

Espace et échelle du mouvement : la loi de Fitts dans le monde physique et dans les mondes électroniques

Yves Guiard

Laboratoire Mouvement et Perception
CNRS (UMR N° 6152) & Université de la méditerranée
Marseille
guiard@laps.univ-mrs.fr

Michel Beaudouin-Lafon

Laboratoire de Recherche en Informatique
Université Paris-Sud & CNRS (UMR N° 8623)
Orsay
mbl@lri.fr

Correspondance

Yves Guiard,
Laboratoire Mouvement et Perception
Faculté des sciences du sport
163 avenue de Luminy - CP 910
13288 Marseille cedex 9
Téléphone : 04 91 17 22 57
Télécopie : 04 91 17 22 52

Résumé

Nous avons conçu et mis en œuvre une approche nouvelle du paradigme classique du pointage faisant jouer un rôle central à la variable d'échelle. Nous utilisons le diagramme espace-échelle introduit par Furnas et Bederson (1995) dans le champ de l'interaction homme-machine (IHM). Fondé sur une géométrie inédite, ce type de représentation permet de visualiser les variations d'échelle en même temps que les déplacements dans l'espace, ce qui nous a permis d'analyser la cinématique de la navigation au sein des mondes électroniques multi-échelle (ou zoomables).

Les travaux rapportés dans ce document se développent autour de la frontière qui sépare le monde réel et les mondes d'information. Le monde réel dans lequel s'inscrivent normalement nos mouvements est typiquement dynamique : il met en jeu la masse, la longueur et le temps. En revanche, les mondes d'information auxquels les humains sont exposés depuis à peine deux décennies sont d'essence purement cinématique, en ce sens qu'ils ignorent typiquement la masse, et donc les contraintes de force, d'énergie et de puissance. C'est la nature cinématique des mondes d'information qui explique que leurs contenus soient indéfiniment rescalables, propriété dont les objets du monde physique ne jouissent que dans une étroite mesure, comme on le sait depuis Galilée.

Mots-Clés

Espace, échelle, homothétie, diagramme espace-échelle, pointage, loi de Fitts, mouvement humain, cinématique et dynamique, mondes d'information ou électroniques

¹ Les termes « rescalable » et « rescalabilité », absents du lexique français, sont des néologismes indispensables ici pour exprimer l'idée que quelque chose se prête aux changements d'échelle par homothétie.

1. Introduction

1.1 Pointage et loi de Fitts

Il y a plus d'un siècle que la psychologie scientifique s'intéresse au conflit entre la vitesse et la précision de nos mouvements. Inaugurée par Woodworth (1899), l'étude systématique de cette question a atteint sa maturité il y a exactement cinquante ans quand Fitts (1954) donnait au paradigme expérimental du pointage le statut d'un paradigme classique de la psychologie expérimentale et identifiait la loi quantitative qui porte désormais son nom.

La loi de Fitts, dont la robustesse et la généralité ont été abondamment démontrées, nous dit que le temps minimal requis pour atteindre une cible de largeur W située à une distance D varie en fonction du logarithme du rapport D/W . Dans sa version généralement admise aujourd'hui (MacKenzie, 1992), la loi s'écrit :

$$TM = k_1 * \log_2(D/W + 1) + k_2 \quad (1)$$

où TM désigne le temps de mouvement, où k_1 et k_2 représentent des coefficients ajustable ($k_1 > 0$) et où le terme $\log_2(D/W + 1)$ désigne l'indice de difficulté (ID) de la tâche.

1.2 Pointage et échelle, dans le monde physique et dans les mondes d'information

Dans les sciences du mouvement humain comme dans bien d'autres disciplines, l'échelle est un concept critique pour appréhender l'espace. Les notions d'échelle et d'espace sont à ce point consubstantielles qu'aucune problématique de l'espace ne peut raisonnablement faire l'impasse sur la variable d'échelle. Un objectif essentiel de ce projet a été d'identifier le statut, à notre avis nettement sous-estimé jusqu'à ce jour, du facteur d'échelle dans le pointage.

Les mondes électroniques mis aujourd'hui à la disposition de tous par les sciences et technologies de l'information (STI) sont pour la recherche fondamentale en psychologie une occasion précieuse d'avancées *conceptuelles*. L'impact qu'ont exercé les STI sur la société est patent. Il n'échappe évidemment à personne, avec un recul de bientôt deux décennies, que l'ordinateur a transformé en profondeur la vie quotidienne des humains. Mais on tarde à réaliser dans les disciplines académiques traditionnelles—où l'on a tendance à réduire les STI à l'*outil* informatique si abondamment mis à contribution dans la pratique de la science—que les STI n'ont pas seulement donné naissance à des applications pratiques. Les STI sont aussi un gisement d'idées théoriques nouvelles de nature à renouveler certains de nos savoirs fondamentaux. Ainsi, la présente étude a été pour nous l'occasion de réexaminer le paradigme classique du pointage à la lumière de théorisations innovantes issues du milieu des chercheurs en informatique qui se réclament de l'IHM. Comme nous l'expliquons ci-dessous, ce réexamen nous amène à proposer aujourd'hui une révision assez radicale de la manière dont on peut conceptualiser le pointage.

Une option stratégique de ce projet a été d'appliquer au thème du pointage le principe du *diagramme espace-échelle* de Furnas et Bederson (1995), qu'illustrent les Figures 1 et 2.

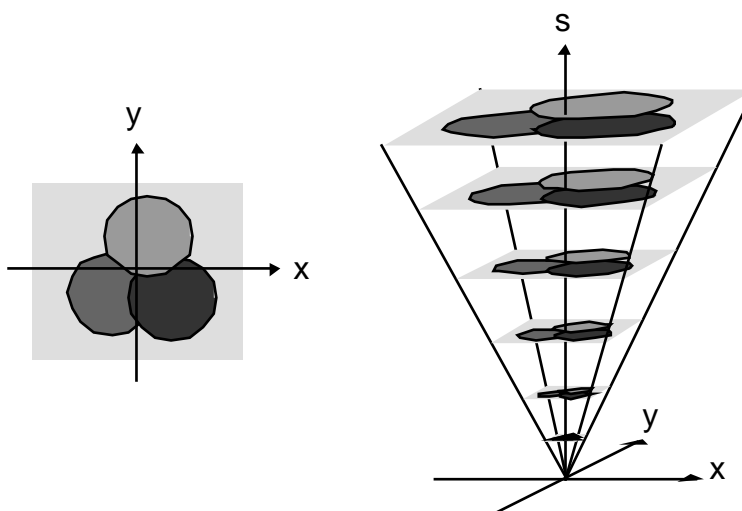


Figure 1 : Le principe du diagramme espace-échelle de Furnas et Bederson (1995). Un objet défini en (a) dans un plan xy est représentée en (b) à divers niveaux de grossissement en utilisant deux axes spatiaux u_1 et u_2 et un axe d'échelle v .

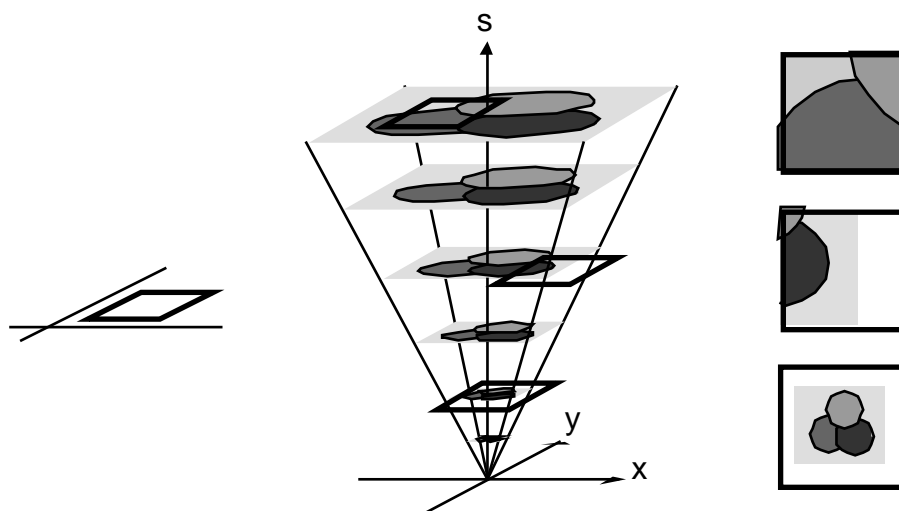


Figure 2. A gauche, le rectangle représente la *vue* courante sur cet objet. Au centre, cette vue conserve une taille constante à tous les niveaux de grossissement, donnant ainsi sur l'objet une information (à droite) d'autant plus détaillée mais en même temps d'autant moins complète qu'on la fera monter sur l'axe de l'échelle (zoom avant, vers le haut).

Cet outil de représentation permet de comprendre de manière intuitive les variations pertinentes d'une tâche donnée. Les Figures 3 et 4 montrent comment faire varier séparément l'échelle et la difficulté d'une tâche de pointage (Guiard, 2001).

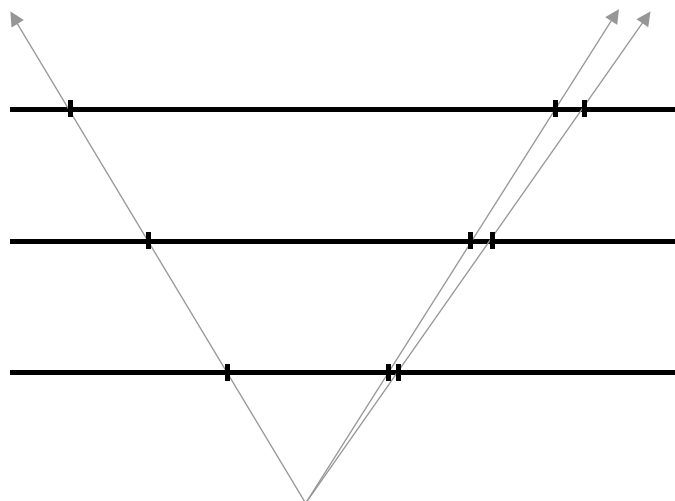


Figure 3. Trois versions d'une tâche de Fitts correspondant à trois niveaux d'échelle différents. Dans ce diagramme espace-échelle, les trois points qui, à un niveau donné d'échelle, définissent le point de départ du mouvement et les limites internes et externes de la cible deviennent des rayons. Le rapport entre distance et largeur de cible étant constant, les trois tâches ont le même niveau de difficulté.

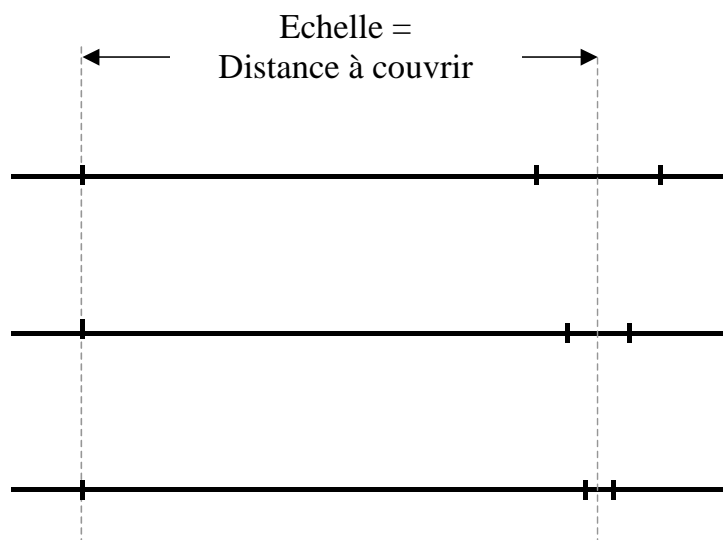


Figure 4. Variation de la difficulté d'un mouvement, à échelle constante. L'amplitude du mouvement, contrôlé par une distance D constante, ne varie pas. Seule varie l'amplitude relative—l'amplitude en unités de tolérance—et donc l'indice de difficulté. (Ceci n'est pas un diagramme espace-échelle, ces trois cas de figure correspondant à une seule et même position sur l'axe vertical de la Figure 3).

Ce principe de la représentation espace-échelle, qui a figuré dès le départ au cœur du projet, n'a jamais perdu cette position centrale. Toutes nos études ont été guidées par l'idée d'une séparation orthogonale de l'espace et de l'échelle.

1.2. Les limites de la loi de Fitts

L'intérêt de la loi de Fitts (Equation 1) réside dans son caractère abstrait et général (voir Mottet, Guiard, Ferrand et Bootsma, 2000). Quelque vaste que soit son champ d'application, il reste qu'elle se heurte à une limite quantitative sur chacune de ses deux dimensions, celle de la difficulté et celle de l'échelle.

Une gamme de difficulté limitée

En premier lieu, l'indice de difficulté dans une tâche de Fitts n'a de signification que jusqu'à 10 bits environ. Au-delà de ce maximum—c'est à dire pour un rapport D/W supérieur à 1000—, une tâche de Fitts devient humainement impraticable (Guiard et al., 2001). A notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature expérimentale classique d'étude ayant proposé à des participants des ID supérieurs à 10 bits.

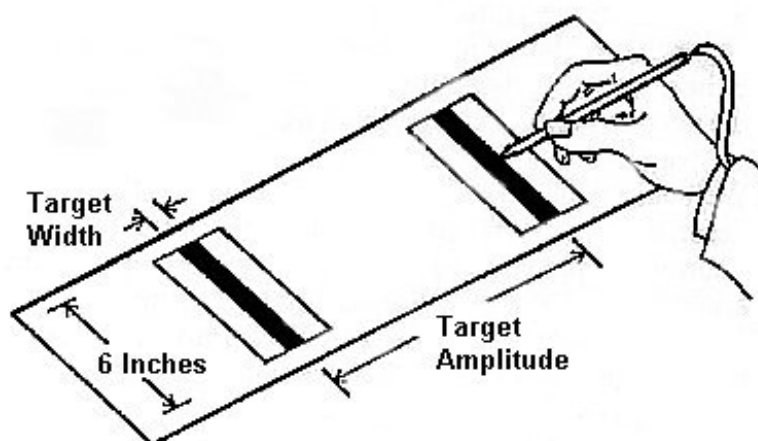


Figure 5. La tâche utilisée par Fitts dans son étude historique de 1954.

Pour augmenter un rapport, il faut en accroître le numérateur et/ou en réduire le dénominateur, mais, s'agissant de pointage humain, l'un et l'autre sont typiquement bornés. Essayons de maximiser l' ID dans la tâche de pointage de Fitts (1954) illustrée dans la Figure 5. Il convient, en premier lieu, de pousser D à son maximum : or, bien avant que l'écartement des cibles n'atteigne la distance d'un mètre, notre sujet ne pourra plus effectuer la tâche, pour des raisons qui relèvent aussi bien de la vision que de la biomécanique. Alors réduisons progressivement W : peut-être atteindrons-nous le millimètre, mais bientôt notre sujet sera rapidement en échec du fait des limites de résolution de la perception et de l'action humaines. Avec ces deux contraintes, nous obtenons un rapport maximal D_{\max} / W_{\min} qui plafonne vers 1000, d'où un ID_{\max} de l'ordre de 10 bits. Nous verrons plus bas (Section 2) que cette limite supérieure de difficulté disparaît dès lors que le pointage devient multi-échelle, grâce à la variable du zoom.

Une gamme d'échelle limitée

En second lieu, on ne peut faire varier l'échelle de la tâche de Fitts que dans une gamme assez étroite. Faire varier l'échelle en l'occurrence, c'est modifier proportionnellement le numérateur et le dénominateur du rapport D/W . Imaginons d'abord que l'on miniaturise progressivement la tâche de la Figure 5, en appliquant le principe illustré dans la Figure 3. Par définition, l' ID sera conservé (l'homothétie n'affectant pas le rapport D/W), et pourtant nous allons inévitablement rencontrer un minimum d'échelle infranchissable, essentiellement contraint par W_{\min} . De la même manière, un agrandissement homothétique de la tâche de la Figure 5 va rapidement se heurter à la limite D_{\max} . Ainsi, une fois défini un niveau de difficulté (un rapport D/W), la marge de manœuvre sur la dimension d'échelle est faible.

2. Relativité d'échelle dans le pointage standard : les limites de la loi de Fitts

Cette section présente les résultats d'une étude visant à comprendre, par la modélisation mathématique et l'expérimentation, comment la loi de Fitts est mise en échec lorsque, à un niveau donné du rapport D/W , et donc de l' ID , on fait croître indéfiniment l'échelle de la tâche.⁷ Plus précisément, la présente étude montre comment, à partir d'un certain niveau critique d'échelle qui dépend essentiellement des caractéristiques du système d'effection, la validité de la loi de Fitts se dégrade pour laisser progressivement la place à une loi de *relativité d'échelle* : le TM en vient à dépendre de l'amplitude *absolue* du mouvement (mesurée par D), et donc de l'échelle, en contradiction avec la loi de Fitts.

2.1. Principe de l'expérience

On s'intéresse ici aux mouvements humains réalisables sur une *gamme d'amplitude ouverte*, sans butée physique. C'est le cas, par exemple, du pointage *locomoteur* : si, au lieu de mouvoir la main à partir d'un corps stationnaire, on consent à se déplacer soi-même, alors n'importe quelle distance peut être couverte—ce n'est qu'une question de temps.

Cette nouvelle variante du paradigme du pointage nous affranchit de la limite supérieure d'amplitude propre aux systèmes d'effection à *gamme d'amplitude bornée* utilisés dans le paradigme classique (par exemple, celui de Fitts, 1954, avec la tâche de *tapping*, ou celui de Meyer et al., 1990, qui ont utilisé un mouvement de rotation du poignet). Il devient dès lors possible de poser la question des possibles limites d'échelle de la loi de Fitts.

Nous avons utilisé le protocole de pointage unidimensionnel réciproque (Figure 6). Deux cibles colorées, représentées par des bandes verticales placées à une distance fixe, étaient disposées à gauche et à droite de l'écran. Leur largeur variait d'une condition à l'autre de manière à manipuler le rapport D/W , et donc l' ID .

Le pointeur, une simple ligne verticale, représentait un véhicule motorisé doté d'inertie et de friction et dont les déplacements obéissaient aux lois de la dynamique classique. Avec ce véhicule virtuel, schématisé à l'extrême mais au comportement physiquement réaliste, les participants avaient pour tâche de réaliser le plus grand nombre possible d'allers et retours en un temps donné en rebroussant chemin à l'intérieur de chaque cible. La manette des gaz d'une console de jeu, qui disposait d'un retour élastique vers son orientation neutre, permettait de contrôler l'accélération du mobile dans les deux directions.

² Une autre option possible serait quantifier l'échelle par la moyenne harmonique de D et W (la diagonale d'un rectangle de côtés D et W), mais cela fait peu de différence : quand le rapport D/W s'élève, la différence entre D et cette combinaison de D et W converge rapidement vers zéro.

³ Même si D sert dans notre analyse à mesurer l'échelle, il faut bien comprendre que faire varier l'échelle d'un mouvement toutes choses égales par ailleurs, c'est faire varier *à la fois* D et W , dans les mêmes proportions.

⁴ Dans l'espace à deux dimensions, un rapport hauteur/largeur (ou rapport d'aspect) définit la *forme* d'une figure rectangulaire. Dans l'espace à une dimension du paradigme de Fitts, c'est toujours une forme que définit le rapport D/W —celle d'une figure à une dimension, le tripoint de la Figure 1.

⁵ Une autre option possible serait de quantifier l'échelle par la moyenne harmonique de D et W (la diagonale d'un rectangle de côtés D et W), mais cela fait peu de différence : quand le rapport D/W s'élève, la différence entre D et cette combinaison de D et W converge rapidement vers zéro.

⁶ Même si D sert dans notre analyse à mesurer l'échelle, il faut bien comprendre que faire varier l'échelle d'un mouvement toutes choses égales par ailleurs, c'est faire varier *à la fois* D et W , dans les mêmes proportions.

⁷ Nous sommes redevables à Olivier Goguy, qui a réalisé l'expérimentation rapportée dans cette section, dans le cadre d'un DEA de STAPS (2000-2001) au LMP de Marseille.

⁸ même si, pour des raisons de commodité expérimentale, nous avons utilisé un véhicule simulé. Comme on le verra plus bas, nous avons veillé dans cette simulation à reproduire les contraintes énergétiques du réel.



Figure 6. Le matériel expérimental. Au premier plan, décalé sur la gauche, le joystick servant à contrôler les mouvements du curseur.

Nous avons fait varier l'échelle de la tâche, à plusieurs niveaux d'*ID*, en jouant sur le gain de la commande d'accélération. Plus faible était le gain de l'accélérateur, plus petite était la vitesse maximale de déplacement du véhicule, un effet interprétable indifféremment comme une réduction d'échelle du véhicule par rapport aux dimensions de la tâche maintenues constantes ou comme un grossissement de la tâche par rapport au véhicule supposé de taille constante. Dans ce qui suit, nous aurons recours exclusivement à ce second mode de description, puisque cette étude concerne les effets exercés par les variations d'échelle de la tâche sur les performances de l'acteur humain.

2.2. Analyse théorique

2.2.2. Notion d'intervalle d'isochronie sur la variable d'échelle.

Une implication évidente des Equations 1 et 2 est que la constance du *TM* tant que le rapport D/W , et donc l'*ID*, ne varie pas. La loi de Fitts est une loi d'*invariance d'échelle*, plus précisément une loi d'*isochronie* : le temps d'exécution du mouvement reste inchangé aussi longtemps que D et W varient de manière proportionnelle.

Les données de la littérature confirment ce principe d'isochronie pour des gammes de variation d'échelle assez restreintes, avec quelques exceptions (e.g., Gan & Hoffmann, 1988 ; Danion et al., 1999). En fait, ces exceptions ne sauraient nous surprendre puisque la loi de Fitts ne peut être valide qu'à l'intérieur de limites d'échelle bien définies.

Considérons une tâche de pointage dans laquelle le sujet doit pointer avec le doigt sur une cible dessinée sur une table. Supposons qu'il y ait trois conditions:

- Condition 1 : $D = 10 \text{ cm}$, $W = 1 \text{ mm}$
- Condition 2 : $D = 50 \text{ cm}$, $W = 5 \text{ mm}$
- Condition 3 : $D = 100 \text{ m}$, $W = 1 \text{ m}$.

Dans les trois cas, le rapport D/W vaut 100, et donc l'*ID* reste le même. Ce qui varie, c'est l'échelle de la tâche, par homothétie. Or, si l'on peut s'attendre à enregistrer un *TM* similaire dans les deux premières conditions, on peut prédire sans grand risque que le *TM* va croître

fortement de la condition 2 à la condition 3. Les Figures 7 et 8 expliquent pourquoi cette violation de la loi de Fitts à grande échelle est inévitable.

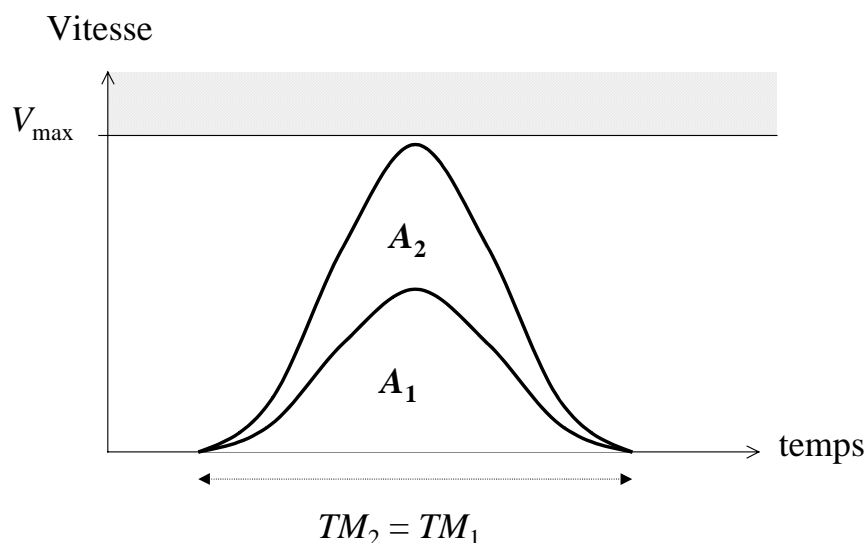


Figure 7. Profil temporel de vitesse pour deux mouvements de difficulté identique mais d'amplitudes inégales, à petite échelle. La surface sous la courbe (le produit vitesse x temps) définit l'amplitude du mouvement.

L'isochronie exprimée par la loi de Fitts est due au fait que, pour des mouvements à petite échelle (comme par exemple les conditions 1 et 2 ci-dessus), le participant est en mesure, parce qu'il dispose de réserves énergétiques, de rescaler sa vitesse pour couvrir une plus grande distance dans le même temps. On observe alors des profils de vitesse en cloche, typiques des mouvements de pointages étudiés dans la littérature (par exemple, Jeannerod, 1981) et composés d'une phase d'accélération et d'une phase de décélération enchaînées sans transition.

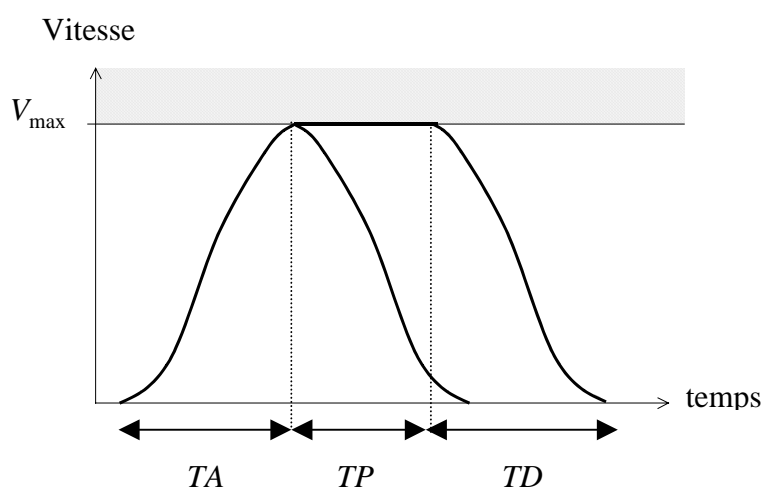


Figure 8. Profil temporel de vitesse pour deux mouvements de difficulté identique mais d'amplitudes inégales, à un niveau d'échelle plus élevé. TA, TP et TD désignent les temps d'accélération, de plateau et de décélération.

Mais tout mouvement biologique possède une limite supérieure de vitesse : dès lors, pour continuer d'accroître l'amplitude au delà de A₂ dans la Figure 7, il va falloir étaler la courbe dans le temps, et le temps requis pour exécuter le mouvement ne pourra plus être

conservé. La cinématique du pointeur va inévitablement présenter un *plateau de vitesse* dont la durée va s'ajouter à celle du profil initial (Figure 8). Toute nouvelle augmentation de D se traduira dès lors par l'allongement de ce plateau de vitesse, et donc du TM : on atteint un niveau critique d'échelle à partir duquel la loi de Fitts va nécessairement se dégrader et perdre peu) peu sa validité.

La Figure 9 illustre, dans un diagramme espace-échelle, une variation continue de l'échelle d'une tâche de pointage pour un ID donné, dans le cas du mouvement discret. Dans ce diagramme, les trois points qui définissent la tâche à un niveau donné d'échelle (le point de départ du mouvement, le bord interne et le bord externe de la cible) deviennent des demi-droites.

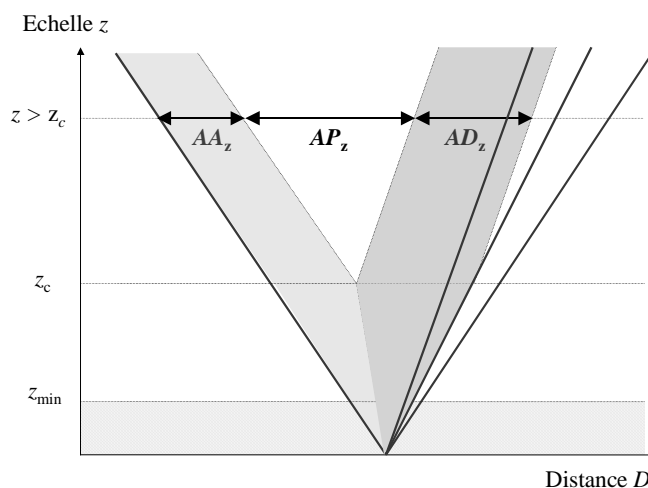


Figure 9. Variations d'échelle d'une tâche de pointage de Fitts, représentées selon le principe du diagramme espace-échelle de Furnas et Bederson (1995). Les quatre rayons correspondent, de gauche à droite, au point de départ du mouvement, au bord proximal de la cible, à son centre et à son bord distal (AA , AP et AD dénotent respectivement l'amplitude couverte par l'accélération, le plateau et la décélération).

2.3.4. Intervalle d'isochronie.

Sur l'axe de l'échelle z , on rencontre deux points singuliers :

- vers le bas, un niveau minimal z_{\min} en dessous duquel le pointage est impossible, en raison de la résolution nécessairement limitée du système perceptuo-moteur (ci-dessous on n'explorera pas cette limite).
- plus haut, un niveau critique d'échelle z_c au-dessus duquel le système ne peut plus rescaler sa vitesse moyenne vers le haut, parce qu'il utilise déjà la totalité de sa puissance. Quand $z = z_c$, le pointeur couvre son niveau d'amplitude critique A_c . Au-delà, la tâche reste réalisable, mais au prix d'une altération qualitative de la cinématique du mouvement, avec l'apparition d'un plateau de vitesse.

Pour un effecteur à gamme d'amplitude ouverte, l'intervalle d'échelle entre z_{\min} et z_c est le seul intervalle dans lequel la loi de Fitts soit physiquement possible grâce à l'absence de plateau de vitesse : c'est ce que nous désignons comme l'*intervalle d'isochronie*. C'est dans cet intervalle d'isochronie que s'inscrivent les tâches de pointage de la littérature. A l'intérieur de cet intervalle, le TM peut être indépendant de l'échelle (bien que ce ne soit pas

⁹ Noter que la distance D et l'amplitude A sont soigneusement distingués dans ce texte. D désigne la distance inter-cibles mesurée de centre à centre et A la distance *effectivement* couverte par le pointeur—l'amplitude pic à pic de son déplacement. Toujours utile, cette distinction l'est particulièrement dans le contexte de cette expérience où nous verrons parfois A s'écarter considérablement de D .

nécessairement le cas), tandis qu'il est toujours fortement influencé par le rapport D/W , le déterminant de la difficulté du mouvement.

2.2.6. Prédiction du TM au-delà de l'intervalle d'isochronie.

Dès lors que le pic de vitesse atteint le maximum permis par la puissance du système, il n'est plus possible de continuer, au-delà de z_c , à augmenter l'amplitude du mouvement à temps constant. A supposer que le sujet applique bien la consigne de minimisation du TM , le pic de vitesse de son mouvement doit être égal à V_{\max} , son plafond absolu de vitesse, et ce plafonnement doit se maintenir pendant toute la durée du plateau de vitesse nécessaire pour couvrir l'excès de distance $D_z - A_c$.¹⁰ La *durée* du plateau de vitesse est alors donnée par :

$$\text{Pour } z > z_c \\ TP_z = 1 / V_{\max} * (D_z - A_c). \quad (3)$$

Par ailleurs, la consigne de minimisation du TM requiert que les processus d'accélération et de décélération, en butée sur leurs valeurs maximales, restent constants quand $D > A_c$. Si l'on appelle TM_c le temps de mouvement dans l'intervalle d'isochronie ($TM_c = TA_c + TD_c$), alors le temps de mouvement au-delà de cet intervalle est :

$$TM_z = TM_c + 1/V_{\max} * (D_z - A_c). \quad (4)$$

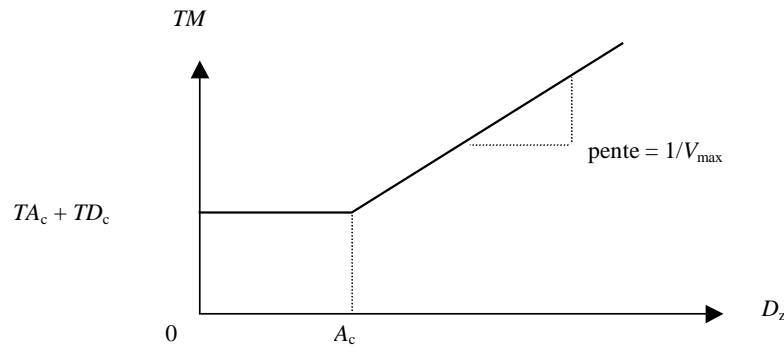


Figure 10. Relation entre le TM et l'échelle de la tâche quand $z > z_c$

Ainsi, quand $D > A_c$, le TM devient une fonction affine de l'*excès d'amplitude* $D_z - A_c$ (Figure 10). Pour déterminer $D_z - A_c$, il nous faut évaluer empiriquement A_c . Une méthode est de définir A_c comme la valeur d'amplitude effective observée au niveau d'échelle où un plateau de vitesse commence à apparaître. Mais on peut déduire une estimation de A_c des constantes du système, moyennant deux hypothèses simplificatrices : nous supposons que l'accélération est constante, en butée sur son maximum a_{\max} , et que le profil de vitesse est symétrique. Ces hypothèses nous permettent de poser que

$$AA = \frac{1}{2} V_{\max}^2 / a_{\max} \quad (5)$$

$$AA = AD \quad (6)$$

¹⁰ Dans une tâche de pointage locomoteur non simulé, ces deux contraintes auraient peu de chances d'être respectées parce qu'elles feraient croître excessivement le coût énergétique du mouvement avec l'échelle. Le respect des consignes reste entièrement plausible, en revanche, dans le cas d'une tâche avec véhicule motorisé.

ce qui conduit à

Pour $z > z_c$

$$TM_z = TM_c + 1/V_{\max} * [D_z - (V_{\max}^2 / a_{\max})]. \quad (7)$$

Si A_c ne peut pas être estimé selon le critère de l'émergence du plateau de vitesse, l'Equation 7 peut remplacer l'Equation 4. Dans tous les cas, il apparaît clairement que, pour un ID constant, lorsque la valeur critique d'échelle est dépassée, le TM commence à dépendre du facteur d'échelle par l'intermédiaire de D_z : l'invariance d'échelle de la loi de Fitts est brisée.

2.2.7. Optimisation de l'amplitude pour les mouvements à grande échelle

Dans l'intervalle d'isochronie, jusqu'au niveau z_c , on peut prévoir que l'amplitude couverte sera en moyenne approximativement égale à la distance de la cible, c'est à dire que $A \approx D$, le sujet ayant intérêt à viser le milieu de la cible pour minimiser le risque d'erreur. Toutefois, une telle stratégie n'est plus optimale à grande échelle : il devient efficace de pointer *en-deçà* du centre de la cible ($A < D$) sans risquer d'accroître le taux d'erreur.

L'optimum de A_z pour tout $z > z_c$ se calcule aisément. Si le sujet continue d'appliquer à grande échelle les consignes de la tâche de Fitts, alors les conditions cinématiques de la décélération seront invariables et identiques à celles qui prévalaient au niveau d'échelle critique : le freinage va commencer à partir de la même vitesse de croisière, égale à V_{\max} , et le processus de décélération se déroule identiquement pour tout $z > z_c$. La stratégie optimale consiste donc à pointer à une distance *constante* au delà du bord proximal de la cible. Cette distance correspond à la demi-largeur de la cible à l'échelle critique, soit $\frac{1}{2} W_c$ (Figure 11).

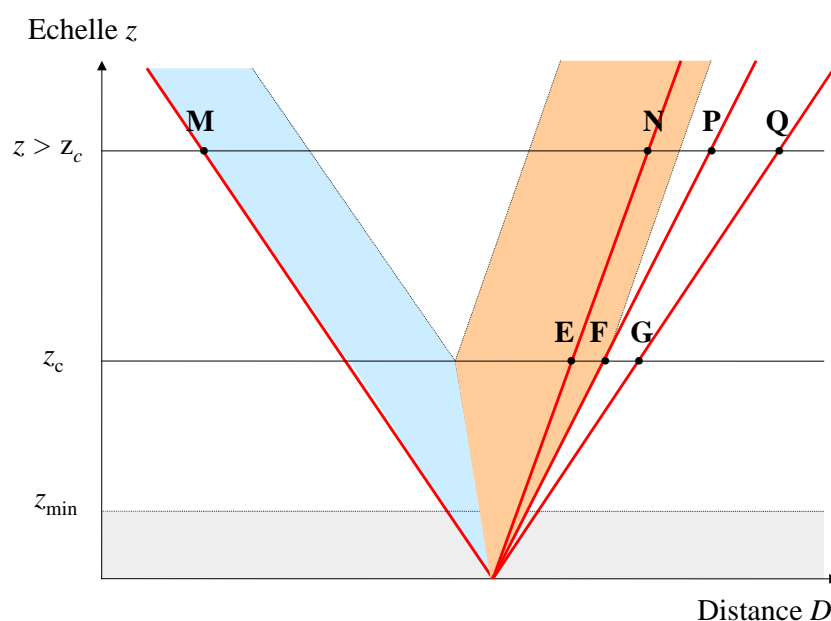


Figure 11. Calcul de l'optimum théorique d'amplitude dans le pointage à grande échelle. Pour tout $z > z_c$, le freinage doit se terminer juste au-delà du bord proximal de la cible, la distance de dépassement correspondant au segment EF, égal à $\frac{1}{2} W_c$.

On en déduit ainsi que, pour $z > z_c$,

$$A_z = D_z - \frac{1}{2} W_z + \frac{1}{2} W_c$$

Ce qui, une fois adapté au protocole réciproque, devient

$$A_z = D_z - W_z + W_c \quad (8)$$

où D_z et W_z sont des longueurs qui varient proportionnellement avec z , tandis que W_c , la tolérance effective du mouvement au niveau d'échelle critique z_c , reste constante. Ainsi, plus l'échelle augmente, plus A devient petit par rapport à D , sans effet sur le taux d'erreur.

Loi chronométrique avec optimisation de l'amplitude

L'Equation 8 nous permet de reformuler l'Equation 7 en remplaçant D_z par A_z , c'est-à-dire en nous débarrassant de l'hypothèse intenable que $A = D$ à toutes les échelles $z > z_c$.

Pour $z > z_c$,
 $TM_z = TM_c + 1/V_{\max} * [D_z - W_z + W_c - (V_{\max}^2 / a_{\max})]$

A_z

$-$

A_c

(9)

$\underbrace{\hspace{15em}}$
 Amplitude du plateau

Comme on l'a déjà noté, $TM_c = k_1$ et $1/V_{\max} = k_2$ sont des caractéristiques du système. De plus, $W_c - (V_{\max}^2 / a_{\max}) = k_3$ ne fait intervenir que des constantes du système d'effection. Ainsi, l'Equation 9 a pour seules variables indépendantes les mesures objectives de la tâche D_z et W_z , la relation étant de la forme :

$$TM = k_1 + k_2 (D_z - W_z + k_3)$$

2.3. Résultats et discussion

Les données expérimentales rapportées ci-après sont des moyennes établies sur nos sept participants, les configurations de données étant intra- et inter-individuellement robustes.

2.3.1. Effet de l'échelle sur les profils de vitesse

L'examen des profils de vitesse conforte nos prédictions, comme le montrent les Figures 12 et 13. S'il y a, aux niveaux inférieurs d'échelle, une modulation nette et systématique de la durée des phases d'accélération et de décélération du mouvement sous l'effet de l'*ID*—ce qui confirme simplement la loi de Fitts à l'intérieur de l'intervalle d'isochronie—, cette modulation s'évanouit entièrement quand croît l'échelle. A partir du troisième niveau d'échelle, la durée de ces deux phase devient rigoureusement constante. En revanche, la durée du plateau de vitesse, le troisième composant du *TM*—et le seul qui soit indéfiniment rescalable—, s'élève linéairement avec l'échelle, comme l'illustre la Figure 14.

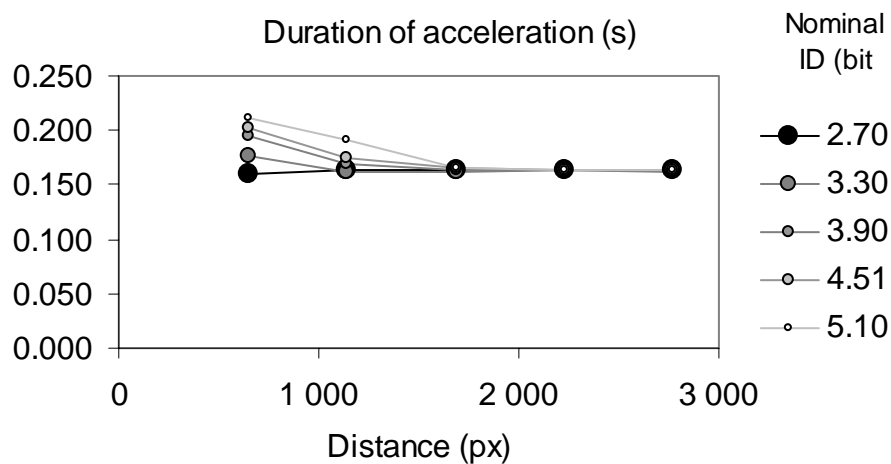


Figure 12. Durée de la phase d'accélération en fonction de la distance.

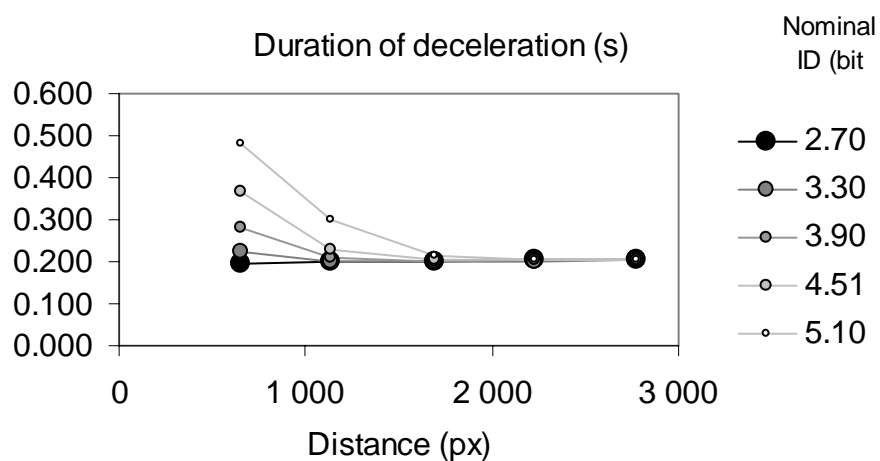


Figure 13. Durée de la phase de décélération en fonction de la distance.

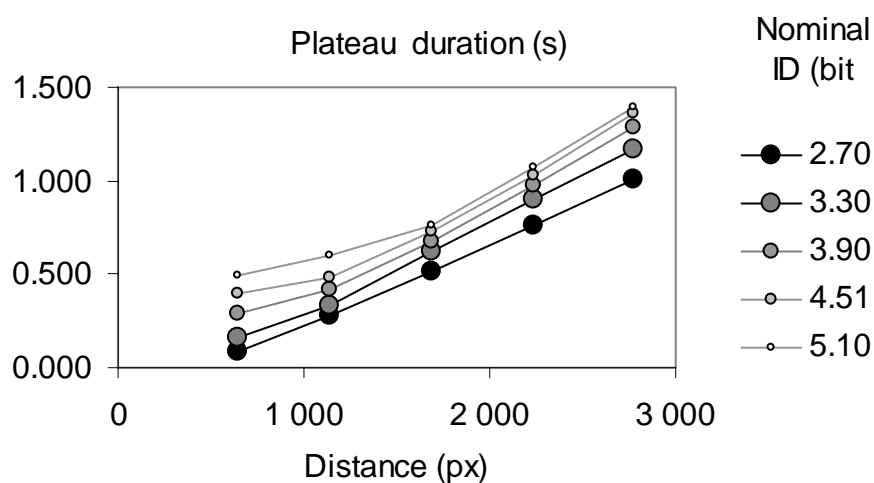


Figure 14. Durée de la phase de plateau en fonction de la distance.

2.3.2. Amplitude et difficulté de la tâche

Au cœur du paradigme de Fitts figure la volonté de faire varier, à travers la manipulation de D et de W , respectivement l'amplitude et la variabilité spatiale du mouvement. Quand l'expérimentateur manipule W à un niveau constant de D (manipulant de ce fait le rapport D/W , et donc l' ID), il entend normalement faire varier la dispersion des pointages sans affecter l'amplitude du mouvement. En fait, la figure 15 montre bien que cette attente n'a été à peu près satisfaite que dans la condition d'échelle la plus basse ($D = 650$ pixels). Plus la distance à couvrir augmente, plus se réduit le rapport A/D , en violation du paradigme de Fitts, mais conformément à notre prédiction (Equation 8).

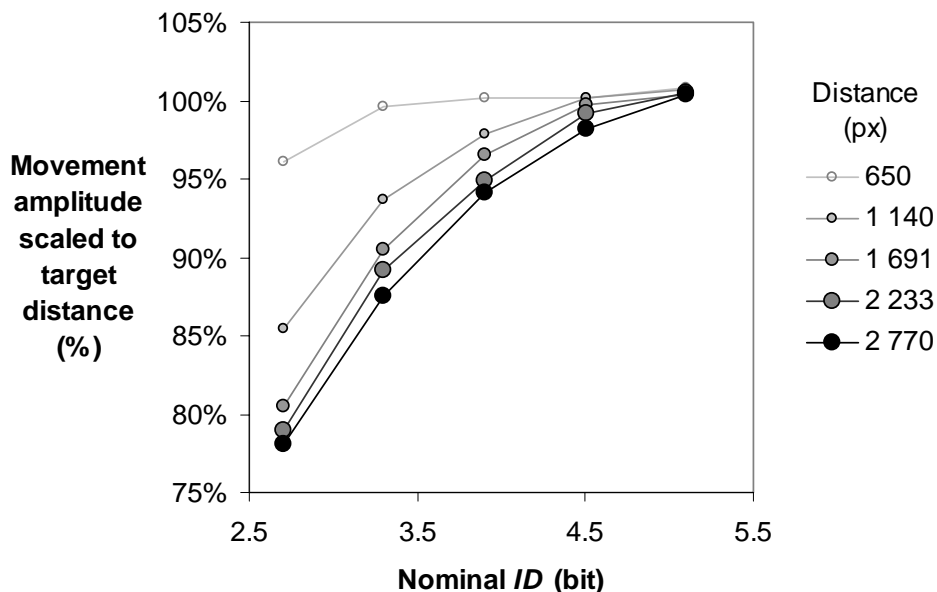


Figure 15. Variation du rapport A/D en fonction de la difficulté de la tâche.

Ceci signifie que les sujets ont optimisé l'amplitude de leurs mouvements en rebrousant chemin avant d'atteindre le centre de la cible dès lors que celle-ci était d'une largeur suffisante. En tout état de cause, il est clair que le paradigme de Fitts est mis en échec aux grandes échelles, en ce sens que la manipulation de la distance inter-cibles ne permet plus à l'expérimentateur de contrôler, via la variable D , l'amplitude réelle des mouvements.

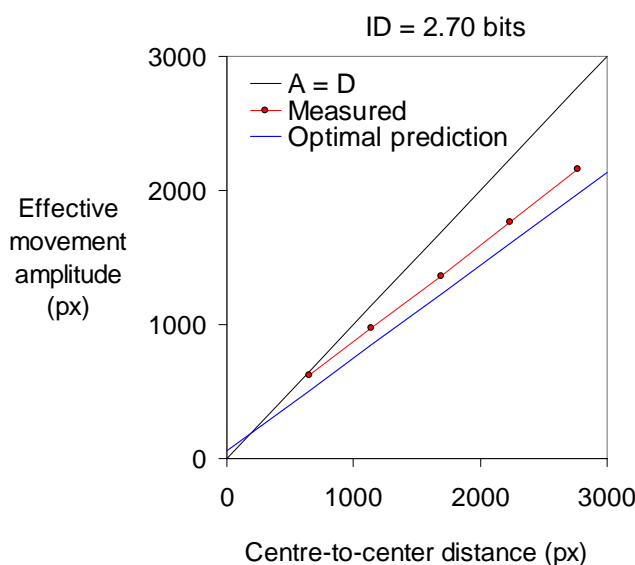


Figure 16

La Figure 16 illustre cet effet en montrant l'amplitude effective du mouvement en fonction de la distance à couvrir, pour le niveau de difficulté le plus bas utilisé dans l'expérience ($ID = 2.7$ bit). Outre les mesures expérimentales, la figure présente deux courbes théoriques, l'une correspondant au cas où le pointage se termine en moyenne sur le centre des cibles ($A = D$) et l'autre à l'hypothèse d'un *undershoot* optimal (et sans erreur) exprimée par l'Equation 8.

L'amplitude des mouvements a été optimisée par les participants : A s'écarte systématiquement de D , et ce d'autant plus que l'échelle croît. La pente de l'amplitude observée est assez précisément celle que prédit l'Equation 8. Quant à l'ordonnée à l'origine de la relation, elle est légèrement décalée : les sujets ont pointé un peu plus loin que nécessaire, compte tenu des caractéristiques dynamiques de leur pointeur.

2.3.3. Effet de l'échelle sur la pente de la loi de Fitts

La pente de la loi de Fitts, c'est-à-dire de la relation linéaire liant le TM à l' ID , mesure la sensibilité du TM aux variations de l' ID . Une approche naïve prédit une pente constante à toutes les échelles (ligne horizontale pointillée dans la Figure 17).

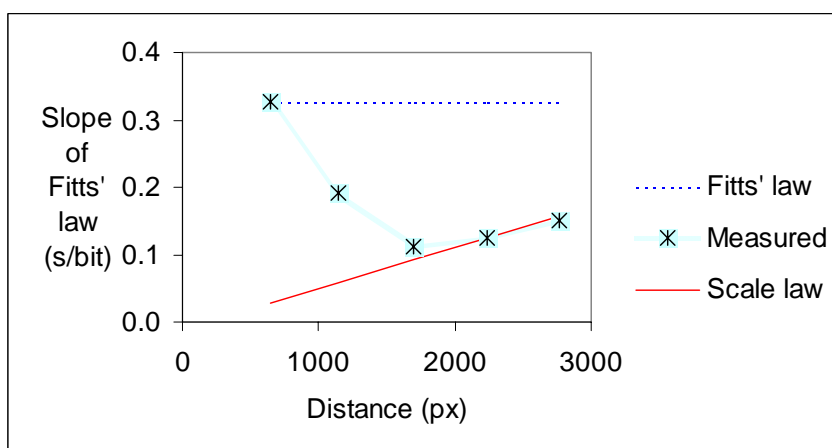


Figure 17. Pente de la loi de Fitts.

On pourrait s'imaginer, à partir de notre modélisation, que la pente de la loi de Fitts doit tendre asymptotiquement vers zéro avec une croissance indéfinie de l'échelle puisque le rapport D/W , en tant que déterminant du TM , doit peu à peu s'effacer devant l'amplitude absolue. La Figure 18 explique pourquoi il ne peut pas en aller ainsi : lorsque la tâche est rescalée au-delà du niveau critique d'échelle, le pourcentage de pénétration dans la cible (qui par construction vaut 50% quand le mouvement s'arrête au centre) se réduit de façon monotone, et ce d'autant plus que la cible est plus large et l' ID plus bas. En fait, plus l'échelle croît, plus l'amplitude couverte tend à se rapprocher du minimum $D - W$, la distance séparant les bords *internes* des deux cibles (Equation 8). Ce n'est pas simplement que la loi de Fitts devienne fautive au-delà de Z_c —plus précisément, le paradigme de Fitts n'est plus applicable. D'une part, D ne coïncide plus avec l'amplitude du mouvement, puisque seule compte, au-delà du niveau critique d'échelle, la distance au bord *interne* de la cible ; d'autre part, W ne coïncide plus avec la tolérance du mouvement, puisque la dispersion du mouvement devient une constante. L' ID , en d'autres termes, ne rend plus compte des caractéristiques pertinentes de la tâche.

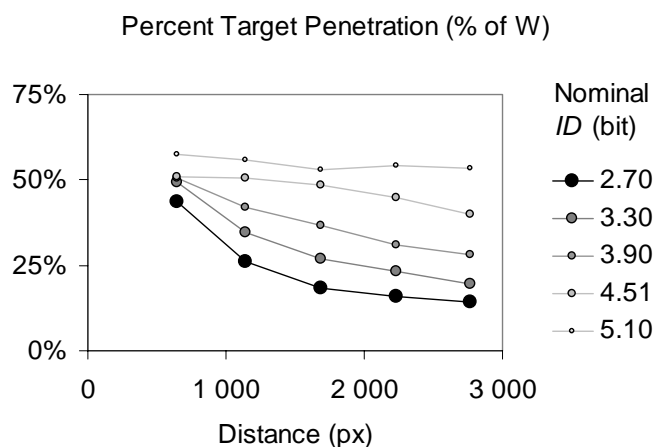


Figure 18. Pourcentage de pénétration de la cible en fonction de la distance à couvrir.

Notre modèle prédit en fait que la pente de la loi de Fitts doit *croître* linéairement avec l'échelle, non pas parce que l' ID est de plus en plus influent, mais pour la raison que l'on vient juste de donner : plus l'échelle croît, plus on vise court, mais comme un rétrécissement de la cible contrecarre cet effet, on obtient une influence de l' ID , mais une influence indirecte et entièrement factice. La Figure 17 montre que les points expérimentaux, après s'être écartés de la pente observée au niveau d'échelle le plus bas, rejoignent la prédiction du modèle. Tandis que la loi de Fitts, loi d'amplitude relative et donc loi d'invariance d'échelle, est valide pour les petites échelles, à plus grande échelle une *loi d'amplitude absolue* prend le relais.

Le fait qu'une loi de relativité d'échelle s'impose peu à peu quand le pointeur doit couvrir des distances de plus en plus grandes n'a sans doute rien de surprenant. Il nous paraît cependant important, dans la perspective d'une meilleure compréhension du paradigme du pointage, de tenter d'appréhender les deux lois *ensemble*, et de comprendre la transition de l'une à l'autre. Nous travaillons actuellement à concevoir une formulation générale de la relation liant le TM à la géométrie et à l'échelle de la tâche dans laquelle la loi de Fitts apparaîtra comme un cas particulier.

3. Le pointage multi-échelle : Extension du paradigme de Fitts aux mondes électroniques zoomables

3.1. Au-delà de la barrière des 10 bits : la loi de Fitts dans les mondes électroniques zoomables

Dans les conditions habituelles, un humain peut au maximum couvrir avec le bras une distance D d'un mètre environ tandis que la précision du mouvement pour sélectionner la cible peut difficilement descendre en dessous du millimètre. Le pouvoir différentiateur mis en jeu dans un pointage manuel ordinaire bute par conséquent sur un rapport maximal D/W de l'ordre de 1000, soit un ID de l'ordre de 10 bits (Equation 1).

Pourquoi le rapport D/W se heurte-t-il à une telle limite supérieure ? Il s'agit en fait d'une contrainte qui pèse sur tous les mouvements que nous effectuons dans le monde réel. Ce monde est d'essence *dynamique*—au sens où sont mises en jeu les trois dimensions physiques fondamentales que sont la masse, la longueur et le temps (MLT). Nos mouvements sont contraints par la matière. Les mouvements du bras, du fait des butées physiques auxquels ils se heurtent, ne disposent que de gammes d'amplitudes bornées—par exemple, environ 1 m pour les translations de la main chez un humain assis. On ne peut ainsi augmenter D indéfiniment sans atteindre une borne supérieure d'amplitude au-delà de laquelle on passe au pointage locomoteur étudié dans la section précédente. On ne peut pas non plus réduire indéfiniment W sans atteindre bientôt une limite infranchissable de résolution.

L'étude expérimentale présentée dans cette section part de l'observation que la limite des 10 bits doit disparaître dans les environnements électroniques, qui sont de nature purement *cinématique*, en ce sens qu'ils ne mettent en jeu que les dimensions physiques de la longueur et du temps (LT). Il est aisé de constater en effet que les logiciels courants (tableurs, traitement de texte ou d'image, atlas géographiques, etc.), dès lors qu'ils sont équipés du zoom, nous permettent d'atteindre des cibles très rapidement sans être préoccupés par des rapports très supérieurs à 1000. Par exemple, dans le cas d'un atlas électronique, on peut en quelques secondes atteindre et sélectionner une cible de petite dimension comme le jardin du Luxembourg à Paris en partant de quelque ville de Nouvelle Zélande. Il suffira de faire un zoom arrière de manière à obtenir une vue globale de la planète, de franchir ensuite les continents et les océans, puis d'enchaîner une succession de zooms avant et de déplacements jusqu'à obtenir un plan détaillé de Paris, jusqu'à cliquer sur le jardin du Luxembourg.

Nous avons, certes, affaire à un environnement électronique, mais il s'agit toujours bel et bien d'un pointage, dont les paramètres sont parfaitement définis : $D = 19\,000$ km et $W = 0,4$ km, donc $D/W = 47.500$ et $ID = 15.5$ —une valeur très largement supérieure à la barrière des 10 bits évoquée ci-dessus. D'où vient que cette barrière ait sauté ? Du fait que les mondes électroniques sont librement *rescalables*, et cela précisément parce que, à la différence du monde physique réel, ils relèvent de la pure cinématique.

Ainsi, dans le contexte nouveau des mondes électroniques multi-échelle (ou zoomables), on peut effectuer des mouvements de pointage incomparablement plus difficiles que dans le monde réel. Une question simple se pose : la loi de Fitts est-elle valide pour n'importe quel niveau de difficulté, c'est-à-dire sur une gamme d' ID s'étendant largement au-delà des 10 bits de la littérature ? Pour aborder cette question, nous avons réalisé une expérience de pointage sur ordinateur avec zoom au cours de laquelle nos sujets devaient cliquer sur deux cibles colorées séparées d'une distance variant entre huit fois ($ID = 4$ bits) et un milliard de fois ($ID = 30$ bits) leur diamètre.

Nous avons utilisé le protocole de pointage dit réciproque : Il s'agissait en passant alternativement de l'une à l'autre, de cliquer sur un nombre maximum de cibles en un temps donné, dans des conditions de difficulté variables. Les sujets disposaient d'une souris, manipulée avec la main droite, et de la manette des gaz d'une console de jeux, manipulée

avec la main gauche (voir la Figure 19). Les déplacements de la souris permettaient de faire défiler l'espace bi-dimensionnel des cibles sur l'écran, tandis que la manette des gaz permettait de contrôler un puissant zoom continu. Les sujets devaient faire coïncider la cible avec une mire fixe placée au centre de l'écran, et valider leur pointage avec un clic de souris.



Figure 19. Le dispositif expérimental.

Nous ne nous intéressons pas, dans cette étude, aux fonctions cognitives supérieures impliquées dans l'orientation spatiale, mais bien au parcours de l'espace appréhendé comme une fonction sensori-motrice de base. C'est pourquoi nous avons offert à nos sujets un espace entièrement texturé de cercles concentriques disposés autour de la cible à atteindre—dès que l'une des cibles était sélectionnée, la structure concentrique se déplaçait autour de l'autre cible. Une telle texture, comme l'illustre la Figure 20, évite qu'un sujet puisse jamais se perdre : à chaque instant, les arcs interceptés dans la vue spécifient à la fois la direction et le sens du trajet à suivre (la droite perpendiculaire à la tangente, dans le sens interne) et la distance qu'il reste à parcourir (le rayon, soit l'inverse de la courbure, spécifiant la distance de la cible).

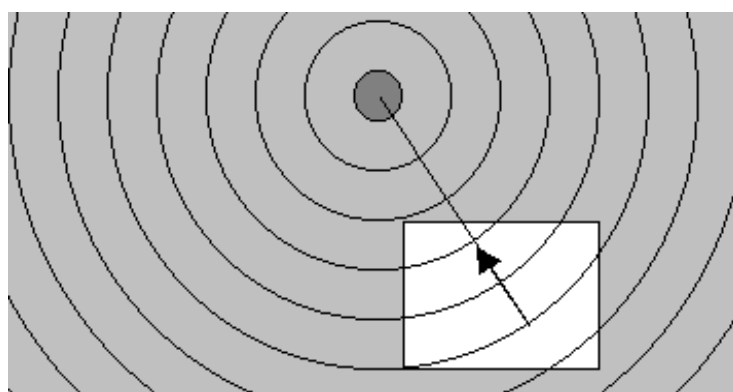


Figure 20. Une partie du plan dans lequel le sujet pouvait déplacer la vue est montrée en gris, la vue mobile apparaissant comme un rectangle clair. Le vecteur spécifiant la direction de la cible et le rayon ont été ajoutés ici pour les besoins de l'explication.

Les sujets ont tous aisément maîtrisé la tâche jusqu'au niveau de difficulté le plus élevé. Ce fait mérite considération à lui seul, si l'on songe que dans la condition la plus

difficile ($D/W = 10^9$, $ID = 30$ bits), la tâche représentait l'équivalent d'un pointage sur des cibles de 1 cm de diamètre situées à 10.000 km l'une de l'autre. Il y a là un élargissement substantiel du paradigme de Fitts : l'étude classique du pointage, qui intéresse depuis longtemps les sciences cognitives et les neurosciences, s'étend désormais à un contexte inédit, celui du pointage dans les mondes d'information multi-échelle.

Le résultat principal de l'expérience a été que le temps moyen de pointage était proportionnel à l' ID (Figure 21). Il est à noter que la relation illustrée, linéaire au sens strict (c'est à dire sans ordonnée à l'origine), est plus simple que celle que l'on a classiquement observée dans la gamme étroite d' ID accessible au pointage uni-échelle classique (2-10 bits). Nous aboutissons ainsi à une généralisation de la loi de Fitts au cas des environnements d'information multi-échelle, avec une extension considérable de la gamme explorée sur l'axe de la variable indépendante.

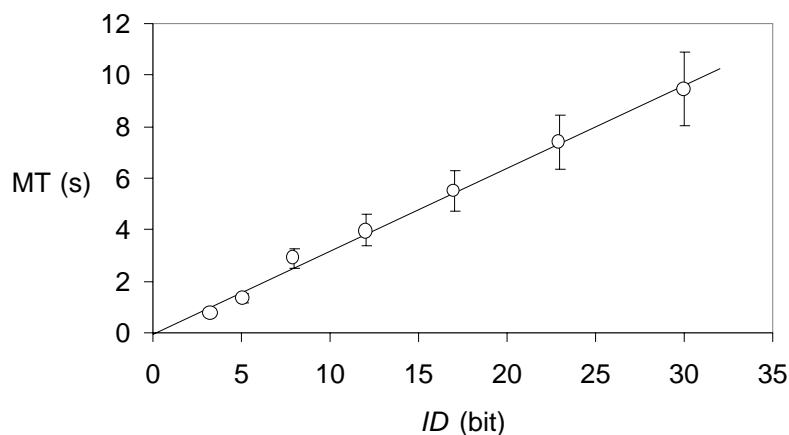


Figure 21. La loi de Fitts sur notre très large gamme d'indices de difficulté.

Les résultats de cette expérience sont pleinement compatibles avec l'hypothèse simple d'une capacité constante de traitement (ou de transmission) de l'information que Fitts (1954) avait suggérée à l'origine, en s'inspirant de la théorie de Shannon et Weaver (1949). Dans un monde multi-échelle, en effet, le pointage manuel devient analogue à la tâche consistant à spécifier une carte parmi N cartes au moyen d'une succession de choix hiérarchiques. Si le paquet compte 8, ou 16, ou 32 cartes (c'est-à-dire 2^3 , 2^4 ou 2^5 cartes), la cible sera atteinte après 3, 4 ou 5 choix dichotomiques, et dès lors le temps nécessaire pour identifier la carte doit varier comme $\log_2 N$.

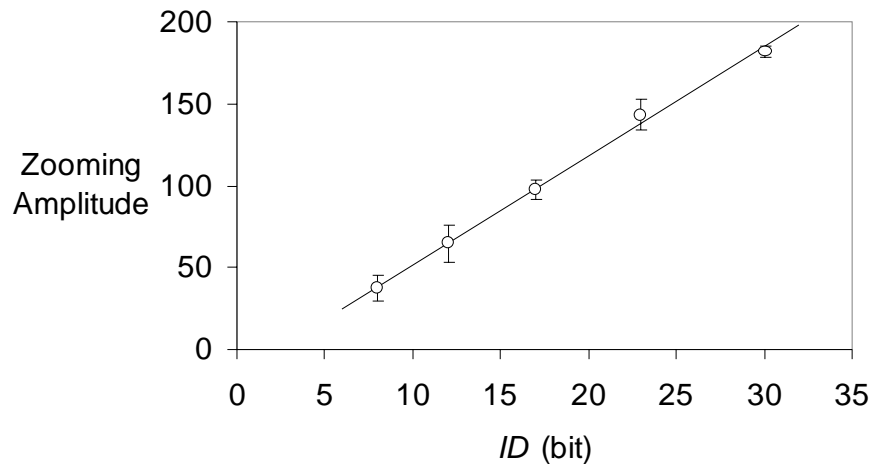


Figure 22. Amplitude du zoom en fonction de la difficulté.

Enfin, l'expérience a permis d'établir que l'amplitude couverte par les sujets sur la dimension du zoom (c'est-à-dire l'écart min-max moyen couvert sur la dimension de l'échelle à l'occasion de chaque pointage), suivait également une loi quantitative simple en fonction de l'*ID*. Comme l'illustre la Figure 22, cette amplitude varie linéairement avec l'*ID*. En d'autres termes, la courbure du chemin dans un diagramme espace-échelle est bien une fonction simple de l'information à traiter, comme Furnas et Bederson (1995) l'avaient supposé dans une analyse purement théorique du problème.

Outre l'intérêt proprement fondamental de cette recherche, nous y voyons un intéressant potentiel d'application en IHM. Il est clair que si le zoom, depuis le début des années 1990, a revêtu une importance pratique croissante, c'est bien parce que les espaces d'information dans lesquels nous naviguons n'ont cessé de devenir de plus en plus vastes. En contribuant à améliorer la compréhension de l'accès à l'information dans les mondes électroniques zoomables, le paradigme expérimental du pointage multi-échelle que nous définissons dans cette étude est susceptible d'aider les concepteurs d'interfaces à améliorer, grâce à de meilleures évaluations expérimentales, les possibilités de nos logiciels.

3.2. Le problème de la coordination pan-zoom

Le pointage multi-échelle se distingue du pointage classique, uni-échelle, notamment en ceci qu'il requiert le contrôle conjoint d'au moins deux degrés de liberté : Il faut faire varier à la fois la position du pointeur le long d'une ligne ou dans un plan (c'est la composante de pointage, conventionnellement désignée dans le contexte des espaces zoomables comme le panoramique ou *pan*) et le niveau d'échelle (le *zoom*). Ceci fait surgir la question de la coordination : comment s'organisent dans le temps, lors de la navigation multi-échelle, les variations du pan et du zoom ?

L'abondante littérature expérimentale consacrée à l'étude de la coordination, dans laquelle domine l'approche des systèmes dynamiques non-linéaires, n'apporte pas les clés dont nous avons besoin. Le paradigme standard de la coordination entre deux effecteurs (e.g., Kugler et Turvey, 1987) s'inspire typiquement du modèle physique des oscillateurs couplés mettant en jeu deux ou plusieurs effecteurs oscillants entre lesquels, en raison d'un lien de couplage, s'établit une interaction d'où émergent des patterns. Mais le lien qui unit le pan et le zoom va au-delà du simple couplage. Comme le zoom contrôle le gain de l'action, l'effet d'un mouvement de pan est à chaque instant entièrement dépendant de l'état du zoom. Selon l'état courant du zoom, une action donnée de la commande de pan (par exemple déplacer la souris de 2 cm vers la gauche) peut aussi bien occasionner, dans l'espace d'information qui seul

compte du point de vue de l'action en cours, un déplacement de quelques mètres ou un déplacement de plusieurs centaines de kilomètres.

Dans cette section nous porterons notre attention sur une seule phase du pointage multi-échelle, le zoom avant, dont l'effet est de magnifier le document dans la vue. Nos études ont montré en effet que lors de la phase initiale de zoom arrière visant à faire rentrer la région cible dans la vue, l'action ne comporte que du changement d'échelle à l'exclusion de toute action de pan. Le problème de la coordination ne s'y pose donc pas (Bourgeois et al., 2002, 2003).

Appréhendée dans la géométrie espace-échelle de Furnas et Bederson (1995), la question de la coordination pan-zoom se ramène à une question de *forme* de trajectoire. Une coordination pan-zoom strictement sérielle, sans recouvrement temporel des actions, donnera lieu à une trajectoire hachée, constituée d'une alternance de segments horizontaux et de segments verticaux, comme représenté dans la partie supérieure de la Figure 23. Cette figure illustre également l'autre cas extrême, celui de la coordination strictement parallèle où le pan et le zoom avant progressent tous deux à cadence constante (diagonale).

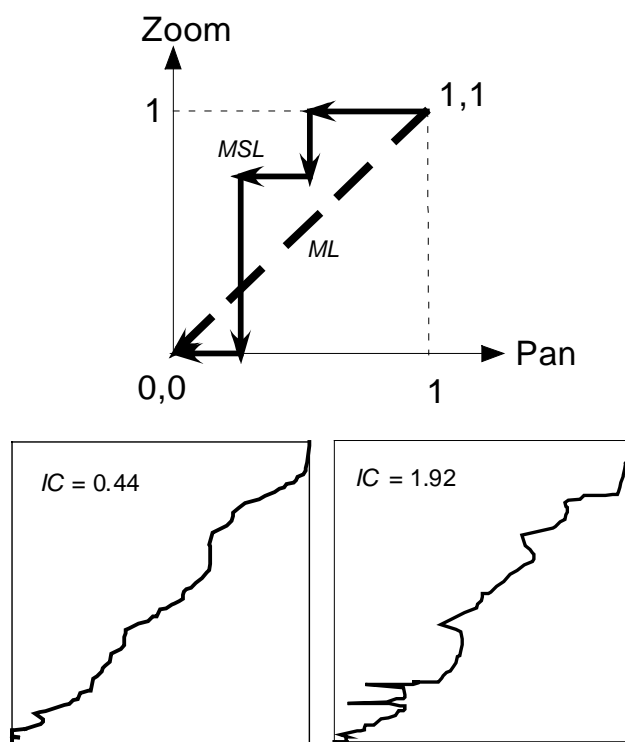


Figure 23. Visualisation de la coordination pan-zoom lors de la phase du *zoom avant*. En haut : Trajectoires théoriques correspondant à une coordination strictement sérielle (*MSL* : minimal serial path) et à une coordination strictement parallèle (*ML* : Minimal path). En bas : deux exemples de trajectoires observées chez un participant entraîné (à gauche) et chez un débutant (à droite). Noter que les axes du pan et du zoom sont normalisés : sur chaque axe, la valeur 1 correspond à la valeur initiale mesurée au début de la phase de zoom avant, et la valeur 0 à la valeur finale mesurée au moment où la cible reçoit un click de souris. *IC* : indice de coordination.

Nous avons développé une méthode permettant d'estimer cette coordination quantitativement (Bourgeois et al., 2003). Notre méthode exploite le fait que, dans l'espace de la Figure 27, la longueur de la trajectoire mesure le degré de parallélisme avec lequel le pan et le zoom avant ont évolué au cours de la progression vers la cible. Comme nous normalisons les deux axes à l'intervalle $[0 ; 1]$, la diagonale, qui correspond au parallélisme parfait, vaut $\sqrt{2}$, tandis que n'importe quelle trajectoire faite de segments perpendiculaires (*city-block*),

caractéristique d'une coordination strictement sérielle, vaut 2. Dès lors, nous pouvons définir notre indice de coordination (IC) comme suit :

$$IC = (LM - \sqrt{2}) / (2 - \sqrt{2}), \quad (10)$$

où LM dénote la longueur de la trajectoire mesurée.

Si $LM = \sqrt{2}$ (strict parallélisme), alors $IC = 0$, ce qui définit l'origine de notre échelle de mesure. Si $LM = 2$, alors, $IC = 1$, une valeur obtenue dans le cas où la coordination a été strictement sérielle—mais sans déperdition, c'est-à-dire sans que la trajectoire se soit jamais éloignée du but, de coordonnée (0,0). Un avantage de cette échelle de score est qu'elle nous permet de détecter à coup sûr toute trace de parallélisme : il est, en effet, impossible d'obtenir un $IC < 1$ sans produire des portions de trajectoires obliques.

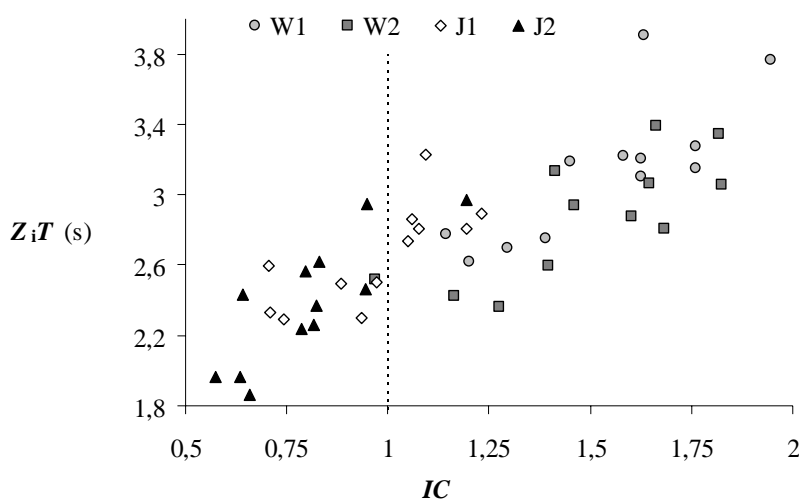


Figure 24. Relation entre le temps de zoom avant (ZiT) et l'indice de coordination. Chaque point correspond à un participant individuel utilisant un dispositif d'entrée : W1, W2 : roulette de souris utilisée en condition uni- et bi-manuelle ; J1, J2 : mini-joystick de souris utilisée en condition uni- et bi-manuelle.

La Figure 24 montre les données fournies par une étude (Bourgeois & Guiard, 2002) dans laquelle nous avons comparé divers dispositifs d'entrée dans un plan expérimental qui combinait deux facteurs : la nature du dispositif de contrôle du zoom (une roulette de souris vs. un mini-joystick IBM) et la distribution des degrés de liberté entre les mains (utilisation uni-manuelle, comme dans la pratique courante, vs. bi-manuelle, avec le zoom confié à la main non-préférée). En premier lieu, il y a eu incontestablement du parallélisme entre le pan et le zoom dans l'expérience, puisqu'une bonne partie de nos mesures de l' IC tombent en dessous de 1. En second lieu, ce parallélisme est spécifique à certaines de nos conditions, la division inter-manuelle des tâches apparaissant comme un facteur facilitant. Enfin, le parallélisme est fortement lié à la vitesse de performance (le temps de zoom avant, ZiT , est d'autant plus court que l' IC , se rapprochant de zéro, révèle davantage de parallélisme).

4. Epilogue : Importance du facteur d'échelle pour l'étude du mouvement humain et au-delà

La recherche rapportée dans ce chapitre, qui s'intéresse au thème du mouvement orienté vers un but, étudié dans la perspective inaugurée il y a exactement un demi-siècle par Fitts (1954), accorde une importance inusitée à la notion d'échelle. Ce traitement systématique de la variable d'échelle nous a conduits à proposer une révision de l'espace conceptuel du paradigme du pointage, à relativiser le principe d'isochronie et à étendre le paradigme aux mondes d'information multi-échelle.

Révision de l'espace conceptuel du paradigme du pointage. Au niveau le plus fondamental, ce travail repose d'abord sur un examen critique du nombre et de l'identité des variables indépendantes qui constituent le paradigme du pointage (Guiard, 2001). Depuis Fitts (1954), l'usage a été de raisonner en termes de distance, de tolérance, et de difficulté. Constatant qu'il est impossible de démêler logiquement ces trois variables, nous avons montré qu'il est possible de capturer l'essence de notre problème avec un nouvel ensemble de deux variables indépendantes, celles-là rigoureusement orthogonales l'une par rapport à l'autre : la *difficulté*, définie comme une amplitude relative et donc comme une forme, et exprimable comme un rapport sans dimension (ou comme le logarithme de ce rapport), et l'*échelle*, définie comme une amplitude absolue possédant la dimension d'une longueur.

Cette révision théorique clarifie le paradigme classique du pointage. Elle permet en particulier de dissiper un faux problème empirique qui a longtemps encombré les esprits, celui de l'effet de la tolérance définie comme une longueur: le problème était mal posé puisque si l'on fixe l'amplitude, l'effet de la tolérance s'identifie inévitablement à celui de la difficulté de la tâche. On comprend rétrospectivement pourquoi les résultats publiés sur ce sujet apparaissent embrouillés. Ensuite, et surtout, la nouvelle approche permet de se prémunir contre certaines confusions factorielles dont l'effet a été d'introduire du bruit statistique dans les données de la littérature classique (Guiard, 2001).

En même temps, nous voyons s'ouvrir devant nous de nouvelles directions de recherche concernant le rôle de l'échelle dans la détermination des lois du mouvement humain. Les questions qui se posent, inaccessibles tant que l'on ne se donne pas un concept d'échelle explicite, sont assez évidentes dans la nouvelle approche, et assurément traitables. Nous sommes invités non seulement à élargir la définition de notre objet, le mouvement, en incorporant le pointage de type locomoteur, mais encore à nous affranchir des contraintes de notre environnement physique traditionnel pour considérer le cas des mondes électroniques auxquels nous confronte la technologie informatique depuis une vingtaine d'années et qui sont des mondes de pure information.

Relativisation de l'isochronie. La loi de Fitts, qui implique la conservation d'une durée, le temps de mouvement, à travers des changements d'échelle, est une isochronie. Mais cette invariance remarquable d'une mesure de temps face à des transformations homothétiques de la tâche, la littérature ne l'avait éprouvée que sur de très courtes gammes d'échelle. Notre étude prend cette variable plus au sérieux en considérant des gammes de variation d'amplitude beaucoup plus étendues qu'on ne l'a fait jusqu'ici. Elle montre théoriquement et expérimentalement que la loi de Fitts ne peut tenir, et ne tient effectivement, que dans un intervalle d'échelle limité, l'*intervalle d'isochronie* : en dessous d'un certain minimum d'échelle (de l'ordre du mm), aucune performance n'est possible ; au-dessus d'un certain seuil (de l'ordre du m), le mouvement adopte la forme d'un pointage locomoteur et la loi de Fitts

perd sa validité pour céder la place à une loi d'échelle simple, loi de proportionnalité entre le temps et la distance à couvrir.

La mise en évidence de cette brisure de symétrie a pour conséquence de relativiser la loi de Fitts en la situant dans une palette de cas plus large. Dans la prochaine étape de ce travail, notre tâche sera de formuler de manière plus générale la dépendance du temps de mouvement par rapport à la difficulté et à l'échelle du mouvement, en prenant en compte l'ensemble des cas de figure auxquels nous conduit l'emploi d'une variable d'échelle désormais débridée.

Extension du paradigme aux mondes d'information multi-échelle. Dans l'étude rappelée dans le paragraphe précédent, l'échelle avait le statut d'une variable indépendante manipulée par l'expérimentateur. Dans l'interaction entre un ordinateur et son utilisateur, en revanche, l'échelle a plutôt le statut d'une variable dépendante—c'est l'utilisateur du zoom qui fait lui-même varier l'échelle comme il l'entend.

Une autre différence doit être notée : quand l'expérimentateur manipule l'échelle de la tâche, il ne touche pas aux capacités d'action du participant—d'où la possibilité que la tâche devienne trop petite ou trop grande. Ce type de difficultés ne peut se produire dans les mondes d'information multi-échelle puisque le zoom modifie simultanément, et dans les mêmes proportions, les dimensions de la tâche et les moyens d'action de l'utilisateur : par exemple, si à petite échelle les distances visualisées sont grandes, la vitesse de défilement autorisée l'est aussi—les flux optiques produits à l'écran par l'action sont invariants.

L'une des raisons qui justifient que l'on s'intéresse au pointage multi-échelle est le fait que l'interface zoomable supprime la borne supérieure de difficulté qui limite le pointage humain. Avec un zoom, en effet, le numérateur du rapport D/W peut être choisi aussi grand que l'on veut, et le dénominateur W aussi petit que l'on veut, la tâche peut toujours être menée à bien par le participant. Alors que le rapport maximal distance/tolérance praticable est, pour le pointage traditionnel (uni-échelle), de l'ordre de 10^3 , le recours à une interface zoomable nous a permis de tester la loi de Fitts, avec succès, sur une gamme de difficulté allant jusqu'à un rapport D/W de 10^9 ($ID = 30$ bits).

* * *

La psychologie scientifique, comparativement aux sciences physiques et même à d'autres champs de la biologie, semble s'intéresser fort peu aux considérations d'échelle. En physique, où l'on raisonne volontiers en termes d'ordres de grandeur, on a coutume d'ordonner les divers domaines de spécialisation sur un axe micro-macro allant de l'échelle de Planck, de l'ordre de 10^{-33} cm, à l'échelle cosmologique, de l'ordre de 10^{28} cm (Nottale, 1998). En biologie, l'idée darwinienne d'une évolution graduelle sans architecte n'a pu émerger que lorsqu'on a commencé à apprécier à sa juste mesure l'ordre de grandeur impressionnant des temps géologiques—plusieurs milliers de millions d'années. Un autre possible point de comparaison est la biologie moléculaire, qui a pour mission de jeter des ponts entre le microscopique du génome et le macroscopique des caractères phénotypiques. En psychologie, assez bizarrement, on se dispense généralement d'évoquer le concept d'échelle, comme s'il n'y avait rien de très grand ou de très petit à comprendre.

Il ne s'agit pas de dire que la psychologie ignore les invariances d'échelle. On en trouve d'excellents exemples en psychophysique, avec la loi de Weber-Fechner, et dans l'étude du mouvement avec la loi d'isochronie (Viviani et Flash, 1995) et la loi de Fitts discutée dans ce chapitre. Mais les gammes d'échelle sur lesquelles on établit ces invariances sont généralement très courtes. S'agissant du pointage, on a vu que l'amplitude des mouvements étudiés reste typiquement de l'ordre de 10 à 50 cm, toujours proche de

l'amplitude que peut confortablement couvrir la main d'un sujet de laboratoire assis. Pourtant, rien ne nous interdit d'expérimenter la tâche de Fitts (1954), dans sa version originale (pointage manuel avec stylet), à l'échelle de la dizaine ou de la centaine de m. Bien sûr, la réponse du participant va changer radicalement—au delà du mètre, le participant va devoir commencer à courir avec son stylet à la main—mais toutes les variables qui définissent le paradigme, D , W et le TM , continuent d'être parfaitement définies tandis que la consigne—minimiser le TM —reste rigoureusement inchangée.

Si la tradition a confiné le protocole du pointage dans l'espace local immédiat, c'est sans doute, en partie, parce qu'il n'est pas bien difficile de deviner que la loi de Fitts, dans les conditions d'expérimentation habituelles, ne peut rester valide aux échelles supérieures. Il existe en effet une sorte de transition de phase entre les mouvements de la main vers un objet à toucher ou à saisir et les déplacements de l'ensemble du corps vers un lieu, que l'on classe dans la catégorie de la locomotion. Alors que, si l'on s'en tient à une description objective de notre manipulation expérimentale, on se borne à faire varier l'échelle du dispositif, on constate que, à un certain niveau critique, tout change du côté du comportement moteur : la nature des degrés de liberté squelettiques mis en jeu, la nature du mobile et de ses référentiels—on passe d'un mouvement du bras dans l'espace du corps à un mouvement du corps dans l'espace des lieux (Paillard, 1991).

L'approche espace-échelle que nous avons adoptée dans cette étude nous a permis de décrire cette transition, ainsi que l'invalidation de la loi de Fitts qui en résulte (Section 2), mais nous avons également vu que cette approche nous permet d'expliquer sans difficulté la disparition complète du phénomène de transition dans le cas du pointage multi-échelle (Section 3). L'existence d'une brisure de symétrie dans le monde réel (masse, longueur et temps) et le maintien, au contraire, de la symétrie dans les mondes électroniques (longueur et temps, sans masse) se comprennent bien à la lumière des lois d'échelle de Galilée : c'est en raison de leur masse que les objets du monde réel sont si réfractaires au rescalement.

Galilée a été le premier à saisir, en mécanicien, toute l'importance de la grandeur absolue des choses : la variabilité des taille, qu'il s'agisse des machines ou des êtres vivants, se heurte à des minima et à des maxima indépassables parce que les surfaces et les volumes suivent des lois de croissance divergentes. Une poutre de forme donnée que l'on tenterait de reproduire toujours plus grande s'effondrerait sous son propre poids une fois atteint un certain niveau critique d'échelle parce que la solidité de l'objet (proportionnelle à sa section, de dimension L^2) croîtrait moins vite que son poids (proportionnel à son volume, de dimension L^3)—un mécanisme qui par la même occasion interdit la possibilité d'un Micromégas. Il n'y a pas non plus place dans notre monde pour un lilliputien : la cellule étant de dimension quasiment constante à travers la diversité des formes vivantes, une miniaturisation de l'organisme exigerait la réduction du nombre de ses cellules, compromettant bientôt la possibilité de toute complexité organique (Thomson, 1917-1942). Dans les mondes d'information, au contraire, la grandeur des choses peut être déterminée arbitrairement.

Pour la psychologie scientifique, il semble ainsi que l'avènement, la propagation et la diversification remarquables, toujours en cours, des mondes d'information multi-échelle auxquelles nous assistons depuis une vingtaine d'années pose un défi. Si l'objet de la psychologie est l'interaction de l'individu humain avec son environnement par la voie de la perception, de la cognition et de l'action, alors il convient d'appréhender comme un événement non négligeable pour cette discipline le fait que les humains passent une part de plus en plus considérable de leur temps à interagir, au moyen de l'ordinateur, avec les contenus d'environnements d'un type radicalement nouveau.

Références

- Bourgeois, F. & Guiard, Y. (2001). Pan-Zoom Coordination in Multi-Scale Pointing. *CHI'2001, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 157-158). New York: ACM Press.
- Bourgeois, F., Guiard, Y., & Beaudouin-Lafon, M. (2002). Multi-scale pointing : Facilitating pan-zoom coordination. *CHI'2002, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 758-759). New York : ACM Press.
- Bourgeois, F. & Guiard, Y. (2003). Performance evaluation of one- and two-handed input devices in multi-scale pointing. *International Journal of Cognitive Studies (CPC)*.
- Danion, F., Duarte, M., & Grosjean, M. (1999). Fitts' law in human standing: The effect of scale. *Neuroscience Letters*, 277, 131-133.
- Pierre Duhem, P. (1990). *Sozein ta phainomena. Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*. Paris : Vrin.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Furnas, G. W. & Bederson, B. B. (1995). Space-scale diagrams: Understanding multiscale interfaces. *Proceedings of CHI'95, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 234-241). New York : ACM Press.
- Gan, K. C. & Hoffmann, E. R. (1988). Geometrical conditions for ballistic and visually controlled movements. *Ergonomics*, 31, 829-839.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Guiard, Y., Beaudouin-Lafon, M., & Mottet, D. (1999). Navigation as multiscale pointing: Extending Fitts' model to very high precision tasks. *Proceedings of CHI'99, ACM conference on human factors in computing systems* (pp. 450-457). Pittsburgh, Pennsylvania, USA, May 15-20. ACM Press.
- Guiard, Y., Bourgeois, F., Mottet, D., & Beaudouin-Lafon, M. (2001). Beyond the 10-bit barrier : Fitts' law in multi-scale electronic worlds. *Proceedings of IHM-HCI 2001*. In A. Blandford, J. Vanderdonckt, & P. Gray (Eds.), *People and Computers XV - Interactions without frontiers*, (pp. 573-587). London : Springer.
- Guiard, Y. (2001). Disentangling relative from absolute movement amplitude in Fitts' law experiments. *CHI'2001, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 315-316). New York : ACM Press.
- Jeannerod, M. (1981). Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and Performance IX*. Hillsdale, Erlbaum, 153-168.
- Kugler, P. N. & Turvey, M. T. (1987). *Information, Natural Law, and the Self-Assembly of Rhythmic Movement*. Lawrence Erlbaum, 1987.
- MacKenzie, I. S. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7, 91-139.
- Mottet, D., Guiard, Y., Bootsma, R. J., & Ferrand, T. (2001). Two-handed performance of a rhythmical Fitts task by individuals and dyads. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 26, 1275-1286.

- Nottale, L. (1998). *La relativité dans tous ses états*. Paris : Hachette Littératures.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing of space. In: J. Paillard (Ed.), *Brain and Space* (pp. 163-182). Oxford: Oxford University Press.
- Shannon, C.E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Urbana, IL: University of Illinois Press.
- Thomson, D'Arcy W. (1842, first ed. 1917). *On growth and form*. London: Dover.
- Viviani, P. & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-third power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 2-53.
- Woodworth, R. S. (1899). Accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, 3 (Whole N° 13), 1-114.