
Caractérisation du mouvement de préhension avec obstacle.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats expérimentaux de notre premier protocole. L'objectif est de fournir une caractérisation du mouvement de préhension en présence d'un obstacle. Pour cela, nous analysons les données issues du Cyberglove et du capteur électromagnétique (Flock of Bird) pour rendre compte de la cinématique du poignet et des doigts. Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'analyse des trajectoires du poignet afin d'identifier différentes stratégies motrices en fonctions des conditions de saisies. Puis, l'analyse des phases de "transport" et de "saisie" sont détaillées en fonction de la cinématique du poignet et de configuration angulaire afin de tester l'effet des différentes conditions d'obstacle et d'objet. Enfin, une discussion confrontera nos résultats avec ceux observés dans la littérature.

IV.2. Problématique

Dans les chapitres précédents, nous avons mis en évidence l'influence des différentes conditions de saisie sur les composantes du mouvement et précisé l'effet de la présence d'obstacle sur la coordination spatio-temporelle de celles-ci.

Plusieurs études montrent ainsi que la taille de l'objet à saisir a une influence directe sur l'amplitude de l'ouverture de la pince manuelle (Paulignan *et al.*, 1991b; Castiello *et al.*, 1993; Zaal & Bootsma, 1993; Bootsma *et al.*, 1994; Paulignan *et al.*, 1997; Zaal *et al.*, 1998). La distance maximale entre les doigts (en général mesurée entre le pouce et l'index) apparaît proportionnelle et supérieur à la taille de l'objet. Pour ces auteurs, les caractéristiques intrinsèques de l'objet influencent les caractéristiques de la composante de saisie mais altèrent peu les paramètres de la composante de transport. En revanche, la présence d'un obstacle sur la trajectoire du poignet ou à proximité de l'objet à saisir modifie significativement la composante de transport. La présence d'un obstacle a principalement des répercussions sur la courbure de la trajectoire (Sabes & Jordan, 1997; Saling *et al.*, 1998; Alberts *et al.*, 2002), sur l'augmentation de la durée du mouvement avec un prolongement de la phase de décélération et sur la vitesse tangentielle du poignet (Tresilian, 1998; Castiello *et al.*, 1999; Mon-Williams M. *et al.*, 2001).

Au contraire, si peu d'influence de la taille de l'objet sur la composante de transport a été reportée (Martenuik *et al.*, 1990; Gentilucci *et al.*, 1991; Jakobson *et al.*, 1991), il est communément admis que les propriétés de l'obstacle affectent la composante de saisie. En particulier, l'ouverture de la pince manuelle apparaît corrélée avec la hauteur de l'obstacle (Saling *et al.*, 1998; Tresilian, 1998; Castiello *et al.*, 1999) ce qui montre le lien entre une modification de la composante de transport et son impact sur les caractéristiques de la saisie.

En bref, une modification de la taille de l'objet influence principalement la composante de "saisie" alors que la présence d'obstacle a des répercussions sur la cinématique de la phase de transport mais également sur la saisie.

Cependant, les effets des propriétés de l'objet sont-ils vérifiés en présence d'un obstacle ? Le Système nerveux central (SNC) se base-t-il alors principalement sur les propriétés de l'objet à saisir pour programmer l'exécution du geste ou sur les caractéristiques de la contrainte spatiale ? Y a-t-il une interaction entre les effets des propriétés de l'obstacle et ceux des

propriétés de l'obstacle ? Par exemple, nous pouvons nous demander comment évolue l'amplitude de l'ouverture de la pince manuelle d'un objet de grande taille en présence d'un obstacle d'une certaine hauteur alors qu'il a été montré une influence de ces deux paramètres sur celle-ci ? Y a-t-il dans ce cas une prédominance de l'effet de la taille de l'objet, de la présence de l'obstacle ou, au contraire, un effet d'interaction entre les deux ? De même, au niveau temporel, il a été observé une augmentation de la durée de la phase de décélération à la fois pour la saisie d'objet de petite taille et lors de mouvement de préhension en présence d'obstacle. Ainsi, faut-il s'attendre à une interaction entre la taille de l'objet et les caractéristiques de l'obstacle sur la durée de la phase de décélération ?

L'objectif de ce protocole est donc de spécifier les effets des propriétés intrinsèques et extrinsèques de l'obstacle et ceux des caractéristiques de l'objet sur les paramètres cinématiques du mouvement de préhension dans différentes conditions de saisie.

En nous basant sur l'interdépendance des composantes de transport et de saisie, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une modification des propriétés intrinsèques et extrinsèques de l'obstacle devrait influencer la configuration de la saisie et inversement, qu'un changement de la taille de l'objet affecterait la composante de transport en présence d'obstacle. Ainsi, si les propriétés de l'obstacle ont un effet sur la composante de saisie, nous devrions observer différentes configurations manuelles pour saisir une même taille d'objet. Réciproquement, si les propriétés de l'objet influencent la phase de transport, les paramètres cinématiques de la phase de transport devraient être affectés par un changement de la taille de l'objet pour une même condition d'obstacle.

Au contraire, si les différentes conditions de saisie n'ont pas d'effet sur la phase de transport, la cinématique devrait apparaître similaire pour une même condition d'obstacle. En ce sens, si les conditions d'obstacle n'ont pas d'influence sur la saisie, nous ne devrions pas observer de différence au niveau des configurations manuelles pour une même taille d'objet.

Afin de tester cette hypothèse, nous avons demandé à des sujets de réaliser des mouvements de préhension dans différentes conditions de saisie en présence d'obstacle. Afin de manipuler les caractéristiques des saisies, nous avons utilisé plusieurs tailles d'objet (B1 : Ø 3,5 cm ; B2 : Ø 5,5 cm ; B3 : Ø 7,5 cm) et différentes tailles d'obstacles (H1 : 15 cm ; H2 : 20 cm) placés en position proche (O1 : 20 cm) ou éloignée (O2 : 40 cm) afin de contraindre principalement la composante de transport ou celle de saisie (cf. § III.3.3).

Afin de faciliter les comparaisons, nous présentons nos résultats en deux parties : le plan statistique *I* compare les essais "contrôles" sans obstacle avec l'ensemble des essais avec obstacle en fonction de la taille de l'objet et de l'axe de saisie, alors que le plan statistique *II* confronte les différentes conditions d'obstacle entre elles (Alberts *et al.*, 2002).

IV.3. Analyse du mouvement de préhension avec obstacle

IV.3.1. Analyse temporelle

Dans un premier temps, nous avons relevé le temps de mouvement (MT) pour chaque sujet et chaque condition de saisie. Les valeurs moyennes de MT sont présentées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1: Temps de mouvement moyen (exprimé en s) (et écart-type) en fonction de la taille (OB1 & OB2) et de la position (O1 & O2) de l'obstacle pour chaque taille d'objet (B1, B2 & B3).

Objet	Axe P1			Axe P2			Axe P3		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
SSO	0.79 (0.25)	0.76 (0.13)	0.73 (0.15)	0.65 (0.20)	0.73 (0.20)	0.72 (0.17)	0.70 (0.23)	0.71 (0.14)	0.75 (0.29)
OB1 O1	1.29 (0.32)	1.28 (0.23)	1.11 (0.24)	1.12 (0.48)	1.10 (0.45)	1.13 (0.48)	1.03 (0.41)	1.01 (0.37)	1.02 (0.37)
OB1 O2	1.32 (0.35)	1.28 (0.37)	1.33 (0.28)	1.11 (0.41)	1.10 (0.41)	1.05 (0.41)	1.03 (0.35)	1.01 (0.29)	1.03 (0.32)
OB2 O1	1.19 (0.18)	1.20 (0.23)	1.24 (0.23)	1.02 (0.44)	1.03 (0.45)	1.07 (0.47)	1.03 (0.33)	1.02 (0.38)	1.03 (0.38)
OB2 O2	1.33 (0.34)	1.45 (0.23)	1.28 (0.31)	1.08 (0.52)	1.06 (0.33)	1.03 (0.46)	1.00 (0.36)	1.03 (0.30)	1.01 (0.39)

Pour le plan statistique *I*, l'analyse de la variance fait apparaître un effet d'interaction entre l'axe et la présence obstacle [$F_{(2,38)}=35.58$; $p<0.0001$] quelque soit les conditions d'obstacle. Le test HSD de Tukey montre que MT augmente significativement pour les essais avec obstacle (1.13 s +/- 0.12) versus sans obstacle (0.73 s +/- 0.04) (Fig. IV.1) ainsi que pour l'axe P1 (1.09 s. +/- 0.03) comparé à l'axe P2 (0.82 s +/- 0.04) et à l'axe P3 (0.72 s +/- 0.03).

Par contre, il n'a pas été observé d'effet de la taille d'objet sur MT [$F_{(2,38)}=0.775$; $p=0.47$].

Le traitement du plan statistique *II* fait apparaître un effet de l'axe sur le temps de mouvement [$F_{(2,38)}=17.33$; $p<0.0001$]. MT est significativement plus long pour les mouvements de l'axe P1 (1.27 s +/- 0.03) vs l'axe P2 (1.074 s +/- 0.04) et l'axe P3 (1.02 s +/- 0.03) ($p<0.0001$) en conditions d'obstacle, indépendamment de taille d'objet.

Par contre, aucun effet significatif des propriétés intrinsèques (Taille : $[F_{(1,19)}=0.14, p=0.70]$) et extrinsèques (Position : $[F_{(1,19)}=1.31, p=0.26]$) de l'obstacle n'est observé sur MT.

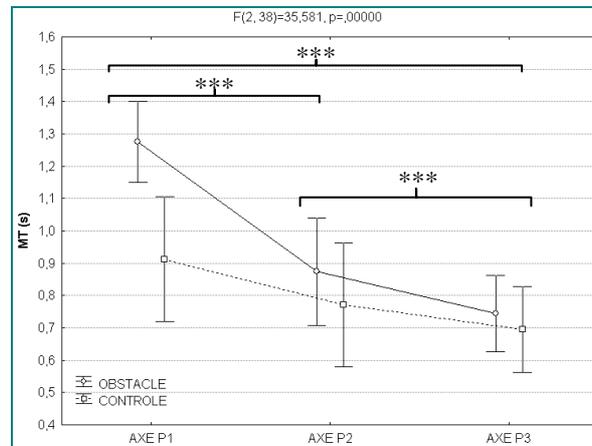


Figure IV.1 : Temps de mouvement moyens en fonction de la présence d'obstacle et de l'axe (** $p < 0.0001$).

En bref, nous observons une augmentation du temps de mouvement entre les conditions avec et sans obstacle mais pas de variations entre les différentes conditions d'obstacle entre elles. L'augmentation significative du temps de mouvement (MT) en condition d'obstacle affecte-t-elle l'ensemble des paramètres cinématiques de la composante de transport? Pour y répondre nous avons étudié la cinématique du mouvement et extrait des paramètres spatio-temporels afin de pouvoir les comparer en fonction des différentes conditions de saisie.

IV.3.2. Analyse cinématique de la phase de transport

La phase de transport est analysée à travers différents paramètres cinématiques du poignet calculés à partir des données issues du capteur électromagnétique (Flock of Birds).

IV.3.2.1. Analyse des trajectoires du poignet

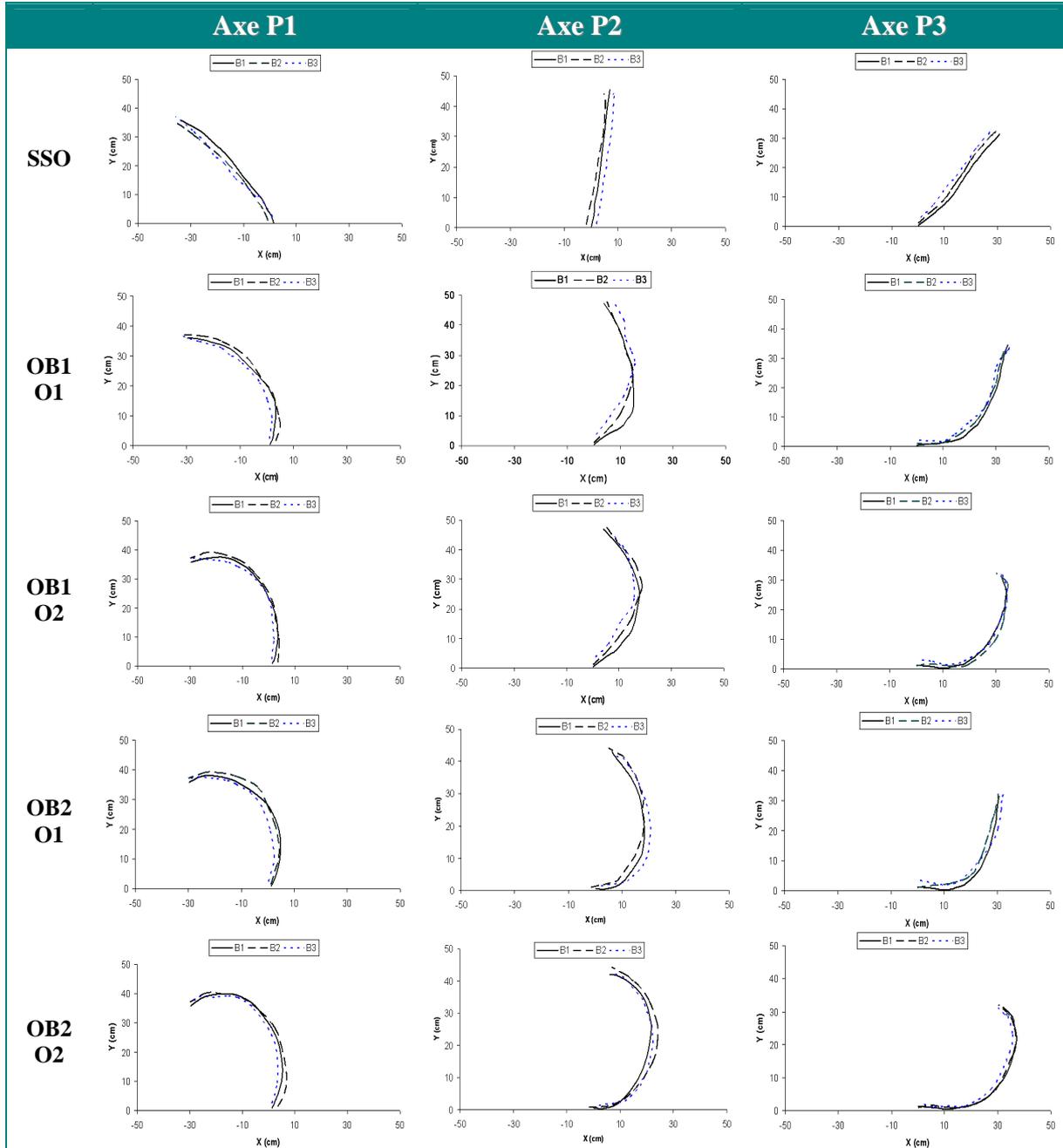
L'analyse spatiale des trajectoires du poignet s'est orientée d'une part, sur une analyse qualitative (trajectoires moyennes § IV.3.2.1.1) et, d'autre part, sur une analyse quantitative (indice de courbure § IV.3.2.1.2 et hauteur maximale du poignet § IV.3.2.1.3).

1. Trajectoires moyennes

Le tableau IV.2 présente les courbes moyennes de la trajectoire du poignet sur le plan transversal (xy), selon la Taille de l'obstacle (OB1 et OB2), la Position de l'obstacle (O1 et O2), l'axe (Axe P1, Axe P2, Axe P3) pour chaque Taille d'objet (B1, B2 et B3) ainsi que pour la condition contrôle sans obstacle (SSO).

Chaque trajectoire correspond à la moyenne des trajectoires des vingt sujets. Les valeurs d'écart-type ne sont pas présentées pour ne pas surcharger les tracés

Tableau IV.2: Trajectoires moyennes du poignet en fonction de la taille (OB1 & OB2) et de la position (O1 & O2) de l'obstacle pour chaque taille d'objet (B1, B2 & B3). (plan transversal : xy).



De manière immédiate, nous pouvons constater que la trajectoire du poignet est influencée par l'axe de saisie et les propriétés de l'obstacle. Les essais sans obstacle sont caractérisés par des trajectoires "quasi" rectilignes alors que la courbure semble s'accroître pour les conditions avec obstacle.

Les trajectoires apparaissent davantage curvilignes avec l'augmentation de la taille de l'obstacle et l'éloignement de sa position quelque soit l'axe et la taille de l'objet. Par contre, nous observons peu de variations en fonction des différentes tailles d'objet.

Dans le paragraphe suivant, nous calculons l'indice de courbure (IC) pour chaque trajectoire afin de quantifier ces observations.

2. Indice de courbure

Afin de comparer les différentes trajectoires, l'indice de courbure (IC) a été calculé pour chaque condition par la relation suivante :

$$IC = \frac{a}{b} \quad (IV.1)$$

où a est la distance maximale entre la trajectoire et la droite passant par le point de départ et le point d'arrivée et b l'amplitude du mouvement (Fig. IV.2). Par conséquent, plus IC est proche de 0 et plus la trajectoire est rectiligne. Inversement, plus IC est proche de 1 et plus la trajectoire est circulaire.

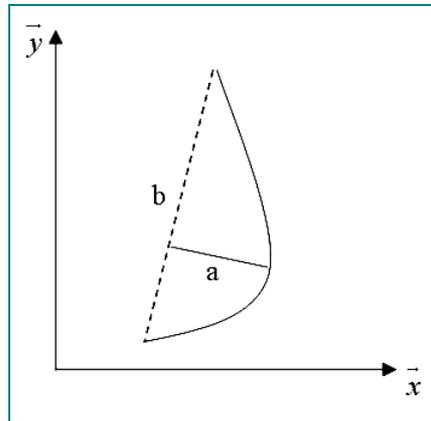


Figure IV.2 : Calcul de l'indice de courbure (IC).

Cet indice a par exemple été utilisé pour observer l'influence de la vitesse d'exécution lors de mouvements de saisie (Atkeson & Hollerbach, 1985) ou l'effet de contraintes visuelles sur des mouvements d'atteintes de cible (Palluel-Germain, 2004).

Afin de quantifier les différences de trajectoires au niveau du contournement de l'obstacle, IC a été calculé sur le plan transversal (xy) en fonction des conditions d'obstacle et d'objet (Tabl. IV.3).

Tableau IV.3: Indices de courbure (IC) (et écart-types) dans le plan frontal (xy) en fonction de la taille (OB1 & OB2) et de la position (O1 & O2) de l'obstacle pour chaque taille d'objet (B1, B2 & B3).

Objet	Axe P1			Axe P2			Axe P3		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
SSO	0.047	0.041	0.043	0.035	0.037	0.033	0.042	0.040	0.040
	(0.04)	(0.01)	(0.03)	(0.03)	(0.03)	(0.02)	(0.02)	(0.01)	(0.02)
OB1 O1	0.224	0.222	0.223	0.247	0.252	0.246	0.173	0.174	0.174
	(0.04)	(0.03)	(0.02)	(0.05)	(0.02)	(0.03)	(0.06)	(0.03)	(0.04)
OB1 O2	0.411	0.413	0.406	0.435	0.441	0.439	0.325	0.326	0.324
	(0.01)	(0.02)	(0.03)	(0.04)	(0.04)	(0.06)	(0.02)	(0.02)	(0.03)
OB2 O1	0.447	0.451	0.444	0.377	0.376	0.375	0.315	0.317	0.321
	(0.05)	(0.04)	(0.06)	(0.04)	(0.03)	(0.03)	(0.03)	(0.04)	(0.05)
OB2 O2	0.437	0.443	0.436	0.334	0.335	0.334	0.369	0.371	0.370
	(0.05)	(0.05)	(0.03)	(0.02)	(0.03)	(0.07)	(0.06)	(0.05)	(0.05)

Le plan statistique *I* fait apparaître un effet d'interaction entre l'axe et la présence d'obstacle [$F_{(2,38)}=199.36$, $p<0.0001$]. Le test *post-hoc* indique que l'indice de courbure apparaît significativement supérieur pour les mouvements avec obstacle (0.26 +/- 0.15) comparés aux conditions contrôles (0.12 +/- 0.11), quelque soit la taille de l'objet ($p<0.0001$).

Le plan statistique *II* révèle une triple interaction entre les conditions d'axe, de taille d'obstacle et de position d'obstacle [$F_{(2,38)} = 35.01$; $p<0.0001$]. Le test *post-hoc* montre que l'indice de courbure apparaît supérieur pour l'obstacle OB2 vs OB1 ($p<0.0001$), la position O2 versus O1 ($p<0.0001$) et l'axe P1 vs P2 ($p<0.0001$) et P3 ($p<0.0001$). Par contre, l'absence de tendance quadratique ($F_{(4,76)} = 0.03$; $p = 0.998$) montre qu'il n'y a pas d'effet de la taille de l'objet sur l'indice de courbure ce qui confirme bien nos observations.

3. Hauteur maximale du poignet

La hauteur maximale du poignet (Hmax) a été mesurée pour chaque condition d'obstacle et chaque taille d'objet. Les valeurs moyennes de celle-ci sont reportées dans le tableau IV.4.

Le plan statistique *I* montre un effet d'interaction entre l'axe et la présence de l'obstacle [$F_{(2,38)}=5.44$; $p=0.008$]. La hauteur maximale apparaît significativement supérieur pour les conditions avec obstacle (Axe P1 : 28.3 cm +/- 8.8; Axe P2 : 27.6 cm +/- 6.3; Axe P3 : 26.7 cm +/- 6.2) comparées aux conditions sans obstacle (Axe P1 : 9.61 cm +/- 2.1; Axe P2 : 9.71 cm +/- 2.1; Axe P3 : 9.74 cm +/- 2.6). Par contre, il n'est pas observé d'effet de la Taille de l'objet ($F_{(2,38)}=0.10$; $p=0.90$) sur Hmax.

Le plan statistique *II* met en évidence un effet d'interaction entre l'axe et la taille de l'obstacle [$F_{(2,38)}=4.29$; $p=0.02$]. La hauteur maximale apparaît significativement supérieur pour les conditions avec l'obstacle OB2 (Axe P1 : 29.5 cm +/-3.2 ; Axe P2 : 29.6 cm +/- 4.7; Axe P3 : 27.9 cm +/- 4.4) comparé aux conditions avec l'obstacle OB1 (Axe P1 : 27.81 cm +/- 5.9; Axe P2 : 25.6 cm +/- 7.12; Axe P3 : 25.5 cm +/-7.3).

Par contre, il n'a pas été observé d'effet simple ou d'effet d'interaction de la position de l'obstacle [$F_{(2,38)}=0.15$; $p=0.86$] ou de la Taille de l'objet [$F_{(4,76)}=0.22$; $p=0.92$] sur Hmax.

Tableau IV.4: Hauteur maximale du poignet (exprimée en cm) (et écart-types en fonction de la taille (OB1 & OB2) et de la position (O1 & O2) de l'obstacle pour chaque taille d'objet (B1, B2 & B3).

Objet	Axe 1			Axe 2			Axe 3		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
SSO	9.75 (1.41)	9.94 (2.71)	9.16 (2.06)	9.61 (1.81)	9.59 (2.40)	9.94 (2.19)	9.95 (2.34)	9.89 (3.44)	9.41 (2.29)
OB1 O1	27.13 (6.06)	27.04 (5.49)	27.85 (6.69)	25.25 (6.98)	24.29 (6.64)	24.74 (6.46)	24.46 (6.33)	24.31 (7.11)	25.24 (7.59)
OB1 O2	28.20 (6.33)	28.52 (5.99)	28.13 (5.81)	26.44 (7.72)	26.11 (7.89)	26.85 (7.50)	26.57 (7.64)	26.14 (7.82)	26.50 (7.78)
OB2 O1	28.13 (6.15)	29.23 (6.95)	28.62 (5.78)	28.22 (5.15)	28.56 (6.70)	29.06 (4.73)	26.45 (4.04)	27.63 (5.16)	27.15 (4.68)
OB2 O2	30.12 (6.85)	30.52 (7.80)	30.27 (5.34)	30.69 (5.93)	30.05 (6.50)	31.14 (6.06)	28.22 (5.92)	29.18 (6.85)	28.84 (6.39)

D'un point de vue temporel, le temps d'apparition de la hauteur maximale du poignet apparaît significativement plus tôt pour les conditions avec obstacle (0.46 s +/- 0.05) que pour les saisie sans obstacle (0.55 s +/- 0.03) indépendamment de l'axe et de la taille de l'objet.

Au regard des conditions d'obstacle, le temps d'apparition de Hmax diminue avec la taille de l'obstacle (OB1 : 0.56 s +/- 0.03; OB2 : 0.53 s +/- 0.03). En revanche, lorsque le temps d'apparition de Hmax est exprimé en fonction du temps total de mouvement, il apparaît stable en dépit des conditions d'obstacle. Nous n'observons alors pas d'effet de l'axe [$F_{(2,38)}=77.32$; $p=0.06$], de la taille [$F_{(1,19)}=0.30$; $p=0.06$] et de la Position de l'obstacle [$F_{(1,19)}=0.04$; $p=0.84$] ou de la taille de l'objet [$F_{(2,38)}=1.84$; $p=0.17$]. Ainsi, nous pouvons donc penser que l'apparition du pic de la hauteur maximale de la trajectoire constitue un invariant temporel quelques soit les conditions d'obstacle.

4. *Distance de sécurité*

La distance de sécurité (DS) peut être définie comme la distance entre le poignet et l'obstacle au moment du passage au-dessus de ce dernier (Gorce *et al.*, 2005; Bendahan, 2006). Celle-ci a été mesurée pour chaque condition de saisie avec obstacle.

Le test ANOVA montre un effet d'interaction entre l'axe et la taille de l'obstacle [$F_{(2,38)}=4.29$, $p=0.002$]. La distance de sécurité apparaît plus petite pour OB2 (Axe P1 : 9.2 cm +/- 2.1 ; Axe P2 : 9.5 cm +/- 3.6; Axe P3 : 8.0 cm +/- 4.2) comparée à OB1 (Axe P1 : 12.05 cm +/- 6.1; Axe P2 : 11.0 cm +/- 6.8; Axe P3 : 15.5 cm +/- 7.8) ce qui suppose un risque de collision accru avec l'augmentation de la taille de l'obstacle.

Par ailleurs, il n'a pas été observé d'effet de la position de l'obstacle [$F_{(1,19)}=8.75$; $p=0.08$] ou de la taille de l'objet [$F_{(2,38)}=0.16$, $p=0.84$] sur la distance de sécurité ce qui signifie qu'il existe une invariance spatiale entre les différentes positions de l'obstacle.

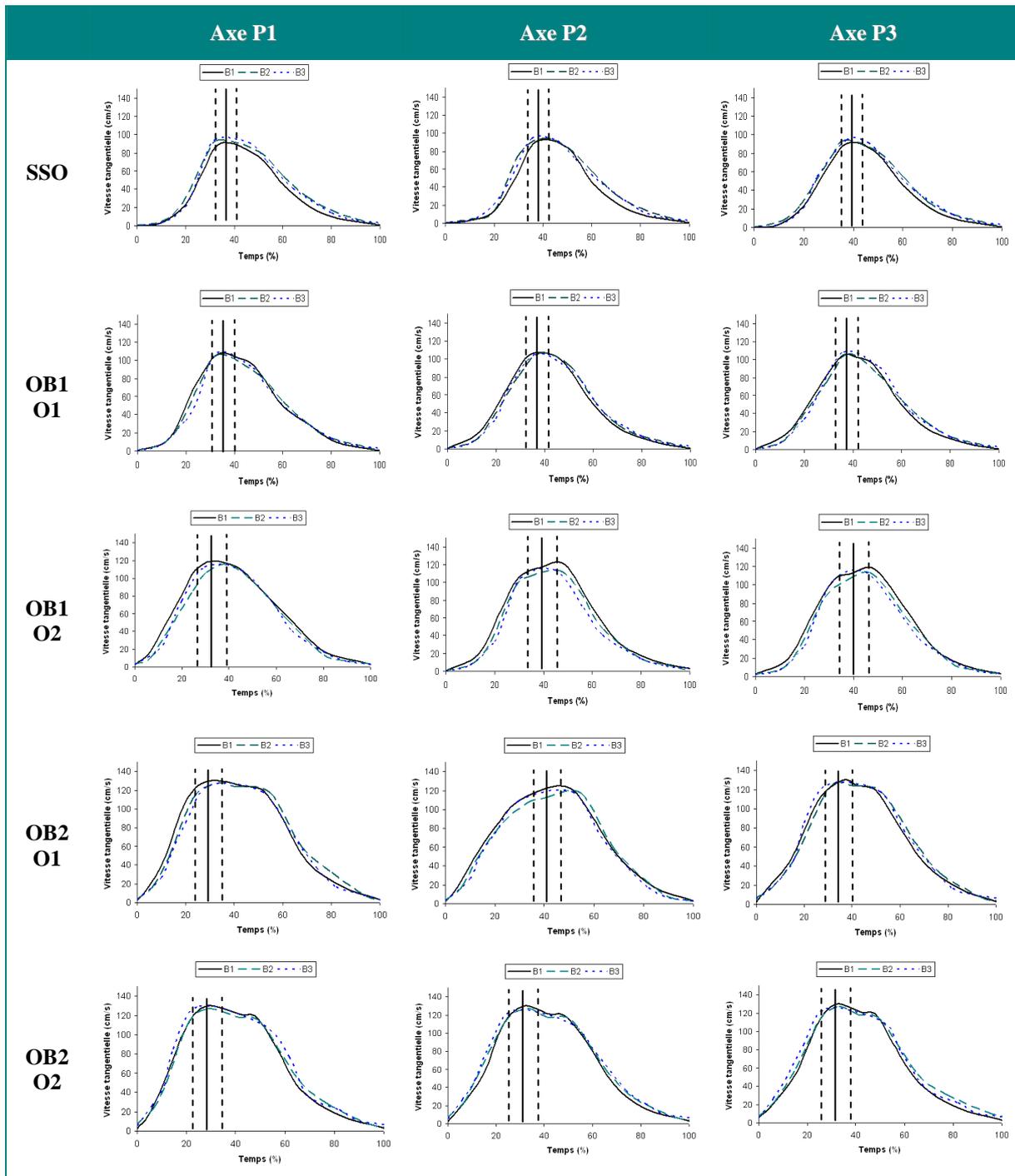
Nous nous interrogeons alors si ces invariances temporelles et spatiales observées au niveau de la trajectoire du poignet se retrouvent également au niveau d'autres paramètres cinématiques telle que la vitesse tangentielle?

IV.3.2.2. *Vitesse tangentielle du poignet*

Les courbes moyennes de la vitesse tangentielle du poignet selon la taille de l'obstacle (OB1 et OB2), la position de l'obstacle (O1 et O2), l'axe (Axe P1, Axe P2, Axe P3) pour chaque taille d'objet (B1, B2 et B3) ainsi que pour les conditions contrôles sans obstacle (SSO) sont reportées dans le tableau IV.5. Chaque courbe correspond à la moyenne de la vitesse de l'ensemble de la population. Les valeurs d'écart-type ne sont pas présentées ici pour ne pas alourdir les tracés.

L'observation de la vitesse tangentielle du poignet fait apparaître des profils différents en fonction des conditions d'obstacle et de l'axe de saisie. Pour l'ensemble des essais, l'allure de la vitesse tangentielle du poignet semble avoir une forme caractéristique du mouvement de préhension dite "en cloche" (Morasso, 1981; Abend *et al.*, 1982; Atkeson *et al.*, 1985). La présence d'obstacle provoque un aplatissement de la courbe de la vitesse du poignet avec des irrégularités qui traduisent des réajustements au passage de l'obstacle. De plus, l'axe du mouvement fait apparaître un décalage de la courbe vers la gauche ce qui correspond à l'allongement de la phase de décélération du poignet.

Tableau IV.5: Vitesses moyennes du poignet en fonction des conditions d'obstacle pour chaque taille d'objet. Les barres verticales représentent l'occurrence de la vitesse maximale (moyenne (—) et écart-type (- - -)).



Afin de quantifier ces observations, nous avons extrait la valeur maximale de la vitesse tangentielle du poignet (V_{max}) pour chaque condition ainsi que les temps d'apparition de celle-ci en fonction du temps relatif (% du temps total) (Tabl. IV.6).

Ce paramètre biomécanique apparaît particulièrement intéressant pour observer des modifications de la cinématique du mouvement. En effet, l'amplitude et l'occurrence de sa valeur maximale nous renseigne sur la décomposition des composantes lentes et rapides de la phase de "transport".

Tableau IV.6: Vitesse maximale du poignet (exprimée en cm/s) (et écart-types) en fonction de l'axe (P1, P2, P3), de la taille (OB1 & OB2) et de la position (O1 & O2) de l'obstacle pour chaque taille d'objet (B1, B2 & B3).

Objet	Axe 1			Axe 2			Axe 3		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
SSO	89.12 (15.33)	96.20 (18.05)	95.4 (18.42)	90.73 (17.94)	93.62 (16.75)	93.29 (18.16)	89.19 (16.18)	90.20 (14.05)	92.07 (12.98)
OB1 O1	106.03 (23.12)	107.22 (25.04)	110.14 (26.34)	103.33 (20.45)	99.08 (22.75)	107.07 (24.89)	105.42 (18.55)	111.80 (20.45)	117.71 (22.91)
OB1 O2	120.30 (21.33)	117.23 (26.28)	119.40 (25.52)	118.88 (22.43)	113.41 (24.26)	116.81 (23.00)	120.87 (19.51)	118.08 (21.21)	119.97 (20.04)
OB2 O1	125.14 (25.55)	122.23 (23.12)	122.89 (24.43)	121.60 (22.13)	115.04 (24.55)	122.66 (22.10)	124.12 (20.89)	123.00 (22.75)	121.34 (26.65)
OB2 O2	128.83 (28.13)	125.14 (27.55)	124.82 (25.76)	126.30 (25.14)	117.72 (32.01)	122.22 (24.15)	125.27 (25.13)	124.03 (23.55)	124.72 (27.15)

Le test Anova à mesures répétées fait apparaître dans le cas I, un effet d'interaction entre l'axe et la présence d'obstacle sur Vmax [$F_{(2,38)}=5.59$, $p=0.007$]. Par contre, aucun effet de la taille de l'obstacle n'est à noter sur Vmax. Ainsi, Vmax se trouve significativement augmentée pour les conditions avec obstacle (Axe P1 : 118.72 cm/s +/- 17.61; Axe P2 : 112.74 cm/s +/- 23.30; Axe P3 : 118.81 cm/s +/- 15.42) comparées aux conditions "contrôle" (Axe P1 : 92.86 cm/s +/- 13.01; Axe P2 : 92.59 cm/s +/- 17.10; Axe P3 : 90.49 cm/s +/- 11.19), quelque soit la taille de l'objet à saisir.

Dans le cas II, le traitement statistique met en évidence un effet de la taille de l'obstacle sur Vmax [$F_{(1,19)}=37.918$, $p<0.0001$]. La vitesse maximale du poignet est significativement plus importante pour l'obstacle OB2 (118.48 cm/s +/- 23.11), comparé à l'obstacle OB1 (106.93 cm/s +/- 22.01), indépendamment des changements de l'axe, de la position de l'obstacle et de la taille de l'objet.

D'un point de vue temporel, l'occurrence du pic de vitesse apparaît significativement plus tôt pour les conditions avec obstacle (32.12 % +/- 4.24) comparées aux conditions sans obstacle (36.33 % +/- 3.78). Avec l'augmentation de la durée du mouvement pour les conditions avec obstacle, la durée de la phase de décélération se trouve nécessairement augmentée avec un prolongement proportionnellement plus long que la composante lente.

IV.3.3. Analyse de la phase de saisie

Pour observer l'effet des propriétés de l'obstacle et de l'objet sur la composante de "saisie", notre analyse s'est focalisée sur le type de saisie caractérisée par le nombre et la nature des doigts puis, sur l'amplitude et l'occurrence de l'ouverture maximale de la pince manuelle et enfin sur les variations angulaires au niveau des doigts.

IV.3.3.1. Types de saisie

Le type de saisie peut être caractérisé par le nombre des doigts utilisés (Bendahan, 2006; Carenzi, 2006). En effet, comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les saisies de précision se caractérisent principalement par des prises bi-digitales alors que les saisies de puissance font intervenir l'ensemble des doigts de la main. Cependant, le nombre de doigts impliqués dans la saisie peut être perturbé par une contrainte spatiale. Ainsi, le nombre de doigts moyen pour chaque condition de saisie a été reporté sur le graphique suivant (Fig. IV.3) :

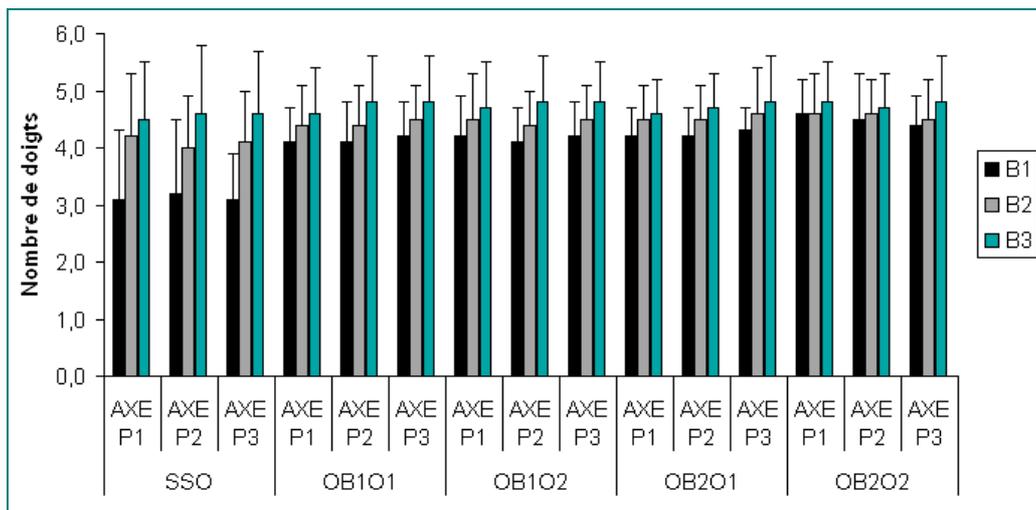


Figure IV.3 : Nombres moyens de doigts impliqués dans la saisie en fonction de l'axe (P1, P2, P3), de la taille (OB1 & OB2) et de la position (O1 & O2) de l'obstacle pour chaque taille d'objet (B1, B2 & B3).

Nous pouvons constater que le nombre de doigts impliqués dans la saisie dépend de la taille de l'objet mais augmente également avec la présence d'un obstacle. L'augmentation du nombre de doigts en présence d'obstacle tend à diminuer la précision manuelle caractérisée par des saisies plus "globales". Toutefois, dans notre étude, la totalité des prises sont des saisies de précisions. En effet, tous les sujets saisissent l'objet avec la pulpe des doigts et cela dans toutes les situations. Par contre, aucun effet des propriétés intrinsèques et extrinsèques de l'obstacle n'est observé sur le nombre de doigts.

IV.3.3.2. Ouverture maximale de la pince

L'évolution de l'écartement des doigts au cours du mouvement a été observée au cours du mouvement pour chaque condition de saisie. Les valeurs moyennes de l'ouverture maximale de la pince manuelle (Ouv_{max}) sont reportées dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7: Ouvertures maximales moyennes (exprimées en cm) des doigts en fonction des conditions d'obstacle pour chaque taille d'objet.

Objet	Axe 1			Axe 2			Axe 3		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
SSO	11.69 (1.60)	13.13 (0.93)	13.90 (1.43)	12.76 (1.73)	13.43 (1.09)	14.07 (1.28)	12.80 (1.04)	13.53 (1.10)	14.16 (1.40)
OB1 O1	11.97 (0.93)	12.23 (1.20)	12.07 (1.85)	11.94 (1.49)	12.22 (1.90)	12.10 (1.68)	11.86 (1.07)	12.28 (2.52)	12.18 (1.16)
OB1 O2	10.36 (1.22)	11.52 (0.87)	11.54 (0.92)	10.48 (2.17)	11.44 (1.21)	11.60 (1.52)	10.59 (2.30)	11.41 (1.63)	11.54 (0.88)
OB2 O1	9.60 (1.63)	10.28 (1.10)	10.41 (1.33)	9.75 (1.77)	10.13 (1.87)	10.11 (1.11)	9.64 (1.51)	10.06 (2.38)	10.15 (1.26)
OB2 O2	11.15 (2.01)	11.37 (1.17)	11.85 (1.05)	11.21 (1.36)	11.65 (1.03)	11.76 (1.42)	11.21 (1.49)	11.55 (0.71)	11.78 (1.29)

Dans le plan statistique I, l'analyse de la variance montre un effet principal de la taille de l'objet sur Ouv_{max} [$F_{(2,38)}=25.441$, $p=0.00001$] (Fig. IV.4). Le test HSD de Tukey montre que Ouv_{max} est significativement inférieur pour l'objet B1 (\emptyset : 3,5 cm) comparée à B2 (\emptyset : 5,5 cm) ($p=0.00024$) et B3 (\emptyset : 7,5 cm) ($p=0.00012$). Par contre, nous n'observons pas de différence significative de Ouv_{max} entre B2 et B3 ($p=0.057$).

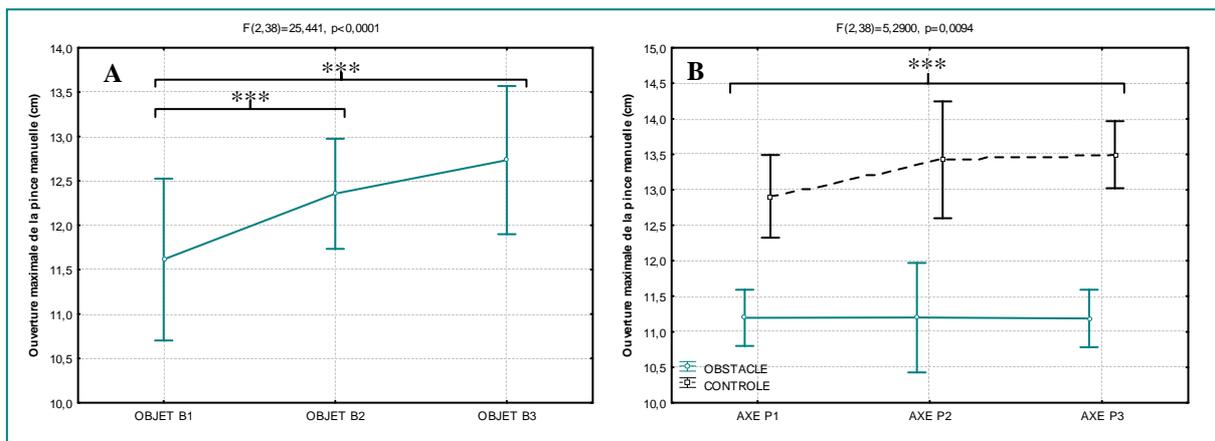


Figure IV.4 : Evolution de l'ouverture maximale de la pince manuelle en fonction de la taille de l'objet (A) et de l'axe et de la présence d'obstacle (B) (***) $p < 0.0001$.

Par ailleurs, nous avons remarqué un effet d'interaction entre l'axe et la présence d'obstacle [$F_{(2,38)}=5.290$, $p=0.009$] sur Ouv_{max} (Fig. IV.4). Ainsi, Ouv_{max} apparaît significativement supérieure pour les conditions sans obstacle (contrôle) comparées aux conditions avec obstacle ($p=0.00013$).

Le plan statistique II montre un effet principal de la taille de l'objet [$F_{(2,38)}=7.41$, $p=0.0019$], ainsi qu'un effet d'interaction entre la taille et la position de l'obstacle [$F_{(1,19)}= 42.614$, $p < 0.0001$] (Fig. IV.5). En position O1, Ouv_{max} est significativement supérieure pour l'obstacle OB1 comparé à OB2 (12.09 vs 10.015 cm ; $p = 0.0002$) alors qu'en position O2, Ouv_{max} est comparable pour les deux tailles d'obstacle (11.50 vs 11.16 cm ; $p = 0.306$).

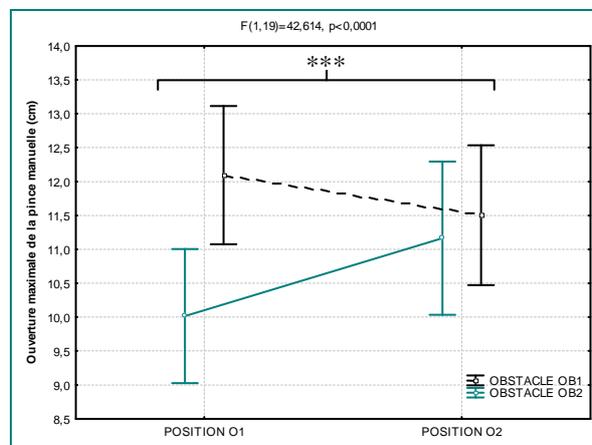


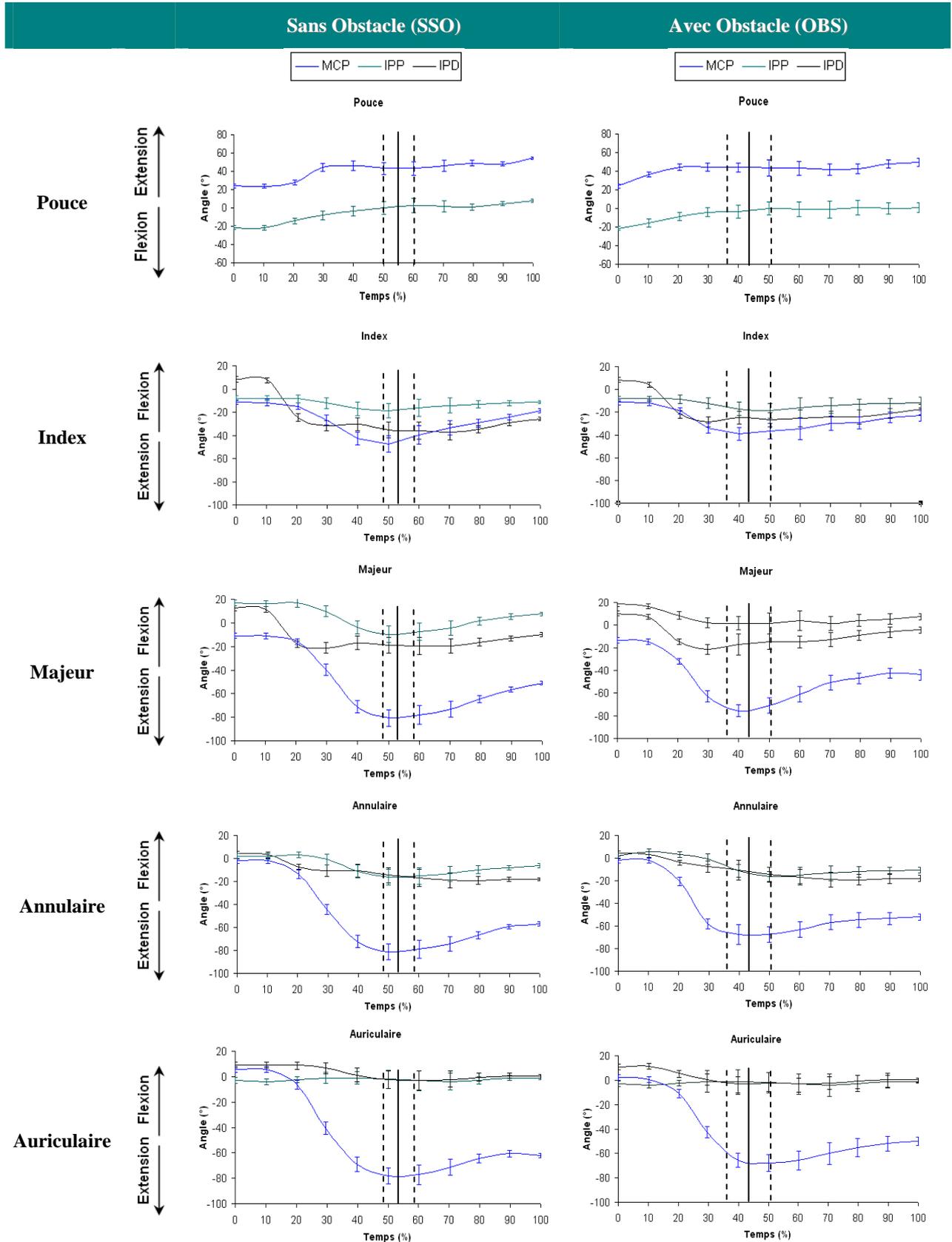
Figure IV.5 : Evolution de l'ouverture de la pince manuelle en fonction de la taille (OB1 & OB2) et de la position de l'obstacle (O1 & O2) (***) ($p < 0.0001$).

Temporellement, l'occurrence de l'ouverture maximale apparaît significativement plus tard pour les conditions avec obstacle (72.2 % +/- 5.3) comparées aux conditions contrôles (66.8 +/- 2.2) ce qui confirme la prolongation de la phase de "transport" pour les saisies avec obstacle.

IV.3.3.3. Evolutions articulaires de la main

Les évolutions angulaires des articulations de la main ont été extraites à partir des données du Cyberglove. Celles-ci ont été moyennées en fonction de la durée de mouvement et reportées dans le tableau IV.8 pour les saisies contrôles et celles avec obstacle.

Tableau IV.8 : Evolutions angulaires moyennes (et écart-type) au niveau des articulations métacarpo-phalangiennes (MCP), interphalangiennes proximales (IPP) et interphalangiennes distales (IPD) des doigts pour les conditions sans obstacle (SSO) et avec obstacle (OBS). Les barres verticales représentent l'occurrence de l'ouverture maximale de la pince manuelle (moyenne (—) et écart-type (- - -))



Nous pouvons observer une diminution des amplitudes angulaires pour les saisies avec obstacle. Celles-ci se caractérisent par des variations articulaires moins importantes et une amplitude maximale temporellement avancée ce qui va de pair avec la diminution de l'ouverture maximale de la pince manuelle et la prolongation du temps de mouvement en présence d'obstacle. La modification de l'évolution articulaire des doigts confirme bien l'influence de l'obstacle sur l'organisation de la composante de "saisie". De même, une plus grande variabilité angulaire est observée pour les saisies avec obstacle ce qui reflète des différences motrices interindividuelles.

IV.3.3.4. Postures finales

Pour comparer l'influence des conditions de saisie sur la posture manuelle, la valeur de l'angle de chaque articulation de la main a été mesurée au moment de la saisie de l'objet. A titre d'exemple, les valeurs moyennes de l'angle des articulations MCP sont présentées dans le tableau IV.9.

Tableau IV.9 : Valeurs absolue de l'angle moyen des MCP (°) de chaque doigt au moment du contact avec l'objet en fonction de l'axe (P1, P2, P3), de la taille (OB1 & OB2) et de la position (O1 & O2) de l'obstacle pour chaque taille d'objet (B1, B2 & B3).

		Axe 1			Axe 2			Axe 3			
		Doigts	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
SSO	Pouce	63.43	42.12	40.14	62.67	44.75	42.46	60.12	54.24	45.34	
	Index	35.18	33.76	20.13	36.14	31.69	22.98	31.55	32.20	22.76	
	Majeur	10.45	15.34	13.54	12.53	10.08	10.69	11.64	10.98	10.02	
	Annulaire	15.88	11.24	10.67	17.96	12.25	9.91	18.77	13.07	9.22	
	Auriculaire	4.59	8.23	5.88	9.99	11.23	6.72	7.43	9.79	8.55	
OB1 O1	Pouce	62.07	50.98	55.14	60.07	52.12	51.05	61.76	48.67	45.78	
	Index	54.17	46.22	48.21	52.17	48.17	44.25	52.17	53.17	46.92	
	Majeur	12.52	37.54	45.18	10.52	38.33	46.33	10.52	45.33	44.68	
	Annulaire	12.88	13.19	35.73	17.88	15.12	30.12	18.88	25.12	28.73	
	Auriculaire	1.05	5.65	9.67	1.33	2.04	12.04	2.45	2.04	15.83	
OB1 O2	Pouce	54.53	48.67	49.87	46.22	59.46	59.09	56.54	59.34	61.78	
	Index	54.17	46.22	48.21	52.17	40.96	44.25	52.17	53.17	46.92	
	Majeur	12.52	37.54	45.18	10.52	18.37	46.33	10.52	45.33	44.68	
	Annulaire	12.88	13.19	35.73	17.88	29.75	30.12	18.88	25.12	28.73	
	Auriculaire	1.05	5.65	9.67	1.33	5.87	12.04	2.45	2.04	15.83	
OB2 O1	Pouce	52.33	54.87	65.59	57.69	59.46	66.97	54.33	57.52	63.09	
	Index	51.77	44.12	40.22	52.27	48.62	38.34	51.23	45.65	40.37	
	Majeur	25.54	26.01	22.43	28.36	28.62	25.91	30.54	31.45	28.19	
	Annulaire	33.76	30.51	26.34	35.06	29.72	24.42	38.76	31.45	32.66	
	Auriculaire	12.44	8.32	5.54	11.96	6.94	6.59	12.54	7.33	8.34	
OB2 O2	Pouce	64.75	61.22	54.11	64.77	62.38	38.93	62.81	60.44	45.65	
	Index	62.23	45.44	36.88	61.11	33.48	32.52	58.17	45.64	37.64	
	Majeur	44.71	37.54	25.51	41.71	27.71	14.55	44.64	32.75	19.23	
	Annulaire	51.65	34.74	31.54	49.93	28.64	23.14	48.44	32.23	28.54	
	Auriculaire	18.54	10.55	6.79	16.18	5.02	3.99	15.45	9.08	5.87	

Il apparaît clairement que les propriétés de l'objet influencent la configuration articulaire de la posture finale des doigts. Par contre, les paramètres intrinsèques et extrinsèques de l'obstacle ne semblent pas liés au type de stratégie de saisie employée. En d'autres termes, les caractéristiques de l'obstacle ne sont pas des facteurs déterminants pour le type de prise. Ceci nous conduit à émettre l'hypothèse que le Système Nerveux Central n'utilise que les informations sensorielles liées à l'objet pour définir une configuration de saisie bien que la présence d'obstacle ait une influence sur celle-ci, indépendamment de ses caractéristiques.

IV.4. Discussion

Le but de ce protocole était de tester différentes contraintes environnementales afin d'identifier les paramètres prépondérants lors de l'exécution d'un mouvement de préhension. Notre objectif était ainsi de différencier le rôle de contraintes liées à l'obstacle de celles liées à l'objet sur l'évolution des paramètres spatio-temporels caractéristiques du mouvement de préhension.

En accord avec les études antérieures, nos résultats montrent ainsi que les paramètres cinématiques apparaissent affectés par la présence d'un obstacle sur la trajectoire du poignet mais que ceux-ci peuvent varier en fonction des propriétés de l'environnement.

Le temps de mouvement (MT) apparaît particulièrement influencé par la présence d'obstacle. Ainsi, nous observons une augmentation significative de la durée de mouvement pour les conditions avec obstacle (Geronimi & Gorce, 2007). Cependant, contrairement à d'autres études, le temps de mouvement ne varie pas en fonction des propriétés de l'obstacle et de la taille de l'objet (Mon-Williams *et al.*, 2001; Biegstraaten *et al.*, 2003). Ce résultat serait en faveur de la théorie de l'isochronie temporelle qui précise que lorsqu'il n'y a pas de consignes données sur la vitesse du geste, il existe une tendance spontanée à accroître cette vitesse en fonction de la distance à parcourir (Viviani & Terzuolo, 1982; Viviani & Schneider, 1991). De ce fait, les mouvements humains tendent à être exécutés pendant la même durée quelles que soient les modifications d'amplitude ou de position. Ainsi, une invariance temporelle devrait se retrouver entre les différents essais en présence d'obstacle.

En effet, l'analyse temporelle a mis en évidence une prolongation de la phase de décélération caractérisée par une occurrence du pic de vitesse avancée pour l'ensemble des conditions

d'obstacle. Ainsi, la symétrie temporelle observée lors des mouvements sans obstacles laisse place à une augmentation de la durée de la composante lente de la phase de "transport".

La hauteur maximale du poignet apparaît significativement liée à l'axe et à la taille de l'obstacle. Au contraire, les variations de la taille de l'objet et de la localisation de l'obstacle en position proche (O1) ou éloignée (O2) ne modifient pas significativement l'amplitude du geste. Ainsi, nous observons une certaine invariance spatiale de la trajectoire sur le plan sagittal (yz) entre les conditions d'obstacle (Bendahan, 2006). Par conséquent, la distance de sécurité entre le poignet et l'obstacle se trouve réduite ce qui augmente les risques de collision avec celui-ci.

Si certains paramètres ne sont pas sensibles aux modifications de l'obstacle, l'indice de courbure semble quant à lui particulièrement affecté par les propriétés de l'environnement. En effet, la triple interaction entre l'axe, la taille et la position témoigne de cette dépendance. Par contre, nous n'observons pas d'effet de la taille de l'objet sur la courbure de la trajectoire.

De même, l'axe du mouvement apparaît comme un paramètre majeur sur la variation de la durée du mouvement. En effet, la plupart des études ayant fait intervenir un obstacle sur la trajectoire du poignet se sont limitées à l'étude dans un plan sagittal (Castiello *et al.*, 1999; Mon-Williams *et al.*, 2001; Alberts *et al.*, 2002; Biegstraaten *et al.*, 2003; Bendahan, 2006). Au contraire, Jackson *et al.* avaient tester l'effet de la présence d'obstacle de chaque côté de l'obstacle pour des saisies effectuées soit 15 cm à droite, soit 15 cm à gauche de la ligne médiane (Jackson *et al.*, 1995). Or, nous montrons que le temps de mouvement est plus important pour l'axe controlatéral (P1) comparé à l'axe médian (P2) et l'axe ipsilatéral (P3). Cette augmentation du temps de mouvement peut être le reflet d'une zone atteignable moins "habituelle" pour les sujets droitiers de notre étude où l'axe représenterait une contrainte supplémentaire à celle de l'obstacle.

Par ailleurs, nous avons également montré que la taille de l'objet n'a pas ou peu d'effet significatif sur les paramètres de la composante de "transport". Au revanche, nous rapportons un effet classique de la taille de l'objet sur les caractéristiques de la saisie et en particulier sur l'amplitude de l'ouverture maximale de la pince (Jeannerod, 1981; Paulignan *et al.*, 1991b; Bootsma *et al.*, 1994; Zaal *et al.*, 1998) ainsi que sur le nombre de doigts impliqués dans la saisie. Ainsi, dans les conditions sans obstacle, l'ouverture de la pince est supérieure et proportionnelle à la taille de l'objet.

Par contre, en condition d'obstacle, le lien entre taille de l'objet et l'évolution de la pince est perturbée (Saling *et al.*, 1998; Tresilian, 1998; Bendahan, 2006). D'une part, nous observons que l'amplitude de l'ouverture de la pince est diminuée mais, d'autre part, que l'amplitude entre les deux tailles d'objet (B1 & B2) est identique en présence d'obstacle. Nous pouvons ainsi penser que les contraintes géométriques liées à l'évitement de la collision avec l'obstacle imposent une restriction au niveau de l'amplitude des doigts qui affecte la coordination entre la taille de l'objet et les caractéristiques de la phase de "saisie".

En bref, nous avons mis en évidence une influence de la présence d'obstacle sur les composantes de "transport" et de "saisie" mais peu ou pas de différences entre les propriétés intrinsèques et extrinsèques de ce dernier.

Comment expliquer que les différentes conditions d'obstacle influencent peu la cinématique du mouvement alors que des propriétés plus fines telles que la taille de l'objet interviennent par exemple sur l'amplitude de la pince manuelle ?

Dans un premier temps, nous pouvons penser que l'incrément de la taille et de la position de l'obstacle n'était pas suffisante pour observer des différences significatives entre les essais. Or, le protocole expérimental a été établi dans le même ordre de grandeur que d'autres études ayant testées l'effet des caractéristiques de l'obstacle sur la coordination des composantes du mouvement. Ainsi, Saling observe peu de différences d'amplitude de la vitesse maximale du poignet entre des obstacles de 9 et 11 cm de hauteur mais uniquement des changements temporels (Saling *et al.*, 1998). De même, Bendahan montre qu'il y a peu de variations de certains paramètres biomécaniques entre des obstacles de 10 à 25 cm (Bendahan, 2006). Le contrôle des mouvements de préhension dépendrait donc peu des caractéristiques propres de l'obstacle.

Ainsi, une autre explication pourrait venir du type de contrôle utilisé pour exécuter le mouvement de préhension. En effet, plusieurs auteurs penchent pour un contrôle "global" du mouvement (Jeannerod, 1984; Marteniuk *et al.*, 1987; Martenuik *et al.*, 1990; Steenbergen *et al.*, 1995). Ainsi, le mouvement de préhension serait contrôlé par un système général où seuls certains paramètres seraient spécifiés et modifieraient les caractéristiques du geste en fonction des contraintes imposées à celui-ci par le contexte environnemental. Ceci expliquerait que nous n'observons pas de différences d'amplitudes sur certains paramètres entre les différentes conditions d'obstacle.