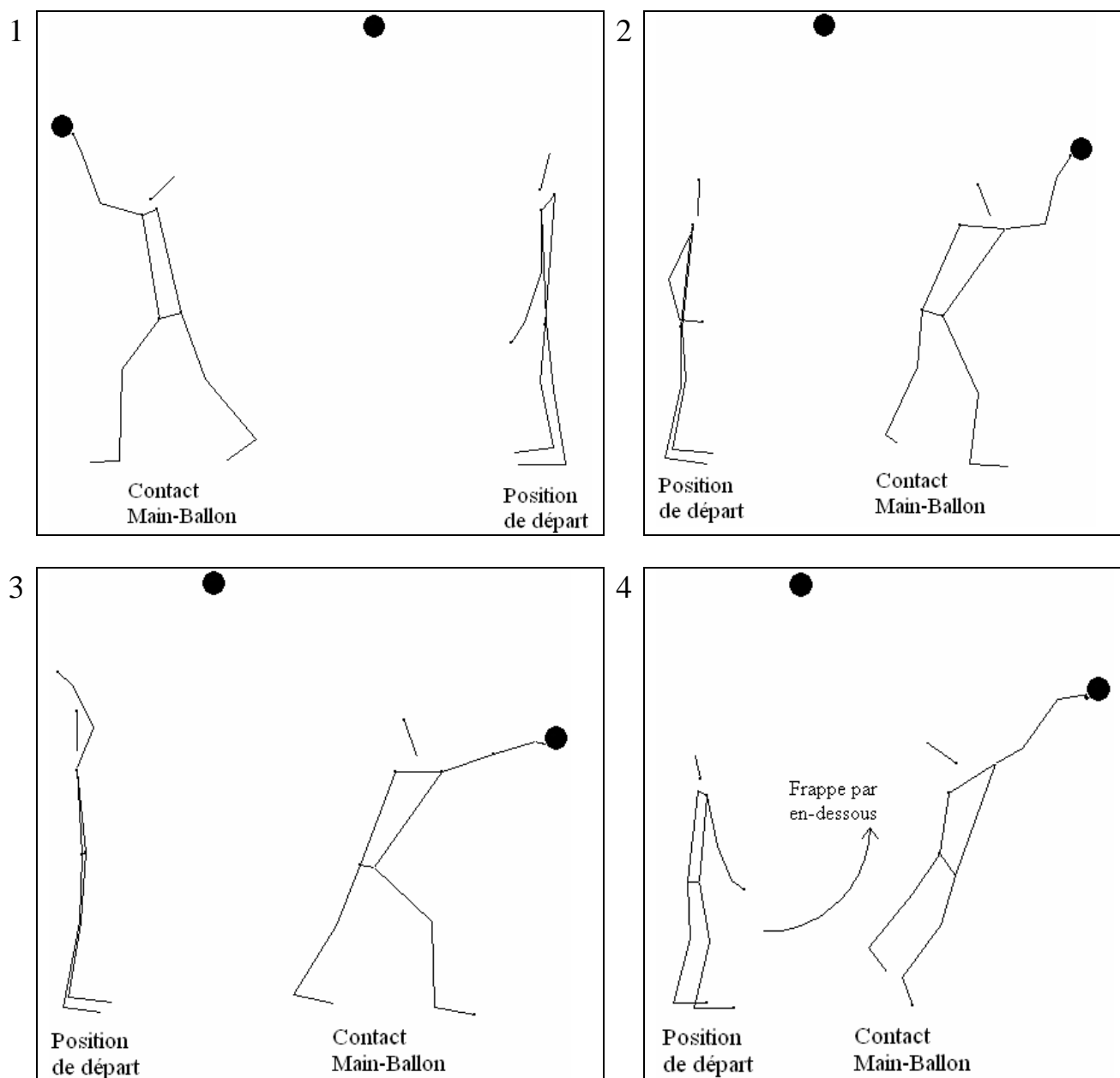
Groupe 10 ans	Genre	RC	RI
10	1	3	3
10	1	3.5	2.6
10	1	3.1	3.3
10	1	3	3
10	1	3.2	3
10	1	2.5	2.3
10	1	2.9	3
10	1	3	2.6
10	1	2.3	3
10	1	2.1	2.3
10	1	2.9	3.6
10	1	3.1	3
10	1	3	3
10	1	3.8	3.3
10	1	2.8	2.6
10	1	3.5	2.3
10	1	3.3	3
10	1	3	2
10	1	3.4	3
10	1	3.9	4
10	2	2.2	1
10	2	3	2
10	2	3	3
10	2	3.1	3
10	2	2	3
10	2	2.9	3
10	2	2.4	2
10	2	3	2.6
10	2	3.2	3
10	2	3.1	3.3
10	2	3.4	3

Où,

RC : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *avant* le passage de la tâche d'interférence.

RI : Niveau de *rotation* des frappes de coup droit réalisées *après* le passage de la tâche d'interférence.

ANNEXE 3



Les différentes positions d'attente et frappes du ballon.

1, 2, 3 : exemples de frappe à bras cassé

4 : exemple de frappe par en-dessous (un seul enfant).

ANNEXE 4

Données des temps de déclenchement de la main (TDM, ms), des temps de contact de la main avec le ballon (TCMB, ms), des temps de mouvement de la main (TMM, ms) et des écarts main-ballon au moment du contact (EMBC, pixels) en fonction des différentes sessions expérimentales

Données de la première session

Sujets	Hauteurs	TCMB 40cm	TDM 40cm	EMBC 40cm	TMM 40cm	TCMB 60cm	TDM 60cm	EMBC 60cm	TMM 60cm
S1	1.5	540	420	5	120	400	320	18.6	80
	2	920	780	18	140	880	780	20	100
	2.5	1220	1100	32	120	1180	1080	37.21	100
	3	1440	1300	19.5	140	1460	1380	19	80
	3.5	1580	1460	18	120	1640	1560	17	80
S2	1.5	660	460	70	200	500	340	77	160
	2	1080	940	25	140	1280	1100	92	180
	2.5	1220	1020	20	200	1340	1280	33.24	60
	3	1420	1280	13.5	140	1500	1340	11.66	160
	3.5	1660	1520	32.5	140	1720	1600	18.43	120
S3	1.5	660	580	15	80	760	640	48.3	120
	2	1020	900	20	120	1060	920	11	140
	2.5	1280	1100	23	180	1340	1240	34.5	100
	3	1500	1340	13.5	160	1480	1320	2.2	160
	3.5	1680	1500	5	180	1740	1540	18.8	200
S4	1.5	680	540	46	140	760	600	61	160
	2	940	740	8.5	200	1220	-20	186.5	1240
	2.5	1480	1020	160	460	1260	1040	14.5	220
	3	1640	1440	60.5	200	1720	1600	87	120
	3.5	1700	1580	5	120	1940	-20	194	1960
S5	1.5	860		156		860	-60	124	
	2	1420		90.5		1240	-40	155.4	
	2.5	1540		177		1520	-80	151	
	3	1760		120		1780	-20	97	
	3.5	1880		120		1860	-100	97	
S6	1.5	500	380	11	120	560	500	11.7	60
	2	940	820	20	120	1180	960	70	220
	2.5	1220	1100	5	120	1480	-40	185	1520
	3	1420	1340	2	80	1640	1460	11.4	180
	3.5	1660	1600	7	60	1660	1540	48	120
S7	1.5	660	520	37	140	860	740	109.7	120
	2	1160	980	42	180	900	660	26.4	240
	2.5	1280	1140	55.4	140	1380	1160	21	220
	3	1740	1600	86.5	140	1720	1460	8	260
	3.5	1600	1460	111	140	1540	1340	18	200
S8	1.5	680	540	148	140	860	740	164	120
	2	1040	860	53	180	1300	1200	202	100
	2.5	1380	1200	67	180	1500	1340	113.5	160
	3	1520	1380	16.03	140	1520	1340	7	180
	3.5	1640	1240	47	400	1920	1820	77	100
S9	1.5	820	620	106	200	480	300	9	180
	2	1040	860	29	180	1160	1040	41.4	120
	2.5	1160	1020	19	140	1500	1400	150	100
	3	1680	1480	43	200	1540	1420	11.4	120
	3.5	1640	1480	18	160	1880	1760	32	120

Où

TCMB : temps de contact Main-Ballon

TDM : temps de déclenchement de la main

TMM : temps de mouvement de la main

EMBC : écarts entre la main et le milieu du bord extérieur du ballon au moment du contact Main-Ballon

Données de la deuxième session

Sujets	Hauteurs	TCMB 40cm	TDM 40cm	EMBC 40 cm	TMM 40 cm	TCBM 60 cm	TDM 60 cm	EMBC 60 cm	TMM 60 cm
S1	1.5	520	420	9	100	560	500	12	60
	2	900	820	17	80	1020	900	6	120
	2.5	1180	1080	22.5	100	1120	1040	16	80
	3	1420	1300	15	120	1480	1340	12.5	140
	3.5	1670	1570	6	100	1680	1560	15.6	120
S2	1.5	880	780	61	100	760	640	34	120
	2	980	860	18	120	1060	980	15	80
	2.5	1280	1220	13.5	60	1400	1340	10	60
	3	1420	1300	14	120	1600	1520	13.4	80
	3.5	1740	1600	10	140	1760	1660	17	100
S3	1.5	560	440	18	120	560	460	27.6	100
	2	1000	900	15	100	1000	920	21.4	80
	2.5	1340	1200	9	140	1140	1020	15	120
	3	1460	1300	14	160	1460	1340	11	120
	3.5	1500	1420	9	80	1700	1620	23	80
S4	1.5	660	500	38	160	780	860	224	-80
	2	1220	1020	179	200	1260	1340	107	-80
	2.5	1360	1180	62	180	1580	-20	178.6	1600
	3	1500	1300	4	200	1540	1300	38	240
	3.5	1700	1500	19.6	200	1920	1620	25	300
S5	1.5	700	440	38	260	820	380	73.75	440
	2	1380		93	1380	1380	-20	93	1400
	2.5	1340	920	38	420	1440	1300	79.6	140
	3	1760		129	1760	1640	1520	61	120
	3.5	1880	1440	73	440	1770	1630	61.4	140
S6	1.5	640	540	48	100	840	620	194.7	220
	2	980	800	1	180	1140	900	83	240
	2.5	1000	800	12	200	1300	1040	8	260
	3	1420	1260	17	160	1560	1340	6.7	220
	3.5	1620	1420	16	200	1560	1340	10.4	220
S7	1.5	660	480	46	180	840	700	112.27	140
	2	1100	800	36	300	1080	900	13.6	180
	2.5	1020	900	37	120	1460	1300	29	160
	3	1320	1180	44	140	1600	1460	15.8	140
	3.5	1660	1500	14.5	160	1780	1660	42.4	120
S8	1.5	620	460	90	160	860	940	249.6	-80
	2	1020	860	55	160	1180	980	140.6	200
	2.5	1140	980	10.5	160	1340	1160	61.68	180
	3	1500	1400	25	100	1580	1380	16	200
	3.5	1600	1460	20	140	1760	1460	27.31	300
S9	1.5	580	420	58	160	760	540	55.15	220
	2	1040	820	9	220	900	740	4.12	160
	2.5	1100	880	44	220	1180	1000	16.55	180
	3	1340	1040	17	300	1440	1240	29.07	200
	3.5	1740	1560	45	180	1640	1440	25.71	200

Où TCMB : temps de contact Main-Ballon
TDM : temps de déclenchement de la main
TMM : temps de mouvement de la main
EMBC : écarts entre la main et le milieu du bord extérieur du ballon au moment du contact Main-Ballon

Troisième session

Sujets	Hauteurs	TCMB 40cm	TDM 40cm	EMBC 40cm	TMM 40cm		TCMB 60cm	TDM 60cm	EMBC 60cm	TMM 60cm
S1	1.5	580	460	16.5	120		660	560	10.44	443.5
	2	960	840	12	120		960	900	20	828
	2.5	1180	1000	4.5	180		1380	1320	27.46	995.5
	3	1420	1320	7	100		1540	1460	8.48	1313
	3.5	1700	1580	17	120		1780	1620	12.37	1563
S2	1.5	660	580	20	80		780	560	107.9	560
	2	980	880	2	100		1060	980	45	878
	2.5	1300	1220	25	80		1320	1000	8.94	1195
	3	1440	1300	35	140		1580	1400	28.4	1265
	3.5	1800	1640	23	160		1780	1660	7.28	1617
S3	1.5	820	600	24.5	220		800	780	47.17	575.5
	2	1000	860	30.5	140		1020	860	24.83	829.5
	2.5	1400	1260	34	140		1340	1260	35.84	1226
	3	1800	1680	9	120		1560	1340	37.73	1671
	3.5	1780	1600	51	180		1780	1560	37.16	1549
S4	1.5	700	560	37	140		900	540	79.6	523
	2	1000	800	17	200		1060	780	16.27	783
	2.5	1280	1140	16	140		940	660	13.89	1124
	3	1560	1400	32.5	160		1460	1300	39.2	1367.5
	3.5	1800	1660	40.5	140		1860	1500	12.36	1619.5
S5	1.5	660	540	28	120		780	620	19.2	512
	2	1060	640	28	420		920	700	70.22	612
	2.5	1100	1020	18	80		1220	1060	55.3	1002
	3	1620	1540	13	80		1620	1500	2.23	1527
	3.5	1760	1640	5	120		1880	1740	76.53	1635
S6	1.5	700	580	46	120		620	500	53.15	534
	2	940	840	17	100		1020	880	27.51	823
	2.5	980	900	15	80		1380	1240	85.91	885
	3	1500	1340	13.5	160		1460	1320	37.48	1326.5
	3.5	1720	1540	9	180		1720	1540	6.4	1531
S7	1.5	660	480	31.5	180		900	580	91.92	448.5
	2	1220	1040	10	180		1060	900	30.8	1030
	2.5	1260	1180	34	80		1280	1140	21	1146
	3	1480	1320	14.5	160		1460	1300	37.48	1305.5
	3.5	1780	1660	12	120		1820	1600	11	1648
S8	1.5	1080	880	65	200		680	520	48.5	815
	2	1000	820	26	180		1160	900	88	794
	2.5	1180	1000	5	180		1460	1080	94	995
	3	1480	1380	33	100		1360	1000	18.35	1347
	3.5	1660	1480	20	180		1720	1540	-7	1460
S9	1.5	600	440	7	160		700	600	21.93	433
	2	900	800	12	100		960	800	12.36	788
	2.5	1260	1160	21	100		1260	1120	1	1139
	3	1340	1180	26	160		1540	1460	3.16	1154
	3.5	1680	1540	9.5	140		1740	1600	3	1530.5

Où TCMB : temps de contact Main-Ballon
TDM : temps de déclenchement de la main
TMM : temps de mouvement de la main
EMBC : écarts entre la main et le milieu du bord extérieur du ballon au moment du contact Main-Ballon

ANNEXE 5

Ecarts-types (pixels) des positions de la main au cours de la frappe manuelle d'un ballon selon les groupes (FB, GD1, GD2), la distance à la rampe (40 cm – 60 cm) et les hauteurs (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5 m)

Ecarts-types (pixels) des positions de la main selon les groupes (FB, GD1, GD2) pour toutes hauteurs (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5m) et pour la distance 40 cm. Où le temps du contact est pris comme point (0,0)

Temps	FB					GD1					GD2				
	1.5	2	2.5	3	3.5	1.5	2	2.5	3	3.5	1.5	2	2.5	3	3.5
-1480					113										
-1460					113										
-1440					113										
-1420					113										
-1400					113					124					38
-1380					113					124					38
-1360					113					124					38
-1340				92	113				117	123				50	38
-1320				92	113				117	123				50	38
-1300				92	113				117	123				50	38
-1280				93	113				117	123				50	37
-1260				93	113				117	123				51	37
-1240				94	113				117	122				51	36
-1220				94	113				117	122				51	35
-1200				95	113				117	122				50	34
-1180				95	113				117	122				50	33
-1160				96	113				117	123				49	32
-1140				97	113				117	123				49	31
-1120				97	114				116	123				48	30
-1100			32	98	114			105	116	123			65	48	29
-1080			32	98	114			107	115	123			66	48	28
-1060			31	98	114			108	114	123			66	48	27
-1040			31	98	114			108	114	123			67	48	26
-1020			30	98	114			108	113	124			67	48	25
-1000			30	98	114			108	112	124			67	47	25
-980			30	98	114			107	112	124			67	47	25
-960			30	98	114			106	112	125			66	47	25
-940			30	98	114			105	112	125			65	47	26
-920	17	31	98	114		121	105	112	125		56	64	47	27	
-900	16	31	99	114		122	104	112	125		49	63	46	28	
-880	16	31	99	114		122	104	112	125		49	62	46	29	
-860	15	30	100	114		122	104	112	125		48	61	46	31	
-840	14	30	100	114		122	104	112	125		48	60	46	32	
-820	14	29	101	114		122	105	112	126		48	59	46	34	
-800	13	28	101	114		121	106	113	126		48	59	47	35	
-780	13	26	101	114		121	107	113	126		48	58	47	37	
-760	12	26	102	113		121	108	114	126		48	58	47	39	
-740	12	26	102	113		120	109	115	126		48	57	48	40	
-720	12	27	103	113		120	111	117	126		48	57	48	41	
-700	11	28	104	113		120	113	118	126		48	56	48	43	
-680	11	29	105	113		119	114	118	126		48	56	48	43	

-660	11	29	105	112		119	116	119	125		48	55	49	44	
-640	11	30	106	112		119	117	119	124		48	54	49	44	
-620	10	29	106	111		120	118	120	123		48	53	50	44	
-600	10	29	106	111		120	119	120	122		48	53	51	44	
-580	10	28	107	111		120	119	121	120		48	53	51	44	
-560	10	27	108	111		120	119	122	118		48	53	52	44	
-540	10	26	108	111		121	119	122	117		48	53	53	43	
-520	10	25	109	112		121	119	123	115		48	53	53	43	
-500	10	24	109	113		122	119	123	114		49	54	54	43	
-480	11	23	110	113		123	118	124	112		49	54	55	44	
-460	53	12	23	111	114	113	124	118	124	111	50	50	55	56	44
-440	53	13	22	111	114	112	124	118	124	110	50	50	56	57	44
-420	53	14	22	111	114	112	125	118	124	109	50	51	57	58	44
-400	54	15	22	111	113	111	125	117	123	108	51	51	58	58	44
-380	54	16	22	111	112	111	124	116	123	108	51	51	59	59	43
-360	54	19	21	111	111	111	124	115	122	107	52	52	59	59	43
-340	54	22	21	111	110	110	124	114	121	107	52	52	60	60	43
-320	54	26	20	111	108	110	123	112	120	106	53	52	60	60	42
-300	54	30	19	110	107	110	123	110	120	105	53	52	60	60	42
-280	55	35	17	110	106	109	123	108	119	105	53	53	60	60	41
-260	56	40	16	109	105	109	122	106	118	104	53	54	60	59	41
-240	56	46	15	109	104	108	122	105	118	103	53	55	59	59	40
-220	57	50	13	108	104	108	122	103	118	102	54	56	58	58	39
-200	57	55	12	106	104	107	121	103	117	102	54	57	57	58	39
-180	58	59	11	105	104	106	120	102	117	101	54	58	56	57	38
-160	58	63	10	103	105	105	118	101	117	101	55	58	55	56	37
-140	59	67	11	102	105	104	115	100	117	100	54	59	54	55	37
-120	59	70	11	101	105	101	110	99	116	99	53	58	53	54	37
-100	59	73	12	99	104	98	104	97	113	97	51	57	53	53	36
-80	58	74	12	98	102	93	97	94	110	94	48	55	52	52	34
-60	58	73	12	96	99	86	90	89	104	89	42	51	50	49	30
-40	56	70	13	93	96	79	83	84	98	84	35	46	48	46	25
-20	53	64	17	89	92	71	78	77	92	79	26	38	45	42	19
0	49	55	25	84	88	64	76	70	87	74	16	29	42	37	13
20	44	44	35	77	85	60	76	62	83	72	11	20	41	32	9
40	38	31	46	68	81	58	78	55	81	70	17	14	44	29	10
60	31	16	57	58	77	59	79	48	80	71	27	19	52	29	16
80	23	2	67	49	73	60	81	43	81	73	35	31	63	34	24
100	19	11	75	41	68	62	81	41	83	76	41	44	75	40	30
120	20	22	81	35	64	63	82	39	85	80	44	54	85	46	34
140	27	30		33	61	64	83		87	84	46	62		49	38

Où

FB : Enfants qui réussissent dès la première session.

GD1 : Enfants qui échouent lors de la première session.

GD2 : Enfants qui réussissent après avoir échoué lors de la première session.

Ecarts-types (pixels) des positions de la main selon les groupes (FB, GD1, GD2) pour toutes hauteurs (1.5, 2, 2.5, 3 et 3.5m) et pour la distance 60 cm. Où le temps du contact est pris comme point (0,0)

Temps	FB					GD1					GD2				
	1.5	2	2.5	3	3.5	1.5	2	2.5	3	3.5	1.5	2	2.5	3	3.5
-1480					113					122					74
-1460					113					122					74
-1440				148	113				141	122				97	73
-1420				148	113				141	122				97	73
-1400				148	113				140	121				96	73
-1380				148	113				140	121				96	73
-1360				149	113				140	121				96	73
-1340				149	113				140	121				96	73
-1320				149	113				140	121				96	73
-1300				149	113				139	121				96	74
-1280				149	113				139	122				97	74
-1260				148	113				139	122				97	74
-1240				148	113				139	123				98	74
-1220				148	113				139	123				98	74
-1200				148	113				140	123				99	74
-1180				148	113				140	123				99	74
-1160				148	113				140	124				99	74
-1140				148	113				140	123				100	73
-1120				148	114				140	123				100	73
-1100			114	148	114			205	139	123			125	99	73
-1080			114	148	114			204	139	123			124	99	73
-1060			114	148	114			204	139	123			123	98	73
-1040			114	148	114			204	139	123			122	97	73
-1020		86	114	147	114		99	204	139	123		135	120	97	73
-1000		86	114	147	114		99	203	139	123		135	119	96	73
-980		86	114	147	114		99	203	139	123		134	118	95	73
-960		86	114	146	114		99	203	139	124		128	117	95	73
-940		86	114	146	114		99	203	139	124		127	102	94	73
-920		86	114	146	114		99	203	139	124		110	102	94	72
-900		86	114	146	114		141	203	139	124		109	101	93	72
-880		82	114	146	114		141	203	139	124		109	101	92	72
-860		82	114	146	114		142	203	139	124		108	100	91	72
-840		82	114	146	114		142	202	140	124		108	100	90	72
-820		82	114	146	114		142	202	140	124		107	100	89	72
-800		81	114	145	114		142	202	140	124		107	99	87	72
-780		81	114	144	114		142	201	140	123		106	99	86	72
-760		81	113	144	113	112	142	200	141	123	84	105	99	84	72
-740		81	113	143	113	112	142	199	141	123	84	104	98	82	72
-720		81	112	142	113	112	142	198	142	122	83	103	98	79	72
-700		80	112	142	113	112	142	196	142	122	98	102	98	77	72
-680		80	111	142	113	112	142	194	142	122	98	101	97	75	72
-660		80	110	142	112	112	142	192	142	121	98	100	97	74	72
-640		80	110	142	112	113	142	190	142	121	98	99	97	72	72
-620		79	109	142	111	112	142	188	141	121	98	99	96	71	72
-600		79	108	142	111	112	142	186	141	121	98	99	96	71	73
-580		79	108	142	111	112	142	184	140	120	98	99	95	71	73
-560	104	78	107	141	111	112	142	183	140	120	98	99	95	71	73

-540	104	78	106	141	111	112	141	181	140	119	97	98	94	72	72
-520	103	77	105	140	112	112	141	180	140	118	97	98	93	72	72
-500	91	76	105	139	113	111	141	178	140	116	97	97	93	73	71
-480	90	76	104	139	113	142	141	177	139	115	97	96	92	73	71
-460	90	75	103	138	114	141	141	175	139	113	97	94	91	74	70
-440	89	74	102	137	114	141	141	174	139	111	97	92	91	74	69
-420	89	74	102	137	114	140	141	173	139	108	97	90	90	75	67
-400	131	73	101	137	113	139	141	171	139	106	97	89	89	76	66
-380	131	72	101	137	112	138	141	170	139	104	96	87	88	76	64
-360	131	71	100	137	111	136	140	168	138	101	96	85	87	77	62
-340	131	70	100	137	110	134	140	166	137	98	95	82	86	78	60
-320	131	69	100	137	108	132	139	164	136	96	94	80	84	78	58
-300	130	68	100	137	107	130	138	162	134	93	93	78	82	78	56
-280	130	67	100	136	106	128	137	159	132	91	92	75	80	78	53
-260	130	66	100	135	105	127	136	157	130	89	90	73	78	77	50
-240	129	65	101	134	104	125	135	154	127	86	88	71	75	77	47
-220	128	64	101	133	104	123	133	152	125	84	86	69	73	75	44
-200	127	64	102	133	104	122	131	149	123	82	83	68	70	74	41
-180	126	64	102	132	104	120	129	145	121	80	79	66	67	72	38
-160	125	64	102	132	105	118	127	142	119	78	75	65	64	70	35
-140	123	64	103	131	105	116	124	138	116	78	71	63	61	68	32
-120	122	65	102	130	105	113	121	134	114	77	66	60	58	64	30
-100	120	65	102	129	104	110	117	129	111	77	61	56	55	60	27
-80	118	65	101	128	102	107	112	124	107	76	55	52	52	54	24
-60	116	64	100	126	99	104	106	119	103	76	49	46	48	47	21
-40	113	63	99	124	96	101	100	113	99	75	44	39	44	40	18
-20	111	60	97	122	92	98	93	106	94	74	39	32	40	32	16
0	109	57	96	119	88	94	87	100	89	72	35	25	37	27	15
20	106	53	95	116	85	89	80	93	84	70	34	24	35	28	16
40	103	48	94	112	81	84	74	87	80	69	34	28	38	34	17
60	100	43	92	107	77	79	68	82	76	61	36	35	43	42	18
80	97	38	109	102	73	74	63	78	73	57	39	42	50	50	18
	95	33	105	97	68	80	67	75	70	54	42	47	56	56	17

Où

FB : Enfants qui réussissent dès la première session.

GD1 : Enfants qui échouent lors de la première session.

GD2 : Enfants qui réussissent après avoir échoué lors de la première session.

ANNEXE 6

Récapitulatifs de tous les temps en fonction de la hauteur de chute du ballon

Temps d'initiation du pied, du genou et de la hanche en fonction de la hauteur de chute du ballon

Pied 1.5m	Pied 2m	Pied 2.5m	Pied 3m	Pied 3.5m	Genou 1.5m	Genou 2m	Genou 2.5m	Gen 3m	Gen 3.5m	Hche 1.5m	Hche 2m	Hche 2.5m	Hche 3m	Hche 3.5m
-80	500	840	1000	980	-80	480	840	1000	1020	-40	500	820	1000	1060
380	720	800	640	960	360	720	820	700	980	300	700	860	700	1020
320	1020	880	600	1140	360	980	880	700	1120	420	1000	880	600	1220
			1160			1000		1400	1500		1160		1420	1520
	1100	680	1360		660	1120	700	1320	1320	660	1120	920	1320	1400
720	620	1080	1360	1020	700	620	1080	1340	1040	640	580	1160	1440	1100
				1300	760	1180	1080	1380	1320	700	1080	1260	1300	1300
240	520	800	640	900	280	680	720	640	840	280	680	660	680	940
340	680	980		1350	320	700	1040	720	1330	380	680	1100	780	1390
380	580	480	900	1480	340	600	400	740	1480	360	640	420	720	1520
580	520	800	1000	980	580	500	800	1000	1020	620	500	860	1020	1120
-20	600	740	700	1000	60	580	720	720	1020	60	60	540	740	1020
360	380	600	620	1200	280	340	480	1160	1180	280	280	340	540	1160
60		1060	880	1240	60		1020	860	1360	120	120	960	1300	1360
420	480	840	980	980	400	440	840	1000	1000	420	420	460	820	980
340	620	940	1040	1440	320	580	880	1020	1360	360	360	580	940	1380

Où,

Pied : Temps d'initiation du pied

Gen : Temps d'initiation du genou

Hche : Temps d'initiation de la hanche

Temps d'initiation de l'épaule, de la main et de la pose du pied en fonction de la hauteur de chute du ballon.

Epau 1.5m	Epau 2m	Epau 2.5m	Epau 3m	Epau 3.5m	Main 1.5m	Main 2m	Main 2.5m	Main 3m	Main 3.5 m	PoP 1.5m	PoP 2m	PoP 2.5m	PoP 3m	PoP 3.5m
260	620	920	1180	1220	320	780	1080	1380	1560	160	780	1060	1380	1560
320	780	920	780	1060	340	1100	1280	1340	1600		1160	1300	1160	1440
440	940	1240	1280	1560	640	920	1240	1320	1540	580	820	1240	860	1560
620	1060		1480	1520	500	960		1460	1540					
660	1240	1060	1500	1740	600		1040	1600			1220	1220	1560	1440
700	640	940	1300	1060	740	660	1160	1460	1340	940	1040	1500	1660	1360
700	1100	1240	1180	1660	740	1200	1340	1340	1820					1840
360	660	760	1360	1640	300	1040	1400	1420	1760	780	1140	1300	1320	1640
600	960	1160	1300	1650	380		1300	1520	1630	740	1060	1400		1770
400	240	480	900	1480	540	780	660	1300	1500	720	1080	1040	1320	1880
640	520	820	1160	1220	580	900	1140	1300	1600	900	1080	1280	1560	1740
60	560	740	920	880	940	980	1160	1380	1460	220	1160	1240	1480	1660
280	440	700	1340	1340	600	800	1120	1460	1600	800	980	1260	1560	1720
200	640	1220	960	1360	620	700	1060	1500	1740	660		1380	1420	1820
400	520	880	1080	1000	620	740	1120	1140	1600	760	980	1260	1420	1620
400	680	760	1440	1520	500	900	1140	1340	1700	720	880	1280	1500	1800

Où,

Epau : Temps de déclenchement de l'épaule

Main : Temps de déclenchement du mouvement de la main

PoP: Temps de la pose du pied

Temps de mouvement de la main, du contact Main-Ballon en fonction de la hauteur de chute du ballon.

TMM 1.5m	TMM 2m	TMM 2.5m	TMM 3m	TMM 3.5m	TCMB 1.5m	TCMB 2m	TCMB 2.5m	TCMB 3m	TCMB 3.5m
80	100	100	80	80	400	880	1180	1460	1640
160	180	60	160	120	500	1280	1340	1500	1720
120	140	100	160	200	760	1060	1340	1480	1740
60	220		180	120	560	1180	1480	1640	1660
160		220	120		760	1220	1260	1720	1940
120	240	220	260	200	860	900	1380	1720	1540
120	100	160	180	100	860	1300	1500	1520	1920
180	120	100	120	120	480	1160	1500	1540	1880
440		140	120	140	820	1380	1440	1640	1770
360	280	280	160	360	900	1060	940	1460	1860
320	160	140	160	220	900	1060	1280	1460	1820
-80	200	180	200	300	860	1180	1340	1580	1760
100	160	140	80	140	700	960	1260	1540	1740
160	220	160	120	140	780	920	1220	1620	1880
140	220	200	260	120	820	1000	1360	1440	1760
160	140	100	200	120	760	1080	1280	1600	1880

Où,

TMM: Temps de mouvement de la main

TCM : Temps de contact Main-Ballon

ANNEXE 7

Temps de déclenchement de la main (TDM, ms), temps de contact Main-Ballon (TCMB, ms), temps de mouvement de la main (TMM, ms) et Écarts main-ballon au contact (EMBC, pixels) pour la condition de côté à la rampe par hauteur et par sujets.

Sujets	H	Côté ballon gonflé				Côté ballon dégonflé			
		TCMB	TDM	TMM	EMBC	TCMB	TDM	TMM	EMBC
S1	2	1160	1040	120	16.55	1000	900	100	20
	2.5	1300	1220	80	4.12	1400	1320	80	9
	3	1600	1500	100	15.6	1560	1460	100	1
	3.5	1860	1820	40	9.22	1920	1840	80	24
S2	2	980	880	100	14.3	960	840	120	16.4
	2.5	1240	1020	220	28.28	1200	1080	120	4.47
	3	1540	1440	100	13.4	1440	1340	100	12.3
	3.5	1780	1680	100	6.3	1640	1500	140	4.47
S3	2	1140	1040	100	23	1000	920	80	14.56
	2.5	1360	1180	180	10.19	1280	1100	180	6.4
	3	1560	1460	100	15.26	1660	1380	280	16
	3.5	1900	1700	200	24.35	1780	1460	320	18.78
S4	1.5	1120	1020	100	19.3	1040	960	80	35.7
	2	1320	1220	100	22	1260	1140	120	12
	2.5	1600	1460	140	9.8	1480	1400	80	25.6
	3	1780	1660	120	18.3	1740	1600	140	19.4
S5	2	1060	900	160	14.56	1040	860	180	30.08
	2.5	1300	1160	140	10.77	1300	1160	140	13.03
	3	1560	1440	120	0	1640	1360	280	18.43
	3.5	1720	1580	140	19.84	1800	1680	120	2.23
S6	2	1040	960	80	3	1120	1000	120	13
	2.5	1260	1140	120	56.46	1440	1320	120	-14
	3	1560	1420	140	1	1520	1400	120	1
	3.5	1900	1780	120	10	1840	1720	120	8
S7	2	920	800	120	9.84	1040	880	160	19.92
	2.5	1380	1220	160	5	1260	1100	160	22.67
	3	1480	1260	220	14.14	1440	1280	160	11.7
	3.5	1740	1600	140	30	1640	1500	140	2.23
S8	2	1100	980	120	31.3	1100	960	140	21.63
	2.5	1260	1160	100	3	1500	1340	160	11.18
	3	1600	1440	160	3.16	1520	1400	120	28.16
	3.5	1760	1720	40	7.07	1680	1500	180	8

Temps de déclenchement de la main (TDM, ms), temps de contact Main-Ballon (TCMB, ms), temps de mouvement de la main (TMM, ms) et Écart main-ballon au contact (EMBC, pixels) pour la condition face à la rampe par hauteur et par sujets.

Sujets	H	Face ballon gonflé				Face ballon dégonflé			
		TCMB	TDM	TMM	EMBC	TCMB	TDM	TMM	EMBC
S1	2	1060	940	120	18.02	980	900	80	19.69
	2.5	1360	1260	100	4.47	1240	1100	140	48
	3	1560	1480	80	3.6	1520	1420	100	16.12
	3.5	1800	1720	80	4.47	1720	1640	80	31.76
S2	2	960	860	100	3.6	1000	960	40	5.3
	2.5	1260	1200	60	3	1300	1240	60	3.1
	3	1560	1460	100	13.6	1500	1400	100	1
	3.5	1760	1680	80	2.2	1700	1640	60	14
S3	2	1020	920	100	9.22	1000	940	60	3
	2.5	1300	1160	140	2.23	1260	1140	120	2.23
	3	1540	1440	100	12.36	1600	1500	100	4.47
	3.5	1780	1660	120	5	1760	1580	180	12.16
S4	1.5	1080	980	100	2.2	1100	980	120	39.6
	2	1400	1240	160	10	1320	1240	80	8
	2.5	1580	1480	100	2.2	1520	1480	40	1
	3	1860	1760	100	3.1	1800	1720	80	5.3
S5	2	980	900	80	3.16	1060	1040	20	16.27
	2.5	1220	1040	180	7.07	1260	1180	80	18.97
	3	1500	1360	140	13.6	1500	1520	-20	7.21
	3.5	1680	1540	140	5	1740	1660	80	7.21
S6	2	1080	1040	40	18.68	1040	960	80	33.12
	2.5	1460	1380	80	5	1340	1220	120	2.23
	3	1600	1460	140	3.6	1520	1460	60	8.06
	3.5	1840	1680	160	16.15	1760	1740	20	29.61
S7	2	980	940	40	1.41	1160	1120	40	8.48
	2.5	1380	1360	20	11.7	1340	1280	60	10.05
	3	1660	1500	160	14.14	1520	1440	80	2.23
	3.5	1720	1600	120	16.4	1760	1680	80	9.05
S8	2	1080	960	120	13.6	1020	940	80	9.22
	2.5	1560	1420	140	2.23	1260	1180	80	19
	3	1600	1500	100	18.02	1560	1520	40	3.6
	3.5	1780	1700	80	10.63	1760	1680	80	32.28

Index des Auteurs

INDEX DES AUTEURS

- Adam, 77
 Adams, 4, 8, 9, 10, 12
 Alain, 7, 14, 78
 Albert, 1
 Alderson, 3, 61
 Amblard, 157
 Assaiante, 157
 Babler, 26, 29
 Badan, 61
 Baillargeon, 50, 51, 65
 Bakker, 28
 Banta, 78
 Bard, 61, 62, 63, 64, 119, 184
 Bartlett, 10
 Basset, 63, 119
 Bell, 52
 Benguigui, 63
 Bennett, 23
 Bernstein, 33, 34, 147
 Bertenthal, 48, 147, 148
 Berthoz, 36, 37
 Bjorklund, 55, 69, 76, 187
 Boker, 48
 Bootsma, 123, 124, 146, 161
 Boudreau, 48
 Bower, 48
 Bradshaw, 145
 Branta, 77
 Brenner, 62, 63, 123, 124
 Broadbent, 4
 Bucky, 78
 Busch, 1
 Carlton, L.G., 12, 13, 15
 Carlton, M.J., 12, 13
 Carnahan, 160
 Caroff, 46, 47
 Carroll, 47
 Castiello, 13
 Chelune, 53
 Clayton, 24
 Coello, 13
 Cohen, 29
 Connell, 1
 Connolly, 14
 Corbetta, 57, 58
 Corcos, 124, 125, 186
 Curtin, 53
 Dannemiller, 26, 29
 Das-Smaal, 55
 Davids, 23, 28, 32
 Davies, 125
 Day, 1
 Degerman, 2
 Dempster, F.N., 54, 69
 Dempster, W.T., 35
 Desmurget, 121, 147
 Di Marco, 23
 Diamond, 52
 Dienes, 26, 27, 28, 31, 32
 Dowley, 2
 Dweck, 1
 Elliott, 160
 Fischer, 56, 58
 Fischman, 48, 61
 Fitts, 14
 Flash, 37
 Fleurance, 81
 Fleury, 61, 62, 63, 64, 119, 121
 Fox, 52
 Gallahue, 42, 81
 Gapenne, 48
 Gardner, 4, 6, 16, 17
 Garulli, 23
 Gesell, 41
 Gibbs, 15
 Gibson, E.J., 38
 Gibson, J.J., 18, 19, 20, 21, 22, 38, 39
 Gielen, 37
 Grealy, 18, 25, 26
 Gredebäck, 48
 Green, 125
 Gross, 78
 Hadders-Algra, 41
 Hagen, 2
 Haggard, 145
 Halverson, 42
 Harnishfeger, 54, 55, 68, 69, 76, 187
 Haubenstricker, 77
 Hauert, 61
 Hay, 60, 61, 62, 64, 65, 119, 184
 Haywood, 71
 Heaton, 53
 Helmholtz, 16
 Hick, 14
 Houdé, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 65, 187
 Hubbard, 67, 119

- Huys, 77
Hynd, 53, 78
Illingworth, 41
Isaac, 53, 78
Jeannerod, 13
Jensen, 157
Jouen, 48
Kagan, 1, 2, 68, 69
Kaiser, 28
Kamm, 58
Kay, 53, 60, 80, 81, 159
Keele, 4, 7, 8, 15
Keller, 2, 16, 41, 42, 55, 60, 66, 69, 71, 72, 80, 81, 147, 157, 185
Kelso, 32, 37, 38, 119, 184, 186
Kerr, 14
Kingma, 77
Kugler, 32, 33, 34, 36, 37, 55
Kwakman, 55
Larue, 64
Lautrey, 46, 47
Lecas, 53
Lee, 23, 24, 25, 26, 48, 81, 82, 83, 102, 120, 123, 125, 159, 184
Lee, T.D., 160
Lefford, 60
Lepecq, 48
Luria, 53, 54, 55
Maccoby, 2, 55, 68
Mace, 37
MacNeilage, L.A., 9
MacNeilage, P.F., 9
Marr, 16, 17
Marteniuk, 15
Mc Laughlin, 181
McBeath, 28, 30, 31
McDonald, 55
McGraw, 41
McLeod, 26, 27, 28, 31, 32
Mickaels, 28
Mischel, 55
Moore, 48
Murphy, 32
Neggars, 37
Netchine-Grynberg, 46
Newell, 40, 41, 55, 120, 124, 125, 185, 186
Nieuwenstein, 77
Not, 66
Orliaguet, 61
Oudejans, 28, 29, 31
Paas, 77
Paillard, 64
Pascual-Leone, 49, 50, 68
Passler, 53, 54, 55, 78
Paulignan, 13
Pellizzer, 61
Peper, 161
Phillips, 1
Piaget, 1, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 65
Pick, 38
Posner, 15
Prablanc, 121, 147
Prattichizzo, 23
Preyer, 43
Rader, 38
Reddish, 24, 102, 120
Reed, 28
Reitan, 53
Richards, 32
Richardson, 145
Ripoll, 2, 55, 63, 69
Roberton, 41, 42, 66
Rodríguez, 55
Rönnqvist, 160
Rosenbaum, 65
Rosengren, 3
Rosey, 2, 41, 55, 66, 69, 80
Rosman, 1
Rossetti, 13
Salmela, 7, 14
Savelsbergh, 3, 23, 32, 120, 160, 181
Schmidt, 4, 5, 9, 10, 11, 12
Schneider, 58
Schöner, 37, 38, 119, 184
Seefeldt, 77
Seng, 67, 119
Sevino, 61
Shaffer, 28, 30, 31
Shannon, 4
Shaw, 37
Shoda, 55
Siegler, 1
Smeets, 62, 63, 123, 124
Spencer, 57, 58
Stadulis, 15, 60
Starkes, 146
Steele, 48
Sugden, 1, 14
Sully, D.J., 3
Sully, H.G., 3

Talley, 53
Teasdale, 62, 63, 64, 119
Thelen, 33, 34, 55, 56, 57, 58, 59, 65, 186
Tijus, 67
Tipper, 159
Todd, 14, 18, 21, 22, 29, 160
Treisman, 159
Turvey, 32, 34, 35, 37
van der Kamp, 3, 23
Van der Meer, 48
Van Der Weel, 125
Van Emmerik, 55
Van Wieringen, 123, 124, 146
Vaughn, 38
Verheul, 3
Vicino, 23
Visser, 55, 80, 159
von Hofsten, 48, 81, 147, 148, 160
Vrijenhoek, 37
Wallon, 42
Warren, 22
Watt, 145
Weaver, 4
Weiss, 40
Werry, 77
Whitall, 157
Whiting, 5, 15
Wickstrom, 42
Wiener, 4, 6
Wild, 41
Willems, 77
Williams, 61, 63, 119
Xu, 48
Young, 24
Zanone, 37, 38
Zernicke, 58

Résumé

L'objectif de ce travail était d'éprouver la fonctionnalité du processus d'activation-inhibition sur le développement des coordinations et le contrôle du mouvement, dans le cadre particulier de l'habileté de frappe d'un mobile chez l'enfant de 3 à 10 ans. Nous avons tout d'abord testé, dans une étude transversale pour cinq catégories d'âge (6 à 10 ans), l'hypothèse que les fonctions exécutives d'activation-inhibition sont un des facteurs à l'origine de l'apparition de structures motrices. A cette fin, nous avons analysé l'effet d'une tâche d'interférence sur la frappe de balle en coup droit avec une raquette. Le niveau de coordination régresse après l'exécution de la tâche d'interférence. Ensuite, après avoir déterminé, dans une étude longitudinale (enfants de 3 à 4 ans) que les enfants à cet âge étaient capables de frapper un ballon vers une cible, nous avons pu déterminer, chez ces enfants à l'âge de 4 ans, si le processus d'activation-inhibition intervenait dans la perception visuelle du mobile. Les enfants réalisaient 2 essais de frappe d'un ballon partant de différentes hauteurs (2m à 3,5 m) d'une rampe inclinée. Ils étaient placés, à une distance de 40 cm, une fois perpendiculairement puis face à la rampe. Nous avons comparé la frappe du ballon gonflé à celle d'un ballon se dégonflant au cours de sa chute. Dans un environnement visuel restreint (de face) la taille du mobile, serait l'information visuelle principale dans la détermination du déclenchement du geste de frappe. En conclusion, la frappe manuelle est organisée selon un couplage temporel et elle est influencée par les contraintes environnementales et de la tâche.

Abstract

The purpose of this work was to test functionality of the process of activation-inhibition on the development of coordination and the control of the movement, in the particular frame of the skill of hitting in 3-to-10-years-olds child. First, we tested, in a transversal study for five categories of age (6-10 years), the hypothesis that the executive functions of activation-inhibition are one of the factors originating the apparition of motor structures. For that purpose, we analyzed the effect of an interference task on a forehand tennis drive. The level of coordination decreased after the interference task. Then, after having determined, in a longitudinal study (children from 3 to 4 years) that children this age were able to hit a ball towards a target, we could determine, among these children aged 4 years, if the process of activation-inhibition was involved in the visual perception of the moving. The children realized 2 attempts trial of hitting of a ball dropping from different heights (2m in 3.5m) of a tilted ramp. They were placed, at a distance of 40cm, once perpendicularly then in front of the ramp. We compared the hitting of the ball inflated in that of a ball deflating during the fall. In a visual restricted environment (facing) the size of the moving, would be the main visual information in the determination of the hitting initiation. In conclusion, manual hitting organized according to a temporal coupling and influenced by environmental and task constraints.