

Chapitre 3

Anticipation et navigation

III. Étude de l'anticipation dans une tâche où le sujet se déplace vers un objectif : la navigation

« Les problèmes que doit résoudre le cerveau sont, pour l'essentiel, des problèmes mécaniques. [...] Il faut retrouver les règles qui sous-tendent [le] mouvement. La cinématique du mouvement est porteuse de sens et [...] la trajectoire d'un doigt, le déplacement de la tête, le balancement du corps doivent répondre à des lois qui sont au carrefour de la mécanique et de la neurologie »
A. Berthoz, Le sens du mouvement.

III.1. Une approche plus « naturelle » de la locomotion

La **locomotion** fait partie des moyens dont nous disposons pour nous déplacer dans notre environnement. Tout comme le maintien de la posture debout, elle mobilise simultanément plusieurs types de capteurs : visuels, proprioceptifs, vestibulaires, pendant nos déplacements. L'ensemble de ces modalités sensorielles semble être traité en parallèle et transformé en une information uni-modale permettant de simplifier la planification des synergies¹³ composant le mouvement locomoteur (Bernstein, 1967). Cette information uni-modale peut, en l'absence de vision, être remplacée par une représentation du mouvement à réaliser comme nous l'avons spécifié dans le paragraphe consacré à l'utilisation des informations visuelles au cours de la locomotion.

¹³ Une synergie (*syn* : ensemble ; *ergo* : travail) est un mouvement qui implique le travail conjoint de groupes musculaires ou de membres. Les synergies motrices sont à la base de nos mouvements.

Nos déplacements se font rarement au hasard ; nous partons d'un point A pour atteindre un point B en suivant un trajet généralement planifié : c'est ce que l'on appelle la **navigation**. Cette dernière sous-entend que l'on a choisi au préalable un objectif locomoteur avant de s'engager dans l'action. Par contre, on peut ou pas avoir connaissance de l'environnement dans lequel nous sommes amenés à évoluer. Dans ce contexte, notre **regard** constitue un outil privilégié pour explorer cet environnement. Il correspond à la somme des mouvements des yeux dans la tête et des mouvements de la tête dans l'espace. L'exploration peut se faire aussi bien sur place que pendant le déplacement. Elle mobilise alors les ressources permettant de gérer l'orientation de nos différents segments corporels (notamment le segment céphalique). En effet, ce dernier contient tous les capteurs essentiels à la bonne gestion de nos déplacements et de notre orientation. Durant la navigation, il devient nécessaire de gérer au mieux l'interaction entre notre corps (l'outil de transport) et notre environnement afin de pouvoir atteindre l'objectif locomoteur dans les meilleures conditions. Une prise d'informations à l'avance peut s'avérer d'une importance non négligeable dans un environnement plus ou moins changeant et imprévisible (comme, par exemple, lors de nos déplacements en tant que piéton dans une ville). Dans ces conditions, une dissociation des mouvements de la tête par rapport au reste du corps constitue un moyen de mobiliser toutes les ressources dont nous disposons pour récupérer les informations dont nous avons besoin tant pour nous orienter que pour gérer notre trajet vers la cible.

En 1873, dans une publication parue dans *Nature*, Darwin avait déjà pressenti l'importance de ces notions. Il déclare en parlant de la navigation que : « *la vision y participe principalement, il n'y a aucun doute, mais aussi partiellement le sens musculaire du mouvement, de la même façon qu'un homme les yeux bandés peut avancer (certains hommes le font mieux que d'autres) sur une courte distance suivant une ligne droite ou un virage à angle droit, ou revenir à sa position de départ. La façon dont ce sens de la direction est quelquefois soudainement perturbé chez les personnes très âgées et faibles (...) et le sentiment de détresse (...) ressenti par des personnes qui se sont subitement aperçues qu'elles avaient pris une direction complètement imprévue et incorrecte, amènent à soupçonner l'existence de parties du cerveau spécialisées dans la fonction d'orientation* » (p. 418).

Le type de tâche locomotrice proposé par Darwin (ligne droite, avec un virage à angle droit, ou avec un retour à la position de départ) constitue un paradigme tout désigné pour explorer les phénomènes d'orientation dans notre environnement et les paramètres qui sont à gérer conjointement à la fonction d'orientation, notamment la stratégie utilisée pour prévoir les

éventuelles modifications de cet environnement. En effet, il est nécessaire qu'un protocole sollicite les organes proprioceptifs de différentes façons afin de pouvoir explorer plus avant les mécanismes qui sous-tendent les processus mis en jeu durant la navigation.

Nous présentons ci-après les matériels et les méthodes communes à toutes nos expériences de navigation. Nous détaillerons ensuite pour chaque expérience les points suivants : les sujets ayant participé à nos expériences, puis le protocole utilisé, et enfin les résultats suivis d'une discussion. Nous pouvons néanmoins déjà donner quelques indications sur les protocoles afin de mieux comprendre l'intérêt de la méthodologie que nous avons utilisé.

Tout d'abord nous avons demandé aux sujets de se déplacer d'un point à un autre en suivant une trajectoire curvilinéaire (90°) afin d'observer le comportement du segment céphalique dans cette tâche relativement simple. Puis, nous avons agit sur certains paramètres comme les conditions de vision, la vitesse de locomotion et le sens locomoteur (marche en avant ou en arrière) afin de voir quel était le degré de stabilité des stratégies mises en évidence. Enfin, nous nous sommes intéressés à l'émergence de ces mécanismes en soumettant des enfants à certains de ces protocoles.

III.2. Matériels et Méthodes

III.2.1.1. Enregistrement des données cinématiques

Nous avons travaillé avec un système de reconstruction du mouvement en trois dimensions utilisant des marqueurs passifs et fonctionnant à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz (système EL.I.TE. ®, Ferrigno & Pedotti, 1985). Placé dans un gymnase (20 m x 11 m), ce système était composé de quatre caméras, distantes de 10,5 m, disposées en carré, et positionnées à 2,5 mètres du sol. Le volume d'analyse résultant était de 4 x 4 x 2 m (respectivement longueur, largeur, hauteur). Les marqueurs étaient des sphères d'un diamètre de 38 mm, recouvertes de papier adhésif réfléchissant la lumière infrarouge des caméras. Nous avons effectué des mesures de précision de ce système concernant la détermination de la position d'un segment grâce aux marqueurs et de la mesure des angles à partir de ces mêmes données. Cette précision est de 1.68 mm en ce qui concerne l'estimation de la position du marqueur dans l'espace et de $0,27^\circ$ pour l'estimation de l'angle entre un segment corporel (à partir de la position de ses deux marqueurs) et l'un des axes de références donnés par le système de reconstruction en 3D.

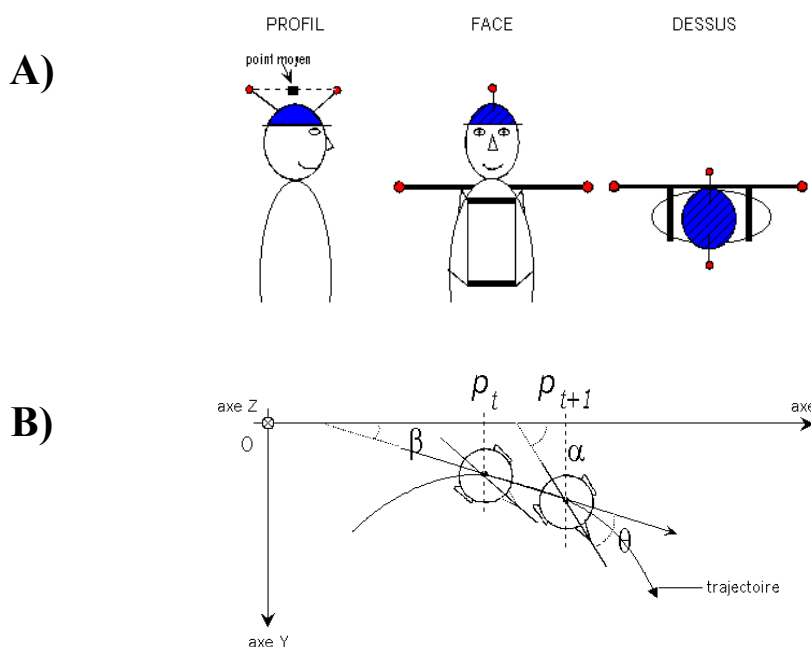


Figure III-1. A) Positionnement des marqueurs et B) méthodologie utilisée pour analyser les mouvements du segment céphalique.

Pour matérialiser le segment céphalique chez l'adulte, nous avons équipé les sujets d'un casque (250 g) sur lequel étaient fixées deux tiges rigides au bout desquelles se trouvaient des marqueurs. Ces deux marqueurs ont été placés de telle sorte que le point moyen du segment soit situé sur l'axe vertical de rotation de la tête¹⁴. Pour le tronc, nous avons utilisé un appareillage très léger, constitué d'un harnais semi-rigide sur lequel était fixé une tige plastique. À ses extrémités, se trouvaient les marqueurs matérialisant un axe orienté perpendiculairement à l'axe antéro-postérieur du tronc (**Figure III-1A**).

III.2.1.2. Paramètres mesurés

La **direction instantanée de la tête** (α) a été calculée dans le plan horizontal à partir d'équations de trigonométrie classiques. La position de la tête était calculée à partir du point moyen entre les deux marqueurs. Dans ces conditions, la trajectoire suivie par le segment céphalique dans le plan horizontal pendant la locomotion était représentée par les positions successives de ce point moyen. A partir de deux points successifs de la trajectoire, nous avons pu calculer la **direction instantanée de cette trajectoire** (β). De là, nous avons mesuré la différence angulaire entre les directions α et β , et l'avons appelé **thêta** (θ) (**Figure III-1B**). Nous avons procédé de la même façon pour les segments du tronc, de la hanche et du pied lorsque ces marqueurs étaient utilisés. Pour le tronc et les hanches, une rotation de 90° a été opérée pour que les directions puissent être comparées. Nous avons complété nos calculs par la mesure des vitesses moyennes de locomotion au cours de tous les essais.

Les séries temporelles correspondantes ont été filtrées à l'aide d'un filtre digital passe-bas (Butterworth) de second ordre (fréquence de coupure = 5 Hz) qui a été appliqué deux fois afin de supprimer le décalage temporel (Wood, 1982). Les constructions des courbes cinématiques utilisées pour l'analyse qualitative ont été faites avec une résolution temporelle de 0.01 s.

III.2.1.3. Analyse des données cinématiques

Pour répondre à la problématique exposée plus haut, de savoir si certains mouvements sont contrôlés par anticipation durant une tâche de navigation, il nous a fallu dater le moment où le sujet réalisait son virage, c'est-à-dire trouver un indice temporel à partir des données cinématiques issues de la production motrice du sujet. Un problème méthodologique s'est alors

¹⁴ Ceci permet de le rendre indépendant de la rotation de la tête.

posé concernant l'estimation de la position du point du virage, notamment lors de la locomotion en vision occultée, car plusieurs sujets montraient une trajectoire composée de plusieurs segments. Il était possible de faire cette estimation soit à partir des *données cinématiques* (vitesse et accélération), soit à partir des *propriétés géométriques* (rayon de courbure) de la trajectoire générée par le sujet. Nous avons passé en revue toutes les courbes en utilisant ces différents critères et notre choix s'est tourné vers la **courbure**, mais d'autres auteurs (Glasauer *et al.*, 1995) ont néanmoins préféré utiliser les paramètres cinématiques. Le point du virage était sélectionné de façon précise là où la courbure atteignait un **maximum local**. Cependant, tous les tracés ont été inspectés visuellement pour vérifier si ce critère fournissait un résultat cohérent. En effet, lorsque la vitesse de marche est rapide, la trajectoire devient beaucoup moins angulaire, et parfois ni la courbure, ni la cinématique de locomotion ne permettaient une sélection automatique des critères (**Figure III-2**).

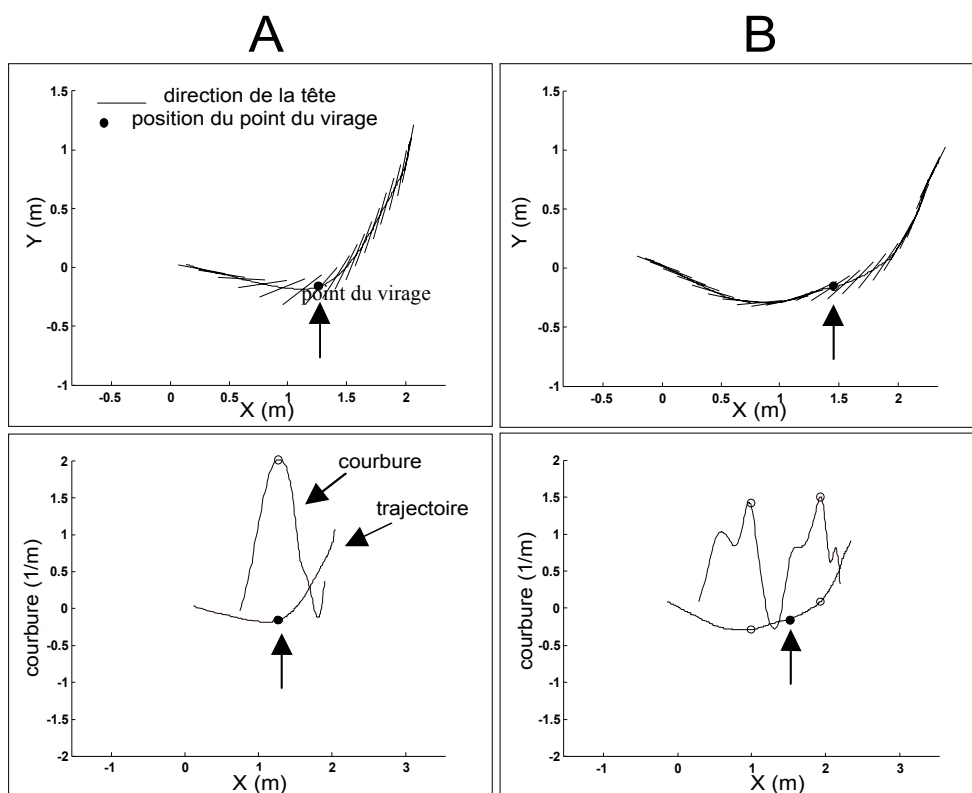


Figure III-2. Identification du point du virage selon le type de trajectoire produit par les sujets

Dans ce cas, l'inspection visuelle a permis d'identifier ce point. Le critère final consistait alors :

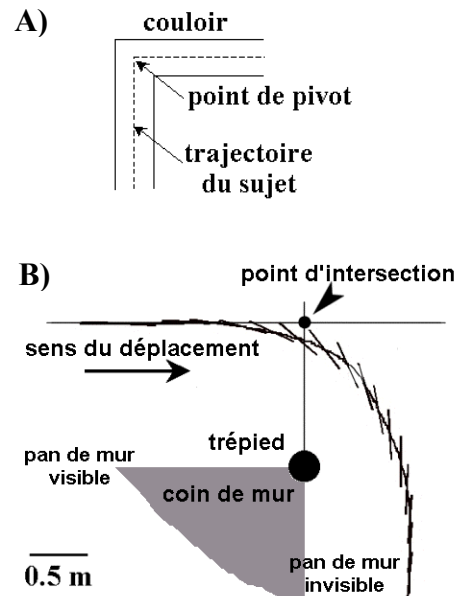
- 1) soit à confirmer la sélection automatique lorsque le point de la trajectoire, montrant la courbure géométrique maximale, était bien le seul point significatif apparaissant à l'inspection visuelle (**Figure III-2A**) ;
- 2) soit, dans le cas contraire, à sélectionner directement le point moyen situé entre deux maxima consécutifs de courbure (**Figure III-2B**). Dans ces conditions, pour des raisons essentiellement liées à la stabilité de la locomotion (donc à l'équilibre), le sujet entamait son virage et faisait un pas supplémentaire afin que la trajectoire du centre de masse passe dans le secteur délimité par les bords médians de chaque pied (Patla *et al.*, 1991). Ceci ne veut évidemment pas dire que le sujet faisait son virage en un seul pas. Au contraire, le changement de cap était planifié et réparti sur un nombre de pas plus ou moins grand.

Le point du virage ainsi mesuré nous a permis de centrer et réduire chaque courbe individuelle par rapport à ce point (± 2 s) afin d'obtenir les moyennes générales. Nous avons pu mesurer ensuite, pour chacun des sujets, deux paramètres : l'**amplitude maximale** du pic de l'angle θ et l'**occurrence de ce pic** par rapport au point du virage.

Dans l'une de nos analyses, nous avons été amenés à comparer certains de nos résultats à ceux d'une étude (Grasso *et al.*, 2000) menée en réalité virtuelle dont l'objectif était d'étudier l'influence de la vitesse de locomotion sur l'anticipation de la tête. Le sujet portait un casque permettant l'immersion dans un monde virtuel piloté par ordinateur et comprenant une série de portions de couloirs perpendiculaires entre elles. En faisant défiler celles-ci à des vitesses différentes, les auteurs ont simulé des vitesses de déplacement allant de 1.4 à 9.7 m/s. Il s'agit évidemment d'un transport passif puisque la personne était obligée de rester sur place afin de rester à portée du capteur ultrason situé au-dessus de sa tête ; le sujet ne faisait que pivoter sur lui-même pour changer de direction. Puisque le sujet suivait obligatoirement une trajectoire au milieu du couloir, le point de pivot correspondait au moment où l'angle entre la direction que le sujet avait avant le virage et celle qu'il avait après le virage (**Figure III-3A**). Nous avons repris et adapté cette méthode à l'analyse des trajectoires « réelles » produites par les sujets durant leur navigation afin d'obtenir un point de virage prenant en compte la configuration spatiale de l'environnement dans lequel évolue le sujet, et de diminuer au maximum l'influence des différences inter-individuelles au niveau de la production des trajectoires locomotrices. Son

application reposait sur l'observation que la trajectoire initiale des sujets était rectiligne (comme s'ils suivaient un mur virtuel).

Figure III-3. Autre méthodologie utilisée en réalité virtuelle (Grasso *et al.*, 2000) pour mesurer les anticipations de la tête au cours d'un trajet locomoteur. **A)** Dans l'environnement virtuel créé par les auteurs, le sujet se déplaçait dans une succession de portions de couloir disposées à 90° les unes des autres. Le déplacement (imposé au sujet) se faisant au milieu du couloir, ils ont choisi le point de pivot (angle formé par les deux portions de trajectoire situées avant et après le virage) pour effectuer les calculs d'anticipation. **B)** Pour trouver un point indépendant de la cinématique de la locomotion du sujet dans le monde réel, il suffit de supposer que le trépied correspond au coin d'un angle de mur virtuel. Le point de virage est alors donné par l'intersection entre deux droites : la première est celle correspondant à la portion initiale rectiligne du trajet locomoteur, la seconde est obtenue en prolongeant le pan de mur invisible, perpendiculairement à cette première direction. Le point ainsi obtenu prend en considération la configuration dans laquelle évolue le sujet et qui influence plus ou moins son comportement (Si le sujet tourne trop tôt, il se cogne dans le mur). Ce choix par ailleurs beaucoup moins influencé par les possibles changements successifs de direction durant le virage comme le montre la **Figure III-2B**.



Par ailleurs, étant donné que les mouvements de la tête sont moins importants lorsqu'ils sont mesurés dans l'espace (moins de 2°) comparés à leur mesure par rapport à la trajectoire locomotrice (4-8°) à cause des pas qui font osciller le tronc, nous avons utilisé la première mesure pour identifier le début du changement de direction de la tête au cours du trajet locomoteur. Nous avons choisi le même seuil que pour l'expérience menée en virtuel (9°).

III.2.1.4. Mouvements oculaires

Les mouvements oculaires ont été enregistrés par électro-oculographie (EOG). Nous avons réalisé un calibrage horizontal avant et après chaque expérience. La position neutre a été contrôlée et ajustée si nécessaire avant chaque essai. Ce dispositif donne une précision dans la mesure dynamique du regard légèrement inférieure à 2° (RMS) dans le plan horizontal.

III.3. Expérience 1 : Mise en évidence d'une stratégie d'orientation dans une tâche de navigation

III.3.1. Présentation de l'expérience

Nous avons demandé aux sujets de suivre un trajet entre deux positions marquées au sol tout en contournant un obstacle (trépied de 1,80 m de hauteur) ; ceci correspond à une trajectoire approximativement à angle droit (**Figure III-4A et B**). Cette situation est très fréquente dans la vie quotidienne puisqu'on la rencontre par exemple au sortir d'une pièce lorsque nous tournons pour emprunter un couloir ou encore lorsque nous tournons au coin d'une rue.

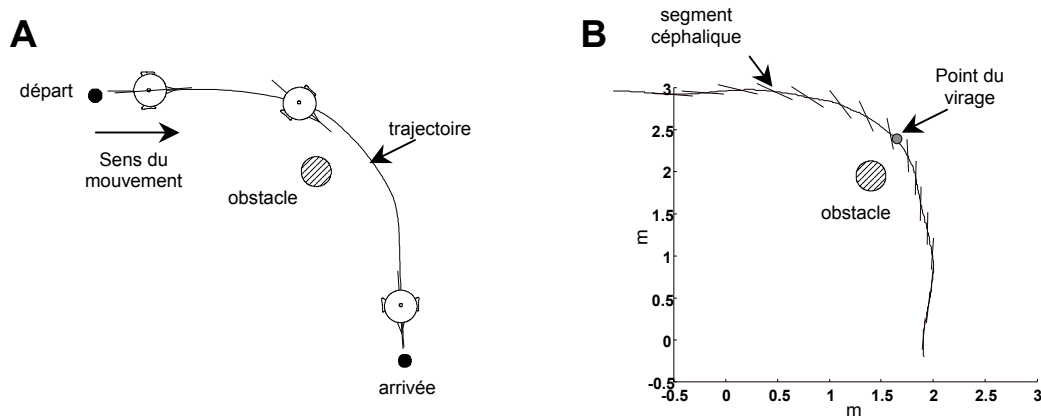


Figure III-4. Description du protocole et de la trajectoire produite par les sujets. Identification des paramètres mesurés et représentés dans les graphes suivants.

Nous nous sommes posés la question de savoir ce que la tête faisait dans ce type de tâche, par rapport à ce qui a été montré dans la locomotion linéaire ou circulaire. Change-t-elle de direction avant que le point du virage ne soit atteint ou reste-t-elle alignée sur la direction du trajet locomoteur ? Quelle est l'amplitude de cette déviation lorsque le sujet marche « normalement » ? Varie-t-elle en fonction de la direction du virage et de la vitesse de locomotion ?

Protocoles

12 sujets sains (8 hommes et 4 femmes, âgés de 33 ± 3 ans) ont participé à plusieurs expériences réalisées d'abord en vision (VIS) occultée (YF ; plus précisément les yeux masqués avec des lunettes opaques) et en vision normale (YO) afin d'éviter autant que faire se peut les phénomènes d'apprentissage. Ils ont été divisés en deux groupes de 6 sujets (4 hommes et 2 femmes).

Le **premier** groupe a réalisé la tâche de navigation en faisant un virage à gauche (**VIR_G**), puis un virage à droite (**VIR_D**). Aucune consigne n'a été donnée quant à la vitesse de la marche. Les sujets étaient libres de choisir spontanément leur fréquence et leur amplitude de pas, de façon à ce qu'elles soient aussi naturelles que possible (voir à ce sujet Bonnard & Pailhous, 1993). Le plan expérimental était donc le suivant : [S6 * VIS2 * VIR2].

Le **second** groupe a réalisé la tâche de navigation en faisant uniquement un virage à droite mais en ayant pour consigne de le faire avec trois vitesses de déplacement (VIT) : normale (ou spontanée, comme le groupe précédent), lente et rapide. Le plan d'analyse correspondant était de la forme : [S6 * VIS2 * VIT3].

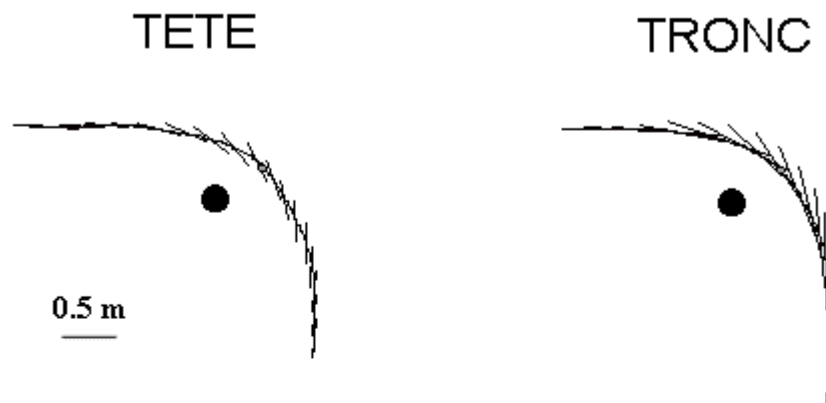
Chacun des sujets a réalisé cinq essais dans chacune des deux conditions, avec un intervalle de deux minutes entre chaque passage.

III.3.2. Résultats

Nous avons remarqué que pour chaque sujet le trajet locomoteur est très caractéristique, à l'image d'une empreinte digitale. Nous pensons que cela est dû aux différences anthropométriques et au « style » locomoteur de chacun d'entre eux (ce que l'on appelle communément la démarche).

La **Figure III-5** illustre un tracé cinématique représentatif obtenu chez l'un des sujets. Les bâtonnés correspondent à la direction de la tête (à gauche) et du tronc (à droite) pendant le trajet locomoteur (courbe) contournant l'obstacle (grand cercle plein). On remarque le changement de direction de la tête en direction de la position finale avant que ne soit atteint le point du virage (petit cercle grisé sur la trajectoire), ce qui n'est pas le cas du tronc dont la direction reste quasi tangentielle à la trajectoire locomotrice.

YEUX FERMES



YEUX OUVERTS

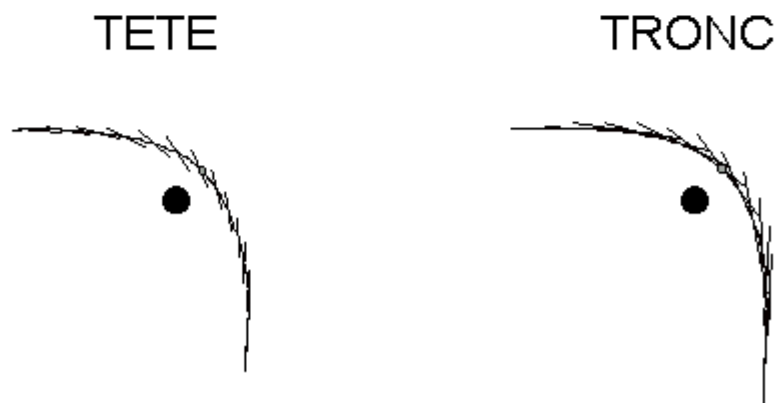


Figure III-5. Exemples de tracés cinématiques obtenus dans chacune des conditions expérimentales avec un sujet. A gauche, les tracés de la tête et à droite les tracés du tronc. On remarque la tête s'oriente vers la position finale avant que ne soit atteint le point du virage, alors que l'orientation du tronc reste quasi tangentielle à la trajectoire locomotrice. Ceci est vrai dans les deux conditions de vision.

Le changement d'orientation de la tête commence environ 1 s avant que ne soit atteint le point du virage et atteint un pic environ 150-200 ms avant ce même point. Une fois passé ce repère, la direction de la trajectoire corporelle (donnée par celle du tronc car nous avons fait l'hypothèse que le tronc ne subissait qu'une faible torsion au cours des changements de direction durant la tâche) se réaligne progressivement sur la direction de la tête. Cette observation est similaire à celle rapportée par Glasauer et coll. (1995).

III.3.2.1. Influence de la direction du virage

La direction du virage n'a eu aucun effet sur les paramètres de déviation de la tête (pic, occurrence de son initiation de θ et occurrence du pic de θ) et sur la vitesse de locomotion ($p>0.6$). La direction de la locomotion n'a donc pas d'influence sur les changements anticipés de la direction de la tête.

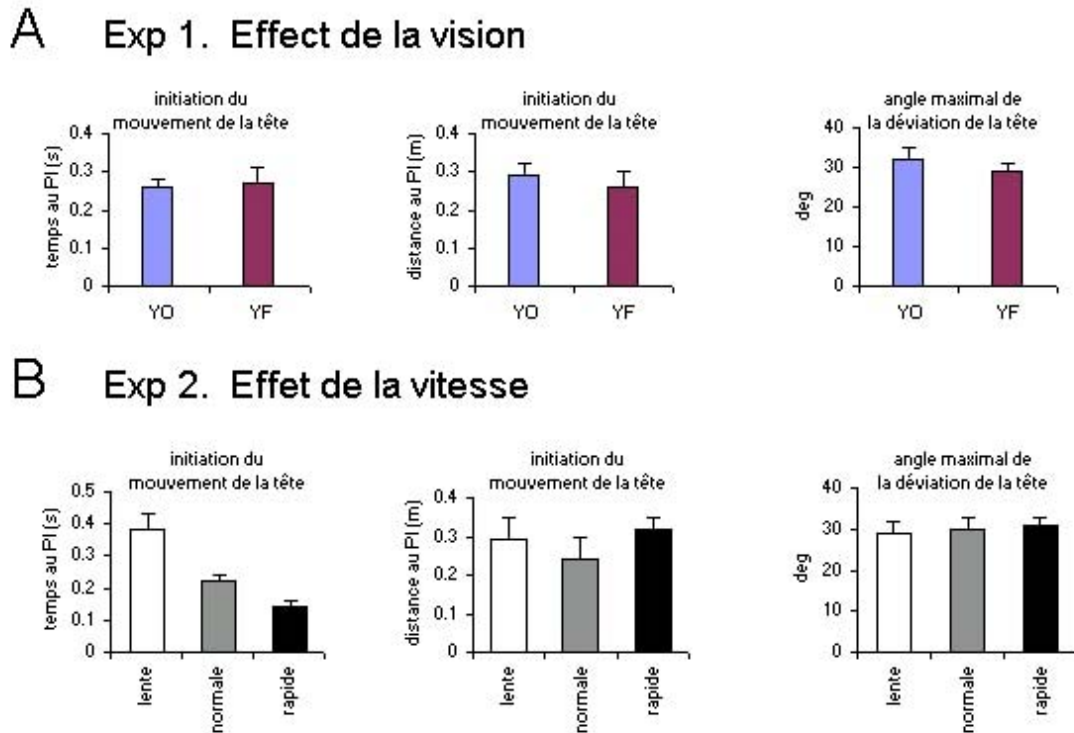


Figure III-6. Influence des conditions de vision (A) et de vitesse (B) sur les paramètres de theta. Les premières n'ont aucun effet sur ces paramètres. De même, les vitesses de marche (qui sont significativement différentes) n'ont pas eu d'influence sur l'amplitude de theta (B, panneau de droite), ni sur son initiation en terme de distance (B, panneau central) par rapport au point du virage. Par contre, l'initiation de la déviation de la tête se fait de façon d'autant plus précoce que le sujet marche lentement (B, panneau de gauche).

III.3.2.2. Influence des conditions de vision

Les conditions de vision ont eu un effet sur la vitesse de locomotion ($F_{1,5}=23.27$, $p=0.019$) puisque les sujets marchaient plus lentement en vision occultée (1.20 ± 0.03 ms vs 1.02 ± 0.03 ms respectivement pour YO et YF). Elles n'ont pas eu non plus d'influence ($p>0.4$) sur les paramètres de θ (Figure III-6A).

III.3.2.3. Influence des consignes de vitesse

La **Figure III-7** montre un exemple de trajet obtenu pour différentes vitesses locomotrices. Le cercle vide représente la position du trépied alors que le cercle plein sur la portion initiale de la trajectoire locomotrice correspond à l'endroit où la tête commence à changer de direction (rappelons que le seuil est de 9°). Le trait vertical correspond à la distance perpendiculaire tracée à partir de la position initiale de la trajectoire (rectiligne) ; le croisement de ce trait avec la trajectoire donne le point d'intersection utilisé pour le calcul des délais d'initiation. Comme illustré plus haut dans la **Figure III-5** pour les deux conditions de vision, la tête commence à dévier en direction de l'objectif locomoteur avant que ne soit atteint le point du virage de façon qualitativement similaire pour les trois conditions de vitesse. En effet, la tête dévie toujours du côté de la courbure interne de la trajectoire locomotrice.

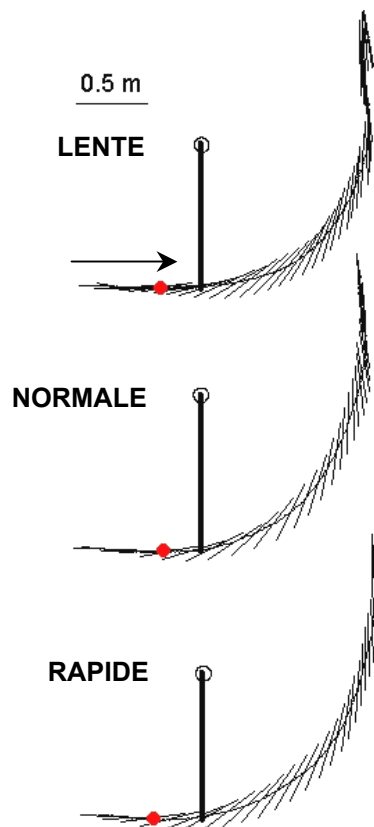


Figure III-7. Changement de direction de la tête en fonction de la vitesse de locomotion. Le cercle vide représente la position du trépied et le cercle plein matérialise la distance à laquelle le changement de direction de la tête commence. Le trait perpendiculaire à la direction initiale du trajet locomoteur permet de situer le point d'intersection utilisé pour le calcul des délais et des distances liés au changement d'orientation céphalique. La flèche indique le sens du déplacement.

Vitesse de locomotion

Les vitesses de marche étaient significativement différentes les unes des autres comme cela était attendu. En moyenne, les sujets ont marché à 0.8 ± 0.07 , 1.2 ± 0.05 et 1.6 ± 0.06 m/s respectivement pour les conditions lente, normale et rapide.

Amplitude du pic de θ

Le facteur VIT ($F=0.98$; $p=0.39$) n'a eu aucun effet sur l'amplitude de θ (**Figure III-6B, panneau de droite**). L'angle maximum entre la direction de la tête et celle de la trajectoire locomotrice est d'environ 30° .

Occurrence de l'initiation de θ

Au niveau temporel, cette initiation débute plus tôt à mesure que la vitesse diminue ($F_{2,10}=14.86$; $p<0.001$; **Figure III-6B, panneau de gauche**), alors qu'en terme de distance, elle se fait à distance très similaire dans les trois conditions de vitesse ($F_{2,10}=0.57$; $p>0.05$; **Figure III-6B, panneau central**).

En moyenne, la tête commence à dévier à 0.3 ± 0.3 m du point du virage, ce qui correspond environ à une distance de 1.1 ± 0.2 m par rapport à la nouvelle direction de la trajectoire locomotrice une fois passé ce point. Ce résultat n'est pas influencé par un changement de seuil de détection de la déviation car, même en le fixant à 5° , la tendance persiste (0.5 ± 0.3 m du point du virage par rapport au 0.3 ± 0.3 m rapporté ci-dessus pour le seuil de 9°). Il semble que **le patron spatial de la déviation de la tête soit conservé pour un intervalle de vitesse de locomotion compris entre 0.8 et 1.6 m/s**. Ces données sont en accord avec celles obtenues en réalité virtuelle alors que le sujet est immobile et l'environnement mobile.

III.3.3. Discussion

Certains auteurs (Paillard, 1971 ; Roberts, 1973) ont déjà insisté sur l'importance de la régulation posturale de la tête dans l'espace pour le maintien de la stabilité du référentiel « géotropique » et faciliter l'interprétation des informations sensorielles. Ce contrôle a été démontré dans diverses tâches locomotrices (Pozzo *et al.*, 1990, 1991 ; Assaiante & Amblard, 1993 ; Keshner & Peterson, 1995 ; Keshner *et al.*, 1995 ; Ledebt *et al.*, 1995 ; Pozzo *et al.*, 1995 ; Amblard *et al.*, 1997 ; Flanders *et al.*, 1999).

Nous avons exploré un autre pan des mouvements de la tête : ceux produits lors des changements de direction planifiés lors de la locomotion orientée vers un objectif. Ils confirment que le mouvement de la tête est effectivement un paramètre sensible des tâches de navigation. Mais ils montrent également que, lors des changements de direction, la tête anticipe systématiquement les changements de direction (par rapport à ceux de la trajectoire locomotrice), quelles que soient les conditions de vision, de sens du virage, de consignes de vitesse de locomotion.

Ce comportement semble être un **invariant** lié à ce genre de tâche car, malgré les variations de vitesse et de direction imposées aux sujets, il apparaît à chaque trajet locomoteur. Il peut être considéré à ce titre comme une **stratégie d'orientation** essentielle dans les **tâches de navigation** du fait de sa reproductibilité au cours des essais.

Pour fournir un support stable au regard, la position de tête est contrôlée dans l'espace à la manière d'une plate-forme inertielle durant les portions rectilignes (Pozzo *et al.*, 1990). Mais, au cours des changements de direction, la nécessité de savoir où l'on va (et donc l'anticipation sur ce qui peut se passer ou sur le trajet à planifier pour contourner des obstacles par exemple) impose de réactualiser le référentiel grâce auquel nous interprétons les données de notre environnement : la déviation anticipée de la tête par rapport au reste du corps permet cela. Une fois que la nouvelle orientation locomotrice est choisie, nous retrouvons une phase de maintien de la tête caractéristique des trajets rectilignes. Partant de là, il devient possible de s'orienter tout en se déplaçant et de prévoir les changements de direction en fonction de la configuration de l'environnement ou des objets qui pourraient s'y trouver. Cette anticipation du mouvement de la tête aurait alors pour objectif premier de permettre le changement de référentiel entre deux directions de marche et de réaligner par la suite le corps sur le nouveau trajet locomoteur.

D'aucun pourrait y voir seulement une synergie tête-tronc entrant dans la dynamique de la locomotion bipède et qui pourrait être interprété différemment : la direction locomotrice étant choisie et planifiée à l'avance, la déviation de la tête par rapport au reste du corps serait due au fait que celle-ci possède une inertie plus faible et peut, de ce fait, tourner dans la direction de l'objectif avant le tronc. Nous ne pensons pas que cette interprétation soit juste. En effet, si l'on demande aux sujets de se concentrer sur la production de leur trajectoire contournant le tripode (deux segments de droite faisant un angle de 90° entre eux), l'anticipation de la tête diminue fortement voire disparaît (**Figure III-8**) ; la tête reste alignée avec le tronc comme si la personne

portait une minerve et n'attachait d'importance qu'à la trajectoire à suivre et non à l'objectif à atteindre en lui-même.

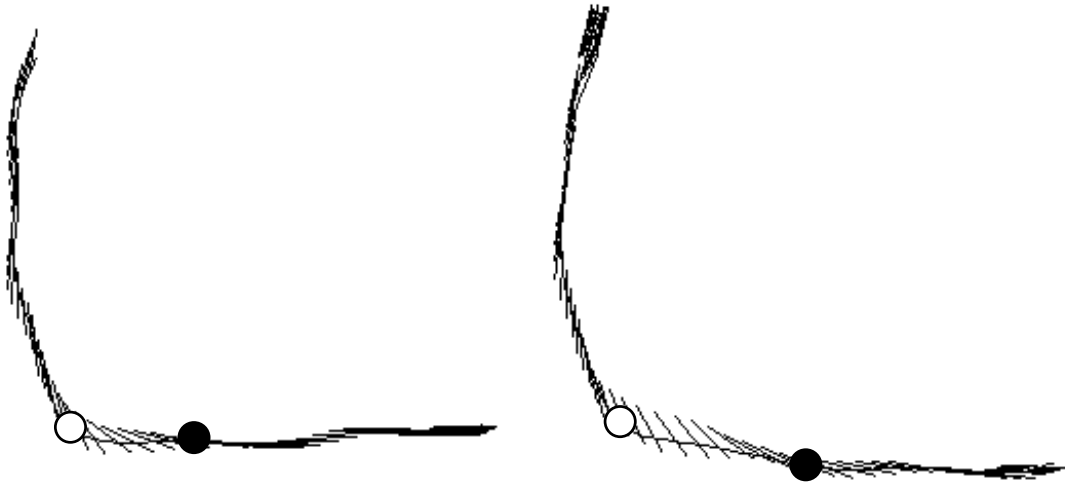


Figure III-8. Influence de la consigne sur la production de trajectoire locomotrice. En A) le sujet doit fixer son attention sur la trajectoire locomotrice. En B) le sujet doit se focaliser sur l'objectif à atteindre. Le cercle plein représente la position où se fait l'initiation du mouvement de la tête, le cercle vide correspond au point du virage. Dans les deux cas, il réalise la tâche les yeux fermés. On note que l'anticipation de la tête se fait beaucoup plus tardivement dans le premier cas (A) que dans le second (B), et que l'amplitude de la déviation de la tête par rapport à la trajectoire est également plus faible.

Certains auteurs ont proposé que ce réalignement serait seulement lié au couplage entre la perception et le mouvement vers l'objectif ; plus précisément aux informations relatives à la direction perçue du mouvement (Rushton *et al.*, 1998, 1999) ou au flux optique (Lee, 1976), ou les deux (Warren *et al.*, 2001). Une loi de contrôle permettrait alors de gérer de façon prospective ce changement de direction en fonction de la direction l'objectif. Mais, cette approche ne permet pas d'interpréter le comportement observé les yeux fermés. Le fait que cette stratégie d'orientation persiste en vision occultée laisse à penser que la mémoire spatiale à court terme est mise à contribution et que la tête s'oriente vers une cible mémorisée pendant la navigation en vision occultée. Cela pourrait également illustrer l'idée que les sujets simulent leur trajet locomoteur en réactualisent leur position à partir des informations proprioceptives et vestibulaires comme il est proposé dans les modèles de Bernstein ou de Droulez et collaborateurs (voir chapitre 2). De plus, le guidage visuel de la navigation semble dominé celui utilisant informations proprioceptives et vestibulaires même si ces trois types d'informations sont utilisés conjointement (Blair et Sharp, 1996). Ceci explique le fait que certains patients vestibulaires soient capables de se déplacer et de changer de direction locomotrice malgré leur déficience

(Glasauer *et al.*, 1994, 2002). A l'opposé, cela pourrait expliquer aussi le fait que les sujets marchent un peu moins vite les yeux fermés (vision occultée).

Il serait également possible de justifier ces mouvements anticipés de la tête en s'appuyant sur les travaux neurophysiologiques réalisés chez l'homme et l'animal. En effet, il a été démontré l'existence :

- d'une part de réseaux de neurones codant de façon « absolue » une direction céphalique préférentielle dans un référentiel exocentré, indépendamment de la position ou du mouvement — les cellules appelées « cellules de direction de la tête » présentes dans le postsubiculum (Taube *et al.*, 1990a, 1990b) et le thalamus (Taube & Burton, 1995) du rat et dans le presubiculum du primate (Robertson *et al.*, 1999) et ;
- d'autre part, de cellules sensibles à la vitesse angulaire de la tête chez le rat (McNaughton *et al.*, 1983 ; Taube, 1995) et le primate (Rolls, communication personnelle).

Certains auteurs (Blair & Sharp, 1995) ont émis l'hypothèse de l'existence d'un circuit thalamo-cortical prédictif sensible à la **direction future de la locomotion** et qui serait sollicité dans ce genre de tâche. Cela renforce l'idée avancée que, dans les tâches de navigation, la priorité est donnée au contrôle anticipé de la direction de la tête vers la direction future de la marche afin de faciliter le traitement informationnel et le guidage vers l'objectif final puisque cette anticipation permet de positionner le regard (yeux-tête) à l'avance dans la bonne direction et de fournir des informations plus précoces pour une bonne gestion de la tâche. Ces réseaux participeraient à l'orientation de l'animal et de l'homme durant les tâches de navigation et leur activité serait modulée par l'activité locomotrice elle-même (Zugaro *et al.*, 2000). Leur sollicitation, durant les tâches de navigation les yeux fermés, donnerait une information supplémentaire au SNC pour ce guidage « à l'aveugle » vers l'objectif locomoteur.

Ces résultats sont en contraste avec ceux obtenus le long d'un trajet circulaire. Dans leur expérience, Grasso et coll. (1996) ont montré que l'anticipation de la tête dépendait de la courbure de la trajectoire du cercle sur laquelle marchent les sujets (elle était dessinée sur le sol) et que les phases toniques de la variation de θ étaient principalement sous contrôle visuel. Par contre, le même trajet circulaire, répété les yeux fermés **après** l'avoir été en vision normale, a pu amener les sujets simplement à reproduire le cercle en étant plus attentifs aux informations vestibulaires et proprioceptives sans prendre en compte les possibilités de poursuite oculaire

comme c'est le cas dans le pointage locomoteur. Ceci avait pour effet de faire disparaître l'anticipation de la tête pendant la locomotion circulaire sans vision. De plus, la locomotion circulaire **ne fournit pas de cible visuelle stable** comme c'est le cas dans la locomotion linéaire ou curvilinéaire pendant laquelle il est possible de fixer des yeux un point précis de notre environnement(avec ou sans mouvements de la tête). D'où les mouvements de la tête très similaire aux nystagmus des yeux et la disparition des mouvements anticipés de la tête lorsque les sujets lisent durant le trajet circulaire.

Un point autre important à soulever concernant nos résultats, est qu'ils vont à l'opposé d'une stratégie à temps constant comme celle proposée par les théories s'appuyant sur l'utilisation de t_c pour initier certains de nos actes moteurs. Nos données suggèrent plutôt que la configuration de l'environnement joue un rôle important dans la façon de gérer la prise d'informations au cours de nos déplacements. Ne pouvant voir à travers les murs, il est en effet inutile de tourner la tête de façon trop précoce en direction de l'objectif à atteindre. On pourrait alors supposer que le mouvement de la tête ne devrait se faire qu'une fois franchit le point du virage (**Figure III-9**). Or, l'angle entre la direction initiale de la locomotion et la direction passant par le point où le mouvement de la tête est initié et l'angle d'un mur, nous avons trouvé une valeur d'environ 65-75°. Sachant que l'hémichamp visuel est de 90° sur l'axe horizontal, on pourrait penser que le sujet commence à tourner sa tête lorsque le coin du mur est trop excentré par rapport à sa vision centrale et que les informations captées perdent en précision. Les mouvements oculaires étant fondamentaux dans la prise d'information durant les changements de direction de la locomotion, leur analyse devrait pouvoir nous aider à préciser cet aspect du contrôle visuo-moteur, ce que nous allons le montrer dans notre seconde expérience.

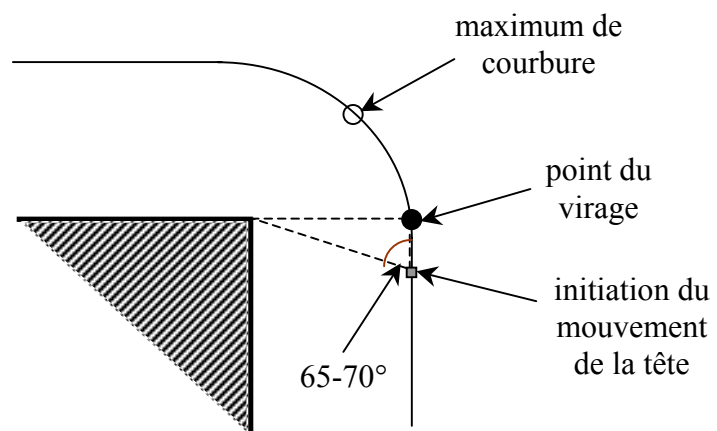


Figure III-9. Influence de la configuration de l'environnement sur l'initiation du mouvement de la tête lors de la locomotion curvilinéaire.

III.4. Expérience 2 : Origine de la stratégie d'orientation

Les observations que nous venons de faire mettent l'accent sur les mécanismes prédictifs dans les tâches de navigation qui sont essentiels pour le contrôle proactif de nos déplacements vers un objectif locomoteur. En effet, les mouvements de la tête sont très importants car ils contribuent, avec les mouvements oculaires, à l'orientation du regard dans l'espace. Les mouvements céphaliques par rapport au tronc sont pilotés par les muscles du cou et ceux des yeux sont mobilisés par rapport à la tête à l'aide des muscles extra-oculaires. Il a été démontré qu'une relation étroite existe entre les mouvements des yeux et de la tête tant chez l'animal (Bizzi *et al.*, 1976 ; Vidal *et al.*, 1982, 1983 ; Guitton *et al.*, 1984) que chez l'homme (Andre-Deshays *et al.*, 1988). Des interactions existent donc au niveau neuronales. De plus, les informations proprioceptives sont essentielles dans le contrôle de la posture et de la locomotion chez l'homme ; leur traitement se ferait par rapport à un référentiel centré sur la vision (Ivanenko *et al.*, 2000a) et impliquerait des régions corticales de l'hémisphère droit très spécifiques (Ivanenko *et al.*, 2000b).

Cela pourrait expliquer, par exemple, pourquoi les conducteurs bougent leurs yeux vers un point d'intersection situé entre leur position actuelle et un point situé sur la tangente à la courbe du virage afin d'estimer la courbure. De plus, ils fixent systématiquement ce point d'intersection pendant le virage. Ce comportement d'orientation du regard est principalement prédictif et débute 12 s avant que ne soit atteint le point tangent du virage (Oxland *et al.*, 1992 ; Land *et al.*, 1992, 1994). Chez un conducteur expert, le regard peut se diriger vers un point un peu plus à l'intérieur de la courbe du virage (Land *et al.*, 2001), ce qui pourrait être interprété comme une stratégie destinée à obtenir une information plus précocement pour contrôler les changements de direction par anticipation.

En ce qui concerne la navigation pédestre, une hypothèse alternative serait que ces mouvements (présents même durant la vision occultée) sont contrôlés indépendamment des informations visuelles, et seraient en fait inhérents à la dynamique de la locomotion. Dans ce cas, c'est l'ajustement de la position des différents segments corporels dont le contrôle assure une bonne gestion des mouvements du centre de gravité au cours des changements de direction, qui serait à l'origine de mouvements céphaliques. Du fait de sa plus faible inertie, il tournerait avant le reste du corps. C'est du moins ce que semble suggérer les résultats rapportés par Patla et coll. (Patla *et al.*, 1999a). Ils ont démontré l'existence d'une hiérarchie lors les événements impliqués

dans le changement de direction d'un trajet locomoteur : le changement de direction du centre de gravité précède tous les autres changements segmentaires et il est lui-même suivi par le changement d'orientation de la tête.

Pour tester cette hypothèse (objectif locomoteur ou dynamique de la marche à l'origine du contrôle de la stratégie d'anticipation), nous avons exploré les **mouvements céphaliques et oculaires** afin de compléter notre analyse des mécanismes proactifs impliquées dans les tâches de navigation et obtenir ainsi des informations concernant la **direction du regard** ; l'objectif étant d'essayer de trancher en faveur de l'une ou l'autre des deux hypothèses.

Si notre hypothèse d'orientation vers l'objectif locomoteur est juste, nous pouvons nous attendre à ce qu'il y ait des différences entre la marche en avant et la marche en arrière car, d'une part, les copies efférentes et les informations proprioceptives ne sont pas les mêmes, et, d'autre part, ces informations peuvent entrer en conflit avec les informations visuelles du flux optique, résultant en une expansion pendant la marche avant et une contraction durant la marche à reculons.

III.4.1. Présentation de l'expérience

Six sujets volontaires ont réalisé la même tâche que précédemment (virage droit et vitesse « normale »), mais selon deux conditions : d'abord en marchant en avant (AVT, partant de la position initiale vers la position finale), puis en marchant à reculons (ARR, partant la position finale vers la position initiale), et ce, les yeux ouverts puis les yeux fermés. Les mouvements des yeux ont été enregistrés en parallèle. Le plan expérimental était : [S6 * VIS2 * DIR2].

Les hypothèses que nous avons voulu vérifier sont les suivantes : 1°) si l'orientation des yeux et la poursuite visuelle se font vers la position finale en vision normale et en vision occultée, alors nous pourrions conclure qu'il se produit effectivement un guidage visuel vers une position finale imaginée ; 2°) si, pendant la marche à reculons pour revenir à la position de départ, les mouvements des yeux et de la tête sont simplement inversés alors nous devons rejeter la première hypothèse et considérer l'anticipation de la tête impliquée dans les mécanismes d'orientation en vue de contrôler la tâche de navigation comme la résultante de la dynamique de la locomotion. Dans cette expérience, le point de virage correspond au maximum de courbure de la trajectoire locomotrice.

III.4.2. Résultats et discussion

Nous avons trouvé (**Figure III-10**) que la tête et les yeux s'orientaient systématiquement vers la direction future de la trajectoire curviligne. L'amplitude totale de ces mouvements représentant celui du regard était liée pour moitié à ceux de la tête et pour moitié à ceux des yeux (d'une amplitude de 25-30° environ). Si l'on rapproche cette mesure angulaire de celle dont nous avons parlé concernant le moment où le sujet initiait son mouvement de tête (65-70°), on peut émettre l'hypothèse que, les yeux ayant débuté leurs mouvements légèrement avant la tête, une rotation du champ visuel s'est opérée dans la même direction permettant ainsi de voir à l'avance ce qui apparaît derrière un mur par exemple. Ces données sont à rapprocher de celles obtenues en neurophysiologie chez l'animal comme chez l'homme (Fuller, 1992 ; Freedman *et al.*, 1996, 1997), qui montrent que les mouvements de la tête n'apparaissent qu'à partir d'un certain seuil de rotation des yeux (environ 20°). Cette synergie serait sous la dépendance de cellules du colliculus supérieur dont le rôle serait de coder le déplacement du regard dans la direction souhaitée. Cela a été implémenté dans plusieurs modèles où les mouvements des yeux et de la tête sont initiés par un signal commun élaboré dans un système de coordonnées égo- ou exocentré (Guitton, 1992 ; van der Steen, 1992). Malgré tout, il existe une certaine indépendance entre les mouvements des yeux et de la tête qui a amené à postuler l'existence de mécanismes de contrôle séparés prenant en compte la position de l'œil dans l'orbite (Freedman et Sparks, 1997)

Des synergies similaires à celles décrites dans l'expérience 1 ont été observées quelles que soient les conditions de vision. Cela confirme nos précédents résultats et nos commentaires relatifs aux analyses des mouvements que nous avons réalisés sur la tête seule. À savoir que le changement d'orientation anticipé de la tête commence environ 1 s avant que ne soit atteint le point du virage et atteint un pic environ 150-200 ms avant ce même point dans la condition AVT alors qu'il est synchronisé avec le point du virage dans la condition ARR. Le début de l'anticipation des yeux est initié légèrement avant celui de la tête. De plus, la déviation de la tête diminue fortement, voire disparaît durant la marche à reculons : tout se passe comme si la tête restait fixe par rapport au tronc

Durant la locomotion à reculons, le mouvement du regard n'est pas inversé comme si l'on passait un film à l'envers. Au contraire, il s'oriente dans la direction opposée à celle qu'il avait prise à l'aller, de telle sorte que le patron locomoteur de marche en avant n'est pas simplement inversé lorsque l'on demande au sujet de retourner à reculons à sa position de départ. Le patron résultant ressemble plutôt à celui que l'on aurait eu si l'on avait demandé au sujet non pas de

marcher à reculons, mais plutôt de faire demi-tour et de retourner à la position de départ en faisant un virage à gauche.

En conséquence, **le regard est toujours orienté vers la direction future du trajet locomoteur.**

Par ailleurs, les mouvements d'orientation montrent une plus grande amplitude, reproductibilité et un temps d'initiation plus élevé dans la locomotion en avant, sans doute à cause de l'influence prépondérante du canal visuel dans nos déplacements quotidiens ; enfin la vitesse de marche est uniquement influencée par la direction de la locomotion ($F_{1,5}=18.91$, $p=0.007$; **Figure III-11**) ; ce qui peut s'expliquer par le fait que les sujets, ne pouvant voir où ils vont, utilisent la position d'arrivée mémorisée pour se diriger.

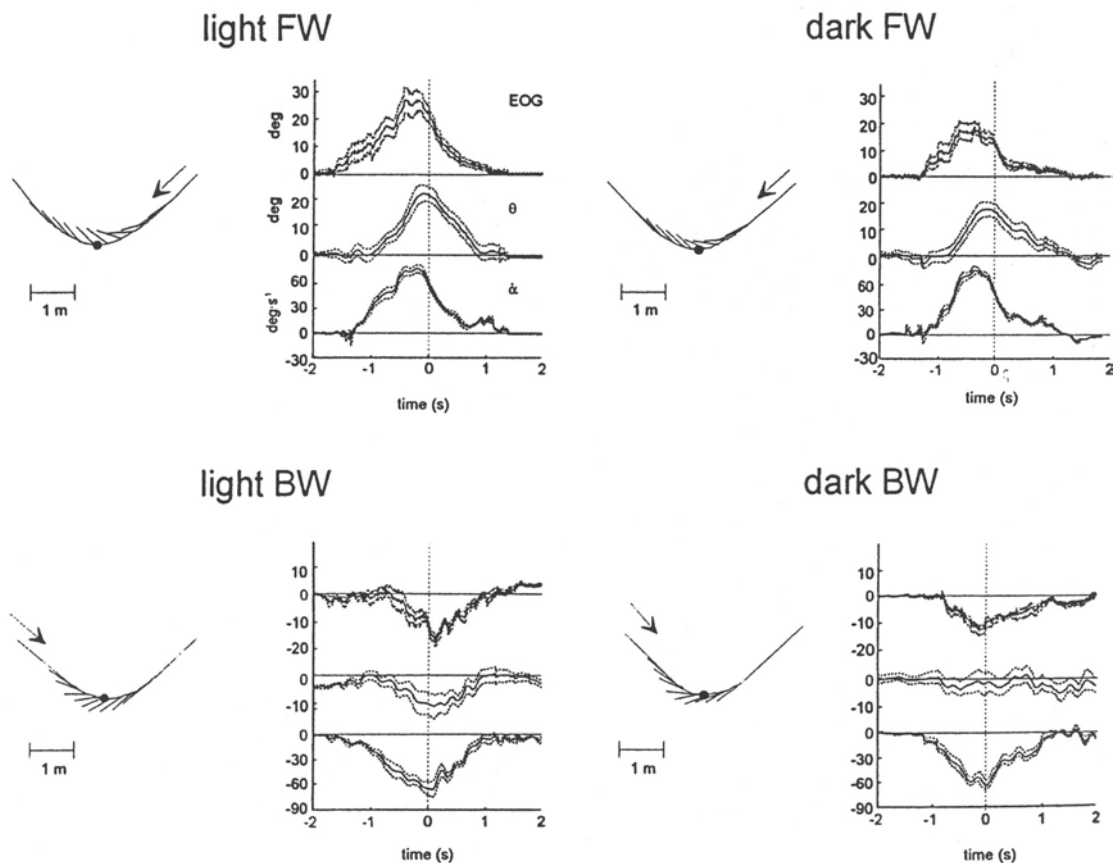


Figure III-10. Récapitulatif des moyennes globales \pm SE des trajets, mouvements des yeux, de la tête et du regard durant la marche en avant et en reculant dans les deux conditions de vision (*light* = vision normale ; *dark* = vision occultée). La *direction du regard* (yeux-tête + tête-trajectoire) est représentée par les bâtonnets attachés à la trajectoire du point moyen de la tête (partie gauche de chacune des colonnes). Le dérouls temporel de l'EOG, de la tête par rapport à la trajectoire (θ) et de la vitesse angulaire de la tête dans l'espace ($\dot{\alpha}$) sont tracés de haut en bas sur la partie droite de chaque colonne.

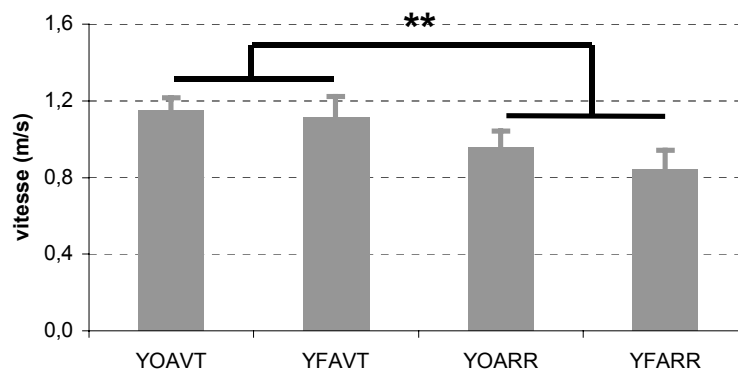


Figure III-11. Comparaison des conditions de vision en marche avant et en marche arrière.

Nous pensons que les synergies d'orientation anticipées font partie du **répertoire moteur de la navigation humaine** et que la nécessité de **préparer de façon anticipée un référentiel visuel stable** pour l'action à venir est à l'origine de leur mise en œuvre, impliquant un contrôle postural hiérarchisé au cours du changement de direction.

Cette hypothèse a été également proposée récemment et illustrée avec une approche plus axée sur l'aspect biomécanique par Patla et coll. (Patla *et al.*, 1999b ; Hollands *et al.*, 2001 ; Vallis *et al.*, 2001). Imai et coll. (2001) ont, eux aussi, obtenu des résultats similaires au cours de leur étude tridimensionnelle de ces mécanismes. Leurs résultats corroborent les nôtres et vont dans le sens d'une **préparation anticipée du changement de référentiel au cours de la locomotion curvilinéaire**. Les mouvements anticipés de la tête semblent être une composante des stratégies d'orientation utilisées par le SNC, à laquelle participe également les mouvements des yeux. Ceci est somme toute logique puisque le regard est l'un des principaux outils d'exploration de notre environnement.

III.5. Expérience 3 : Développement de la stratégie d'orientation

Nous avons déjà souligné l'importance de l'étude des comportements anticipés chez l'enfant qui ont été préalablement mis en évidence chez l'adulte (voir paragraphe II.4.1). Il a permis de poser les bases du développement du contrôle proactif. Nous citerons pour exemple des études se rapportant à des domaines qui nous ont particulièrement intéressés : celui de la posture et de l'équilibre, celui de l'initiation de la marche.

Nous avons précédemment mentionné les expériences de Hadders-Aglra et coll. (1996a, 1996b) sur le maintien de la posture lors de l'introduction d'une perturbation externe.

Durant la locomotion, la posture debout fait intervenir plus de degré de liberté et oblige le SNC à contrôler ceux-ci de façon simultanée sous peine d'entraîner la chute. Pour explorer la locomotion curvilinéaire chez les enfants, nous avons adopté l'approche proposée par Assaiante et Amblard (1993). Le modèle ontogénétique développé par ces auteurs est intéressant, en ce sens qu'il propose deux modes de contrôle de l'équilibre postural (ascendant et descendant) conjointement à deux autres stratégies de contrôle des relations inter-segmentaires entre la tête et le tronc (« en bloc » ou articulé). Différentes phases (couplant les modes et les stratégies exposées ci-dessus) se succèdent au cours du développement pour aboutir à une maîtrise de plus en plus fine des degrés de liberté (Bernstein, 1967) du système articulé que constitue notre corps (Assaiante, 1998). La conséquence de ce développement est une désynchronisation des mouvements de la tête par rapport à ceux du tronc.

Ce modèle n'est pas le seul envisageable puisque l'amélioration de la maîtrise de l'équilibre durant la locomotion est essentiellement liée au flux optique car il peut influencer le contrôle de celui-ci du fait de l'immaturité de certaines structures visuelles comparées à l'adulte (Stoffregen *et al.*, 1987). Une approche dynamique de la coordination motrice permettrait selon certains auteurs (Bardy *et al.*, 1999) d'arriver aux mêmes constatations : les différents modes de contrôle, coordination en phase ou en anti-phase, émergent d'eux-mêmes sous les contraintes imposées par la tâche à réaliser. Selon nous, ces auteurs ne divergent pas réellement au niveau de leur conclusion car dans les deux cas, les facteurs centraux sont associés à des facteurs périphériques et c'est de leur interaction que découlent les stratégies utilisées par le système nerveux.

Apportons à présent quelques précisions concernant le modèle d'Assaiante et Amblard qui nous seront utiles plus loin dans notre discussion. Le développement de la coordination tête-tronc durant la locomotion en vision normale peut être décrit par au moins 3 périodes. La première apparaît entre 3 et 6 ans, quand la stratégie de stabilisation de la tête dans l'espace est adoptée seulement pendant la marche sur un sol plat. Durant cette période, les enfants ont tendance à mobiliser leur tête et leur tronc « en bloc » comme si l'articulation permise par le cou n'existait pas. Lors de la marche sur un support étroit, les enfants de ce groupe d'âge tendent à augmenter la raideur tête-tronc, spécialement à 6 ans. Dans la seconde période (7-8 ans), les enfants deviennent capables d'adopter une stratégie de stabilisation de la tête dans l'espace lors de la marche sur un support étroit avec notamment une dissociation des mouvements de la tête par rapport à ceux du reste du corps. Les conditions de vision n'ont aucun effet sur cette stratégie pendant la marche quel que soit l'âge. Par conséquent, la stratégie de stabilisation de la tête dans l'espace est la plus appropriée pour réussir à gérer une augmentation du niveau de difficulté dans l'équilibre. Enfin, à l'âge adulte, cette stratégie est généralement adoptée mais elle implique d'associer une composante en rotation spécifique couplée avec des oscillations latérales pendant la marche. Assaiante et Amblard suggèrent que cela pourrait refléter une organisation « céphalo-caudale » du contrôle postural durant la marche, mais aussi que cette stratégie serait principalement d'origine vestibulaire et servirait probablement à faciliter le traitement des entrées visuelles, particulièrement celles du mouvement et des indices visuels périphériques qui sont impliqués dans le contrôle de l'équilibre corporel durant la locomotion.

Durant l'initiation de la marche, il se produit également une maturation des ajustements posturaux anticipés associant équilibre et force de gravité. Durant la phase de support, l'enfant ne parvient pas à maintenir un équilibre aussi efficacement que l'adulte vis à vis des forces gravitationnelles qui agissent sur son corps et de leur moment qui s'exercent au niveau de l'articulation de la cheville. L'accélération verticale du centre de gravité peut donner une indication sur les capacités neuromusculaires de l'enfant à résister aux forces externes qui s'exercent entre l'ensemble tête-tronc-bras et la jambe supportant le poids du corps au moment de la phase d'appui. L'analyse de cette accélération au moment du posé du talon a montré que, chez les enfants, elle est d'abord négative (décélération du CG) puis ne devient positive (accélération du CG) qu'au moment de la phase de double-appuis (Breniere & Bril, 1988a) alors que, chez l'adulte, cette accélération est positive avant même que le talon n'entre en contact avec le sol (Breniere *et al.*, 1981 ; Breniere & Do, 1986). Par conséquent, l'adulte anticipe les effets de la chute du CG en ajustant l'activité des muscles porteurs au moment opportun, tandis que

l'enfant en est incapable, tout du moins au début de l'apprentissage de la marche. Il acquiert cette capacité posturale avec la maturation, aux alentours de 4-5 ans grâce à un meilleur contrôle des muscles de la jambe durant l'appui unipodal. De même, le mouvement vers l'arrière du CP au moment de l'initiation de la marche, que nous avons décrit plus haut chez l'adulte (section II.4.1.3), n'est définitivement acquis chez l'enfant qu'à partir de 8 ans environ, même s'il peut être observé dès 2.5 ans (Ledebt *et al.*, 1998). Ainsi, l'enfant intègre progressivement la force de gravité dans son contrôle dynamique de la posture et de la locomotion.

Nous avons voulu savoir s'il en allait de même pour la stratégie d'anticipation mis en évidence dans les changements de direction au cours d'une tâche de navigation chez l'homme.

III.5.1. Présentation de l'expérience

Huit enfants (3 garçons, 5 filles) âgés de 3,5 à 8,5 ans ont participé à l'expérience. Aucun ne présentait de troubles moteurs susceptibles de fausser les résultats. Nous leurs avons demandé de réaliser la même tâche de navigation que celle proposée aux adultes dans l'expérience 2. Nous avons néanmoins été obligés de placer au sol des bandes adhésives afin d'empêcher certains d'entre eux de couper les trajectoires (prendre en quelque sorte un raccourci) pour aller plus vite vers la position finale où se trouvait un parent ou un expérimentateur. Tout comme les adultes, ils ont été équipés d'un casque adapté à la taille de leur tête, sur lequel étaient fixées des tiges au bout desquelles se trouvaient les marqueurs passifs. Ils ont réalisé 4 essais dans deux conditions de vision (normale et occultée). Les plus jeunes (<4 ans) n'ont pas voulu faire l'expérience en vision occultée malgré les encouragements de leurs parents. Aucune instruction n'a été donnée concernant la vitesse de marche.

III.5.2. Résultats et discussion

Nous avons divisé le groupe en deux afin de respecter la méthodologie utilisée dans les études précédentes. L'âge n'a pas eu d'effet sur l'amplitude de θ ($p=N.S.$) alors qu'il en a eu sur l'occurrence du pic de θ ($F_{2,19}=5.11$; $p = 0.167$).

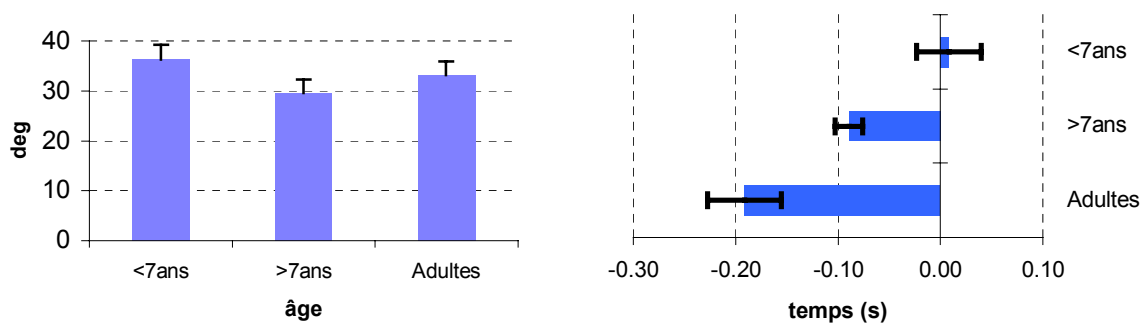


Figure III-12. Amplitude et pic d'occurrence de l'angle theta chez les enfants et les adultes. L'âge n'a aucun effet sur l'amplitude de l'anticipation de la tête vers l'objectif locomoteur, alors que l'on voit très nettement son effet sur le moment où le pic est atteint. Plus l'enfant est grand, plus le pic apparaît de façon plus précoce par rapport au point du virage.

La vitesse de locomotion est significativement inférieure chez les enfants comparée à celle des adultes ($p < 0.001$), surtout dans la condition de vision occultée où elle diminue quasiment de moitié ($p < 0.001$) (**Figure III-11**).

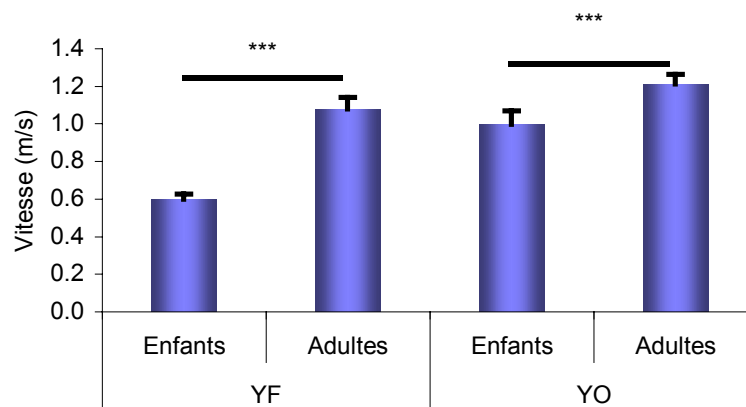


Figure III-13. Comparaison des vitesses de locomotion chez les enfants et les adultes en vision normale et vision occultée.

Une analyse qualitative du dérours temporel des tracés des angles θ pour chacun des segments corporels montre que chez les enfants âgés de moins de 7 ans, l'anticipation de la tête est présente mais elle est ni stabilisée, ni répétée systématiquement durant les trajets

locomoteurs. Ceci se traduit par le fait que les enfants les plus jeunes tournent leur tête et leur tronc de façon synchrone durant le changement de direction, comportement qui n'apparaît plus chez les plus âgés. Passé 7 ans, cette anticipation est présente à chaque essai.

Nous pouvons en conclure que les anticipations présentes chez les plus jeunes enfants (dès 3.5 ans) sont latentes et ne peuvent se manifester de façon systématique qu'à partir du moment où l'équilibre postural ne pose plus de problème à l'enfant au cours de la locomotion (concomitant à une diminution des oscillations latérales du CG durant la locomotion). Cette idée est confortée par le modèle de Assaiante et Amblard qui suggère, durant la marche, que le contrôle postural commence par un contrôle « en bloc » des segments corporels tête-tronc pour ensuite passer à un contrôle où les segments se désolidarisent pour que la tête puisse gagner en indépendance vis à vis du reste du corps et permettre tant une exploration plus aisée de l'environnement qu'une utilisation du regard plus efficace pour la création et l'analyse des informations en provenance du milieu extérieur.

Enfin, les différences de vitesse de locomotion peuvent être interprétées de plusieurs façons :

1°) La sensibilité du flux optique au niveau du contrôle locomoteur chez les enfants (Lee, 1974 ; Stoffregen *et al.*, 1987), flux absent durant la locomotion en vision occultée, peut gêner les enfants pour qui la vision reste prioritaire pour l'équilibre. D'autre part, leur capacité à élaborer une représentation spatiale exocentrée de leur environnement est, elle aussi, en cours de développement (Alderson *et al.*, 1974 ; Rider & Rieser, 1988, 1991) et les amènent à utiliser préférentiellement une représentation spatiale égocentrée qui n'est pas aussi efficace que la précédente car plus coûteuse d'un point de vue cognitif ;

2°) D'un point de vue biomécanique, la locomotion de l'enfant n'est pas similaire à celle de l'adulte. Les activités anticipées ne sont pas encore en place (Breniere & Bril, 1998a,b ; Bril & Ledebt, 1998 ; Ledebt *et al.*, 1998) et empêchent l'enfant de maîtriser parfaitement ses pas, entraînant ainsi une démarche oscillante au niveau du tronc qui ne facilite pas la stabilisation de la tête dans l'espace (Assaiante & Amblard, 1993 ; Ledebt *et al.*, 1995 ; Assaiante, 1998), et donc la dissociation dans le plan horizontal des mouvements de la tête et du tronc. Par conséquent, ils ne peuvent se fier aux informations proprioceptives et vestibulaires comme peuvent le faire leurs aînés durant la navigation « à l'aveugle ».

3°) L'utilisation conjointe des informations visuelles et biomécaniques permet à l'individu d'estimer les distances et les directions avec l'un et/ou l'autre de ces deux types d'informations.

Durant la croissance, les paramètres biométriques (masse, longueur des membres, taille du globe oculaire) changent les rapports entre le flux optique et les mouvements locomoteurs (Banks, 1988). Ceci pourrait expliquer les différences observées durant le développement au niveau de la stratégie d'anticipation liées au changement de direction dans la navigation ; cette hypothèse a déjà été proposée lors du développement des APA (Hay & Redon, 1999) pour expliquer la diminution de la variabilité intra-individuelle des stratégies posturales et des patrons locomoteurs chez les enfants (McCollum *et al.*, 1995).

III.6. Résumé et conclusion

« Les yeux sont placés à une hauteur par rapport au sol variable d'une personne à l'autre, ceci étant un facteur déterminant de la perception ».

Le Corbusier, Le Modulor.

Les expériences de navigation, que nous venons de passer en revue, nous ont permis de mettre en évidence une stratégie contrôlant les mouvements de la tête **en direction de la cible locomotrice**. Cette stratégie est sous-tendue par une **synergie anticipatrice du regard** (associant les mouvements des yeux et de la tête) dont l'objectif principal serait de fournir un référentiel visuel stable au cours des changements de direction de la locomotion. Par ailleurs, cette synergie temporelle pourrait simplifier le problème de coordination en **réduisant** à ce premier niveau **le nombre de variables à contrôler** (nombre de segments différents à mobiliser conjointement pour les orienter vers le but à atteindre) et, par voie de conséquence les processus attentionnels sous-jacents (Pelz *et al.*, 2001).

Malgré la variété des conditions dans lesquelles nous avons demandé aux sujets de réaliser la tâche de navigation, il s'est avéré que cette stratégie est utilisée dès qu'un changement de direction doit être réalisé pour atteindre l'objectif locomoteur.

L'absence d'influence de la vitesse de marche sur l'initiation de la déviation de la tête par rapport au point d'intersection ou au point du virage, peut s'expliquer par le fait que le changement de direction est planifié dans un délai compatible avec les contraintes biomécaniques ; celles-ci nécessitent que nous fassions ce changement suffisamment longtemps à l'avance pour ne pas se trouver dans une situation de déséquilibre liée à une déviation trop importante (non maîtrisée) de notre centre de gravité par rapport à la trajectoire désirée (Patla *et al.*, 1991, 1999a, 1999b ; Hollands *et al.*, 2001).

Ce résultat pourrait être aussi liée à l'utilisation de repères exocentriques (coin e mur, repère dans une pièce, etc.) pour déclencher cette déviation à partir d'un certain angle du regard par rapport au reste du corps.

Nous avons observé cette stratégie chez des enfants dès l'âge de 3.5 ans sans pour autant montrer qu'elle était systématiquement utilisée à chaque essai. Au contraire, elle suit un processus de maturation qui se fait en parallèle à ceux de l'équilibre postural et du contrôle inter-segmentaire qui s'opèrent jusqu'à l'âge de 7 ans environ (Breniere, 1999). À cet âge, la stratégie anticipée d'orientation est stable et présente à tous les essais, mais le pic n'est pas aussi précoce que chez l'adulte, même si le début de l'anticipation de la tête commence à peu près au même moment que chez l'adulte (environ 1 s avant que ne soit atteint le point du virage). Le développement du contrôle proactif de cette stratégie se manifeste par une précocité de plus en plus importante du pic de θ par rapport au point du virage. En cela, nous rejoignons d'autres auteurs ayant mis en évidence le même type de développement (présence précoce d'un élément du répertoire moteur et optimisation de celui-ci avec la maturation) dans d'autres registres moteurs (Forssberg *et al.*, 1991 ; Assaiante, 1998 ; Breniere, 1999 ; Schmitz *et al.*, 1999 ; Hay & Redon, 1999 ; Ferrel *et al.*, 2001).

