

Institut Régional de Formation aux Métiers de Rééducation et Réadaptation

Pays de Loire

54, rue de la Baugerie - 44230 SAINT SÉBASTIEN SUR LOIRE

ÉVALUATION DE LA PERCEPTION DE LA VERTICALE DANS LE CADRE D'UNE SCOLIOSE IDIOPATHIQUE DE L'ADOLESCENT

État actuel de la littérature et étude illustrative
en libéral

Loren CHEVALLIER

Travail Écrit de Fin d'Études

En vue de l'obtention du Diplôme d'État de Masseur-Kinésithérapeute

AVERTISSEMENT

Les travaux écrits de fin d'études des étudiants de l'Institut Régional de Formation aux Métiers de la Rééducation et de la Réadaptation sont réalisés au cours de la dernière année de formation MK.

Ils réclament une lecture critique. Les opinions exprimées n'engagent que les auteurs. Ces travaux ne peuvent faire l'objet d'une publication, en tout ou partie, sans l'accord des auteurs et de l'IFM3R.

Remerciements

À mon tuteur de stage, qui a su m'orienter et me soutenir avec sa motivation dans la réalisation de ce travail écrit, et à ses collègues.

À ma directrice de travail écrit pour ses conseils et son accompagnement.

À notre documentaliste de l'institut de formation qui a su m'aider à trouver des documents avec efficacité et gentillesse.

Aux parents et aux enfants qui m'ont fait confiance pour cette étude.

À mes amis, pour leur patience, leurs encouragements et leurs nombreuses relectures.

À ma famille et plus particulièrement à mes parents pour leur confiance et sans qui ces études n'auraient pas été possibles.

À Nina pour m'avoir supporté et encouragé avec un soutien infaillible et à qui je dédie ces trois années d'études et surtout ma réussite au concours.

Résumé

L'origine de la Scoliose Idiopathique de l'Adolescent (SIA) est multifactorielle. Actuellement, plusieurs études mettent en évidence des troubles du « modèle interne de verticalité ». L'hypothèse était que le test de la Verticale Visuelle Subjective (VVS) était le plus pertinent pour la mise en évidence de ces troubles de perception de la verticale en activité libérale. Nous avons alors étudié l'état actuel de la littérature et réalisé une étude illustrative sur un cas clinique. Il s'est avéré que les adolescents ayant une Scoliose Idiopathique (SI) ont présenté des troubles en condition dynamique et que le test de Fukuda-Unterberger semble le plus pertinent en pratique. Cela soutient une hypothèse actuelle de la littérature sur leur défaut d'intégration corticale notamment en condition de conflit sensoriel. De nombreuses études sur le sujet doivent encore être mises en place.

Abstract

The origin of Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS) is multifactorial. Currently, several studies point out disorders of the « internal model of verticality ». The hypothesis was that the test of the Subjective Visual Vertical (VVS) was the most relevant for the description of these vertical perception disorders in liberal activity. We studied the current state of literature and conducted an illustrative study of a clinical case. It turned out that adolescent with idiopathic scoliosis (IS) have presented disorders in dynamic condition and the test of Fukuda-Unterberger seems most relevant in practice. This support a hypothesis of the current literature on their default of cortical integration including sensory conflict. Numerous studies on the subject have yet to be implemented.

Mots clés

- Scoliose Idiopathique de l'Adolescent - SIA
- Perception de la verticale
- Proprioception
- Verticale subjective
- Contrôle postural

Key words

- Adolescent Idiopathic Scoliosis - AIS
- Vertical perception
- Proprioception
- Subjective vertical
- Postural control

Sommaire

1	Introduction	1
2	Cadre conceptuel	3
2.1	Scoliose idiopathique de l'adolescent	3
2.2	Les différentes verticales et leurs tests	7
2.3	Test de la VVS	8
2.4	Le « modèle interne de verticalité » et ses systèmes	10
2.5	Troubles objectivés chez les adolescents avec SI	13
3	Etat actuel de la littérature	14
3.1	Objectif	14
3.2	Contexte de la recherche	14
3.3	Stratégie de recherche documentaire	14
3.4	Synthèse des résultats	15
3.5	Conclusion sur l'état actuel de la littérature	21
3.6	Elargissement de cet état de la littérature	22
4	Étude illustrative	23
4.1	Présentation du patient	23
4.2	Présentation des tests	23
4.3	Résultats des tests de Léo	25
4.4	Analyse des résultats	25
4.5	Conclusion de l'étude	27
5	Discussion	28
6	Conclusion	30

Références bibliographiques et autres sources

Annexes 1 à 5

1 Introduction

La Scoliose Idiopathique de l'Adolescent (SIA) (*Récapitulatif des abréviations en annexe 1*) est une déformation tridimensionnelle du rachis permanente et fréquente (2 à 3% des adolescents) (1). Elle concerne huit fois plus les filles que les garçons (2). 80% des scolioses sont *idiopathiques* avec une origine multifactorielle (3). Dans la littérature, deux revues systématiques datant de 2014 (4) et de 2015 (5) ont étudié les preuves d'une étiologie vestibulaire. Elles en concluent que le manque d'étude ne permet pas de prouver une étiologie vestibulaire. L'une d'elle évoque alors une autre hypothèse (4) : les adolescents avec une Scoliose Idiopathique (SI) organiseraient leur posture autour d'une représentation erronée de leur verticale (axe longitudinal interne passant par la tête et les pieds) par rapport à la verticale gravitaire.

Cette hypothèse s'est basée sur le constat de troubles des différents systèmes impliqués dans la perception et la représentation de la verticale. L'ensemble de ces systèmes construit le « modèle interne de verticalité ». Il intégrerait des informations sensori-motrices (bottom-up) et dépendrait de structures cognitives de haut-niveau (top-down) (*schéma récapitulatif en annexe 2*) (6).

Le projet de départ était de comparer l'efficacité objective d'une rééducation axée sur la représentation de la verticale par rapport à une rééducation classique chez le patient avec SI à partir du test de perception de la verticale utilisé en libéral : la Verticale Visuelle Subjective (VVS). La méthodologie choisie était donc une étude de faisabilité. Il s'est avéré que ce type d'étude comprenait de nombreux biais et aurait été difficile à mettre en œuvre au sein d'un cabinet libéral dans le temps imparti. Les moyens à disposition ne permettaient pas non plus d'en déduire des conclusions exploitables pour répondre à cette problématique.

Une remise en question s'est alors faite sur le test de la VVS : Est-il le seul réalisable en libéral ? Est-il le plus pertinent ? Qu'en dit la littérature et quelles seraient ses modalités de réalisation dans le cadre d'une SIA ? Quels sont les autres tests permettant d'objectiver des troubles de la perception de la verticale ? La méthodologie s'est orientée sur un état de la littérature. Cela a permis de trouver 5 articles dont 4 études de cas témoins (7) (8) (9) (10) de niveau de preuve III et une revue de littérature de niveau de preuve I (4) (*tableau I des niveaux d'évidence des recommandations d'après la SOSORT en annexe 3*).

Compte tenu du peu d'articles retrouvés, nous nous sommes interrogés sur les tests utilisés dans le bilan de l'équilibre chez ces patients.

Ces tests pourraient révéler indirectement des troubles de perception de la verticale via le « modèle interne de verticalité » du fait des différents systèmes impliqués. Une étude pilote de 2015 (11) propose alors des tests d'évaluation via la proprioception et un mémoire de Master (12) nous a interpellé concernant un test d'asymétrie posturale de proprioception statique. Cet état de la littérature a donc été couplé à une étude illustrative sur ces évaluations reprises sur un cas clinique.

Dans ce cadre, la problématique émergeant pour ce travail écrit serait la suivante : Comment évaluer les troubles perceptifs de la verticale chez des adolescents ayant une scoliose idiopathique alors qu'aucune recommandation n'existe et que des données probantes de la littérature indiquent qu'ils présentent des troubles du « modèle interne de verticalité » ? En tant que kinésithérapeute, les questions professionnelles qui en découlent sont : comment évaluer les troubles de la perception de la verticale chez l'adolescent ayant une SI en activité libérale ? Quels seraient les tests et leur pertinence ?

Selon les critères PICO de la Cochrane, le sujet d'une question clinique peut se décomposer en quatre dimensions (13) :

- *Population étudiée* : adolescents avec scoliose idiopathique
- *Intervention* : état de la littérature puis étude illustrative
- *Comparaison* : les différents tests pouvant mettre en évidence les troubles perceptifs de la verticalité et leur impact en littérature
- *Outcome (critères de jugement)* : usage, intérêt, pertinence et limites

L'hypothèse formulée est la suivante : l'évaluation des troubles de la perception via la VVS chez l'adolescent avec SI serait la plus pertinente.

Ce travail est composé d'une première partie « cadre conceptuel » qui définit la SIA, les différentes verticales et leurs tests, la VVS précisément, le « modèle interne de verticalité » et ses systèmes puis les troubles objectivés de cette perception chez les patients avec SI. Une deuxième partie fait « état de la littérature » sur les différents tests et modalités de la Verticale Subjective (VS), potentiellement réalisables en libéral et étudiés dans le cadre d'une SIA. Ce travail a ensuite été élargi en troisième partie par une « étude illustrative » exposant le cas d'un patient de 13 ans. Cette étude présente le test de la VVS et des tests de proprioception pouvant, éventuellement, être corrélés à la perception de la verticale via le « modèle interne de verticalité ». Enfin, une « discussion » argumente sur ces troubles perceptifs de la verticale et les structures pouvant être impliquées, dans la perspective d'une rééducation axée sur la représentation de la verticale.

2 Cadre conceptuel

2.1 Scoliose idiopathique de l'adolescent

2.1.1 Définition

Le mot *scoliose* vient du grec « scolios » qui signifie tordu ou courbé (14). Il s'agit d'une déformation tridimensionnelle et non réductible de la colonne vertébrale et du tronc. De ce fait, il est observé (1) :

- Dans le plan frontal : une courbure latérale (simple ou double)
- Dans le plan transversal : une rotation axiale du corps vertébral puis d'une partie du tronc par rapport à la ligne médiane à l'origine d'une gibbosité. Cette rotation se fait du côté de la convexité.
- Dans le plan sagittal : une tendance à l'inversion des courbures naturelles du rachis dans le plan sagittal (lordose cervicale, cyphose dorsale et lordose lombaire)

Parmi les déformations rachidiennes, la scoliose, dite scoliose structurale, est à différencier de *l'attitude scoliotique*. L'attitude scoliotique présente essentiellement une inclinaison du rachis réductible, sans rotation vertébrale. Le test qui permet de les différencier est celui de la flexion rachidienne en position debout. Il met en évidence la gibbosité dans le cas d'une scoliose structurale (14).

Le terme de scoliose *idiopathique* a été introduit par Kleinberg en 1922. Cela évoque le « symptôme d'un syndrome plus complexe d'étiologie multifactorielle » (1). Elle se différencie ainsi des scolioses secondaires, pouvant être d'origines neurologiques ou congénitales le plus souvent, qui représentent 20% des scolioses contre 80% de scolioses idiopathiques (1).

Selon l'âge de l'enfant, on distingue la scoliose (1) : infantile (0-2 ans), juvénile (3-9 ans), *adolescente* (10-17 ans ou jusqu'à la fin de la maturation osseuse) et adulte (à partir de 18 ans ou fin de la maturation osseuse).

2.1.2 Étiopathogénie

La scoliose idiopathique est une pathologie multifactorielle. Les étiopathogénies suivantes sont les plus couramment admises actuellement et expliquent les aggravations des déformations pendant la puberté (3) :

- Le caractère héréditaire de la pathologie
- La responsabilité de la station érigée
- La théorie du cercle vicieux

Quatre autres catégories étiopathogéniques sont décrites. Il s'agit de la dysrégulation asymétrique de croissance osseuse (mécanismes induisant une hypertrophie unilatérale des vertèbres), la susceptibilité osseuse à la déformation, les anomalies du système de maintien passif et les anomalies du système de maintien actif. Cette dernière catégorie regroupe l'ensemble des causes qui peuvent perturber le tonus musculaire de l'architecture ostéoarticulaire du rachis. Les troubles du contrôle postural orthostatique en lien avec des anomalies neurologiques (anatomiques, morphologiques, d'intégration ou encore des troubles de neurotransmetteurs tels que la mélatonine) s'y retrouvent. C'est sur cette dernière dysfonction que ce travail écrit se concentre (3).

2.1.3 Dépistage

Le dépistage est recommandé par tout professionnel de santé intervenant en pédiatrie et est essentiel. En effet, la SIA est majoritairement asymptomatique et très évolutive à l'adolescence. Plus le traitement débute tôt, meilleur est le pronostic. Il doit être réalisé sur tous les enfants mais principalement sur les filles et les enfants de parents avec scoliose (facteurs héréditaires). Ce dépistage comprend un bilan clinique statique, un bilan clinique dynamique et un bilan radiographique que nous décrirons (1) (15) :

L'inspection statique se fait sur deux plans. Elle consiste à détecter, en station assise et debout, des asymétries posturales chez le patient au niveau du pli de taille et des épaules (vue de dos pour le plan frontal) ainsi que des anomalies au niveau des courbures naturelles du rachis (vue de côté pour le plan sagittal). Ces observations seront en faveur d'une scoliose structurale, d'autant plus si le bassin est équilibré (1).

L'examen dynamique se fait avec le test d'Adam. Durant ce test de flexion du rachis à partir de la position debout, le clinicien va observer avec une vue tangentielle sur le rachis la présence ou non d'une gibbosité (dorsale ou lombaire). Il est recommandé de l'objectiver avec un scoliomètre (1).

Le diagnostic se confirme par une radiographie de la colonne rachidienne complète, de face et de profil en position debout. Elle permet (1) :

- La visualisation des courbures et contre-courbures scoliotiques. La(es) localisation(s) et le sens de(s) courbure(s) seront précisés.
- La mesure de l'importance de la scoliose par l'angle de Cobb (nous parlerons de courbure scoliotique si il est supérieur ou égal à 10° et lorsqu'il existe une rotation axiale).
- La détermination de l'âge osseux (via l'échelle de Risser), indispensable pour prévoir le potentiel d'évolution de la scoliose. Il est caractérisé par l'apparition et l'accolement du cartilage sur la crête iliaque de 0 à 5 : absence de cartilage jusqu'à sa fusion complète (témoin de maturité) (2).

2.1.4 Évolution

Chaque scoliose a sa propre évolutivité : certaines évoluent peu ou pas tandis que d'autres s'aggravent rapidement (15).

Selon la courbe de Duval-Beaupère (*fig.1 en annexe 4*), l'évolution de la scoliose est lente jusqu'au début de la puberté avec l'apparition des premiers caractères sexuels secondaires. Cette phase lente est suivie d'une phase d'aggravation rapide marquée par la présence au 1/3 des premières règles ou du premier rasage. Enfin, l'évolution de la scoliose se stabilise en fin de puberté avec l'acquisition de la maturité osseuse. Cette évolution dépend également de la localisation de la courbure. Une courbure dorsale scoliotique va évoluer précocement avec une perte de la cyphose dorsale rapide tandis que la perte de la lordose lombaire due à une courbure lombaire scoliotique va être plus tardive.

La surveillance de l'évolution de la scoliose est donc primordiale pour tout professionnel de santé et sera d'autant plus nécessaire durant la puberté. Cette évolutivité devra être évaluée avec des bilans cliniques et des radiographies plus ou moins régulières : cela dépendra du potentiel d'évolution en fonction de la maturité osseuse et de l'angulation initiale de la scoliose. Par principe, toute scoliose doit être considérée comme évolutive en premier lieu afin d'optimiser la réactivité de prise en charge (1).

Une scoliose sera confirmée « évolutive » si nous observons une aggravation de 5° sur 2 radiographies à 4 ou 6 mois d'intervalle. Une courbure supérieure à 30° est considérée d'emblée comme évolutive (2).

2.1.5 Traitements

Les traitements entrepris pour la SI traitent principalement la symptomatologie plutôt que l'étiologie de la scoliose et ils sont pluridisciplinaires. Toute scoliose évolutive est prise en charge et le choix du traitement dépend de l'angle de Cobb, du type de courbure, de sa localisation et du stade pubertaire. Le traitement peut être rééducatif seul, orthopédique (corset) associé à la rééducation ou chirurgical.

Traitement par kinésithérapie : Isolément, la kinésithérapie n'a pas fait la preuve de son efficacité sur l'évolution des courbures mais elle est systématique en première intention (2).

Les objectifs visés sont (2) :

- Entretenir les amplitudes articulaires vertébrales et costo vertébrales ;
- Renforcer les muscles érecteurs du rachis ;
- Entretenir la fonction respiratoire ;
- Améliorer la statique vertébrale (assouplissement, contrôle proprioceptif) ;
- Prévenir l'aggravation de la scoliose ;
- Sensibiliser le patient et son entourage par l'éducation thérapeutique.

Traitement orthopédique associé à un traitement kinésithérapique : L'objectif est d'empêcher l'évolution de la scoliose. Plusieurs types de corsets et de protocoles existent en fonction de chaque cas et des habitudes des équipes. Le corset est porté dans la majorité des cas jusqu'à la fin de la croissance. La kinésithérapie vise à surveiller la tolérance du corset, le respect du temps de port du corset, l'acceptabilité du corset, à renforcer la musculature du tronc sous corset et à encourager la pratique d'activité physique avec corset pour l'amélioration de la fonction musculaire, respiratoire et proprioceptive (2).

Traitement chirurgical : Il est réservé aux scolioses pour lesquelles le traitement orthopédique a échoué ou aux scolioses qui poursuivent leur évolution. L'objectif est de réduire et de fixer la déformation dans les trois plans de l'espace (2) (16).

2.2 Les différentes verticales et leurs tests

Les différentes verticales selon les référentiels de la verticalité sont les suivantes (17) (18) (19) :

- *Verticale gravitaire ou physique* dans l'espace géocentré.
- *Verticale Posturale* (ou comportementale, physiologique, biologique), dans l'espace égocentré. Elle est représentée par l'axe Z longitudinal qui passe de la tête jusqu'aux pieds du sujet perpendiculairement au plan corporel transversal.
- *Verticale Subjective* (VS) dans l'espace allocentré : c'est « l'estimation par l'individu de l'orientation de la verticale physique évaluée au travers de l'estimation de l'orientation d'une baguette ou de son corps à la verticale » (17).

L'estimation de la VS peut être réalisée selon différentes modalités perceptives :

- *Visuo-vestibulaire* par la Verticale Visuelle Subjective (VVS)
- *Somesthésique* par la Verticale Haptique Subjective (VHS)
- *Visuelle et somesthésique* par la Verticale Visuo-Haptique Subjective (VVHS)
- *Somesthésique* par la Verticale Posturale Subjective (VPS)

Pour connaître la perception de la verticale d'un individu donné, plusieurs tests spécifiques à chacune des verticales sont décrits ci dessous (tableau II). Les modalités initiales avant réalisation des tests sont les suivantes : le patient doit être dans le noir (sans repères de verticalité spatiale), dans une position naturelle avec la tête dans l'axe du tronc (17) (18).

Tableau II : Les différents tests de perception de la verticale

Tests	VVS	VHS	VVHS	VPS
Description	Ajustement d'une barre lumineuse par détermination visuelle de la verticale (<i>fig.2 en annexe 4</i>)	Ajustement tactilo-moteur d'une barre dans le noir généralement avec la main dominante (20) (<i>fig.3 en annexe 4</i>)	Modalité mixte entre la VVS et la VHS. Ajustement dans l'obscurité d'une barre lumineuse avec la main (<i>fig.4 en annexe 4</i>)	Patient immobilisé dans un dispositif incliné. Il estime la verticalité de son corps (17) (<i>fig.5 en annexe 4</i>)
Avantages	Facile à réaliser et peu onéreux. Déjà testé pour la SIA	Alternative à la VPS (21). Matériel spécifique	Utilisation de l'entrée sensorielle la plus fiable. Matériel spécifique	Déjà testé pour la SIA
Inconvénients	/	Non testé pour la SIA	Aucune norme et test méconnu (18). Non testé pour la SIA	Matériel spécifique très onéreux.

Seul le test de la VVS sera donc décrit précisément dans ce travail écrit car il est le seul réalisable en cabinet libéral.

2.3 Test de la VVS

A l'origine, ce test est utilisé pour déterminer la participation visuelle à l'élaboration de la verticale.

La VVS correspond à l'estimation visuelle par l'individu de la direction gravitaire. L'examineur projette ainsi une barre lumineuse inclinée sur un mur.

La position initiale d'inclinaison est fixe intra-étude mais peut être variable inter-étude avec par exemple $-15^{\circ}/+15^{\circ}$ ou $-30^{\circ}/+30^{\circ}$. L'examineur ou le patient verticalise ensuite progressivement via un joystick la barre sans la toucher (vitesse variable suivant les études). Enfin, le patient vocalise ou arrête de lui-même la progression de la barre quand elle atteint son estimation de la verticale gravitaire.

Chez des adultes sains, la VVS serait comprise entre $-2,5^\circ$ et $+2,5^\circ$ par rapport à la verticale gravitaire (20).

Ce test statique est dépendant de l'âge (étude avec une population d'adulte à sénior) mais indépendant du sexe, de la posture, de la prévalence manuelle ou encore de l'angle prééglé. Une influence au niveau du délai de maintien de la position initiale a tout de même été repérée. En effet, les performances sont moins bonnes si la position initiale s'attarde et si elle est proche de la verticale. Il est facilement reproductible en clinique, simple et peu onéreux (22). Cette modalité reste la plus perturbée dans 40 à 60% des cas par rapport aux autres tests de mesure pour l'Accident Vasculaire Cérébral (AVC) (17). Dans le cadre d'une SIA, la VVS est la plus testée mais sa pertinence n'est pas avérée.

La représentation de la VVS fait intervenir le circuit d'intégration des informations en provenance des otolithes jusqu'au cortex vestibulaire, d'intégration multisensorielle, impliqué dans la représentation des référentiels spatiaux. Les structures anatomiques concernées semblent être les suivantes : le thalamus, les aires corticales vestibulaires, le cortex insulaire, la jonction temporo-pariétale, la scissure intra-pariétale, la jonction temporo-occipitale et la jonction pariéto-occipitale. Cette modalité semble donc plutôt visuo-vestibulaire (17). Ce test simple semble être valable dans l'évaluation des désordres spatiaux lors de troubles neurologiques (22).

➤ Modalités statiques d'évaluation de la VVS

En principe, la VVS est testée en position stable et naturelle, sans repère spatial quel qu'il soit. Toutes les positions peuvent alors être possibles : debout, assis, en décubitus dorsal.

➤ Modalités dynamiques d'évaluation de la VVS

Ce test peut être complexifié en intégrant des perturbations sensorielles plus ou moins dynamiques (4) :

- D'origines visuelles : avec un cadre plus ou moins incliné (condition statique) ou encore une stimulation optocinétique en arrière de la projection de la barre (condition dynamique)
- D'origines somesthésiques : le patient serait sur un support instable (mousse)
- Possibilité d'associer ces différentes perturbations pour identifier le poids des informations sensorielles dans la perception de la verticale. Suivant les patients, cela peut ainsi orienter la rééducation.

2.4 Le « modèle interne de verticalité » et ses systèmes

Ce concept de « modèle interne de verticalité » a été suggéré vers 1980 par Mittelstaedt (23) puis est par la suite confirmé (6). Des mécanismes perceptifs (sensoriels et moteurs) et représentationnels cognitifs sont impliqués dans la construction de ce modèle interne.

2.4.1 Les systèmes sensoriels impliqués dans la perception de la verticale

La perception de la verticale est multifactorielle et résulte en partie de l'intégration des informations sensorielles perçues par les systèmes visuel, proprioceptif et vestibulaire (24) (6).

➤ Le système visuel

Le système visuel renseigne le système nerveux central par une multitude d'informations provenant de l'environnement.

Ces afférences proviennent des photorécepteurs rétiniens et rejoignent le lobe occipital par l'intermédiaire du nerf optique (25).

Cette vision des repères spatiaux fixes et mobiles informe sur la perception des référentiels verticaux. Le système visuel a un rôle essentiel dans la perception de la verticale (6) et donc dans le maintien de l'équilibre postural. Cependant, la vision n'est pas indispensable à l'équilibre (24). La possibilité de compensations, via les systèmes sensoriels intacts et leur intégration au niveau du système nerveux central, limite les répercussions sur le système moteur et le maintien de l'équilibre et de la posture (6).

➤ Le système proprioceptif

Ce système est compris dans la somesthésie, qui regroupe les informations extéroceptives (le chaud, le froid, la pression) et les informations proprioceptives que nous allons détailler. Ce système proprioceptif est « conscient » via la perception des différents segments corporels, leurs positions et leurs mouvements. Il est essentiel dans la construction du schéma corporel. Ce système est également « inconscient » par des ajustements posturaux de lutte antigravitaire (24).

Les informations proprioceptives, notamment pour la construction des référentiels verticaux, sont recueillies par divers capteurs : les mécanorécepteurs cutanés, les gravicepteurs internes (viscères etc.) et les capteurs du système locomoteur (ostéo-articulaires, musculaires, tendineux) (6). L'ensemble de ces capteurs permet l'adaptation posturale par l'équilibration lors de sollicitations statiques ou dynamiques.

➤ Le système vestibulaire

Ce système est sensible aux accélérations linéaires de la tête telles que la gravité, captées par les otolithes (sacculé pour la verticale et utricule pour l'horizontale), et angulaires, captées par les canaux semi-circulaires (latéral, postérieur et antérieur). Le vestibule assure la position stabilisée de la tête dans toutes les dimensions de l'espace grâce à ses récepteurs qui renseignent le Système Nerveux Central (SNC).

Du fait des propriétés du système vestibulaire, sa contribution dans l'élaboration de la perception du sens de la verticalité fut largement admise jusque dans les années 1990. Depuis, l'importance des autres systèmes sensoriels est reconnue (6).

2.4.2 Le système moteur impliqué dans la perception de la verticale

Afin de viser à une meilleure compréhension du système moteur, il est nécessaire d'introduire quelques notions :

➤ La posture

La posture est une attitude. C'est la « position que prend le corps spontanément et sans contrainte par rapport aux forces environnementales » (19). Sa construction dépend de mécanismes nerveux qui régulent les variations d'attitudes, intentionnelles (le mouvement) ou non, autour de la verticale gravitaire.

Cet ajustement postural est rendu possible par deux mécanismes (26) :

- *Le réflexe de réaction* : Du fait de la capacité à récupérer le contrôle postural.
- *Le réflexe d'anticipation* : C'est la possibilité de modifier le contrôle postural avant un mouvement potentiellement déstabilisant pour éviter l'instabilité.

La posture orthostatique permet l'alignement de l'axe longitudinal Z du corps sur la verticale gravitaire (4). Cet axe traverse le corps de haut en bas et est perpendiculaire au plan transversal.

Le contrôle de la posture participe donc à l'élaboration des représentations spatiales par une régulation du tonus (rôle des muscles posturaux), un contrôle de l'orientation antigravitaire et un contrôle de la stabilisation posturale. La recherche de l'équilibre est le facteur déterminant de l'organisation de la posture (27).

➤ Le contrôle de l'équilibre

L'équilibre est « l'état d'un corps, qui, soumis à diverses forces, reste au repos » (28). Le contrôle de l'équilibre s'organise alors sous les contraintes suivantes (27) :

- Internes (masses et géométrie corporelle)
- Externes (gravité, stabilité des appuis sur un support et perturbations éventuelles)

L'équilibre est stable lorsque la projection au sol du centre de masse peut être maintenue à l'intérieur du polygone de sustentation (délimité par les surfaces d'appui au sol) (26). Il sert à fournir une base stabilisée à l'action.

2.4.3 Le système cognitif impliqué dans la représentation de la verticale

Le « modèle interne de verticalité » interagit également avec les fonctions supérieures.

➤ La représentation spatiale corticale

Ce sont les référentiels de verticalité (allocentré visuel, égocentré et gravitaire géocentré) au sein du SNC (4). Ces référentiels sont soumis aux expériences sensori-motrices et aux contraintes environnementales (17).

Le lieu d'unification et d'intégration de ces trois référentiels pour le maintien de la posture se situerait probablement au niveau de la jonction temporo-pariétale et du cortex pariétal (sillon intrapariétal) (6) (29) (30).

➤ La conscience du corps dans l'espace

Les zones corticales de la représentation de la verticale et de la conscience du corps sont en partie liées : la conscience d'être dans l'espace implique la jonction temporo-pariétale et les zones corticales autour du sillon intrapariétal.

2.4.4 Intégration perceptive et représentationnelle de la verticalité

L'intégration cognitive au sein du SNC se fait par des mécanismes « bottom-up » (du bas vers le haut) en lien avec les systèmes moteurs et sensoriels perceptifs (6) :

- Processus de pondération centrale des informations sensorielles visuelles, proprioceptives et vestibulaires.
- Processus de pondération des efférences mises en jeux dans le contrôle dynamique de l'équilibre.

L'intégration de l'ensemble de ces informations gravitationnelles serait principalement concentrée le long des voies vestibulo-corticales au niveau des noyaux vestibulaires, du thalamus ainsi que dans les zones corticales de projection des afférences vestibulaires (29).

De plus, ce « modèle interne de verticalité » est modulé par les fonctions supérieures décrites précédemment. Deux mécanismes « top down » (du haut vers le bas) ont été mis en évidence (30) :

- Les images mentales peuvent influencer la perception de la verticale (rôle de la représentation spatiale corticale)
- La conscience de l'orientation corporelle peut moduler le sens de verticalité

Cela ouvre des perspectives intéressantes sur l'utilisation de l'imagerie mentale pour la rééducation du sens de la verticalité pathologique (6).

2.5 Troubles objectivés chez les adolescents avec SI

Selon l'étiopathogénie de De Sèze (3), l'adolescent ayant une SI présenterait des anomalies du système de maintien actif, avec modification du tonus postural qui serait asymétrique. Or ces anomalies sont en lien avec la présence de troubles du contrôle postural avérés chez ces adolescents avec SI (31) (32).

Les afférences sensorielles sont également dites perturbées chez ces adolescents. Plusieurs études le prouvent sur les trois systèmes : vestibulaire (5), visuel (33) (34) et somatosensoriel (35). De plus, l'intégration sensorielle est également considérée comme déficitaire chez ces patients (36) (37) (38) (39) (40). Comme le sens de la verticalité dépend de ces différents systèmes, le « modèle interne de verticalité » chez ces adolescents serait déficitaire et objectivé dans certaines études (4) (7) (9) (10).

Enfin, une étude de Bruyneel A-V *et al.* a mis en évidence un pas latéral plus petit du côté de la convexité de l'adolescent avec SI (41). Or la latéropulsion pourrait être une tentative d'aligner le corps avec une référence verticale interne perçue, à tort, inclinée par rapport à la vraie verticale (30).

Une hypothèse étiopathogénique a de ce fait été proposée (4). La SIA serait secondaire à une représentation erronée de la verticale : l'adolescent avec SI organiserait son équilibre à partir d'une référence spatiale faussée (41). Cela expliquerait peut-être que, du fait de ce référentiel égocentré décalé par rapport au référentiel gravitaire, l'adolescent avec SI présente ces différents troubles.

En effet, il réorienterait continuellement son axe corporel longitudinal Z par défaut d'ajustement postural du tronc sur la verticale gravitaire (en période de croissance). Les troubles sensoriels mis en évidence viendraient alors réduire les compensations possibles ou seraient mal intégrés au niveau du SNC.

3 Etat actuel de la littérature

3.1 Objectif

Cette recherche a pour objectif de déterminer l'état de la littérature sur les différents tests et modalités de la verticale subjective étudiés dans le cadre d'une SIA afin de peut-être faire émerger un test pertinent mais surtout réalisable pour une prise en charge libérale.

3.2 Contexte de la recherche

Peu de publications traitent de la mesure de la Verticale Subjective (VS) chez des adolescents ayant une scoliose idiopathique. Cette recherche s'est donc faite sur plusieurs mois en début de 3^e année. Dans un premier temps, il était prévu de ne garder que les articles abordant la VVS dans le cadre d'une SIA. Ayant peu d'articles, cette recherche s'est élargie aux autres tests de perception de la VS, excepté le test le moins réalisable en libéral : la VPS.

De ce fait, la recherche littéraire s'est faite avec des bases de données axées sur la santé plutôt que sur la kinésithérapie et avec le critère d'éligibilité suivant : des études traitant de la perception de la verticale chez les adolescents ayant une SI.

3.3 Stratégie de recherche documentaire

- Les différents mots-clés utilisés sont :

Concernant les moteurs de recherche francophones : *scoliose, scoliose idiopathique de l'adolescent, verticale subjective, perception, orientation spatiale, verticalité*

Concernant les moteurs de recherche anglo-saxons : *scoliosis, adolescent idiopathic scoliosis, subjective verticality, perception, vertical, spatial orientation*.

- Les équations de recherches en fonction des bases de données sont :
 - Pour Pubmed : (scoliosis OR "idiopathic scoliosis" OR "adolescent idiopathic scoliosis" OR AIS) AND (perception AND vertical), donnant 11 résultats.
 - Pour ScienceDirect : (scoliosis OR "adolescent idiopathic scoliosis") AND ((subjective AND vertical AND perception AND verticality) OR ("spatial orientation" AND perception AND vertical)), donnant 37 résultats.

Aucun article concernant la VS et la SIA n'a été trouvé sur les moteurs de recherches suivants : Kinedoc, PEDRO, HAS, BDSP, Réédoc, Refdoc, Google Scholar et EMconsulte.

De plus, les auteurs de certaines études ont été contactés afin de récolter certaines informations non disponibles telles que la méthode d'évaluation de la VVS ou simplement l'obtention de l'étude. Un contact a pu être établi avec M. LE BERRE, interne en médecine et effectuant sa thèse sur ce sujet, et le docteur CATANZARITI.

Au total, 48 articles ont été trouvés grâce aux moteurs de recherche.

3.4 Synthèse des résultats

- Après avoir ôté les articles en doublon, il restait **47 articles**.
- Une deuxième sélection s'est effectuée en lisant les titres et les résumés de chacun des articles afin de s'assurer de leur pertinence par rapport à la problématique du travail écrit. Cela prend en compte les critères d'exclusion suivants : articles ne regroupant pas les notions de perception de la verticale et de SIA ou n'abordant que les notions de VPS. Le nombre d'articles gardés est ainsi passé de $N = 47$ à **$N = 5$** .

Au total, cet état de la littérature s'appuiera sur **$N = 5$** articles (*organigramme en annexe 5*)

3.4.1 Tableau III : Caractéristiques des articles sélectionnés

Titre	a. Subjective visual vertical in patients with idiopathic scoliosis	b. Spatial orientation and postural regulation in patients with idiopathic scoliosis	c. Perception of vertical and horizontal orientation in children with scoliosis	d. Does adolescent idiopathic scoliosis relate to vestibular disorders? A systematic review	e. Subjective Visual Vertical and Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS)
Auteurs	Cakrt O, Slabý K, Viktorinová L, Kolář P, Jeřábek J	Krödel A, Straube A, Angerer M, Fritsch K	Cheung J, Sluiter WJ, Veldhuizen AG, Cool JC, Van Horn JR	Catanzariti J-F, Agnani O, Guyot M-A, Wlodyka-Demaille S, Khenioui H, Donze C	Catanzariti J-F, Le Berre M, Coget M, Guyot M, Agnani O, Donzé C
Données relatives à la publication	J Vestib Res. 2011 Avec comité de lecture	Z Orthop Ihre Grenzgeb. Juin 1997	J Orthop Res. Mai 2002. Avec comité de lecture	Annals of Physical and Rehabilitation Medicine. Août 2014 Avec comité de lecture	Annals of Physical and Rehabilitation Medicine. Septembre 2015
Hypothèse	Les patients atteints de SI pourraient avoir un déséquilibre au niveau des voies vestibulaires centrales ou périphériques. Du fait qu'un rôle important a été attribué à l'intégration de l'information vestibulaire graviceptive dans la perception de l'espace	D'après la littérature, une perturbation principale neuro-physiologique de la régulation posturale entrainerait des déformations ultérieures de la colonne vertébrale telles que la scoliose idiopathique	Les adolescents avec SI seraient plus susceptibles d'avoir une grande déviation pour ce simple test neuro-physiologique que des patients sains ou atteints de scoliose congénitale du fait de leur perception interne de posture perturbée.	Une atteinte vestibulaire, unilatérale, isolée, induirait, via les faisceaux vestibulo-spinaux, une asymétrie du tonus de la musculature paravertébrale qui, en période de croissance vertébrale, pourrait aboutir à une déformation scoliothique	Les patients avec SI ont une perturbation de l'intégration centrale de l'ensemble des afférences sensorielles engendrant une perturbation de la VS
Type d'article	Etude de cas-témoin	Etude de cas-témoin	Etude de cas-témoin	Revue systématique	Etude de cas-témoin
Niveau de preuve	III	III	III	I	III

➤ Population :

Au niveau de la population intégrée aux études, les critères d'inclusion et d'exclusion varient.

Pour l'article de **Cakrt O et al.** (7), 23 adolescents avec une SI diagnostiquée et 23 sujets témoins sont intégrés à l'étude. L'âge et le sexe moyen des 2 groupes sont identiques. L'angle de Cobb est de $21,4^{\circ} \pm 8,8^{\circ}$. Les déformations scoliotiques des enfants de l'étude sont variées : 7 convexités thoraciques Droites (D) et 2 Gauches (G), 5 thoraco-lombaires D et 9 G. Les critères d'exclusion éliminent tous les adolescents avec une SI ayant subi une chirurgie ou ayant des troubles neurologiques. Les patients sains ne devaient pas avoir de problèmes orthopédiques ou neurologiques.

Pour l'article de **Krödel A et al.** (8), seul l'accès au résumé de cette publication allemande est disponible gratuitement et en anglais. On sait que seulement 28 patients ont participé à l'étude sans savoir le nombre de sujets avec SI ni celui de sujets sains. Les auteurs n'ont pas pu être contactés pour avoir plus d'informations.

L'article de **Cheung J et al.** (9) a intégré 89 enfants avec SI, 50 enfants atteints de scoliose congénitale (SC) et 45 sujets témoins. L'âge moyen est de 15 ans pour le groupe avec SI tandis qu'il est de 12 ans pour le groupe témoin. Nous constatons autant de filles que de garçons dans le groupe SC alors que les deux autres groupes présentent environ 20% de garçons. Enfin, pour le groupe avec SI, l'angle de Cobb moyen est de 30° avec 20% de convexités gauches vs droites. Pour le groupe avec SC, l'angle moyen est de 23° avec 10% de convexités gauches versus droites. La localisation des déformations n'est pas précisée. Les patients ayant des troubles neurologiques, physiques autres que la scoliose pour les groupes avec SI et SC, ou des antécédents du rachis pour le groupe témoin ont été exclus. Tous les sujets avaient les yeux corrigés à la normale physiologique et aucun n'était familiarisé avec le contexte théorique de l'étude.

Enfin, l'article de **Catanzariti J-F et al.** (10) présente 62 SIA Dorsales Droites (DD), 32 SIA Lombaires Gauches (LG) et 30 sujets contrôles. Il y avait plus de filles (80%) chez les patients scoliotiques mais un âge moyen identique. Les sujets sains ont une moyenne d'âge comparable et autant de filles que de garçons. L'angle de Cobb moyen est plus élevé chez les adolescents ayant une SI DD (36°) qu'une SI LG (30°). En ce qui concerne les critères d'inclusion, tous les sujets ont été recrutés lors de consultations spécialisées du rachis pédiatrique avec un diagnostic avéré pour la SIA. Les patients ayant subi une chirurgie du rachis ou ayant des troubles neurologiques ont été exclus. Les sujets témoins, recrutés également en consultation, pouvaient présenter des pathologies orthopédiques autres telles qu'une cyphose (étude pilote).

➤ Tableau IV : Méthodologie

a.	b.	c.	d.	e.
Mesure de la VVS statique : Avec seau en plastique opaque. Patient debout, tête non fixée : 10 essais (5 sens horaires et 5 antihoraires avec une position de départ aléatoire). C'est l'examineur qui tourne doucement le seau et le patient dit "stop" lorsqu'il pense que la ligne au fond du seau est verticale. Pour éviter tout biais inter-examineurs, un seul examinateur a fait passer les tests. La lecture de la déviation se fait avec un rapporteur fixé côté examinateur au fond du seau.	Mesure de la VVS selon plusieurs procédures. Aucune information en plus n'est donnée sur la méthodologie de ces différentes procédures	Mesure de la VVS statique : Patient debout, tête non fixée et dans le noir à 5m face à la ligne qu'il projette lui-même et qu'il ajuste. Quand il juge que sa verticale est bonne et qu'il s'est stabilisé, l'examineur enregistre. 3 mesures verticales et 3 horizontales par sujet.	Une revue systématique avec comité de lecture. Recherche par Pubmed-NCBI, de 1966 à 2013. Mots clés : scoliosis avec respectivement vestibular-labyrinthine-postural control. Pour le système otolithique, il n'a été conservé que les études sur la VVS (adolescents avec SI vs témoin de 10 à 18 ans).	Mesure de la VVS dynamique et statique avec synapsis. Port d'un masque pour éliminer les repères visuels. Droite lumineuse blanche inclinée à 45° en position initiale. Sujet debout pieds nus à 1,55m de la projection. Familiarisation avec 2 essais en VVS dynamique : 4 mesures VVS dynamique sens horaire en alternant G/D et 40°/s puis 4 antihoraires idem et 4 statiques en alternant D/G

3.4.2 Résultats

Cakrt O et al. : Cette étude soutient, avec des résultats significatifs, que la perception de la verticale visuelle est altérée dans la SI. Les mesures obtenues pour les adolescents sains sont sensiblement les mêmes que celles retrouvées pour des adultes sains.

Krödel A et al. : Aucune observation neuro-physiologique pathologique n'a été relevée chez les patients ayant une SI versus témoins sains.

Cheung J et al. : Aucune corrélation entre âge/sexe/déformation/gravité n'a été trouvée entre les groupes. Les plus jeunes avaient majoritairement de plus fortes déviations.

Par contre, chez les adolescents avec SI et SC, l'angle rapporté entre la verticale et l'horizontale retrouvée était plus important si la déformation scoliotique était importante.

Catanzariti J-F et al. 2014 : Les trois études précédentes ont été incluses. Ils en concluent que ces études ne sont pas en faveur d'une asymétrie otolithique. Mais modifier les informations sensorielles disponibles pour étudier la verticale serait exploitable (plan stable ou sur mousse, assis, en décubitus, en situation visuelle statique par fond visuel stable ou dynamique via l'optocinétique par exemple) ainsi que de coupler la VVS à la VPS. Trop peu d'études se sont intéressées à la mesure de la verticale chez les adolescents avec SI.

Catanzariti J-F et al. 2015 : Des normes pour adolescents ont pu être calculées pour la VVS : seuil de $-2,5^\circ$ à $+2,5^\circ$ pour la VVS statique et de -4° à $+4^\circ$ en condition dynamique (perturbation visuelle horaire ou antihoraire d'arrière plan). Cela se rapproche des normes de l'adulte sain. Les mesures de la verticale en statique soutiennent l'hypothèse de départ avec une différence non significative des SI versus témoin. En dynamique, aucune différence entre les SI DD et LG n'est significative. En comparant les SI DD versus témoins, une différence significative est observée pour la VVS antihoraire inclinée à gauche et pour la VVS horaire inclinée à droite. Seule une différence significative, retrouvée pour la VVS antihoraire inclinée à gauche, est observée dans la comparaison des SI LG versus témoin.

3.4.3 Analyse des résultats et biais intra-études

En s'appuyant sur la revue de littérature de **Catanzariti J-F et al. 2014**, les trois études les plus anciennes ne permettent pas d'établir un trouble de la VVS statique chez les adolescents avec SI versus témoins. Seule l'étude de **Cakrt O et al.** confirme ce lien. Or ces résultats sont difficilement exploitables puisqu'ils sont notamment biaisés par des populations limitées (< 30 patients) pour **Cakrt O et al.** et **Krödel A et al.**

Des inégalités sont observées entre les différents groupes concernant l'âge, l'angle de Cobb et le sexe pour **Cheung J et al.** Aucune information n'est transmise dans le résumé de l'article de **Krödel A et al.** Enfin, les méthodologies diffèrent fortement entre chacune de ces études. Par exemple, l'article de **Cakrt O et al.** présente un test réalisé avec un seau et le patient qui indique verbalement l'arrêt quand il atteint sa verticale. Dans l'article de **Cheung J et al.** une barre lumineuse est projetée et contrôlée par le patient lui-même jusqu'à ce qu'il indique sa verticale. Dans **Catanzariti J-F et al. 2015**, c'est l'examineur qui contrôle la barre lumineuse et le patient verbalise l'arrêt à sa verticale. Aucune information sur la méthodologie n'est donnée pour l'étude de **Krödel A et al.**

En ce qui concerne les patients et leurs déformations scoliotiques, seul l'article de **Catanzariti J-F et al. 2015** s'intéresse aux différences pouvant être retrouvées suivant la convexité et la localisation de la scoliose. A noter cependant que toutes ces études intègrent des déformations à convexité unique et donc des SI non équilibrées.

Au niveau de l'évaluation de la VVS, les trois articles les plus anciens ne testent que la VVS statique. Or les résultats ne sont majoritairement pas significatifs, ce qui est confirmé par l'article de **Catanzariti J-F et al. 2015** qui oppose la VVS statique à la VVS dynamique par perturbation visuelle optocinétique.

Cet article de **Catanzariti J-F et al. 2015** est le plus complet concernant l'évaluation des troubles de la perception de la verticale chez les adolescents avec SI. Ces résultats proposent une plus grande incertitude dans les extrêmes des modalités du test dynamique surtout pour les SI Dorsales Droites (DD) avec une perturbation qui apparaît également du côté inverse à l'inclinaison corporelle. Il apparaît donc que les adolescents avec SI DD semblent avoir une perturbation plus importante du sens de la verticalité que les patients avec SI Lombaires Gauches (LG). Mais cela reste discutable car les patients LG étaient plus jeunes (donc plus immatures) alors que les adolescents avec SI DD avaient un angle de Cobb plus important (ce qui aurait tendance à majorer les troubles (31)).

Cette étude de 2015 étant une étude pilote, ses résultats sont critiquables avec notamment une population de groupe témoin recrutée en consultation pour le rachis et pouvant avoir des déformations de type cyphotique. De plus, les groupes témoins et scoliotiques ne sont pas comparables au niveau du sexe avec plus de garçons dans le groupe témoin : cela peut poser problème pour l'exploitation de la VVS dynamique. En effet, il a été prouvé qu'aucune différence significative n'était observée pour le sexe en condition statique (22) mais aucune étude n'a fait l'expérience en dynamique. Or les modifications brusques du schéma corporel à l'adolescence sont plus tardives chez le garçon, ce qui peut altérer sa proprioception par rapport à une fille du même âge.

La seule révélation qui ressort de cette étude de 2015 est donc que les patients avec SIA présentent une plus grande incertitude de la représentation de la verticale subjective par rapport à des sujets sains en condition de VVS dynamique. Cette incertitude est en faveur d'un trouble de l'intégration de ces informations visuelles qui perturberait la perception de la verticale. Une étude à plus grande échelle avec des sujets comparables (sexe, âge) sera indispensable pour en déduire des résultats exploitables concernant les différents types de déformations scoliotiques et les troubles qui en découlent.

Dans l'ensemble, ces études cas-témoins sont difficiles à comparer. La méthodologie est différente et la population diffère car elle est incluse et étudiée sous divers critères. Ces études intègrent notamment pour la plupart des adolescents ayant une SI avec une déformation du rachis en simple courbure. Les scolioses avec double courbure ne sont visiblement pas intégrées sûrement pour des raisons de pratique (homogénéité de la population et fréquence de la déformation). En effet, les scolioses avec déformation thoracique droite, par exemple, sont beaucoup plus fréquentes. Mais la question de l'impact des troubles de la perception de la verticale entre des scolioses à simple ou double courbure, équilibrées ou non, est tout à fait légitime.

3.4.4 Analyse de cet état de la littérature

Le niveau de preuve de ces études est de III (*tableaux des niveaux d'évidence des recommandations d'après la SOSORT en annexe 1*) car la plupart sont des études cas-témoin exceptée la revue de littérature de niveau de preuve I. La qualité de cet état de la littérature est donc moyenne du fait du peu d'études sur le sujet. De plus, les deux études les plus récentes de cet état de la littérature ont été en partie écrites par les mêmes auteurs, ce qui ne permet pas d'apporter différents points de vue sur le sujet malgré le fait que l'abord reste objectif et déclaré sans conflit d'intérêt. C'est d'ailleurs dans ces deux seules études que les auteurs se sont prononcés vis-à-vis des conflits d'intérêt.

Nous noterons également l'absence d'études sur la VHS et la VVHS dans le cadre d'une SIA. Il faut avouer que la pratique de l'évaluation de la VHS ou de la VVHS en libéral reste très compliquée et difficilement réalisable. La VPS est encore moins envisageable. Il reste donc à trouver des alternatives au test de la VVS par ses modalités. Notamment, le poids des informations proprioceptives pour la perception de la verticale dans le cadre d'une SIA n'a encore jamais été testé. Evaluer son impact par comparaison à l'importance des troubles entre des conditions stables ou instables (ex : mousse) s'avère pertinent. De futures études devraient s'y intéresser.

3.5 Conclusion sur l'état actuel de la littérature

Ces études soutiennent l'hypothèse selon laquelle les adolescents avec SI présentent de plus grandes difficultés pour la perception de la verticale, via la VVS, en condition dynamique plutôt que statique par rapport à des adolescents sains. Le tout peut être lié à une représentation erronée de la verticale par des difficultés d'intégration et d'interaction du « modèle interne de verticalité ». Mais ces études restent limitées car seule la plus récente va dans ce sens et toutes les modalités existantes pour la VVS n'ont pas été testées.

De plus, les populations étudiées sur ces différentes études étaient peu comparables et variées : cela n'était pas représentatif de l'ensemble des adolescents ayant une SI. Il serait donc particulièrement intéressant que des études soient réalisées sur les modalités de conflit sensoriel et en dynamique pour la VVS avec des sujets comparables (âge, sexe, angle de Cobb, nombre de courbures et leur localisation). Cela permettrait de juger l'importance des troubles perceptifs, en fonction de la modalité choisie. Il faudrait également, dans un second temps, essayer d'élargir ces résultats pour tous les types de SIA avec l'exemple des scolioses à double courbure, équilibrées ou non.

3.6 Elargissement de cet état de la littérature

Pour finir, un questionnement sur les bilans utilisés pour l'objectivation des troubles proprioceptifs chez les adolescents avec SI en libéral était nécessaire. En effet, les troubles de l'équilibre retrouvés seraient intimement liés aux troubles de la perception de la verticale via le « modèle interne de verticalité » par la proprioception.

Dans un premier temps, nous avons étudié une étude pilote (11), soutenue par les auteurs de l'article de Catanzariti J-F *et al.* 2015 (10). Ils ont évalué la proprioception statique par le test de **Romberg sensibilisé** et l'**appui unipodal** puis la proprioception dynamique par le test de **Fukuda-Unterberger**. Ces tests seront décrits dans la partie suivante. Seul le test de Fukuda s'est retrouvé perturbé pour les adolescents avec SI versus sujets témoins. Ce test de proprioception dynamique est également retrouvé dans la fiche bilan du Groupe Kinésithérapique de Travail sur la Scoliose et le rachis (GKTS). Dans un second temps, un test d'asymétrie posturale de proprioception statique nous a interpellé dans un mémoire de master d'un kinésithérapeute qui s'est interrogé sur la rééducation du hors-aplomb gravitaire de l'adolescent avec scoliose (12). Il s'agit du test de **double pesée**. Il est probablement significatif pour les adolescents ayant une SI du fait des translations latérales que l'on peut retrouver en morphostatique, à l'aide d'un fil à plomb, chez certains adolescents. Cette translation, induisant une asymétrie gravitaire, est peut-être en lien avec l'hypothèse d'une représentation faussée de la verticale et l'importance des troubles de la perception de la verticale.

Afin de regrouper et confronter les différents tests (VVS, Romberg sensibilisé, appui unipodal, double pesée et Fukuda), il était intéressant de mettre en pratique certains de ces tests sur un adolescent ayant une SI. Certains protocoles ont été repris des différentes études ci-dessus. Le test de la VVS a été réalisé en condition statique pour des raisons pratiques.

4 Étude illustrative

4.1 Présentation du patient

Le patient inclus a 13 ans et nous l'appellerons Léo afin de préserver son anonymat. Il présente une scoliose dorso-lombaire droite diagnostiquée fin 2014 (12 ans) avec un angle de Cobb à 15°. En juin 2015, sa scoliose n'était plus que de 7°.

Il suit une rééducation depuis le diagnostic. Ce patient est droitier avec un pied d'appel droit. Il ne présente aucun antécédent orthopédique ou neurologique et pratique une activité physique régulière (ski, rugby et tennis en compétition). A ce jour, aucune preuve scientifique n'a établi de lien entre les sports asymétriques et la scoliose (1). Les critères d'inclusion se sont fait après analyse des patients que nous avons testés en libéral. Les critères principaux étant une véritable SIA en fonction de l'âge, de la déformation dans les trois plans de l'espace et d'une étiologie idiopathique.

4.2 Présentation des tests

4.2.1 Le test de la VVS

Ce test a été réalisé dans une pièce fermée et dans le noir. Le patient était placé à 3m du mur et sous le rétroprojecteur en fonction d'un boîtier d'étalonnage spatial préréglé sur les projections au mur. De ce fait, la position initiale du patient et le matériel étaient parfaitement alignés. Une fois le patient installé, l'examineur projette une barre inclinée à 30° sur le mur, puis redresse cette barre à une vitesse de 2°/sec jusqu'à ce que le patient énonce « stop » quand il estime que la verticale est atteinte. 10 mesures sont effectuées aléatoirement avec 5 positions initiales à droite (convention 30°) et 5 à gauche (-30°).

4.2.2 Le Romberg sensibilisé

Il permet de tester la voie vestibulo-spinale avec activation de la proprioception statique. Ce test consiste à positionner les pieds en tandem : pieds alignés l'un devant l'autre. Le patient lève les deux bras en flexion à l'horizontale et ferme les yeux. Le temps de maintien en secondes est relevé et ce test s'effectue d'abord avec le pied droit devant puis avec le pied gauche. Tout mouvement du pied provoque la fin du test et le chronomètre est arrêté.

Le temps de maintien maximal considéré est théoriquement de 30 secondes. La norme pour un adolescent serait de 24,1 +/-8,4s pied droit devant et 24,6 +/-8,5s pied gauche devant (11).

4.2.3 L'appui unipodal

Il permet de tester la voie vestibulo-spinale avec activation de la proprioception statique. Il se réalise yeux fermés en appui sur un membre. Les bras sont libres, la hanche controlatérale doit être en position neutre et le genou est fléchi à 90°. Les deux membres inférieurs ne doivent pas se toucher. Le patient commence en unipodal sur le pied droit puis sur le pied gauche. La norme pour un adolescent serait de 20 +/-9,6sec en monopodal droit et de 21,2 +/-9,1sec en monopodal gauche (11). Tout mouvement de pied rend ces tests statiques positifs et le chronomètre est arrêté. Ils sont réalisés une fois chacun excepté si le temps est inférieur à 15 sec : le meilleur des deux essais est retenu. Le temps maximal est théoriquement de 30sec.

4.2.4 Le test de double pesée

Ce test est réalisé avec deux balances identiques. Le patient est en appui bipodal avec un pied sur chaque balance et regarde droit devant lui. Il adopte une attitude naturelle et l'idéal serait en théorie que 50% du poids du corps soit atteint sur chaque balance. Cependant aucune norme n'est retrouvée pour des adolescents avec SI. Ce test est « indicatif » d'une asymétrie, en fonction de la répartition du poids du corps sur chacune des balances, et du ressenti proprioceptif du patient (12).

4.2.5 Le test de Fukuda-Unterberger

Il permet de tester la voie vestibulo-spinale avec activation de la proprioception dynamique en plus de la proprioception statique.

Cette épreuve consiste à piétiner sur place avec les yeux fermés. Le patient réalise ainsi 50 pas en fléchissant les hanches d'au moins 45° avec les bras en flexion à l'horizontale, index joints. Des repères sont mis au sol derrière le talon et l'axe des pieds afin d'en déduire un angle initial. A la fin des 50 pas, l'orientation des pieds est relevée afin de comparer l'angle final et l'angle initial. Cette angulation a été rapportée à l'aide d'un rapporteur et d'une règle. La distance parcourue lors du test est également retenue avec un mètre ruban entre le marquage initial à l'arrière du talon et le marquage final. La norme pour un adolescent serait de 31,2 +/-22,7cm pour la distance et de 13,1 +/-14,5° pour la déviation (11).

4.3 Résultats des tests de Léo

Tableau V : Résultat du test de la VVS

	VVS statique avec départ incliné à gauche	VVS statique avec départ incliné à droite
Moyenne +/- écart-type	-1,05 +/-1,41	1,45 +/-2,24

Tableau VI : Résultat des tests de Romberg sensibilisé, test unipodal et de double pesée

Test de Romberg sensibilisé		Test unipodal		Test de double pesée	
gauche devant	droit devant	pied gauche	pied droit	Poids pied gauche	Poids pied droit
24,12 s	42,15 s	14,69 s	9,95 s	54%	46%

Tableau VII : Résultat du test de Fukuda-Unterberger

Le test de Fukuda-Unterberger		
Déviation angulaire	Distance Parcourue	Translation latérale
63° rotation droite	77,3 cm	droite

4.4 Analyse des résultats

➤ Au niveau du test de perception de la verticale

Le test de la VVS en condition statique n'a révélé aucun trouble chez Léo par rapport aux normes retrouvées chez des adolescents sains (-2,5° à +2,5°). Ces résultats sont en accord avec les études retrouvées dans l'état actuel de la littérature ci-dessus.

➤ Au niveau des tests de proprioception statique

Pour le test de **Romberg sensibilisé**, Léo a tenu plus longtemps avec son pied droit devant qu'avec son pied gauche. Ces performances restent dans les normes retrouvées chez un adolescent ayant une SI dorsale droite dans l'étude. Or ces normes, sur une population plus importante, ne présentent visiblement aucune significativité par rapport au temps d'appui tenu et les déformations scoliotiques, ainsi que par rapport à des adolescents sains (6). La même conclusion est retrouvée pour le **test d'appui unipodal** alors que Léo a réalisé un appui monopodal gauche plus long qu'un appui monopodal droit.

Léo présente au **test de double pesée** un déport du poids sur son pied gauche. Ici, nous constatons que Léo est en surcharge du côté de sa concavité et en décharge du côté de sa convexité.

Or d'après l'hypothèse selon laquelle l'équilibre du patient scoliotique s'organiserait et se stabiliserait autour d'une référence faussée, et selon sa déformation dorso-lombaire droite, Léo devrait être en surcharge du côté de sa convexité et en décharge du côté de sa concavité (41). Ce résultat clinique chez Léo est cependant retrouvé dans le mémoire réalisé par Vanaverbecq A. (12) : le poids s'est reporté du côté concave chez ses 4 sujets. Ces observations pratiques ne sont donc pas en accord avec une représentation faussée de la verticale du côté de la convexité. Peut-être que ces patients compensent fortement leur posture lors du test afin de corriger leur hors-aplomb gravitaire, avec un défaut de calibrage.

➤ Au niveau du test dynamique de proprioception

En ce qui concerne le **test de Fukuda**, la distance observée est plus importante (77,3cm) que la distance moyenne du groupe contrôle de l'étude. L'angle de déviation est également plus important (63°). Nous pouvons en conclure que pour Léo, ce test de la voie vestibulo-spinale dynamique est positif et représentatif des troubles retrouvés dans l'étude de 2015 avec des SI dorsales droites.

A noter cependant que Léo a réalisé une rotation droite avec une translation droite durant le test. Or il semblerait que les comportements directionnels ne soient pas significatifs par rapport à la convexité (42). Pourtant, une étude de 2008 a découvert, lors de la marche, une augmentation systématique des paramètres spatiotemporaux lorsque le pas est initié par le membre du côté concave (43). De plus, en reprenant l'analyse des résultats de l'étude (11), ils auraient constaté une absence de corrélation entre l'angle de Cobb et l'importance de la déviation à l'épreuve de Fukuda. C'est le cas avec Léo puisque son angle de Cobb est faible et que son épreuve de Fukuda est particulièrement perturbée. Les troubles dynamiques retrouvés pourraient alors être à l'origine des déformations scoliotiques ; cette observation serait plus en faveur de la cause de la SIA que de la conséquence.

Ce test permet vraiment d'analyser les systèmes vestibulaires et somesthésiques en shuntant les informations visuelles. Peut-être serait-il intéressant de réaliser sur de prochaines études des tests de Fukuda sur tapis afin de tester l'impact d'une perturbation somesthésique lors des piétinements chez des adolescents avec SI. Cela devrait encore plus augmenter l'écart des perturbations entre des sujets sains et des adolescents avec SI.

Il est supposé que le poids des informations proprioceptives est majeur pour la construction de notre « modèle interne de verticalité » (30).

➤ Tableau VIII : Récapitulatif de l'analyse des résultats de Léo

Perception de la verticale	Proprioception statique			Proprioception dynamique
VVS	La double pesée	Romberg sensibilisé	Appui unipodal	Fukuda
Non perturbée	Surcharge côté concave Non significative	D > G Non significatif	G > D Non significatif	Test positif

Ces résultats sont en accord avec les différents articles qui ont inspiré cette étude illustrative.

➤ Les limites de cette étude illustrative

Les limites de cette étude s'inscrivent dans le fait que les résultats de Léo ont été comparés avec les seules normes à disposition. Ce sont celles de l'étude pilote avec des SIA dorsales droites d'angle de Cobb minimum de 15°, alors que Léo a une scoliose à convexité dorso-lombaire droite de 7°.

De plus, trouver un patient pour cette étude n'a pas été facile. Les adolescents pris en charge durant le stage qui a permis la réalisation de cette étude illustrative avaient des attitudes scoliotiques ou encore des critères pouvant mettre en doute une étiologie idiopathique. Seul Léo correspondait à tous les critères malgré le fait que son angle de Cobb soit faible et que cela remette en cause le diagnostic de scoliose (1).

4.5 Conclusion de l'étude

Ces tests réalisés sur Léo mettent toutefois en évidence une absence de perturbation de la perception de la verticale via la VVS statique, des résultats non significatifs pour la proprioception statique et une altération des voies de la proprioception dynamique avec shunt des informations visuelles. Ces troubles pourraient venir directement du cortex pariétal, au niveau des zones d'intégration de ces informations sensorielles dynamiques. En effet, les zones d'intégration corticale des informations proprioceptives statiques et dynamiques sont différentes (44).

Si tel est le cas, ces résultats pourraient être en faveur d'une immaturité de ces zones corticales d'intégration, qui engendrent ces troubles du contrôle postural. Il faudrait bien sûr envisager de faire une analyse longitudinale à plus grande échelle sur ces tests en combinant différentes déformations scoliotiques et les comparer à des adolescents non-atteints de scoliose. Cela permettrait de valider, ou pas, ces hypothèses.

5 Discussion

Dans cette discussion, nous aborderons les spécificités de l'adolescent et ses difficultés d'adaptation posturale, les spécificités de l'adolescent avec SI et ses difficultés sensorielles et les atteintes des différentes structures, chez tout patient, pouvant engendrer ces troubles de la perception de la verticale. Enfin, nous verrons les perspectives de rééducation que cette hypothèse de « représentation erronée de la verticale » en condition de conflit sensoriel ou en dynamique suggère.

➤ Spécificités de l'adolescent et de ses difficultés d'adaptation posturale

D'après Assaiante C. et al. (45), l'adolescence est une période transitoire sur le plan des troubles de l'équilibre. Cela implique que chaque étude réalisée sur ce sujet doit obligatoirement intégrer des sujets sains du même âge pour que les données soient exploitables. En effet, vers 13-14 ans, une étape charnière dans la gestion de la posture et de la proprioception se joue. Elle intervient dans la maîtrise définitive du référentiel postural. Ce processus de développement comprend toutes les dimensions locomotrices et posturales telles que le tonus, la musculature, l'attention cognitive nécessaire au contrôle de la posture, l'intégration multisensorielle et la réponse adéquate qui en découle : l'équilibration. Cette automatisisation comportementale demande alors un coût attentionnel qui peut mettre l'adolescent en position d'échec et le perturber dans des situations de double tâche. Cette constatation est d'autant plus importante du fait que la croissance ne se fait pas de manière linéaire.

➤ Spécificités de l'adolescent ayant une SI et de ses difficultés sensorielles

Ils semblent éprouver encore plus de difficultés à gérer l'intégration des systèmes du « modèle interne de verticalité » par rapport à des adolescents sains. Différentes études renforcent l'hypothèse selon laquelle leur intégration sensorielle lors de « conflits d'afférences » serait déficitaire.

Une première étude de 2014 retrouve des troubles lors de phénomènes de conflits sensoriels chez des adolescents avec SI. Cette analyse sur des filles rapporte qu'elles auraient des difficultés à déterminer la fiabilité d'un système sensoriel par rapport à un autre contrairement à des adolescentes saines. Cela suggère donc bien que leur processus d'intégration sensorielle semble différent et témoigne probablement d'une déficience de leur SNC (40).

Une autre étude de 2015 suggère également ces difficultés sensorielles lors de situation de conflit par un questionnaire. Ce dernier, par une méthode non invasive et à faible coût, a révélé des résultats étonnants : les adolescents avec SI ont déclaré une susceptibilité accrue au mal des transports (situation qui met les systèmes vestibulaire et visuel en conflit) par rapport à des adolescents sains (46).

➤ Atteintes structurelles à l'origine de troubles de la perception de la verticale

D'après Pérennou D. (27), les troubles perceptifs de la verticale peuvent être induits par différentes atteintes au niveau du système nerveux. Les perturbations de la proprioception dynamique, d'intégration ou encore lors de conflit des patients avec SIA pourraient être dues à une de ces atteintes ou immaturité des systèmes ci-dessous :

- Une atteinte unilatérale du tronc cérébral ou vestibulaire périphérique : cela entraînerait des troubles de l'orientation liés à une asymétrie de tonus.
- Une atteinte hémisphérique unilatérale (cortex pariétal, temporal ou insulaire, thalamus) : cela entraînerait des troubles de l'orientation latérale liés à un biais dans la verticale biologique.
- Une atteinte centrale bilatérale des voies de la graviception somesthésique ou vestibulaire : cela entraînerait des troubles de l'orientation sagittale liés à un biais dans la verticale biologique.
- Une atteinte bilatérale des voies de la graviception somesthésique ou vestibulaire (centrale ou périphérique) : incertitude sur la direction de la verticale.

L'hypothèse la plus probable pour la SIA serait la deuxième, qui correspond le mieux aux troubles retrouvés chez ces patients.

➤ Perspectives de rééducation

L'ensemble de ces études a mis en évidence des troubles de la proprioception dynamique chez les adolescents avec SI. L'intérêt de la kinésithérapie serait donc essentiel avec une approche rééducative prenant en compte ces troubles.

Etant donné qu'ils se révèlent via le « modèle interne de verticalité », la rééducation envisagée aurait deux objectifs (5) (21) :

- Renforcer l'intégration multisensorielle (24) dynamique (47) pour pallier ces troubles de l'équilibre : par des exercices variés (48) (24) et un recalibrage des informations sensorielles vestibulaires (49) et/ou visuelles mais surtout somesthésiques (30) tout en réalisant un acte moteur.
- Renforcer la conscience de l'orientation corporelle que le patient a pour favoriser les corrections posturales et corriger son asymétrie : miroir indicé, intégration de feedback, imagerie mentale (50) (6).

6 Conclusion

Seuls les tests de la VVS dynamique et le test de Fukuda permettraient, à ce jour, de révéler des troubles de ce « modèle interne de verticalité » chez les adolescents ayant une SI. Cette démarche nous a permis de mettre en évidence que le test de la VVS statique n'est pas forcément le test le plus adapté pour la mise en évidence des troubles de la perception de la verticale. L'hypothèse actuelle est que ces troubles révélés en dynamique seraient liés à un défaut d'intégration de ces informations sur une zone précise du cortex avec pour conséquence une représentation erronée de la verticale, qui induirait la déformation.

Il semble toutefois admis que les adolescents avec SI présentent des troubles en situation dynamique ou de conflit sensoriel. De ce fait, ces perturbations seront peut-être mises en évidence chez tous les adolescents avec SI par le test de Fukuda, car il reste le plus facilement réalisable en clinique. Une démarche de rééducation spécifique pourra ensuite être entreprise.

Cette expérience a été très formatrice par la recherche au niveau de ce concept actuel. Toute information trouvée a dû être exploitée avec prudence du fait que la plupart restent des hypothèses, certes avec des preuves, mais non reconnues scientifiquement. Les plus grandes difficultés se sont révélées lors des démarches de protocole entreprises en libéral et lors de la recherche d'une équation fiable pour cet état de la littérature. Cela permet d'apprendre une certaine rigueur car rien ne doit être fait au hasard, et limiter les biais d'une étude doit être l'une des principales préoccupations, tout comme être le plus exhaustif pour une revue de littérature. Pour la suite, il est envisageable de continuer à travailler sur le sujet en collaboration avec une équipe spécialisée. Clarifier ce concept de la perception de la verticale chez ces patients, surtout au niveau des perspectives de rééducation, s'avère nécessaire pour la prise en charge.

Références bibliographiques et autres sources

1. Negrini S, Aulisa AG, Aulisa L, Circo AB, de Mauroy JC, Durmala J, *et al.* 2011 SOSORT guidelines: orthopaedic and rehabilitation treatment of idiopathic scoliosis during growth. *Scoliosis*. 2012;7(1):3.
2. Haute Autorité de santé (HAS). Scoliose structurale évolutive (dont l'angle est égal ou supérieur à 25°) jusqu'à maturation rachidienne. Saint-Denis La Plaine (France) ; 2008
3. De Sèze M, Cugy E. Pathogenesis of idiopathic scoliosis: A review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2012 Mar;55(2):128–38.
4. Catanzariti J-F, Agnani O, Guyot M-A, Wlodyka-Demaille S, Khenioui H, Donze C. Does adolescent idiopathic scoliosis relate to vestibular disorders? A systematic review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2014 Aug; 57(6-7):465–79.
5. Hawasli AH, Hullar TE, Dorward IG. Idiopathic scoliosis and the vestibular system. *Eur Spine J*. 2015 Feb;24(2):227–33.
6. Barra J, Pérennou D. Le sens de verticalité est-il vestibulaire ? *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. 2013 Jun; 43(3):197–204.
7. Cakrt O, Slabý K, Viktorinová L, Kolář P, Jeřábek J. Subjective visual vertical in patients with idiopathic scoliosis. *J Vestib Res*. 2011;21(3):161–5.
8. Krodel A, Straube A, Angerer M, Fritsch K. [Spatial orientation and postural regulation in patients with idiopathic scoliosis]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 1997;135:203–9.
9. Cheung J, Sluiter WJ, Veldhuizen AG, *et al.* Perception of vertical and horizontal orientation in children with scoliosis. *Orthop Res* 2002;20:416– 20.
10. Catanzariti J-F, Le Berre M, Coget M, Guyot M, Agnani O, Donzé C. Subjective Visual Vertical and Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS). *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2015 Sep;58, Supplement 1:e111.
11. Le Berre M, Guyot M, Agnani O, Versyp MC, Bourdeauducq I, Donzé C, *et al.* Clinical equilibration tests, proprioceptive system and Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS). *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2015 Sep;58, Supplement 1:e112.
12. Vanaverbecq A. Rééducation des hors aplombs gravitaires chez le sujet scoliotique. Mémoire de master en kinésithérapie. Haute école provinciale de Hainaut;2014-2015,106p.
13. Centre Cochrane français. introduction à l'Evidence-based nursing (EBN) [En ligne]. 2011 [consulté le 10 novembre 2015]. Disponible : <http://tutoriel.fr.cochrane.org/fr/pr%C3%A9sentation-du-tutoriel>
14. Vasiliadis ES, Grivas TB, Kaspiris A: Historical overview of spinal deformities in ancient Greece. *Scoliosis* 2009, 4(1):6
15. Khouri N, Vialle R, Mary P, Marty C. Scoliose idiopathique. Stratégie diagnostique, physiopathologie et analyse de la déformation. *EMC-Rhumatologie-Orthopedie*. 2004;1(1):17–44.

16. Negrini S, Grivas TB, Kotwicki T, Maruyama T, Rigo M, Weiss HR, *et al.* Why do we treat adolescent idiopathic scoliosis? What we want to obtain and to avoid for our patients. SOSORT 2005 Consensus paper. *Scoliosis*. 2006;1(1):4.
17. Bonan L, Dampousse M. Intérêts et limites des mesures de verticalité subjective pour l'évaluation des troubles de l'équilibre. *La Lettre de médecine physique et de réadaptation*. 2012;28(3).
18. Braem B. Perception des orientations et intégration multisensorielle [Internet]. Université Charles de Gaulle - Lille III; 2014 [cited 2015 Nov 8]. Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01146140/document>
19. Luyat M. Verticale subjective versus verticale posturale : une note sur l'étude de la perception de la verticale. *L'année psychologique*. 1997; 97(3):433–47.
20. Barbieri G, Gissot A-S, Pérennou D. Ageing of the postural vertical. *Age (Dordr)*. 2010 Mar;32(1):51–60.
21. Pérennou D, Piscicelli C, Barbieri G, Jaeger M, Marquer A, Barra J. Measuring verticality perception after stroke: Why and how? *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. 2014 Jan;44(1):25–32.
22. Tesio L, Longo S, Rota V. The subjective visual vertical: validation of a simple test. *International Journal of Rehabilitation Research*. 2011 Dec;34(4):307–15.
23. Mittelstaedt H. A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften*. 1983;70(6):272–81.
24. Jacquemard J, Costille M. Apport de la rééducation vestibulaire pour une prise en charge multisensorielle des troubles de l'équilibre. *Kinésithérapie scientifique*. 2008. p. 21–7.
25. Souchart P-E. Rééducation posturale globale, RPG. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson; 2011. p. 37-43.
26. Kelly, V.E. (2008). *Postural Control* [Polycopié]. Consultable à L'URL : <http://courses.washington.edu/anatomy/KinesiologySyllabus/BalanceOutline2008.pdf>
27. Pérennou D. Physiologie du contrôle postural et Physiopathologie des troubles de l'équilibre. XVIIe Congrès de l'Association Posture et Equilibre. COFEMER. 2010 :46p. [En ligne]. Consultable à l'URL : <http://www.cofemer.fr/UserFiles/File/Perennou%20Physiologie%20Posture%20Site%20Cofemer.pdf>
28. Quevauvilliers J, Somogyi A, Fingerhut A. Dictionnaire médical avec atlas anatomique. Issy-les-Moulineaux: Elsevier-Masson; 2009.
29. Lopez C, Lacour M, Borel L. Perception de la verticalité et représentations spatiales dans les aires corticales vestibulaires. *Bipédie, contrôle postural et représentation corticale*. 2005;35–86.
30. Barra J, Marquer A, Joassin R, Reymond C, Metge L, Chauvineau V, *et al.* Humans use internal models to construct and update a sense of verticality. *Brain*. 2010 Dec 1;133(12):3552–63.

31. Haumont T, Gauchard GC, Lascombes P, Perrin PP (2011) Postural instability in early-stage idiopathic scoliosis in adolescent girls. *Spine (Phila Pa 1976)* 36:E847–E854
32. Assaiante C, Mallau S, Jouve J-L, Bollini G, Vaugoyeau M. Do Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS) Neglect Proprioceptive Information in Sensory Integration of Postural Control? Gribble PL, editor. *PLoS ONE*. 2012 Jul 17;7(7):e40646.
33. Grivas TB, Savvidou OD, Vasiliadis E, Psarakis S, Koufopoulos G. Prevalence of scoliosis in women with visual deficiency. *Stud Health Technol Inform*. 2006;123:52–6.
34. Catanzariti JF, Salomez E, Bruandet JM, Thevenon A. Visual deficiency and scoliosis. *Spine*. 2001 Jan 1;26(1):48–52.
35. Barbieri G, Gissot A-S, Fouque F, Casillas J-M, Pozzo T, Pérennou D. Does proprioception contribute to the sense of verticality? *Experimental Brain Research*. 2008 Mar;185(4):545–52.
36. Herman R, Mixon J, Fisher A, Maulucci R, Stuyck J. Idiopathic scoliosis and the central nervous system: a motor control problem. The Harrington lecture, 1983. *Scoliosis Research Society. Spine*. 1985 Feb;10(1):1–14.
37. Simoneau M, Mercier P, Blouin J, Allard P, Teasdale N (2006a) Altered sensory-weighting mechanisms is observed in adolescents with idiopathic scoliosis. *BMC Neurosci* 7:68
38. Beaulieu M, Toulotte C, Gatto L, Rivard C-H, Teasdale N, Simoneau M, *et al*. Postural imbalance in non-treated adolescent idiopathic scoliosis at different periods of progression. *European Spine Journal*. 2009 Jan;18(1):38–44.
39. Simoneau M, Lamothe V, Hutin E, Mercier P, Teasdale N, Blouin J (2009) Evidence for cognitive vestibular integration impairment in idiopathic scoliosis patients. *BMC Neurosci* 10:102
40. Eijgelaar PN, Wapstra FH, Otten E, Veldhuizen AG. Altered head orientation patterns in children with idiopathic scoliosis in conditions with sensory conflict. *European Spine Journal*. 2014 Dec;23(12):2626–34.
41. Bruyneel AV, Chavet P, Bollini G, Allard P, Berton E, Mesure S. Lateral steps reveal adaptive biomechanical strategies in adolescent idiopathic scoliosis. *Ann Readapt Med Phys* 2008;51:630–5.
42. Romano M, Zaina F. Is there a relationship between the results of unterberger test and convexity of scoliosis major curve? *Scoliosis*. 2007;2(Suppl 1):S36.
43. Bruyneel A-V, Chavet P, Mesure S. Initiation du pas et scoliose idiopathique de l'adolescence. *Kinesithérapie, la revue*. 2008;8(79):46–52.
44. Onishi H, Sugawara K, Yamashiro K, Sato D, Suzuki M, Kirimoto H, *et al*. Neuromagnetic activation following active and passive finger movements. *Brain Behav*. 2013 Mar 1;3(2):178–92.
45. Assaiante C, Nougier V, Olivier I, Palluel E. Évolution des stratégies posturales de l'enfance à l'adolescence. *Emc Podologie*. 2013;in press.

46. Catanzariti J-F, Guyot M-A, Massot C, Khenioui H, Agnani O, Donzé C. Evaluation of motion sickness susceptibility by motion sickness susceptibility questionnaire in adolescents with idiopathic scoliosis: a case-control study. *Eur Spine J*. 2015 Jun 16;
47. Bruyneel A-V, Chavet P, Bollini G, Mesure S. Gait initiation reflects the adaptive biomechanical strategies of adolescents with idiopathic scoliosis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2010 Aug;53(6-7):372–86.
48. Bruyneel A-V, Mesure S. Effet d'apprentissage au cours de la répétition d'un équilibre assis instable sur balancelle chez des adolescentes présentant une scoliose idiopathique. *Kinésithérapie, la Revue*. 2014 Jul;14(151):38–43.
49. Mast FW, Preuss N, Hartmann M, Grabherr L. Spatial cognition, body representation and affective processes: the role of vestibular information beyond ocular reflexes and control of posture. *Frontiers in Integrative Neuroscience* [Internet]. 2014 May 27 [cited 2016 Feb 12];8. Available from: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnint.2014.00044/abstract>
50. Mertz S, Lepecq J-C. Imagined body orientation and perception of the visual vertical. *Psychological research*. 2001;65(1):64–70.

Table des annexes

- **Annexe 1** : Abréviations
- **Annexe 2** : Le « modèle interne de verticalité » et ses systèmes
- **Annexe 3** : Niveaux d'évidence des recommandations d'après la SOSORT
- **Annexe 4** : Courbe d'évolutivité et tests de perception de la verticale
- **Annexe 5** : Organigramme de l'état de la littérature

Annexe 1 – Abréviations

AVC : Accident Vasculaire Cérébral

D : Droite

DD : Dorsale Droite

G : Gauche

LG : Lombaire Gauche

SC : Scoliose Congénitale

SI : Scoliose Idiopathique

SIA : Scoliose Idiopathique de l'Adolescent

SNC : Système Nerveux Central

VPS : Verticale Posturale Subjective

VS : Verticale subjective

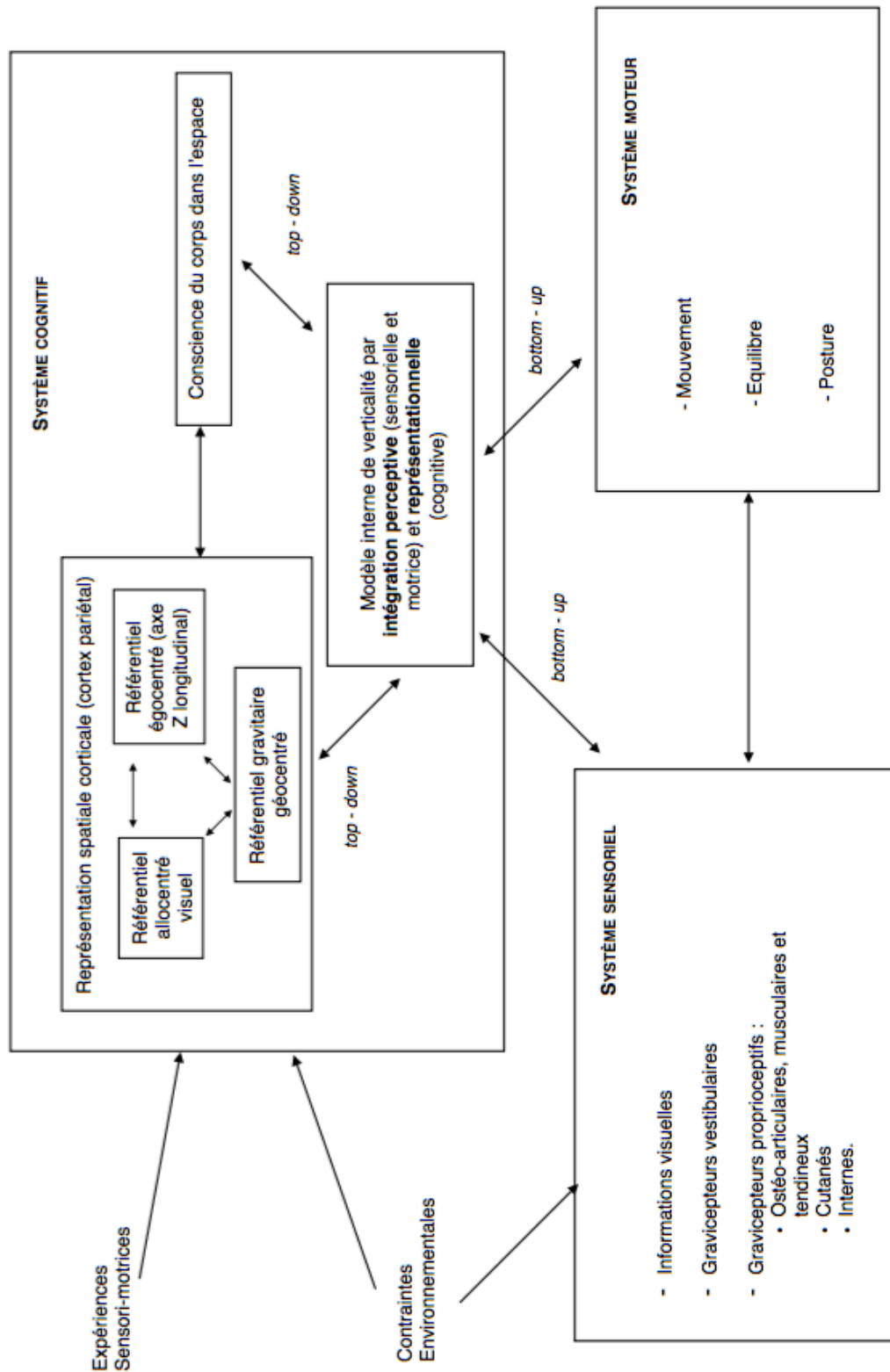
VHS : Verticale Haptique Subjective

VVS : Verticale Visuelle Subjective

VVHS : Verticale Visuo-Haptique Subjective

Annexe 2 - Le « modèle interne de verticalité » et ses systèmes (6) (17)

Le « modèle interne de verticalité » et ses systèmes



Annexe 3 – Niveaux d’évidence des recommandations d’après la SOSORT

Niveau d’évidence	Correspondance
I	De multiples essais contrôlés randomisés ou examens systématiques de ces études.
II	Une étude randomisée contrôlée.
III	De multiples études non randomisées contrôlées ou examens systématiques de ces études.
IV	D'autres études.
V	Consensus de la SOSORT avec plus de 90% d'accord.
VI	Consensus de la SOSORT avec de 70 à 89% d'accord.

Annexe 4 : Courbe d'évolutivité et tests de perception de la verticale

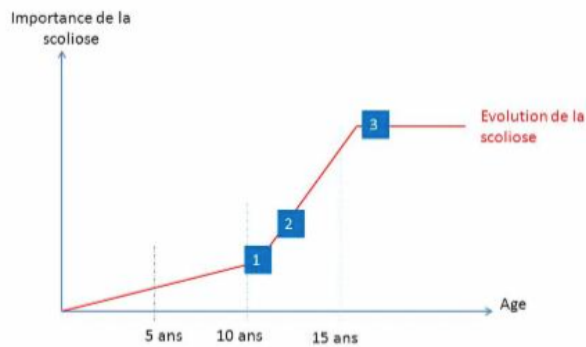


Figure 1 : Courbe d'évolutivité de Duval-Beaupère (1970)

- 1 - Apparition des premiers caractères sexuels secondaires
- 2 - 1^{ère} règles (ou 1^{er} rasage chez le garçon)
- 3 - Maturité osseuse



Visuelle

Figure 2 : Evaluation de la VVS d'après Pérennou et al. 2005.



Figure 3 : Evaluation de la VHS d'après Pérennou et al. 2005



Figure 4 : Evaluation de la VVHS d'après Saj et al. 2006



Figure 5 : Evaluation de la VPS d'après Pérennou et al. 2005

Annexe 5 – Organigramme de l'état de la littérature

