

UNIVERSITÉ DE NANTES

FACULTÉ DE MÉDECINE

Année : 2021

N° 2021-201

THÈSE

pour le

DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN MÉDECINE
DES D'OPHTALMOLOGIE

par

Quentin LEFEBVRE

Présentée et soutenue publiquement le 15 octobre 2021

**Corrélation entre la biométrie et la réfraction cycloplégée chez
l'enfant et application de la biométrie dans le dépistage des
amétropies de l'enfant.**

Président du Jury : Monsieur le Professeur Michel WEBER,

Directeur de thèse : Madame le Docteur Chloé COURET,

Membres du Jury : Madame le Docteur Guylène LE MEUR, Monsieur le Professeur Pierre
LEBRANCHU et Monsieur le Professeur Alain PÉCHEREAU

Serment d'Hippocrate

“Au moment d’être admis à exercer la médecine, je promets et je jure d’être fidèle aux lois de l’honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J’interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l’humanité.

J’informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n’exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l’indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l’intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu à l’intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l’indépendance nécessaire à l’accomplissement de ma mission. Je n’entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J’apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu’à leurs familles dans l’adversité.

Que les hommes et mes confrères m’accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré et méprisé si j’y manque.”

Remerciements

Au Professeur Weber, merci de présider mon jury. J'ai passé un semestre passionnant autant chirurgicalement que médicalement, et surtout merci infiniment pour m'avoir redonné confiance en moi avant de débiter mon assistanat. Je n'oublierai pas nos conversations sur mon choix d'internat, alors que je n'étais encore qu'externe.

Au Docteur Couret, Chloé, merci pour ton dynamisme et ta motivation que tu m'as apporté durant ce travail, j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec toi. Merci pour ta gentillesse et ta bonne humeur. J'ai pu découvrir une très belle personne en toi et je ne suis pas près d'oublier mon 1^{er} binôme au CHU. Ne change rien !

Au Professeur Péchereau, merci pour votre expertise et vos précieux conseils dans ce travail. C'est un honneur de vous avoir au sein de mon jury. Vos enseignements sur la réfraction ont été une réelle source de motivation et d'inspiration.

Au Docteur Le Meur et au Professeur Lebranchu, merci de me faire l'honneur d'être dans mon jury. Merci également pour votre bienveillance envers moi, que ce soit en consultation ou au bloc, c'était un plaisir sincère de poursuivre la pédiatrie avec vous.

Aux docteurs Masse et Vabres, merci pour les semestres passés ensemble, j'ai beaucoup appris auprès de vous. *Aux docteurs Orignac et Lebreton*, merci pour votre gentillesse et vos nombreux avis.

À *mes parents*, sans vous, rien de tout ceci n'aurait été possible. Merci de m'avoir supporté, remotivé, épaulé et soutenu avec sourire et bonne humeur durant ces nombreuses années ! J'ai une chance incroyable de vous avoir auprès de moi. Maman, si j'en suis là, c'est grâce à une de nos conversations, tu le sais. Papa, merci d'avoir pris autant de temps pour relire ce travail, nul doute que la cycloplégie n'a plus de secret pour toi. Et promis, j'essayerai de me tenir droit !
A mon petit frère, Théodore, merci pour ton soutien et ton inspiration, tu es un modèle au quotidien. Bien sûr, sans toi, je ne serais pas là ! *A ma grand-mère*, merci de m'avoir également supporté, ta fierté me reconforte à chaque appel que nous nous passons.

À *Marie et filoute*, merci d'avoir été là dans les bons comme dans les mauvais moments, merci pour tous ces précieux et nombreux moments passés ensemble. J'ai hâte de créer de nombreux autres souvenirs ensemble ! À *Quiloch*, merci pour ton soutien indéfectible durant maintenant plus de 10 ans, merci aussi d'avoir supporté mes craintes et mes peurs presque tous les week-ends en terrasse ! À *Mégane*, tous ces voyages passés ensemble ont réussi à me faire tenir. Même si tu es loin, tu réussis à me transmettre ta positivité au quotidien ! À *Ionion*, même si tu es loin également, tu as rythmé mon internat autour d'aventures sportives que je ne suis pas près d'oublier !

À *Charlène, Marion et Victor*, vous êtes des co-internes en or ! Merci de m'avoir accompagné, remotivé et écarté les doutes en moi durant ces années d'internat ! Aux deux petits chatons, *Marie et Manon*, merci d'avoir été là dès le début, j'ai eu beaucoup de chance d'avoir croisé votre route, ne changez rien ! Et à toutes ces belles rencontres durant mon internat : *Paul, Karine, Angeline, Chloé, Dimitri, Clara, Guillaume, Benjamin* et tellement d'autres, merci pour tout ! Merci également aux orthoptistes du service de m'avoir aidé à inclure ! Merci également à *Yannick* pour ta précieuse aide avec mes statistiques autant sur le mémoire que la thèse !

À *Mehdi, Renaud, Ramzy, Simon*, même si le début n'était pas simple, merci pour votre bonne humeur et votre aide. Véritables mamans du service du Mans, *Sylvie, Christelle, Laetitia et Marie-Christine*, une pensée émue à vous toutes, merci d'avoir été là pendant 1 an ! Merci aussi à *Valentin et Barnabé* !

À ces petites têtes, *Élise, Antoine, Amélie, Claire, Adrien, JB*, merci d'avoir partagé ce début de vie étudiante autour de vacances, soirées, délires...

Au *Dr Crance*, mon ophtalmologue à Nancy, qui a réussi à déclencher une étincelle lors d'un « stage en entreprise » alors que je n'étais encore que collégien, merci !

Et enfin, à toutes ces étoiles qui brillent encore fort en moi, où mes pensées pour vous sont quotidiennes, *André, Lucien, Éliane, Jean, Danielle*, en espérant que vous soyez fiers de moi.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	9
1.1	GENERALITES	9
1.1.1	Les troubles réfractifs de l'enfant	10
1.1.1.1	L'astigmatisme	10
1.1.1.2	L'hypermétropie	10
1.1.1.3	La myopie	11
1.1.1.4	L'anisométrie	11
1.1.2	Épidémiologie des amétropies et profils évolutifs	12
1.1.3	Réfraction et paramètres réfractifs.....	13
1.1.4	La cycloplégie	14
1.1.4.1	Les collyres cycloplégants.....	14
1.1.4.1.1	L'Atropine	14
1.1.4.1.2	Le Cyclopentolate (Skiacol®).....	15
1.1.4.1.3	Le Tropicamide (Mydraticum®).....	15
1.1.4.2	Les effets indésirables	16
1.1.4.2.1	Effets locaux et généraux.....	16
1.1.4.2.2	Rémanence et pratique courante	17
1.1.4.3	Les indications.....	17
1.1.5	Les paramètres biométriques.....	18
1.1.5.1	Longueur axiale.....	18
1.1.5.2	La kératométrie.....	19
1.1.5.3	Le cristallin et son jeu accommodatif	19
1.1.5.4	Les autres paramètres.....	20
1.2	LE DEPISTAGE DES TROUBLES REFRACTIFS DE L'ENFANT	20
1.2.1	Définitions	20
1.2.2	Critères indispensables et justifications en ophtalmologie	20
1.2.3	Paramètres étudiés.....	21
1.2.4	Actualité dans le dépistage des troubles visuels	22
1.3	ÉTUDE PRELIMINAIRE	24
2.	OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	24
2.1	ÉTABLIR UNE CORRELATION ENTRE LES DONNEES BIOMETRIQUES ET LES DONNEES REFRACTIVES	24
2.2	ÉVALUER SI CETTE CORRELATION EST UTILISABLE DANS LE CADRE DU DEPISTAGE.....	25
2.3	ANALYSER LES FORMULES EXTRAITES APPLIQUEES SUR UN NOUVEL ECHANTILLON.....	25
3.	MATERIELS ET METHODES	25
3.1	PATIENTS INCLUS (CRITERES D'INCLUSION ET D'EXCLUSION)	25
3.2	MATERIEL UTILISE	26
3.3	DONNEES RECUEILLIES.....	27
3.4	DEFINITION DES ERREURS REFRACTIVES.....	28
3.5	METHODES STATISTIQUES.....	28
3.5.1	Statistiques générales.....	28
3.5.2	Comparaison des données réfractives pré- et post-cycloplégie	29
3.5.2.1	Comparaison des équivalents sphériques pré- et post-cycloplégie.....	29
3.5.2.2	Comparaison de l'astigmatisme pré- et post cycloplégie.....	29
3.5.3	Analyses des données brutes	29
3.5.3.1	Équivalent sphérique pré-cycloplégie par rapport à l'équivalent sphérique post-cycloplégie	29
3.5.3.2	Équivalent sphérique cycloplégie par rapport à la longueur axiale	30
3.5.3.3	Équivalent sphérique cycloplégie par rapport à la longueur axiale et la kératométrie	30
4.	RESULTATS.....	30
4.1	DESCRIPTION DE LA POPULATION	30
4.1.1	Sexe, âge, ethnie	30

4.1.2	La réfraction	33
4.1.3	Éléments biométriques et âge	34
4.2	CORRELATION ENTRE LA BIOMETRIE ET LA REFRACTION	35
4.2.1	L'astigmatisme	35
4.2.1.1	Comparaison de l'astigmatisme pré- et post-cycloplégie	35
4.2.1.1.1	Puissance du cylindre pré- et post-cycloplégie	35
4.2.1.1.2	Axe de l'astigmatisme pré- et post-cycloplégie.....	35
4.2.1.2	Analyse de la corrélation entre les différentes mesures cylindriques.....	36
4.2.1.2.1	Corrélation entre l'astigmatisme réfractif pré- et post-cycloplégie.....	36
4.2.1.2.2	Corrélation entre l'astigmatisme biométrique et réfractif post-cycloplégie.....	37
4.2.2	La sphère	38
4.2.2.1	Analyse de l'ES pré- par rapport à l'ES post-cycloplégie.....	38
4.2.2.1.1	Comparaison entre l'ES pré- et post-cycloplégie	38
4.2.2.1.2	Corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie	39
4.2.2.2	Corrélation entre l'équivalent sphérique et la longueur axiale.....	40
4.2.2.3	Corrélation entre l'ES post-cycloplégie et le rapport LA/Km.....	41
4.3	UTILISATION DES DONNEES BRUTES DANS LE CADRE DU DEPISTAGE	42
4.3.1	Analyse des tests seuls.....	42
4.3.1.1	Détection de l'astigmatisme	42
4.3.1.2	La réfraction automatique non cycloplégée.....	42
4.3.1.2.1	Réfraction automatique non cycloplégée seule (Se, Sp, VPP, VPN).....	42
4.3.1.2.2	ES-post cycloplégie estimé par la réfraction automatique non cycloplégée (Se, Sp, VPP, VPN).....	43
4.3.1.3	ES-post cycloplégie estimé par la longueur axiale (VPP, VPN, Se, Sp)	44
4.3.1.4	ES-post cycloplégie estimé par le rapport LA/Km (VPP, VPN, Se, Sp).....	44
4.3.2	Analyse des tests combinés (Se, Sp, VPP, VPN).....	45
4.3.2.1	Association de la réfraction non cycloplégée et de la formule de la LA	45
4.3.2.2	Association de la réfraction non cycloplégée et de la formule du rapport LA/Km	46
4.3.2.3	Association de la réfraction non cycloplégée, de la formule de la LA et du rapport LA/Km	46
4.3.3	Tableau récapitulatif des paramètres intrinsèques et extrinsèques des formules seules.....	47
4.3.4	Association des formules.....	47
4.4	UTILISATION DES FORMULES PAR STRATES D'AGE	48
4.4.1	Corrélation entre la réfraction et les paramètres anatomiques	48
4.4.1.1	Équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie.....	48
4.4.1.2	Longueur axiale et équivalent sphérique post-cycloplégie	49
4.4.1.3	Rapport LA/Km et équivalent sphérique post-cycloplégie	50
4.4.2	Tableau récapitulatif des paramètres intrinsèques et extrinsèques des formules appliquées aux différentes strates d'âge.....	51
4.4.2.1	Enfants de moins de 3 ans.....	51
4.4.2.2	Enfants de 3 à 6 ans.....	51
4.4.2.3	Enfants de 7 à 10 ans.....	51
4.4.2.4	Enfants de plus de 10 ans.....	52
4.5	UTILISATION DES FORMULES D'ESTIMATION APPLIQUEES SUR LA POPULATION 2	52
4.5.1	Enfants issus de la population hospitalière	52
4.5.2	Enfants issus de la population libérale.....	53
5.	DISCUSSION.....	53
5.1	LA POPULATION.....	53
5.1.1	La réfraction	53
5.1.1.1	La sphère.....	53
5.1.1.2	Le cylindre	55
5.1.2	L'âge.....	56
5.1.3	Le sexe	57
5.1.4	L'ethnie.....	58
5.1.5	Les paramètres biométriques étudiés	59
5.2	LA METHODOLOGIE.....	59
5.2.1	Les critères d'inclusion.....	59
5.2.2	Les seuils réfractifs.....	60
5.2.3	La correction optique.....	61

5.2.4	Les collyres cycloplégants.....	62
5.2.5	L'effet « centre tertiaire ».....	62
5.2.6	Les méthodes statistiques utilisées.....	63
5.3	CORRELATIONS ET PARAMETRES BIOMETRIQUES	65
5.3.1	Analyse de l'astigmatisme	65
5.3.2	Analyse de la sphère avant et après cycloplégie	66
5.3.3	Apport de la réfraction non cycloplégée en tant que formule	66
5.3.4	Apport de la longueur axiale seule dans la détection des amétropies	68
5.3.5	Apport du rapport LA/Km dans la détection des amétropies.....	69
5.3.6	Analyse des tests combinés.....	71
5.4	LES AUTRES PARAMETRES A INCLURE	72
5.4.1	La problématique du cristallin	72
5.4.2	Les autres paramètres	72
5.5	L'AVENIR	73
5.5.1	Fabrication d'un biomètre portatif	73
5.5.2	Confection de formules fiables	74
5.5.3	Le carnet de santé.....	74
5.5.4	Intégration de la biométrie dans le dépistage.....	76
6.	CONCLUSION.....	77
7.	BIBLIOGRAPHIE.....	78

Liste des abréviations :

LA : longueur axiale

Km : kératométrie moyenne

mm : millimètres

IC (95%) : intervalle de confiance à 95%

δ : delta, symbole de la dioptrie

n : nombre

p : p-value

ES : équivalent sphérique

VP, VN : vrai positif, vrai négatif

FP, FN : faux positif, faux négatif

Se, Sp : sensibilité, spécificité

VPP, VPN : valeur prédictive positive, valeur prédictive négative

AFSOP : Association Française de Strabologie et d'Ophtalmologie Pédiatrique

CADET : Centre d'Action pour le Dépistage, l'Exploration et le Traitement des troubles visuels

PMI : Protection Maternelle Infantile

RA : réfractométrie automatique

ROC : Receiver Operating Characteristic

SFO : Société Française d'Ophtalmologie

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

CHU : Centre Hospitalo-Universitaire

UCVA : Uncorrected Visual Acuity

1 Introduction

1.1 Généralités

Les amétropies représentent les motifs de consultation les plus fréquents¹, principalement en ophtalmopédiatrie. Leur prévalence est variable selon les études en raison de seuils parfois variables, celle-ci varie entre 10 et 35% dans la population pédiatrique selon les études^{2,3,4}. Cependant, les études convergent vers une prévalence aux alentours de 10% dans la population pédiatrique⁵. En raison d'une forte puissance accommodative chez l'enfant, la réfraction non cycloplégée n'est pas suffisante. Celle-ci entraîne une sous-estimation de l'hypermétropie et une surestimation de la myopie^{6,7}. Ainsi, il est indispensable et recommandé, de provoquer, dans un but diagnostique, une paralysie du corps ciliaire afin d'annuler le jeu accommodatif. De ce fait, des études ont décrit la supériorité de la cycloplégie sur la réfraction de l'enfant, la définissant comme le « gold-standard diagnostic »⁸.

La cycloplégie n'est cependant pas dénuée d'effets secondaires généraux (tachycardie, crise d'épilepsie, agitation) et locaux (flou visuel de près). Celle-ci entraîne un engorgement des salles d'attente, un temps d'attente allongé et nécessite parfois une deuxième consultation de prise de mesures, qui peut être difficile à gérer pour l'enfant et ses parents. La cycloplégie est sous prescription médicale, ce qui ne permet pas de l'envisager dans une politique de dépistage.

Il semble donc intéressant de s'aider d'autres moyens afin d'estimer la réfraction et d'adresser les enfants à risque. La réfraction est corrélée aux paramètres anatomiques de l'œil, dont certains sont mesurables via la biométrie. Ce travail s'attachera à étudier la corrélation entre les paramètres anatomiques et la réfraction cycloplégée de l'enfant afin d'en extraire des formules simples et fiables pour estimer l'équivalent sphérique cycloplégé sans avoir recours à la cycloplégie. Des études asiatiques se sont penchées sur ce sujet, et il semble y avoir des résultats encourageants⁹. Nous tacherons d'intégrer les valeurs de la kératométrie à la longueur axiale et d'étudier cette corrélation sur une population caucasienne. La prévalence des amétropies dans les pays caucasiens n'est pas la même que dans les pays asiatiques, ces derniers recensant une forte prévalence de la myopie¹⁰. Dans cette étude, nous comparerons

la réfraction cycloplégée aux paramètres biométriques sur une population pédiatrique du CHU de Nantes principalement et de la Clinique d'Alger.

1.1.1 Les troubles réfractifs de l'enfant

Sur le plan optique, on distingue deux systèmes visuels : l'œil amétrope et l'œil emmétrope. L'œil emmétrope correspond à un système optique dont la longueur axiale et la puissance réfractive totale de l'œil sont en parfaite harmonie, permettant une vision nette de loin sans correction optique. A l'inverse, l'œil amétrope correspond à une inadéquation entre la longueur axiale et la puissance totale de l'œil, entraînant un défaut de focalisation de l'image sur la rétine lorsque l'objet est situé à l'infini et nécessite donc une aide grâce à une correction optique. Parmi les amétropies, on distingue l'amétropie axiale (engendrée par une longueur axiale trop longue ou trop courte¹¹) et l'amétropie de puissance de cause cornéenne et / ou cristallinienne¹². Nous rappelons ci-après les amétropies rencontrées chez l'enfant.

1.1.1.1 L'astigmatisme

On définit un œil « stigmat » lorsque la réfraction totale de l'œil est identique dans tous les méridiens. A l'inverse, un œil « astigmat » correspond à une réfraction qui varie en fonction des méridiens entre un minimum et un maximum, définissant les axes de l'astigmatisme. Ainsi, le patient non corrigé ne verra pas net les lignes horizontales ou les lignes verticales. L'astigmatisme n'augmente en général pas au cours des années, mais tend à devenir inverse en raison du relâchement du tonus palpébral supérieur⁵. Un astigmatisme significatif doit être corrigé dès le plus jeune âge pour éviter une amblyopie méridienne⁵.

1.1.1.2 L'hypermétropie

Un œil est qualifié d'hypermétrope lorsque le pouvoir dioptrique total de l'œil est trop faible comparé à la longueur axiale de l'œil ou lorsque l'œil est trop court par rapport à son pouvoir dioptrique. Le punctum remotum se trouve alors derrière le sujet et engendre une image en arrière de la rétine. Pour compenser, l'œil hypermétrope va réaliser un effort accommodatif

en vision de près et en vision de loin. Mais cet effort accommodatif peut être responsable de spasmes accommodatifs, d'asthénopie et de céphalées. Afin de compenser cet effort, une correction optique adaptée doit être proposée en cas de signes d'asthénopie, lorsque l'enfant n'atteint pas l'acuité visuelle maximale, lorsqu'il existe un trouble oculomoteur (strabisme convergent, divergent...), lorsqu'il existe des signes d'amblyopie, en cas d'amétropie ou d'anisométrie dépassant les limites physiologiques. L'hypermétropie constitue l'amétropie la plus fréquente chez l'enfant¹³. L'hypermétropie physiologique retrouvée chez le nourrisson, a tendance à diminuer au cours des premières années de vie, alors qu'une hypermétropie moyenne ou forte a tendance à persister le plus souvent⁵.

1.1.1.3 La myopie

A l'inverse de l'hypermétropie, l'œil myope est défini comme une inadéquation entre le pouvoir dioptrique, ici trop fort, par rapport à la longueur axiale, ou lorsque l'œil est dit trop long par rapport au pouvoir total du dioptré oculaire. L'image se situe alors en avant de la rétine, même sans accommodation. Le patient myope ne voit pas au loin, et le moyen de compensation sera de rétrécir l'ouverture des fentes palpébrales pour créer une « fente sténopéique ». Avec la croissance de l'œil dans l'enfance, la progression de la myopie sera la plus rapide au cours de la période pré-pubertaire, puis ralentit pour se stabiliser à la fin de la croissance⁵.

1.1.1.4 L'anisométrie

La plupart du temps, les deux yeux sont symétriques sur le plan optique et sur le plan réfractif^{5,14} définissant l'isométrie. Lorsque l'on constate une différence entre les 2 yeux, on parle alors d'anisométrie. On peut définir une anisométrie si la différence est sphérique ou cylindrique. Il est admis de considérer une différence d'au moins 1 dioptrie d'écart pour l'amétropie sphérique et d'au moins 0,75 dioptrie pour l'amétropie cylindrique¹⁵. Une grande méfiance sera accordée à cette amétropie chez l'enfant en bas âge, en raison de son absence de plainte et du caractère très amblyogène de celle-ci.

1.1.2 Épidémiologie des amétropies et profils évolutifs

L'épidémiologie des amétropies de l'enfant est un sujet hautement complexe mais capital nécessitant des critères rigoureux, afin d'établir une base précise pour établir une politique de dépistage fiable. Discuter l'épidémiologie revient à définir ce qu'est une amétropie. Cette réponse est double :

- On peut la définir via l'anatomie, à savoir recueillir les réfractions d'un panel d'enfants. Les valeurs au-delà des 95^e percentiles constituent les valeurs pathologiques. Cette méthode a comme conséquence un taux élevé d'amétropie et ne préjuge pas de l'incidence fonctionnelle⁵. Il s'agit là d'une méthode statistique ;
- On peut la définir via les facteurs de risques, ce qui semble la méthode la plus retenue dans la littérature, à savoir la détermination d'un seuil au-delà duquel il existerait un risque de pathologie amblyopique ou strabique.

A cette problématique s'associe une double réflexion : la variation de la réfraction en fonction de l'âge ainsi qu'en fonction de l'ethnie. L'ensemble de ces éléments traduit des taux parfois très variables dans une littérature riche. Nous nous concentrerons ici sur une population caucasienne, cette population étant la cible de ce travail.

En moyenne, à la naissance, le nouveau-né présente une hypermétropie dite « physiologique » aux alentours de 2^{1,16} à 3¹⁷ dioptries. On rapporte entre 4 à 6% de myopes et environ 3% de forts hypermétropes¹ à la naissance. Le taux d'astigmatisme est élevé dans les premiers mois de la vie proche de 13,5%^{18,19}, bien que la littérature soit parfois non uniforme dans les critères d'astigmatisme tant sur le choix du seuil réfractif que sur la méthodologie. Chez l'enfant de 9 à 12 mois, la littérature est parfois variable, mais on retient un taux d'amétropies aux alentours de 20%²⁰ toutes amétropies confondues.

Les études s'intéressant à l'enfant à l'âge scolaire sont dominées par les études de dépistage scolaire. Le globe s'allongeant avec la croissance, les hypermétropies physiologiques vont diminuer pour se stabiliser autour de + 0,5 dioptrie et s'emmétropiser vers l'âge de 15 ans¹. Les astigmatismes sont fréquents avant 6 ans²¹, et ont tendance à diminuer dans le temps, au moins pour les astigmatismes faibles et modérés²², jusqu'à l'âge scolaire, pour atteindre la

fréquence de l'astigmatisme chez l'adulte, environ 8 %¹. Concernant la myopie congénitale légère à modérée, celle-ci aura tendance à évoluer vers l'emmétropisation²³ alors que la myopie forte n'aura pas tendance à diminuer¹. La myopie acquise entre 5 et 12 ans, aura, quant à elle, tendance à évoluer vers une myopie pathologique¹.

S'il se dessine de façon évidente une épidémie de myopie dans les pays asiatiques, largement décrite dans la littérature, il est plus compliqué d'obtenir des chiffres épidémiologiques de prévalence précis du fait de nombreux biais et de critères imprécis. Néanmoins, le profil réfractif des enfants jusqu'à 6 ans est dominé par l'hypermétropie et l'astigmatisme²⁰. On peut noter dans la littérature que la majorité des amétropies dans l'enfance sont déjà établies vers l'âge de 9 mois, et, à cet âge, 1 enfant sur 5 a une réfraction considérée comme non physiologique²⁴. À partir de 5 ans, 1 enfant sur 4 a besoin d'une correction optique²⁴. Ces statistiques renforcent la pensée collective : il faut améliorer le dépistage des amétropies de l'enfant.

1.1.3 Réfraction et paramètres réfractifs

La problématique de ce sujet est multiple et réside dans l'absence d'uniformisation de critères stricts dans la littérature internationale et dans la difficulté d'établir des définitions précises. En effet, si on s'intéresse à la réfraction, il peut s'agir de la réfraction manifeste, objective, cycloplégée, subjective, etc... De plus, cette réfraction peut considérablement varier en fonction du protocole utilisé, du collyre employé et des appareils disponibles. Ceci peut entraîner de nombreux biais et une difficulté à généraliser des conclusions sur une littérature riche aux résultats parfois très variables.

Le système optique visuel est codé par une nomenclature. La sphère (puissance constante) et le cylindre (puissance variable selon le méridien) sont souvent couplées, ces 2 composantes ne sont pas indépendantes car le cylindre entre dans la définition de l'équivalent sphérique²⁵ (équivalent sphérique = sphère + cylindre / 2). Bien qu'il s'agisse d'une nomenclature mondialement admise, le cylindre peut être matérialisé de façon positive ou négative (la puissance positive étant plus utilisée dans la littérature européenne²⁰).

1.1.4 La cycloplégie

La cycloplégie correspond à une paralysie du corps ciliaire, annulant ainsi l'accommodation, et constituant une étape indispensable à tout examen pédiatrique dont la détermination précise de la réfraction sera au cœur de la consultation. En effet, l'accommodation reste la principale source d'incertitude du fait de la grande capacité accommodative de l'enfant. Celle-ci constitue une source d'imprécision avec une surestimation de la myopie et une sous-estimation de l'hypermétropie²⁶. Ainsi, il est indispensable de mettre au repos l'accommodation, en paralysant le muscle ciliaire, afin de prescrire la correction optique la plus adaptée, notamment dans le traitement des amblyopies²⁷. Ce processus est notamment permis grâce à l'instillation de l'Atropine et du Cyclopentolate dont l'efficacité est incontestable chez l'enfant^{5,28,29}, confirmant ainsi la réfraction cycloplégiée comme étant le « gold-standard diagnostic » dans la gestion des amétropies de l'enfant⁸.

1.1.4.1 Les collyres cycloplégiants

L'accommodation dépend du système parasympathique médié par l'Acétylcholine au niveau de la fente synaptique. Les molécules cycloplégiantes les plus efficaces vont ainsi bloquer l'action cholinergique sur le muscle ciliaire. L'analyse des études existantes s'accordent à valider les agents parasympatholytiques comme étant les meilleures molécules à action cycloplégiante²⁸. Les collyres sympathomimétiques ont une action plutôt mydriatique que cycloplégique en stimulant le système sympathique via l'Adrénaline. Nous détaillerons succinctement les 3 molécules les plus étudiées dans la littérature : l'Atropine, le Cyclopentolate et le Tropicamide (l'Homatropine étant une molécule peu utilisée et peu étudiée dans la littérature).

1.1.4.1.1 L'Atropine

L'Atropine est le parasympatholytique de référence. Il est extrait de la Belladone et commercialisé sous 3 dosages : 0,3%, 0,5% et 1%. Il s'agit de la molécule anticholinergique la plus ancienne, la plus efficace, mais paradoxalement peu étudiée dans la littérature. Le Vidal précise que l'Atropine à 1 % est à réserver aux patients de plus de 12 ans³⁰. Les dosages 0,3 %

et 0,5 % sont préférés pour l'enfant de moins de 12 ans. L'habitude prise dans notre service est d'instiller le 0,3% avant 2 ans et le 0,5% entre 2 et 12 ans. En fonction des protocoles, ce collyre est à instiller 3 à 5 jours avant la consultation. Sa rémanence est d'environ 8 jours. Il ressort de la littérature que l'Atropine constitue le collyre ayant la meilleure action cycloplégante^{28,31,32}. A noter que l'Atropine est à préférer chez les enfants mélanodermes et en cas de résistance au traitement d'une amblyopie⁵.

1.1.4.1.2 Le Cyclopentolate (Skiacol[®])

Le Cyclopentolate est un antagoniste des récepteurs muscariniques de l'acétylcholine. Il est commercialisé au dosage de 0,5%, et instillé à partir de l'âge d'un an en France. Si certains auteurs considèrent qu'une³³ voire deux gouttes³⁴ d'instillation sont suffisantes à la réalisation d'une cycloplégie, il est recommandé de respecter le protocole habituel. Il s'agit d'instiller, idéalement au cabinet, afin de rester précis sur la temporalité, trois gouttes de Cyclopentolate à 5 minutes d'intervalle avec une réfraction mesurable entre la 45^e et la 60^e minute après la première instillation⁵. Le Cyclopentolate est le collyre cycloplégiant le plus utilisé en pratique, même s'il est légèrement moins efficace que l'Atropine³². Il est d'autant plus important de généraliser ce protocole afin de pouvoir comparer les études utilisant ce produit.

1.1.4.1.3 Le Tropicamide (Mydriaticum[®])

Le Tropicamide est un parasymphaticolytique commercialisé sous la forme 0,5% dont l'action est principalement mydriatique. Cependant, une paralysie passagère de l'accommodation s'établit dans les 20 à 40 minutes qui suivent l'instillation³⁵ (dont le protocole selon le Vidal est : 4 à 6 instillations d'une goutte de Tropicamide 0,5 % à 5 minutes d'intervalle). La littérature ne lui suggère cependant pas un rôle suffisant, à lui seul, dans la gestion des amétropies. Certaines études ont montré une bonne efficacité chez les iris foncés des associations à partir d'instillation de Cyclopentolate 1% et de Tropicamide 1%³⁶ ou à base de Cyclopentolate, Tropicamide et de Phényléphrine³⁷. Une méta-analyse de 2016 a comparé l'effet cycloplégiant du Cyclopentolate par rapport au Tropicamide, et lui confère un effet cycloplégiant, mais qui ne reste pas recommandé chez l'enfant et l'hypermétrope fort³⁸.

1.1.4.2 Les effets indésirables

Nous verrons dans ce court chapitre les inconvénients en pratique clinique et sur le plan général. Ces risques justifient la présence du corps médical dans sa prescription et n'est donc pas compatible dans une politique de dépistage des troubles visuels de l'enfants. A noter que les effets indésirables sont plus fréquents et plus graves sous Atropine que sous Cyclopentolate²⁰.

1.1.4.2.1 Effets locaux et généraux

Chacun de ces collyres ont comme effet local de dilater la pupille, pouvant entrainer une photophobie particulièrement gênante chez le tout petit, surtout en cas de temps ensoleillé. La paralysie de l'accommodation entrainera une vision floue, en particulier de près. Le Vidal rapporte également sur le plan local un risque de glaucome aigu suite à l'instillation d'Atropine³⁰ chez les patients ayant un angle étroit.

Sur le plan général, le risque principal de l'Atropine réside dans le passage systémique ou l'ingestion accidentelle du produit, qui peut entrainer une tachycardie. Pour limiter ce risque, il est conseillé d'éloigner ce produit de la portée des enfants les plus petits et de comprimer les points lacrymaux pendant quelques minutes lors de l'instillation du produit. Il est fréquent d'observer une rougeur ou une agitation qui sont réversibles à l'arrêt du traitement et constituent des complications bénignes.

Concernant le Cyclopentolate, l'effet indésirable majeur classiquement décrit est le risque de déclencher une crise comitiale, il est donc déconseillé en cas d'antécédent de crise, ce d'autant que l'épilepsie est mal contrôlée. Il semble plus judicieux d'instiller de l'Atropine. L'Atropine n'est cependant pas dénuée de risque, notamment cardiaque et neurologique. Une rougeur du visage et une somnolence sont régulièrement constatées en consultation, et sont rapidement réversibles.

L'existence de ces effets indésirables n'est pas sans conséquence et peuvent entraîner une réticence du praticien, voire des parents à une époque où l'on refuse de prendre le moindre risque chez l'enfant, alors que son intérêt est capital.

1.1.4.2.2 Rémanence et pratique courante

Les deux seuls collyres efficaces et cycloplégants chez l'enfant (Atropine et Cyclopentolate)²⁸ partagent le point commun qu'ils entraînent une vision floue, surtout de près, par paralysie du muscle ciliaire. Celle-ci entraîne une gêne visuelle, plus ou moins longue en fonction de la rémanence du produit. Elle est de 10 à 24h pour le Cyclopentolate, et de 8 à 10 jours pour l'Atropine. Cet effet peut considérablement gêner l'enfant scolarisé en vision de près. Bien que cet effet soit systématique, il ne doit pas limiter son utilisation afin de donner la meilleure prise en charge et le meilleur devenir visuel de l'enfant.

En raison du protocole, d'au moins 45 minutes pour le Cyclopentolate, il peut exister un engorgement des salles d'attente en ophtalmopédiatrie et un temps d'attente augmenté pouvant entraîner une agitation de l'enfant et un mécontentement des parents. Le protocole via l'Atropine peut aussi nécessiter un contrôle supplémentaire afin de prendre les mesures, alourdissant ainsi le planning du praticien, et pouvant être mal vécue pour les parents sur le plan organisationnel ou financier.

1.1.4.3 Les indications

Nous l'avons vu, le cycloplégique le plus efficace est l'Atropine, mais le Cyclopentolate est préféré en raison de sa rapidité et de sa moindre rémanence. Il convient de fixer ses indications afin d'en limiter ses effets indésirables. Il est communément admis et recommandé de réaliser une cycloplégie à toute première consultation en ophtalmopédiatrie, notamment s'il existe une anisométrie à la réfraction automatique, un antécédent personnel ou familial de strabisme, un antécédent d'amblyopie... Le suivi et le port prolongé de la correction optique emmétropisante, qui constitue le meilleur cycloplégique, permettra de diminuer le recours à la cycloplégie pharmacologique. Elle garde également son indication dans la gestion du nystagmus et des enfants plus ou moins grands consultants pour des signes d'asthénopie

(céphalées) ou des signes de mauvaises adaptations optiques (comme des chalazions à répétition ou la présence de blépharite). Chez l'adulte, la cycloplégie garde sa place, en particulier en consultation pré-opératoire de chirurgie réfractive et dans la gestion d'un strabisme. Elle garde également son indication en cas de trouble asthénopique, en raison de la présence d'une réserve accommodative, présente jusqu'à environ 50 ans³⁹. Une étude personnelle réalisée dans notre service retrouve une différence statistiquement significative entre les myopes et les hypermétropes lorsque l'on analyse la moyenne des différences avant et après cycloplégie (différence de 0,45 δ chez les myopes et de 0,82 δ chez les hypermétropes pour la tranche 40 – 50 ans). Cette étude confirme la nécessité de cycloplégier les patients dont la part accommodative est forte, spécifiquement chez les hypermétropes.

1.1.5 Les paramètres biométriques

La puissance dioptrique totale à la naissance est d'environ 90 dioptries et celle-ci diminue pour se stabiliser vers 60 dioptries vers l'âge de 15 ans²⁰. Les 2/3 du dioptre chez l'adulte correspond à la puissance cornéenne en raison de son interface air / humeur aqueuse dont les indices de réfraction sont éloignés. Les paramètres les plus corrélés à la réfraction sont la longueur axiale^{40,41} (paramètre très corrélé chez l'enfant⁴²), la puissance de convergence cornéenne et cristallinienne. A noter que le rapport LA/Km est décrit comme un paramètre puissant dans la corrélation avec la réfraction⁴³ (longueur axiale sur la kératométrie moyenne). En tant que modèle optique simplifié, l'indice de réfraction de l'humeur aqueuse, du corps vitré ou de l'entonnoir fovéolaire peuvent être négligés⁵. Ces paramètres anatomiques sont mesurables via la biométrie optique, examen indispensable dans la compréhension de la réfraction. Nous décrirons ici les principaux paramètres biométriques et leur évolution dans l'enfance.

1.1.5.1 Longueur axiale

La longueur axiale correspond à la distance comprise entre la face antérieure de la cornée et la fovéa, celle-ci est mesurée par méthode d'interférométrie dans les biomètres optiques modernes et exprimée en millimètres (mm). Ce paramètre est un facteur majeur dans l'évolution de la réfraction chez l'enfant. Le nouveau-né naît avec une longueur axiale d'environ

17 mm⁴⁴⁻⁴⁶ qui augmente pour atteindre 24 mm chez l'emmetrope²⁰ jusqu'à 15 ans, valeur que gardera le sujet adulte. Cette croissance est plus forte jusque l'âge de 6 ans, puisque l'enfant passe de 17 mm à environ 22,7 mm à l'âge de 6 ans⁴⁶. Chez le patient myope, la croissance se poursuit jusqu'à environ 1 à 2 ans plus tard. L'allongement se fait surtout par une croissance du segment postérieur de l'œil, s'accompagnant de modification du vitré qui se liquéfie avec l'âge⁵. Les fortes hypermétropies ont tendance à persister, voire augmenter²⁰.

1.1.5.2 La kératométrie

La kératométrie représente le rayon de courbure cornéen et s'exprime en millimètre ou en dioptrie. Il s'agit du 2^e paramètre le plus important de la réfraction. La kératométrie permet de calculer la puissance de l'astigmatisme cornéen antérieur (correspondant à la différence de puissance sur les deux méridiens principaux). Ce pouvoir réfractif est en particulier permis grâce à la face antérieure de la cornée, la face postérieure étant moins importante. A l'heure actuelle, cette donnée est facilement recueillie par les autoréfractomètres (fixe ou portatif), mais également par la biométrie optique basée sur l'interférométrie utilisant un faisceau infra-rouge, ce dernier limitant l'effet accommodatif. La kératométrie varie entre 51,2 δ ⁴⁶ et 47 δ ⁴⁷ à la naissance, celle-ci diminue rapidement au cours de la première année de vie à environ 45,2 \pm 1,3 δ ⁴⁶. Cette évolution est liée à l'augmentation du diamètre de la cornée due à l'âge²⁰.

1.1.5.3 Le cristallin et son jeu accommodatif

Le cristallin s'amincit entre 6 et 14 ans²⁰. En pratique, il est complexe de mesurer l'indice réfractif de celui-ci ainsi que le jeu accommodatif. On sait cependant que le cristallin augmente de taille avec l'apparition d'une opacification du cristallin avec l'âge compensé par une diminution de la profondeur de la chambre antérieure⁴⁸. On sait également que le jeu accommodatif diminue aux alentours de 40 à 50 ans en raison de la disparition de la réserve accommodative³⁹.

1.1.5.4 Les autres paramètres

L'épaisseur cornéenne ne semble pas jouer un rôle prépondérant^{49,50} dans l'évolution de la réfraction. Certaines études rapportent également le lien entre la profondeur de la chambre antérieure et la réfraction^{41,51}.

1.2 Le dépistage des troubles réfractifs de l'enfant

1.2.1 Définitions

Un dépistage est l'application d'un ou plusieurs tests qui ne répondent pas à une demande explicite, il s'agit du professionnel qui prend l'initiative de la réalisation de ce ou ces tests (clinique ou biologique) dans une population ne se plaignant d'aucun symptôme pathologique⁵². Il s'agit d'une étape visant à identifier des patients potentiellement atteints d'une anomalie, ici, un problème réfractif.

1.2.2 Critères indispensables et justifications en ophtalmologie

La réalisation d'une nouvelle politique de dépistage occasionne une réorganisation avec de nouvelles structures, de nouveaux personnels occasionnant un coût pour la société et un possible impact psychosocial non négligeable. C'est pourquoi, un dépistage doit respecter un certain nombre de critères :

- Un problème de santé important : nous l'avons vu, les troubles réfractifs de l'enfant représentent environ 10 à 35% de la population pédiatrique selon les études, et sont potentiellement responsable d'amblyopie, strabisme, handicap visuel, difficultés scolaires. En 2019, l'AFSOP estime à environ 15% le taux d'enfants présentant un trouble visuel avant l'âge de 6 ans dont 70% seraient liés à un trouble réfractif⁵³ ;
- Une physiopathologie connue : bien que les seuils réfractifs ne soient pas univoques dans la littérature, les mécanismes optiques et les conséquences sont très bien connus ;

- Un cout économique acceptable pour la société : une amblyopie peut entrainer un handicap visuel, avec des aides nécessaires et un coût pour la société⁵⁴ à l'âge adulte, des difficultés professionnelles ou un retard de productivité⁵⁵ ;
- Un test simple, fiable et reproductible : les appareils modernes (autoréfractomètres) ont quelques années de recul et ont pour certains été bien validés dans la littérature comme des appareils ayant une bonne reproductibilité ;
- Un test acceptable pour la population : en effet, si nous envisageons un dépistage des troubles réfractifs, celui-ci serait organisé avec un biomètre, pourquoi pas portatif, qui ne nécessite aucun contact, tout au plus une fixation visuelle de plusieurs secondes ;
- Une pathologie dépistée dont il existe des thérapeutiques : il existe aujourd'hui des solutions qui découlent d'un problème réfractif (lunettes) ou de ses conséquences (amblyothérapie).

Ainsi, un dépistage réfractif prend tout son sens chez l'enfant.

1.2.3 Paramètres étudiés

La qualité d'un test de dépistage est définie par de ses caractéristiques intrinsèques et extrinsèques⁵² :

Les paramètres intrinsèques d'un test de dépistage sont :

- La sensibilité (Se) correspondant à la probabilité en pourcentage qu'un test soit réellement positif si le patient est porteur de la maladie, ainsi, il évite les faux négatifs (FN). Ce paramètre est calculé par la formule : **vrai positif / (vrai positif + faux négatif)**. Elle analyse la qualité du dépistage des sujets présentant une anomalie, ici réfractive.
- La spécificité (Sp) correspondant à la probabilité en pourcentage qu'un test soit réellement négatif si le patient est sain, ainsi, il évite les faux positifs (FP). Ce paramètre est calculé par la formule : **vrai négatif / (vrai négatif + faux positif)** ;

Les performances extrinsèques d'un test de dépistage sont :

- La valeur prédictive positive (VPP) correspondant à la probabilité que l'anomalie soit présente lorsque le test est positif. Ce paramètre se calcule par la formule : **vrai positif / (vrai positif + faux positif) ;**
- La valeur prédictive négative (VPN) correspondant à la probabilité que l'anomalie ne soit pas présente lorsque le test est négatif. Ce paramètre se calcule par la formule : **vrai négatif / (vrai négatif + faux négatif).**

La VPP et la VPN permettent de calculer la proportion d'erreurs respective pour la sensibilité et la spécificité.

Ainsi, dans le cadre d'un dépistage des troubles visuels, en particulier réfractif, la sensibilité devra être bonne (éviter les faux négatifs) pour ne pas méconnaître des troubles visuels importants. La sensibilité est plus grande si on diminue le seuil réfractif à détecter, elle a l'inconvénient d'augmenter le nombre de patients à examiner. Le test devra avoir également une bonne spécificité (éviter les faux positifs) afin de ne pas surcharger les salles d'attente en ophtalmologie, et allonger le délai d'attente déjà conséquent, ainsi en augmentant la spécificité, on diminue le nombre de patients à examiner et on améliore la détection des sujets réellement anormaux. L'AFSOP préconise une spécificité des tests de dépistages supérieurs à 90%⁵³.

1.2.4 Actualité dans le dépistage des troubles visuels

Le rapport SFO d'ophtalmopédiatrie de 2017 stipule qu'en France, sur 4 millions d'enfants de moins de 5 ans, environ 400000 enfants présentaient une amétropie²⁸, potentiellement responsable d'amblyopie et de malvoyance chez l'adulte. Ces malvoyances entraînent un handicap visuel pouvant être responsables d'un retard scolaire chez l'enfant, puis d'un retard de productivité⁵⁶ au travail et un coût pour la société⁵⁴ à l'âge adulte. A titre d'exemple, dans le monde, en 2010, l'OMS estimait à environ 285 millions de personnes le taux de déficience visuelle, dont 42% de troubles visuels liés à un trouble réfractif⁵⁵, dont 19 millions sont des enfants de moins de 15 ans²⁸. A ce titre, une politique de dépistage des troubles réfractifs fiable et robuste a tout son sens. Si des recommandations d'experts existent, ce dépistage n'est

néanmoins pas uniforme et varie en fonction des départements, en l'absence de consensus national clair. Ce dépistage est réalisé par la Protection Maternelle et Infantile (PMI), en mairie, à l'école, chez le médecin traitant, ou chez le pédiatre. Il existe, à ce jour, plusieurs aides et recommandations dans le cadre du dépistage :

Depuis 2006, un volet de santé visuel est renseigné dans les carnets de santé à plusieurs âges de l'enfant (dont 3, 4 et 6 ans...), remplis par les médecins généralistes et les pédiatres. Les troubles réfractifs peuvent être suspectés par une acuité visuelle faible ou asymétrique, ou si un strabisme est présent. Malheureusement aucun de ces professionnels de santé ne bénéficie d'un autoréfractomètre systématique. En pratique, l'examen clinique ophtalmologique est souvent incomplet⁵⁷ ou irréaliste face à des connaissances insuffisantes⁵⁸.

	L'enfant a-t-il une correction ?	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>	Mesure de l'acuité visuelle
	(Si oui, l'acuité visuelle doit être mesurée avec sa correction)			
Strabisme	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>		Vision de près
Si oui, pris en charge	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>		Test utilisé :
Poursuite oculaire normale	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>		Résultat : œil gauche œil droit
Tolère l'occlusion oculaire alternée	non <input type="checkbox"/>	oui <input type="checkbox"/>		Vision de loin
Test de vision stéréoscopique fait	<input type="checkbox"/>	non fait <input type="checkbox"/>		Test utilisé :
Résultat :	normal <input type="checkbox"/>	à refaire <input type="checkbox"/>		Résultat : œil gauche œil droit
	avis spécialisé demandé <input type="checkbox"/>			

Item sur la santé visuelle de l'enfant âgé de 3 ans (carnet de santé 2021)

Bien que des recommandations nationales^{4,59} existent pour aider le praticien dans le dépistage des troubles visuels, il reste complexe et imparfait reposant sur des examens paramédicaux (infirmière scolaire ou orthoptiste) et médicaux dans le cadre du suivi du développement de l'enfant (médecin généraliste, pédiatres...). Aucune mention réfractive ne figure dans le carnet de santé. Ce n'est qu'à l'âge de 3 ans que le carnet de santé évoque la première acuité visuelle. Le CADET (Cercle d'Action pour le Dépistage, l'Exploration et le Traitement des troubles visuels) met à disposition un guide complémentaire, avec des aides cliniques et séméiologiques pour guider le praticien^{60,61}.

De récentes recommandations font mention d'un dépistage réfractif. En effet, en 2019, l'AFSOP recommande, dès la 3^e année, dans le cadre d'un dépistage de masse, la réalisation d'une acuité visuelle, d'un test à l'écran ainsi qu'un photostrening^{53,62}. Ce dernier a montré son efficacité dans le cadre d'un dépistage de masse des troubles réfractifs sans cycloplégie chez les enfants⁶³ (avec notamment le Spot Vision Screener[®], le PlusOptix[®] et le 2win^{®53}). Le Rétinomax[®] mesure la réfraction automatique monoculaire, et semble être plus adapté au diagnostic sous cycloplégie.

1.3 Étude préliminaire

Une étude préliminaire a été réalisée par les étudiants en orthoptie du CHU de Nantes entre 2016 et 2019 sur la biométrie et la réfraction de l'enfant, 196 enfants de 0 à 8 ans avaient pu être inclus. L'étude montre que la faisabilité d'une biométrie classique par le biomètre du service LENSTAR LS900 (Haag Streit[®]) est possible à partir de l'âge de 3 ans en raison de défaut de fixation ou de pleurs trop importants pour permettre une acquisition. Elle montre une corrélation forte entre la réfraction cycloplégiée et la longueur axiale, avec un coefficient de corrélation à $r = 0,8$ (avec une équation de droite $y = -2,511x + 57,103$). Concernant l'évolution des paramètres biométriques, l'étude note une évolution linéaire de la longueur axiale de 0 à 8 ans, alors que la pachymétrie n'évolue pas significativement avec l'âge.

2. Objectifs de l'étude

2.1 Établir une corrélation entre les données biométriques et les données réfractives

L'objectif principal de cette étude est d'établir une corrélation entre les paramètres biométriques inclus et la réfraction cycloplégiée chez l'enfant de 2 à 16 ans.

2.2 Évaluer si cette corrélation est utilisable dans le cadre du dépistage

Les objectifs secondaires sont :

- De montrer la supériorité de la biométrie seule par rapport à la réfractométrie non cycloplégée pour l'hypermétropie, la myopie et l'astigmatisme ;
- De montrer la supériorité de la biométrie associée à la réfractométrie non cycloplégée par rapport à la réfractométrie non cycloplégée pour l'hypermétropie, la myopie et l'astigmatisme.

Ainsi, nous analyserons chaque modèle prédictif d'estimation de l'équivalent sphérique cycloplégé en précisant la sensibilité, spécificité, valeur prédictive négative (VPN), valeur prédictive positive (VPP) de ces formules via la biométrie dans le cadre d'un dépistage des amétropies de l'enfant. Nous évaluerons également leur association dans la détection d'une amétropie.

2.3 Analyser les formules extraites appliquées sur un nouvel échantillon

Enfin, nous tâcherons d'analyser la fiabilité des formules extraites de la première base de données, au sein d'une deuxième base de données (« population 2 ») séparée en deux populations : une hospitalière et une libérale.

3. Matériels et méthodes

3.1 Patients inclus (critères d'inclusion et d'exclusion)

Dans cette étude, 734 enfants de 2 à 16 ans ont été inclus sur 2 centres (CHU de Nantes et la Clinique d'Alger) de façon rétrospective sur des dossiers de 2016 à 2020. Le protocole de cette étude a été validé par le GNEDS (Groupe Nantais d'Éthique dans le Domaine de la Santé) du CHU de Nantes. Parmi ces enfants, 502 dossiers complets ont pu être inclus dans cette étude. Nous l'appellerons « population 1 ». Le recueil et du traitement des données ont été entièrement anonymisés.

Secondairement, nous avons créé une deuxième base de patients afin d'y appliquer les formules extraites du premier échantillon. Cette base est constituée de 100 enfants inclus à l'Hôpital de Nantes, et de 58 enfants issus de cabinets libéraux d'ophtalmologie : nous l'appellerons « population 2 ». Les critères d'inclusion étaient identiques pour ces 2 populations.

3.1.1 Les critères d'inclusion

Les critères d'inclusion étaient les suivants :

- L'âge : de 2 à 16 inclus ;
- Le sexe : garçons et filles ;
- Les dossiers où les enfants bénéficiaient d'une réfraction objective et d'une cycloplégie, ainsi qu'une mesure de la biométrie lorsque celle-ci était possible.

A noter que les enfants strabiques ont été inclus.

3.1.2 Les critères d'exclusion

Les critères d'exclusion étaient :

- Les enfants âgés de plus de 17 ans, ou de moins de 2 ans, en raison de la non faisabilité de la biométrie avant cet âge ;
- Les pathologies ophtalmologiques pouvant impacter sur la réfraction : pathologies cornéennes, cristalliniennes et vitréorétiniennes.

3.2 Matériel utilisé

Les mesures de l'autoréfraction non cycloplégées et cycloplégées ont été réalisées à l'aide d'un autoréfractomètre portatif (Rétinomax K-plus 3[®]) ou fixe (Nidek Tonoref[®] II). Les paramètres biométriques ont été mesurés à l'aide de l'appareil LENSTAR LS900 (Haag Streit[®]). Les figures suivantes illustrent les données recueillies via cet appareil que ce soit via le module

standard (figure 1) ou lors du calcul d'un implant via le IOL MASTER (figure 2). La longueur axiale est encadrée en rouge, et les données kératométriques, en bleu.

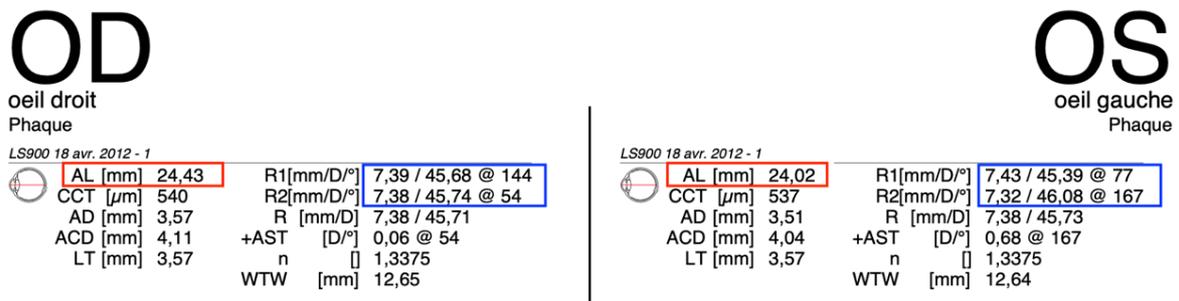


Figure 1. IOL MASTER

		OD oeil droit		OS oeil gauche	
		Phaque		Phaque	
Mode de mesure	Mode				
Longueur axiale	AL	24,43 mm	±0,007 mm	24,02 mm	±0,027 mm
Epaisseur de la cornée	CCT	540 μm	±1,1 μm	537 μm	±1,4 μm
Humeur aqueuse	AD	3,57 mm	±0,009 mm	3,51 mm	±0,012 mm
Profondeur chambre antéri..	ACD	4,11 mm	±0,008 mm	4,04 mm	±0,011 mm
Epaisseur de la lentille	LT	3,57 mm	±0,018 mm	3,57 mm	±0,011 mm
Epaisseur de la rétine	RT	200** μm	±0,0 μm	200** μm	±0,0 μm
Méridien plat	R1	7,39 mm @ 144°	±0,006 mm	7,43 mm @ 77°	±0,004 mm
Méridien bombé	R2	7,38 mm @ 54°	±0,016 mm	7,32 mm @ 167°	±0,009 mm
Astigmatisme	AST	0,06 D @ 54°	-----°	0,68 D @ 167°	±5,6°
Indice kératométrique	n	1,3375		1,3375	

Figure 2. Données biométriques du LENSTAR LS900

3.3 Données recueillies

Les données recueillies étaient de 4 ordres :

- Les données optiques de l'enfant : à savoir s'il portait une correction optique lors de l'examen, ainsi que les valeurs objectives de celle-ci (sphère, cylindre et axe) ;

- Les données réfractives de l'enfant : réfraction automatique non cycloplégée et la réfraction sous cycloplégie (sphère, cylindre et axe) ;
- Les données biométriques de l'enfant : la longueur axiale (en millimètres) et la kératométrie (K1 et K2) ;
- Les données cliniques (absence de pathologie impactant la réfraction : pathologie cornéo-cristalinienne ou vitréo-rétinienne).

3.4 Définition des erreurs réfractives

Dans notre étude, nous avons réalisé plusieurs tests, nous avons d'abord fixé les seuils réfractifs tels que l'on trouve dans les méta-analyses récentes, valables chez les adultes⁶⁴ :

- Un œil est considéré comme myope si son équivalent sphérique (ES) est $\leq -0,75 \delta$;
- Un œil est considéré comme hypermétrope si l'ES est $\geq +0,75 \delta$;
- Un œil est considéré comme astigmatique si sa réfraction cylindrique est $\geq 1,0 \delta$;
- Un œil sera considéré comme emmétrope si sa réfraction est $> -0,75 \delta$ et $< +0,75 \delta$.

Afin de s'adapter aux seuils de l'enfant, nous tâcherons de dépister les troubles réfractifs suivants :

- Un œil myope en cas d'ES $\leq -1 \delta$;
- Un œil hypermétrope en cas d'ES $\geq +3,5 \delta$;
- Un œil astigmatique si sa réfraction cylindrique $\geq 1,5 \delta$.

3.5 Méthodes statistiques

3.5.1 Statistiques générales

La réfraction non cycloplégée et cycloplégée ont été simplifiées par l'équivalent sphérique (ES) en se basant sur les mesures des auto-réfractomètres et calculées via l'équation : $ES = S + C / 2$ (S = sphère en dioptries et C = cylindre en dioptries). En effet, l'équivalent sphérique semble préférable pour l'analyse de la sphère²⁰. Les analyses descriptives sont réalisées avec le logiciel *Excel v16*®.

Les analyses descriptives portent sur la cohorte dans son ensemble. Les variables quantitatives sont exprimées en moyenne et écart-type, les variables qualitatives sont exprimées en effectif et pourcentage. Ces résultats ont été extraits du logiciel *Excel v16*®. Des analyses univariées étudiant la corrélation entre la réfraction et les différents paramètres biométriques (longueur axiale, kératométrie et réfraction pré-cycloplégie), puis, les paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests seuls ou associés ont été réalisés avec le logiciel *Excel v16*®. Les tests de comparaison de student ont été réalisés via le logiciel *BiostaTGV*®. Pour tous les tests statistiques réalisés, le seuil de significativité retenu est de 0.05.

3.5.2 Comparaison des données réfractives pré- et post-cycloplégie

3.5.2.1 Comparaison des équivalents sphériques pré- et post-cycloplégie

Nous avons comparé les données de l'équivalent sphérique (en dioptrie), à l'aide d'un test t-student pour données appariées à l'aide du logiciel internet *BiostaTGV*.

3.5.2.2 Comparaison de l'astigmatisme pré- et post cycloplégie

Nous avons comparé les données de l'astigmatisme (puissance cylindrique et axe), à l'aide d'un test t-student pour données appariées à l'aide du logiciel internet *BiostaTGV*. Nous considérons l'astigmatisme biométrique par l'équation suivante : $K2-K1$.

3.5.3 Analyses des données brutes

3.5.3.1 Équivalent sphérique pré-cycloplégie par rapport à l'équivalent sphérique post-cycloplégie

Nous avons comparé l'équivalent sphérique pré-cycloplégie et l'équivalent sphérique post-cycloplégie en étudiant leur corrélation à l'aide d'une courbe de régression linéaire, associée à l'interprétation du coefficient de corrélation r , celui-ci correspond à la quantification de la force de la relation linéaire entre deux variables. Ce coefficient est parfois associé au coefficient de détermination R^2 , correspondant à la qualité de la prédiction d'une régression linéaire. Nous

en avons ensuite extrait une formule, que nous avons testée et utilisée en tant que test de dépistage d'une amétropie pour l'ensemble de la population. Ces mêmes formules ont ensuite été utilisées dans le cadre de l'extension de l'étude, lorsque nous avons inclus d'autres enfants en prospectif au sein du service, afin d'y étudier les formules issues de la population 1 de 502 enfants sur la population 2. Ces formules ont été extraites via le logiciel *Excel v16*®.

3.5.3.2 Équivalent sphérique cycloplégié par rapport à la longueur axiale

De la même façon, l'analyse était identique pour la corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégié et la longueur axiale. Les formules extraites ont ensuite été appliquées à la population 2.

3.5.3.3 Équivalent sphérique cycloplégié par rapport à la longueur axiale et la kératométrie

Enfin, l'analyse était identique pour la corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégié et le rapport longueur axiale sur la kératométrie moyenne (LA/Km). Les formules extraites ont aussi été appliquées à la population 2.

4. Résultats

Afin de ne pas doubler artificiellement l'effectif, nous n'avons étudié que les résultats de l'œil droit. En effet, il existe une corrélation forte entre la réfraction des deux yeux¹⁴, elle est plus forte pour la composante sphérique ($r = 0,90$) que pour la composante cylindrique ($r = 0,65$).

4.1 Description de la population

4.1.1 Sexe, âge, ethnie

Le **tableau 1** résume les caractéristiques épidémiologiques de la population 1. Sur une population de 502 patients, la parité est respectée avec un ratio (M : F) à 0,97. La moyenne de l'équivalent sphérique non cycloplégié est de $+1,01 \delta (\pm 3,64)$ [-28,5 ; +10,875] pour l'œil droit,

la moyenne de l'ES cycloplégié est de $+1,93 \delta (\pm 3,79)$ $[-25,25 ; +11]$ pour l'œil droit ($p < 0,0001$).
 Sur 502 patients, on dénombre 11 patients inclus depuis le centre hospitalier d'Alger, ce qui correspond à 0,02% de la population totale incluse.

Tableau 1. Caractéristiques de la population 1.

Caractéristiques	n = 502
Moyenne d'âge	7,87 ans
2 ans, n (%)	4 (0,8)
3 ans, n (%)	14 (2,78)
4 ans, n (%)	42 (8,39)
5 ans, n (%)	69 (13,77)
6 ans, n (%)	89 (17,76)
7 ans, n (%)	59 (11,58)
8 ans, n (%)	56 (11,18)
9 ans, n (%)	39 (7,78)
10 ans, n (%)	27 (5,39)
11 ans, n (%)	22 (4,39)
12 ans, n (%)	22 (4,39)
13 ans, n (%)	18 (3,59)
14 ans, n (%)	18 (3,59)
15 ans, n (%)	11 (2,20)
16 ans, n (%)	12 (2,40)
Garçons : Filles, n (%)	247 (49,2) : 255 (50,8)
Sexe ratio (M : F)	0,97
Équivalent sphérique moyen non cycloplégié (dioptries), œil droit : œil gauche	1,01 : 1,00
Équivalent sphérique moyen non cycloplégié (dioptries), œil droit : œil gauche	1,93 : 1,94

Concernant l'âge, la répartition de la population 1 suit globalement une courbe de Gauss, comme nous pouvons le voir sur la **figure 3** avec une moyenne d'âge de 7,87 ans (IC à 95% : 7,58 – 8,16).

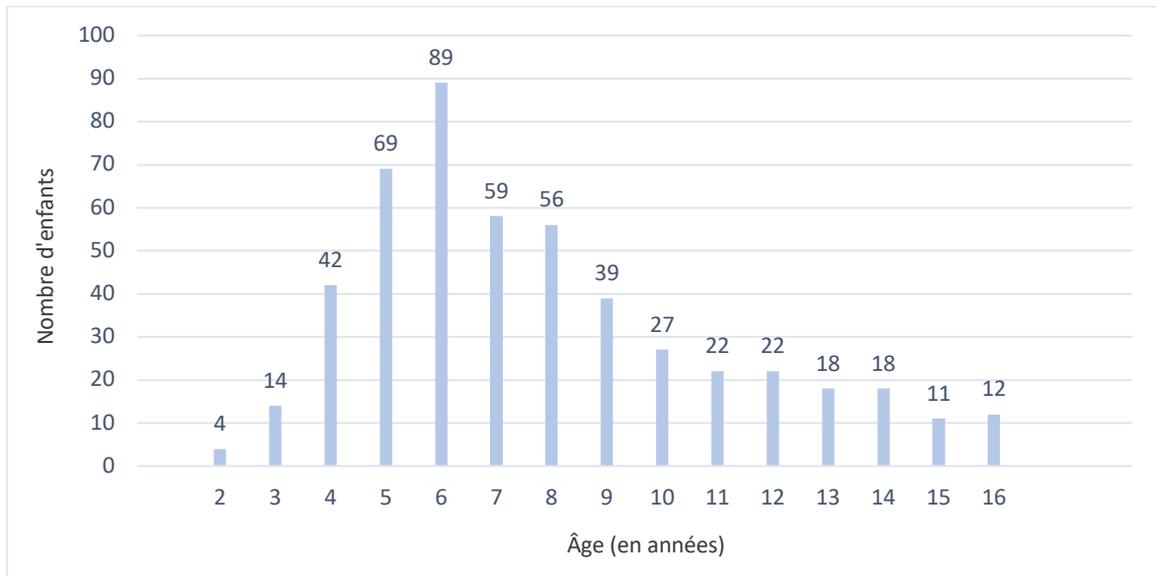


Figure 3. Effectif de la population 1.

La **figure 4** illustre l'effectif de la population 2, composé de 100 enfants issus d'une population hospitalière (âge moyen de 9,3 ans – IC à 95% : 8,4 – 10,2) et de 58 enfants issus d'une population libérale (âge moyen de 5,5 ans – IC à 95% : 5,1 – 5,95).

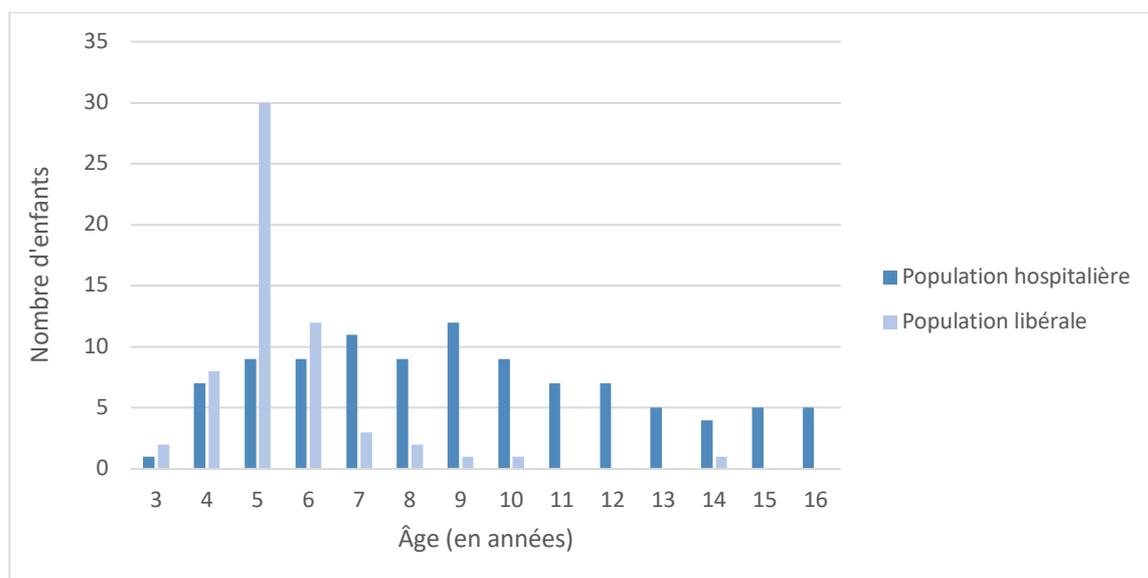


Figure 4. Effectif de la population 2

4.1.2 La réfraction

Dans les deux tableaux suivants, nous résumons les caractéristiques réfractives de la population 1 et 2. Nous considérons 2 situations dans la détection de seuil réfractif, à savoir :

- **La situation 1** : où la myopie est $\leq - 0.75 \delta$, l'emmétropie $> - 0.75$ et $< + 0.75 \delta$ et l'hypermétropie $\geq + 0.75 \delta$;
- **La situation 2** : où la myopie est $\leq - 1 \delta$, l'emmétropie $> - 1$ et $< + 3.5 \delta$ et l'hypermétropie $\geq + 3.5 \delta$.

Ainsi, 4 seuils seront évalués au cours de l'étude.

Tableau 2. Réfraction de l'œil droit avant et après cycloplégie dans la population 1.

Population 1 (n = 502)	Avant cycloplégie		Après cycloplégie	
	1	2	1	2
Situation réfractive				
Myopes, n (%)	85 (16,93)	69 (13,75)	58 (11,55)	49 (9,76)
Emmétropes, n (%)	145 (28,88)	332 (66,14)	61 (12,15)	160 (31,87)
Hypermétropes, n (%)	272 (54,18)	101 (20,12)	383 (76,29)	293 (58,37)

On constate un taux fort d'hypermétropes, qui, après cycloplégie se majore.

Tableau 3. Réfraction de l'œil droit avant et après cycloplégie dans la population 2.

Population 2	Population hospitalière (n=100)				Population libérale (n=58)	
	Avant cycloplégie		Après cycloplégie		Après cycloplégie	
Seuils réfractifs	1	2	1	2	1	2
Myopes (%)	44 %	42%	37%	34%	12%	7%
Hypermétropes (%)	31 %	11%	45%	13%	81%	10%
Emmétropes (%)	25 %	47%	18%	53%	7%	83%

En raison de la non disponibilité des données pré-cycloplégées dans la population libérale de la population 2, nous ne pouvons pas analyser les données avant cycloplégie.

4.1.3 Éléments biométriques et âge

Nous analysons la moyenne de la kératométrie moyenne et de la longueur axiale dans la population 1 :

Moyenne	< 3 ans	3 – 6 ans	7 – 10 ans	> 10 ans
LA (en mm)	21,47	21,90	22,28	22,95
Km (en dioptrie)	44,52	43,29	43,50	43,28

Associé à ces moyennes, nous analysons si les groupes sont statistiquement différents les uns des autres :

Tableau 4. Comparaison de la longueur axiale en fonction des groupes d'âge

ρ -value	< 3 ans	3 – 6 ans	7 – 10 ans	> 10 ans
< 3 ans		0,16	0,03	0,002
3 – 6 ans			0,004	< 0,001
7 – 10 ans				< 0,001
> 10 ans				

Tableau 5. Comparaison de la kératométrie moyenne en fonction des groupes d'âge

ρ -value	< 3 ans	3 – 6 ans	7 – 10 ans	> 10 ans
< 3 ans		0,02	0,04	0,02
3 – 6 ans			0,27	0,95
7 – 10 ans				0,26
> 10 ans				

4.2 Corrélation entre la biométrie et la réfraction

4.2.1 L'astigmatisme

4.2.1.1 Comparaison de l'astigmatisme pré- et post-cycloplégie

4.2.1.1.1 Puissance du cylindre pré- et post-cycloplégie

Nous avons comparé la puissance du cylindre avant et après cycloplégie, voici les résultats de la p -value pour l'œil droit résumé dans le **tableau 6** :

Tableau 6. Comparaison de la puissance cylindrique pré- et post-cycloplégie.

Puissance cylindrique	Œil droit
p -value	0,85
Moyenne des différences	0,005 δ

On constate qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre la puissance cylindrique pré- et post-cycloplégie, avec une moyenne des différences très faible.

4.2.1.1.2 Axe de l'astigmatisme pré- et post-cycloplégie

L'axe a également été comparé, avant et après cycloplégie, dont voici les résultats notés dans le **tableau 7** :

Tableau 7. Comparaison de l'axe cylindrique pré- et post-cycloplégie.

Axe de l'astigmatisme	Œil droit
p -value	0,56
Moyenne des différences	1,42 °

On peut constater que l'axe, avant et après cycloplégie, ne change pas avec une différence non statistiquement significative. L'analyse de ces résultats dans notre population est concordante avec la littérature⁶, à savoir que l'astigmatisme reste stable avant et après cycloplégie avec une différence non statistiquement significative.

4.2.1.2 Analyse de la corrélation entre les différentes mesures cylindriques

4.2.1.2.1 Corrélation entre l'astigmatisme réfractif pré- et post-cycloplégie

Nous avons étudié la corrélation entre l'astigmatisme réfractif pré- et post-cycloplégie (mesures à l'autoréfractomètre) dont voici l'analyse graphique :

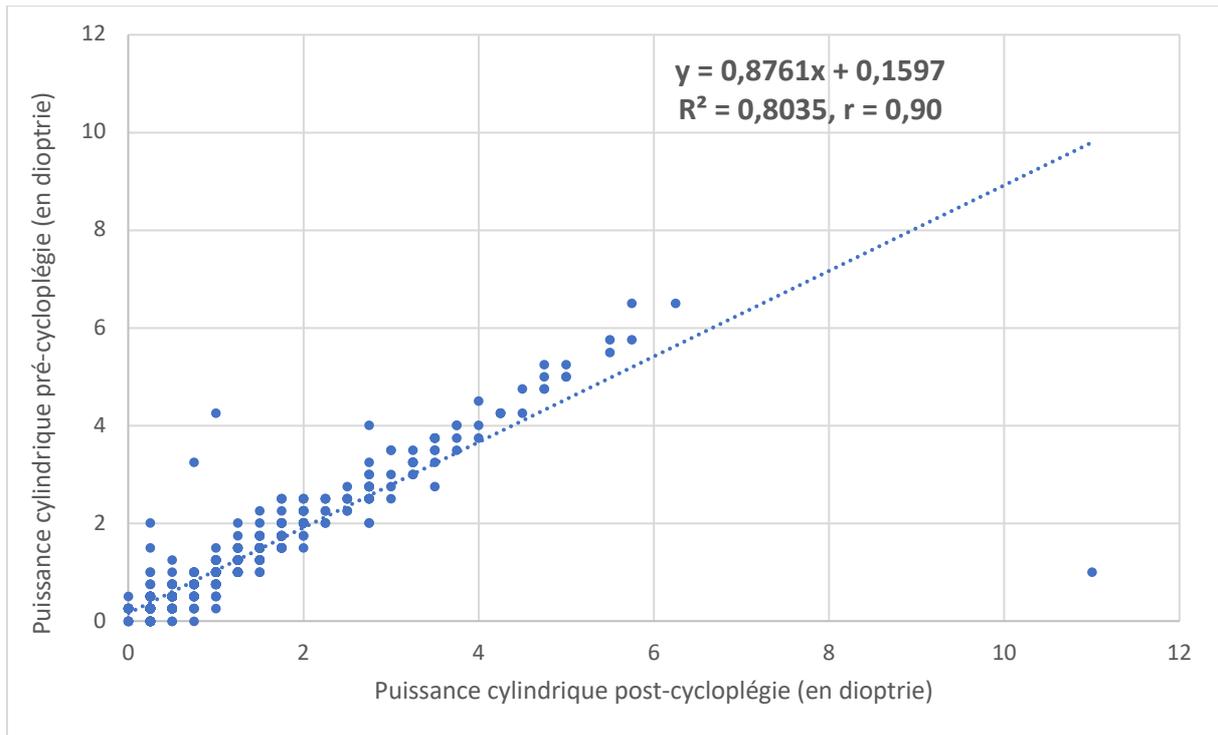


Figure 5. Corrélation entre le cylindre avant et après cycloplégie (en dioptries)

Sans surprise, on constate une bonne corrélation entre les valeurs cylindriques pré- et post-cycloplégiques avec un coefficient de corrélation r de 0,90.

4.2.1.2.2 Corrélation entre l'astigmatisme biométrique et réfractif post-cycloplégie

Pour l'œil droit, nous avons étudié la corrélation entre l'astigmatisme réfractif post-cycloplégie et l'astigmatisme biométrique dont voici l'analyse graphique :

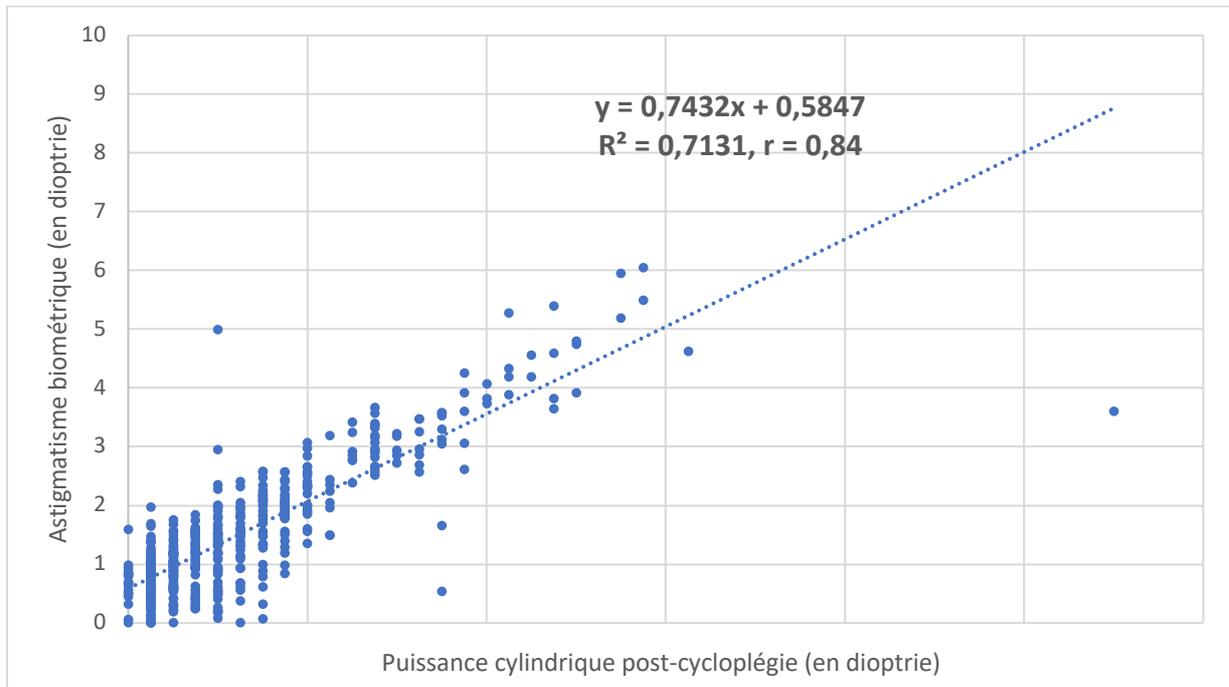


Figure 6. Corrélation entre l'astigmatisme biométrique et le cylindre post-cycloplégie (en dioptries)

On constate une bonne corrélation, avec un coefficient de corrélation r de 0,84.

4.2.2 La sphère

4.2.2.1 Analyse de l'ES pré- par rapport à l'ES post-cycloplégie

4.2.2.1.1 Comparaison entre l'ES pré- et post-cycloplégie

Nous avons comparé les équivalents sphériques avant et après cycloplégie, à l'aide d'un test t-student pour données appariées. On retrouve une p -value statistiquement significative sur l'œil droit sur un échantillon de 502 patients.

Tableau 8. Comparaison de la sphère avant et après cycloplégie.

n = 502	Œil droit
p -value	$p < 0,0001$
Moyenne des différences (dioptrie)	0,98 D

L'interprétation de ces données révèlent une différence statistiquement significative entre l'équivalent sphérique avant et après cycloplégie avec une différence d'environ 1 δ , à droite, en faveur de la convexité.

Suite à ce constat, nous avons également analysé ces données par strates d'âge, les moins de 3 ans, entre 3 et 6 ans, les enfants entre 7 et 10 ans, puis les enfants avec un âge supérieur à 10 ans. Voici les résultats concernant l'œil droit :

Tableau 9. Comparaison de la sphère avant et après cycloplégie en fonction de l'âge.

Œil droit, n = 502	< 3 ans	3 – 6 ans	7 – 10 ans	> 10 ans
Effectif	4	152	221	125
p -value	0,05	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Moyennes des différentes (dioptries)	+ 0,50 δ	+ 1,29 δ	+ 0,90 δ	+ 0,76 δ

Il existe une différence statistiquement significative avec une p -value $< 0,05$ pour chaque strate d'âge sauf les enfants ayant moins de 3 ans. On constate une moyenne des différences plus forte chez l'enfant de 3 à 6 ans. Afin d'étudier si ces différents groupes d'âges étaient statistiquement différents entre eux, un test de Student est réalisé :

p -value	< 3 ans	3 – 6 ans	7 – 10 ans	> 10 ans
< 3 ans		0,005	0,02	0,14
3 – 6 ans			0,13	< 0,001
7 – 10 ans				0,02
10 – 16 ans				

4.2.2.1.2 Corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie

Nous avons étudié la corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie comme le montre la **figure 7** :

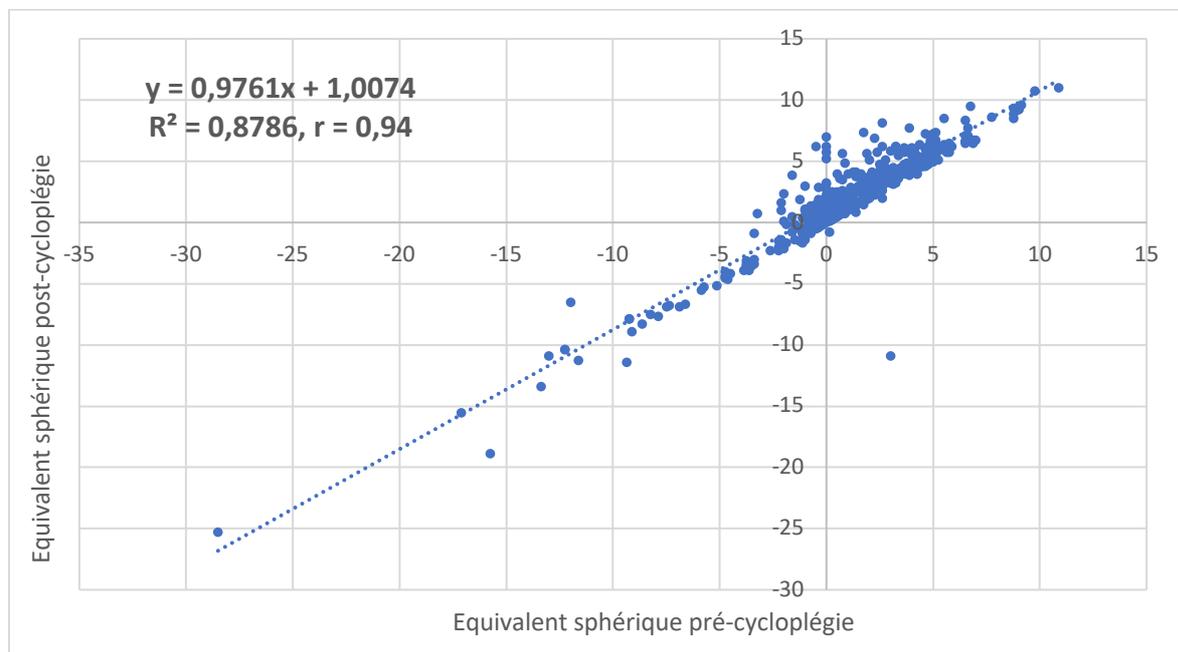


Figure 7. Corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et l'équivalent post-cycloplégie de l'œil droit.

Une droite est extraite avec une formule de type $y = ax + b$, où x correspond à l'équivalent sphérique pré-cycloplégie, avec un r à 0,94, ce qui prouve une relation puissante, mais non surprenante, entre ces 2 données.

4.2.2.2 Corrélation entre l'équivalent sphérique et la longueur axiale

Pour calculer la corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégié et la longueur axiale, nous avons utilisé une droite de corrélation. Voici les résultats concernant l'œil droit :

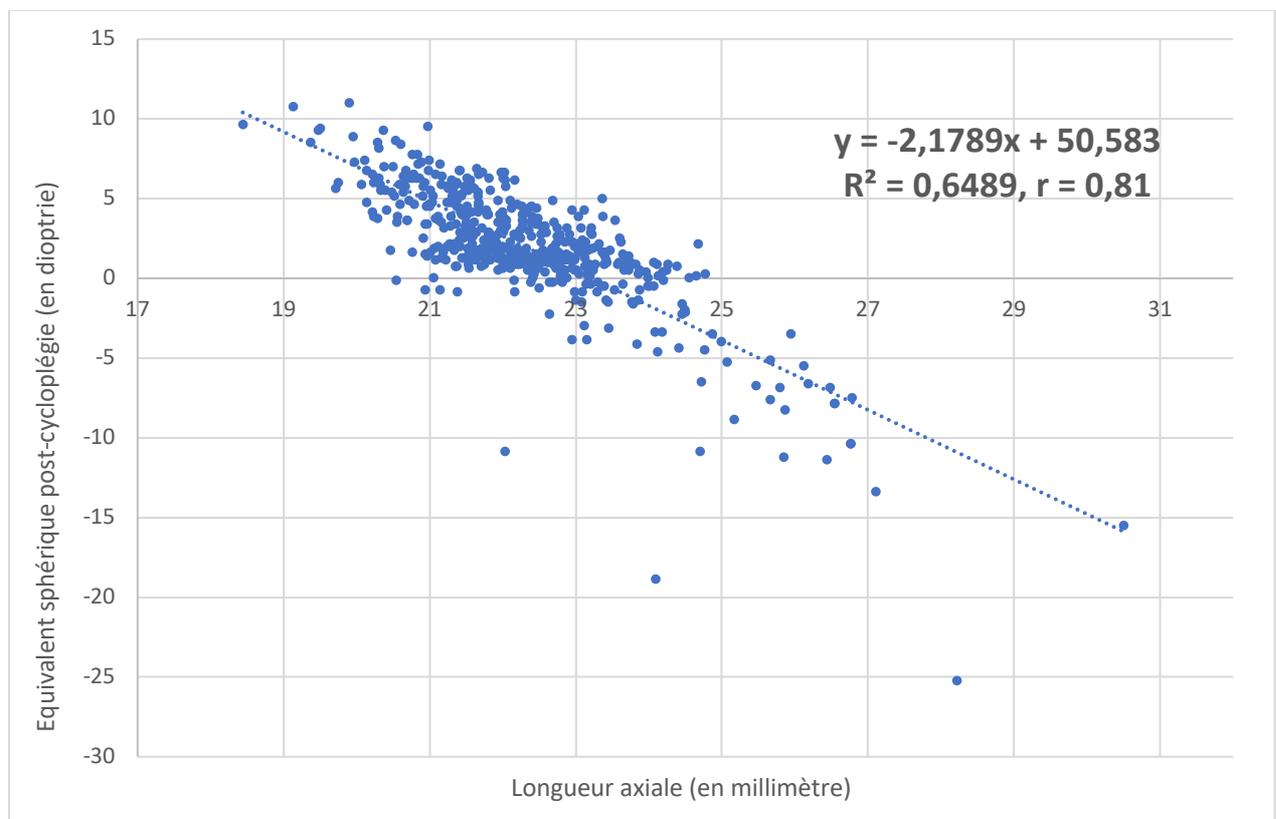


Figure 8. Corrélation entre la longueur axiale et l'équivalent sphérique cycloplégiée de l'œil droit.

On retrouve une formule de type $f(x) = a x + b$ où x correspond à la longueur axiale de l'œil. Le coefficient r correspond à l'indice de corrélation, sa valeur est de 0,81, ce qui correspond à une excellente corrélation dans notre population.

4.2.2.3 Corrélation entre l'ES post-cycloplégie et le rapport LA/Km

Nous avons ensuite calculé le rapport LA/Km (exprimé en millimètres) afin d'analyser sa corrélation avec l'équivalent sphérique cycloplégié. Km correspond à la kératométrie moyenne en millimètres. En voici l'analyse graphique pour l'œil droit :

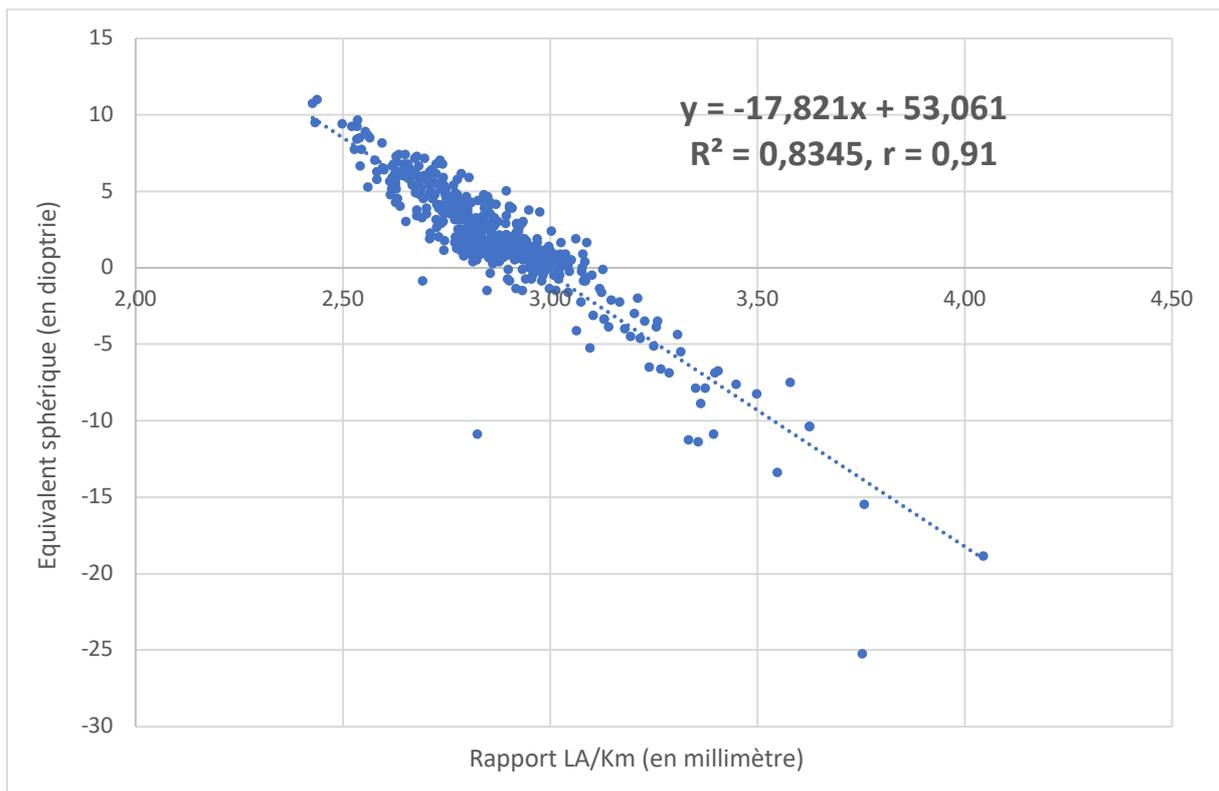


Figure 9. Corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégié et le rapport LA/Km de l'œil droit.

Le coefficient de corrélation r y est ici excellente, nous constatons une relation forte entre l'équivalent sphérique cycloplégié et le rapport LA/Km.

4.3 Utilisation des données brutes dans le cadre du dépistage

4.3.1 Analyse des tests seuls

4.3.1.1 Détection de l'astigmatisme

Nous avons comparé l'astigmatisme réfractif (à l'autoréfractométrie automatique) et l'astigmatisme biométrique en considérant comme gold-standard l'astigmatisme réfractif post-cycloplégie (puissance cylindrique post-cycloplégie). Ainsi, nous avons d'abord calculé les paramètres intrinsèques et extrinsèques du cylindre pré-cycloplégié (RA) en tant que test de dépistage par rapport aux valeurs cycloplégiées. Nous avons ensuite comparé l'astigmatisme biométrique (K2-K1) aux valeurs post-cycloplégie afin de savoir si celui-ci permettait de détecter les astigmatismes de façon fiable. Les seuils de l'astigmatisme sont fixés à 1δ et $1,5 \delta$.

Tableau 10. Calcul des performances d'un test de dépistage de l'œil droit

n = 502	Astigmatisme (RA)		Astigmatisme biométrique	
	$> 1 \delta$	$> 1,5 \delta$	$> 1 \delta$	$> 1,5 \delta$
Seuils				
Sensibilité	0,91	0,92	0,85	0,88
Spécificité	0,95	0,96	0,64	0,84
VPP	0,95	0,93	0,71	0,73
VPN	0,91	0,96	0,81	0,93

4.3.1.2 La réfraction automatique non cycloplégiée

4.3.1.2.1 Réfraction automatique non cycloplégiée seule (Se, Sp, VPP, VPN)

Dans cette partie, nous envisageons la réfraction automatique non cycloplégiée seule (équivalent sphérique non cycloplégié) comme test de dépistage à part entière, en considérant la réfraction cycloplégiée (équivalent sphérique cycloplégié) comme valeurs diagnostics de l'amétropie. Nous avons fait cette analyse pour les 4 seuils précédemment expliqués. Nous retrouvons les paramètres intrinsèques et extrinsèques pour l'œil droit en page suivante.

Tableau 11. Calcul des performances de l'équivalent sphérique non cycloplégiée de l'œil droit, en tant que test de dépistage.

n = 502	Réfraction automatique non cycloplégiée			
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$	$\leq - 1 \delta$	$\geq + 0,75 \delta$	$\geq + 3,5 \delta$
Sensibilité	0,97	0,98	0,73	0,65
Spécificité	0,93	0,95	0,99	1
VPP	0,66	0,7	1	1
VPN	1	1	0,54	0,86

4.3.1.2.2 ES-post cycloplégie estimé par la réfraction automatique non cycloplégiée (Se, Sp, VPP, VPN)

Nous envisageons, comme test de dépistage, la formule extraite de la corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie (paragraphe 4.1.1.2.1 **figure 7**). Cette formule est : $y = 0,9761 x + 1,0074$ (où x représente l'ES pré-cycloplégié et y l'ES post-cycloplégié estimé). Nous l'appellerons formule **RANC** (réfraction automatique non cycloplégiée). Les paramètres intrinsèques et extrinsèques de ce test sont les suivants :

Tableau 12. Calcul des performances de la formule de corrélation entre l'ES pré- et post cycloplégie, en tant que test de dépistage.

n = 502	ES estimé par la formule RANC			
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$	$\leq - 1 \delta$	$\geq + 0,75 \delta$	$\geq + 3,5 \delta$
Sensibilité	0,76	0,84	0,94	0,80
Spécificité	0,99	0,99	0,71	0,96
VPP	0,88	0,91	0,91	0,90
VPN	0,97	0,98	0,79	0,91

Le **tableau 12** résume les paramètres de la formule de corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie.

4.3.1.3 ES-post cycloplégié estimé par la longueur axiale (VPP, VPN, Se, Sp)

Nous envisageons comme test de dépistage la formule extraite de la corrélation entre l'équivalent sphérique post-cycloplégie et la longueur axiale. La formule, expliquée dans le paragraphe 4.2.2.2 **figure 8**, est $y = -2,1789x + 50,583$ (où x correspond à la longueur axiale et y correspond à l'équivalent sphérique estimé post-cycloplégie par la longueur axiale) et est testée en tant que test de dépistage des amétropies dans la détection des 4 seuils précédemment cités. Les paramètres intrinsèques et extrinsèques de ce test pour l'œil droit sont :

Tableau 13. Calcul des performances de la formule de corrélation entre la longueur axiale (LA) et l'ES post-cycloplégie, en tant que test de dépistage.

n = 502	ES estimé par la formule de la longueur axiale			
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$	$\leq - 1 \delta$	$\geq + 0,75 \delta$	$\geq + 3,5 \delta$
Sensibilité	0,69	0,80	0,84	0,67
Spécificité	0,93	0,94	0,71	0,84
VPP	0,55	0,61	0,90	0,67
VPN	0,96	0,98	0,58	0,84

4.3.1.4 ES-post cycloplégié estimé par le rapport LA/Km (VPP, VPN, Se, Sp)

La formule de la corrélation entre l'équivalent sphérique post-cycloplégie et le rapport longueur axiale / Km est expliquée dans le paragraphe 4.2.2.3 (**figure 9**). Celle-ci est $y = -17,821x + 53,061$, où x correspond au rapport LA/Km en millimètres et y l'équivalent sphérique estimé post-cycloplégié. Les paramètres intrinsèques et extrinsèques de cette formule pour l'œil droit sont précisés dans le **tableau 14** ci-après.

Tableau 14. Calcul des performances de la formule de corrélation entre le rapport LA/Km et l'ES post-cycloplégie, en tant que test de dépistage.

n = 502	ES estimé par la formule du rapport LA/Km			
	$\leq - 0,75 \delta$	$\leq - 1 \delta$	$\geq + 0,75 \delta$	$\geq + 3,5 \delta$
Seuils				
Sensibilité	0,78	0,88	0,90	0,80
Spécificité	0,95	0,96	0,83	0,93
VPP	0,66	0,72	0,95	0,84
VPN	0,97	0,99	0,73	0,91

4.3.2 Analyse des tests combinés (Se, Sp, VPP, VPN)

Dans ce paragraphe, nous avons analysé les paramètres intrinsèques et extrinsèques des tests précédemment étudiés en association, afin de répondre aux objectifs secondaires et de montrer une supériorité, ou pas, de la biométrie associée à la réfractométrie non cycloplégée par rapport à la réfractométrie non cycloplégée seule. L'œil était considéré comme amétrope pour les seuils définis, si l'équivalent sphérique non cycloplégié ou si l'équivalent sphérique cycloplégié prédit par nos formules étaient positifs pour l'un de ces tests.

4.3.2.1 Association de la réfraction non cycloplégée et de la formule de la LA

Nous étudions ici les paramètres intrinsèques et extrinsèques de l'association de la réfraction non cycloplégié seule (sans la formule RANC) associée à la formule extraite de la corrélation entre l'ES post-cycloplégie et de la longueur axiale comme montré en paragraphe 4.2.2.2 (**figure 8**). L'œil est considéré comme amétrope si l'équivalent sphérique non cycloplégié ou l'équivalent sphérique estimé par la formule de la longueur axiale est positif pour les seuils définis.

Tableau 15. Calcul des performances de l'association des 2 tests suivants :

n = 502	Association ES pré-cycloplégie et ES estimé par la formule de la LA			
	$\leq - 0,75 \delta$	$\leq - 1 \delta$	$\geq + 0,75 \delta$	$\geq + 3,5 \delta$
Seuils				
Sensibilité	0,97	0,98	0,93	0,84
Spécificité	0,87	0,90	0,70	0,85
VPP	0,50	0,53	0,91	0,73
VPN	0,99	1	0,76	0,92

4.3.2.2 Association de la réfraction non cycloplégiée et de la formule du rapport LA/Km

L'œil est considéré comme amétrope, pour les seuils définis, si l'équivalent sphérique non cycloplégié ou l'équivalent sphérique estimé par la formule du rapport LA/Km est positif :

Tableau 16. Calcul des performances de l'association des 2 tests suivants :

n = 502	Association ES pré-cycloplégie et ES estimé par LA/Km			
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$	$\leq - 1 \delta$	$\geq + 0,75 \delta$	$\geq + 3,5 \delta$
Sensibilité	0,97	0,98	0,95	0,88
Spécificité	0,90	0,92	0,83	0,93
VPP	0,55	0,57	0,95	0,85
VPN	0,99	1	0,84	0,94

4.3.2.3 Association de la réfraction non cycloplégiée, de la formule de la LA et du rapport LA/Km

Les 2 tests sont ici couplés avec l'équivalent sphérique non cycloplégié. Le test est positif si un des 3 tests est positif dans la recherche de l'amétropie. Voici les résultats pour l'œil droit :

Tableau 17. Calcul des performances de l'association des 2 tests suivants :

n = 502	Association ES pré-cycloplégie, de la LA et du rapport LA/Km			
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$	$\leq - 1 \delta$	$\geq + 0,75 \delta$	$\geq + 3,5 \delta$
Sensibilité	0,97	0,98	0,98	0,96
Spécificité	0,85	0,88	0,63	0,81
VPP	0,46	0,48	0,89	0,70
VPN	0,99	1	0,90	0,97

Les tests associés n'ont volontairement pas pris en compte la formule d'estimation de l'équivalent sphérique prédit par la formule RANC de la corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie (**figure 7**, paragraphe 4.2.2.1.2).

4.3.3 Tableau récapitulatif des paramètres intrinsèques et extrinsèques des formules seules

n = 502	Paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests															
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$				$\leq - 1 \delta$				$\geq + 0,75 \delta$				$\geq + 3,5 \delta$			
Tests	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sensibilité	0,97	0,76	0,69	0,78	0,98	0,84	0,80	0,88	0,73	0,94	0,84	0,90	0,65	0,80	0,67	0,80
Spécificité	0,93	0,99	0,93	0,95	0,95	0,99	0,94	0,96	0,99	0,71	0,71	0,83	1	0,96	0,84	0,93
VPP	0,66	0,88	0,55	0,66	0,7	0,91	0,61	0,72	1	0,91	0,90	0,95	1	0,90	0,67	0,84
VPN	1	0,97	0,96	0,97	1	0,98	0,98	0,99	0,54	0,79	0,58	0,73	0,86	0,91	0,84	0,91

1: ES pré-cycloplégie, 2: ES estimé par RANC, 3: ES estimé par la LA, 4: ES estimé par le rapport LA/Km

4.3.4 Association des formules

Les formules testées précédemment ont été combinées afin d'étudier si l'association des formules permettaient d'améliorer les tests de dépistage. La colonne 1 correspond aux valeurs pré-cycloplégées. La colonne 2 correspond à la formule issue de la corrélation avec la longueur axiale ainsi que les valeurs pré-cycloplégées. La colonne 3 correspond aux valeurs avant la cycloplégie ainsi que la formule issue du rapport LA/Km. La colonne 4 correspond aux 3 paramètres précités. La formule issue de la corrélation entre l'ES pré- et l'ES post-cycloplégie n'a pas été associée. En voici le tableau récapitulatif :

n = 502	Paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests															
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$				$\leq - 1 \delta$				$\geq + 0,75 \delta$				$\geq + 3,5 \delta$			
Tests	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sensibilité	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,73	0,93	0,95	0,98	0,65	0,84	0,88	0,96
Spécificité	0,93	0,87	0,90	0,85	0,95	0,90	0,92	0,88	0,99	0,70	0,83	0,63	1	0,85	0,93	0,81
VPP	0,66	0,50	0,55	0,46	0,7	0,53	0,57	0,48	1	0,91	0,95	0,89	1	0,73	0,85	0,70
VPN	1	0,99	0,99	0,99	1	1	1	1	0,54	0,76	0,84	0,90	0,86	0,92	0,94	0,97

1 : ES pré-cycloplégie, 2 : association de l'ES pré- et de la LA, 3 : association de l'ES pré- et du rapport LA/Km, 4 : association de l'ES pré-, de la LA, et du rapport LA/Km

4.4 Utilisation des formules par strates d'âge

4.4.1 Corrélation entre la réfraction et les paramètres anatomiques

Dans cette partie, nous étudions la corrélation entre l'équivalent sphérique post-cycloplégie et les mêmes paramètres précédemment étudiés (ES pré-cycloplégie, LA, rapport LA/Km) que nous avons subdivisés en fonction des strates d'âge : < 3 ans, entre 3 et 6 ans, entre 7 et 10 ans, et > 10 ans).

4.4.1.1 Équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie

Nous représentons dans ce graphique, les droites de corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie de l'œil droit pour les différentes strates d'âge.

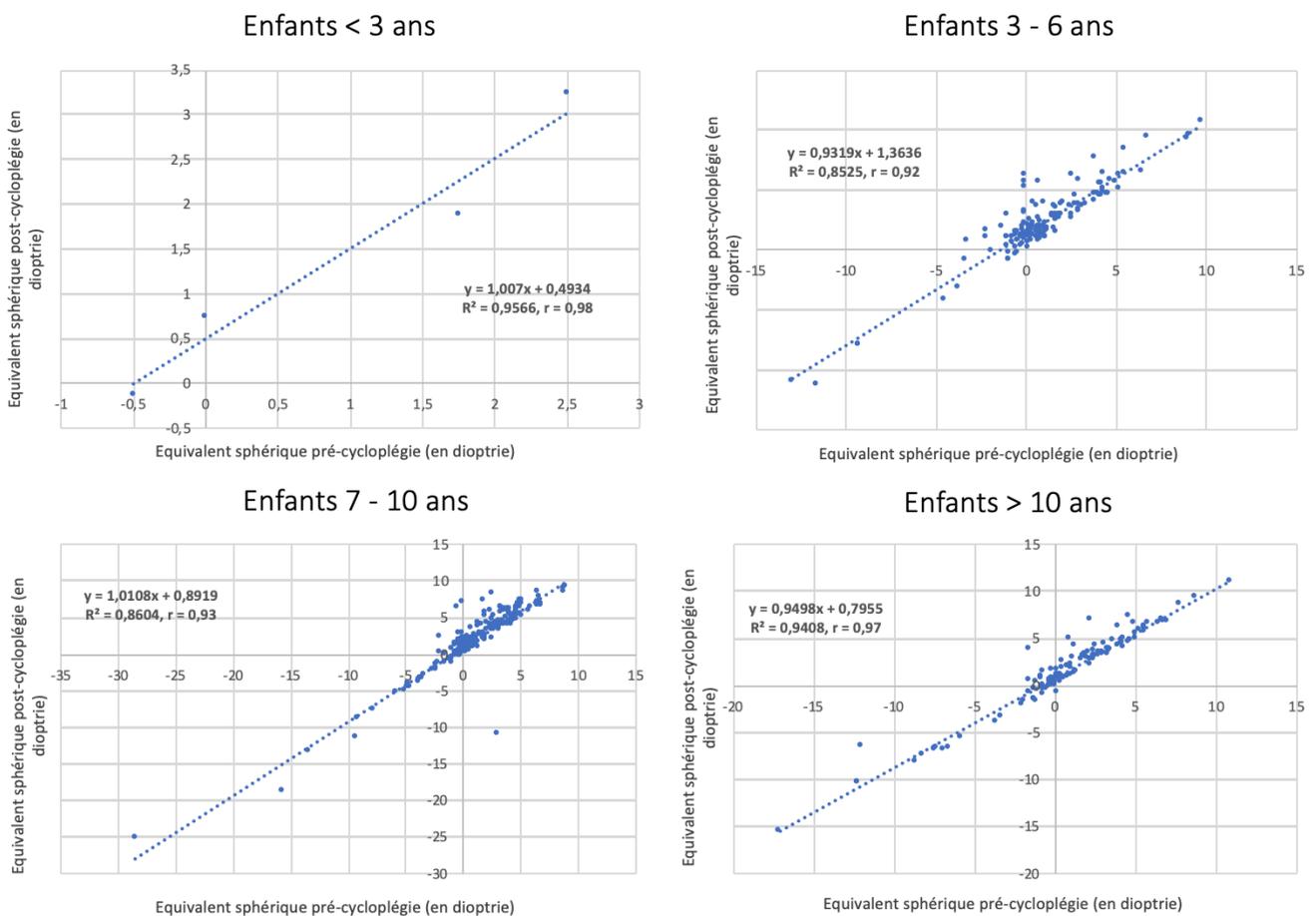


Figure 10. Corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post cycloplégie en fonction des strates d'âge.

4.4.1.2 Longueur axiale et équivalent sphérique post-cycloplégie

Nous représentons dans ce graphique, les droites de corrélation entre l'équivalent sphérique post-cycloplégie et la longueur axiale de l'œil droit pour les différentes strates d'âge.

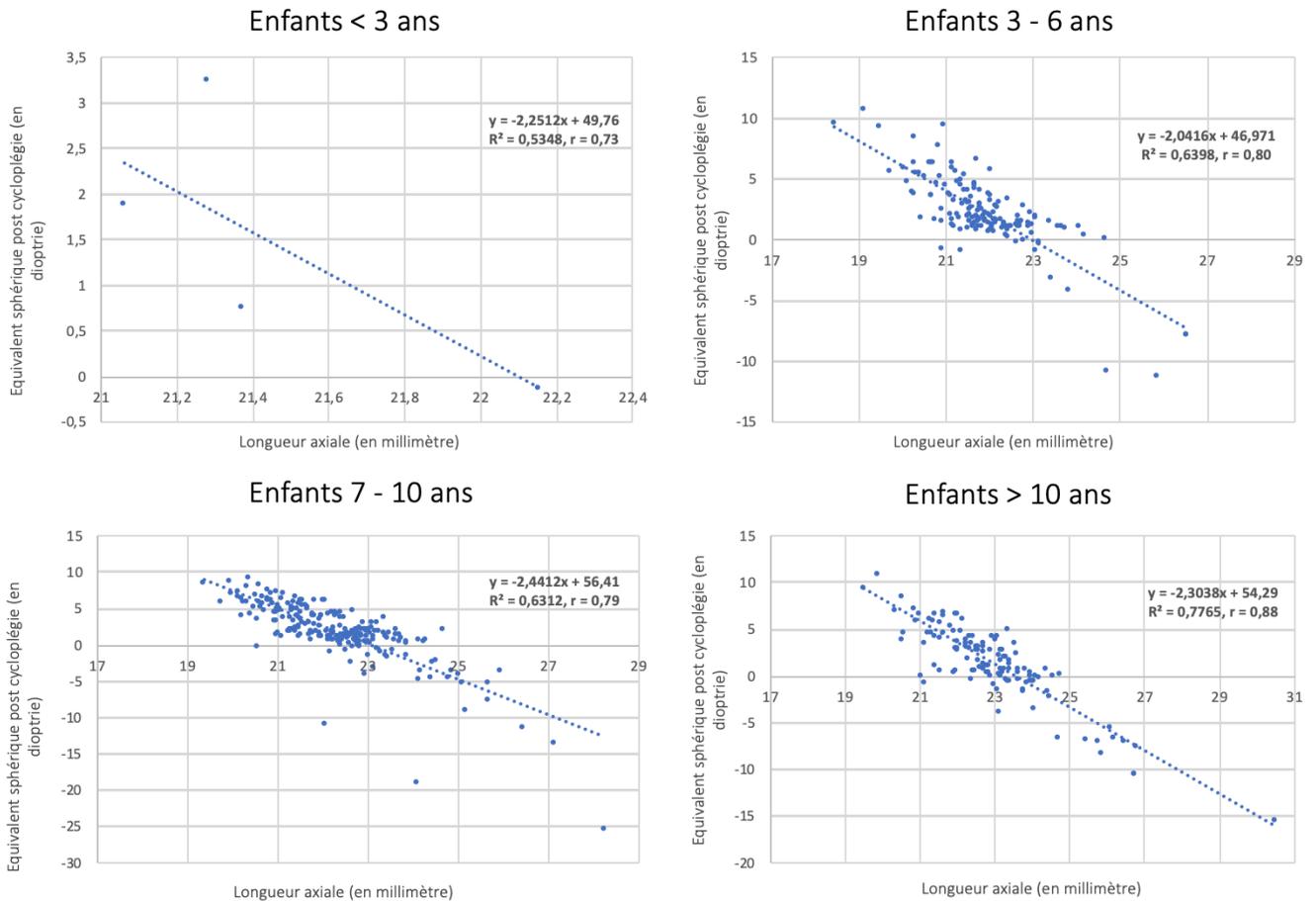


Figure 11. Corrélation entre la longueur axiale et l'équivalent sphérique post-cycloplégie en fonction des strates d'âge.

4.4.1.3 Rapport LA/Km et équivalent sphérique post-cycloplégie

Dans ce sous chapitre, nous analysons, par graphique, les droites de corrélation entre le rapport LA/Km et l'équivalent sphérique post-cycloplégie en fonction des classes d'âges précédemment définies. À chaque formule de droite de corrélation est associée un coefficient de corrélation r et de détermination R^2 .

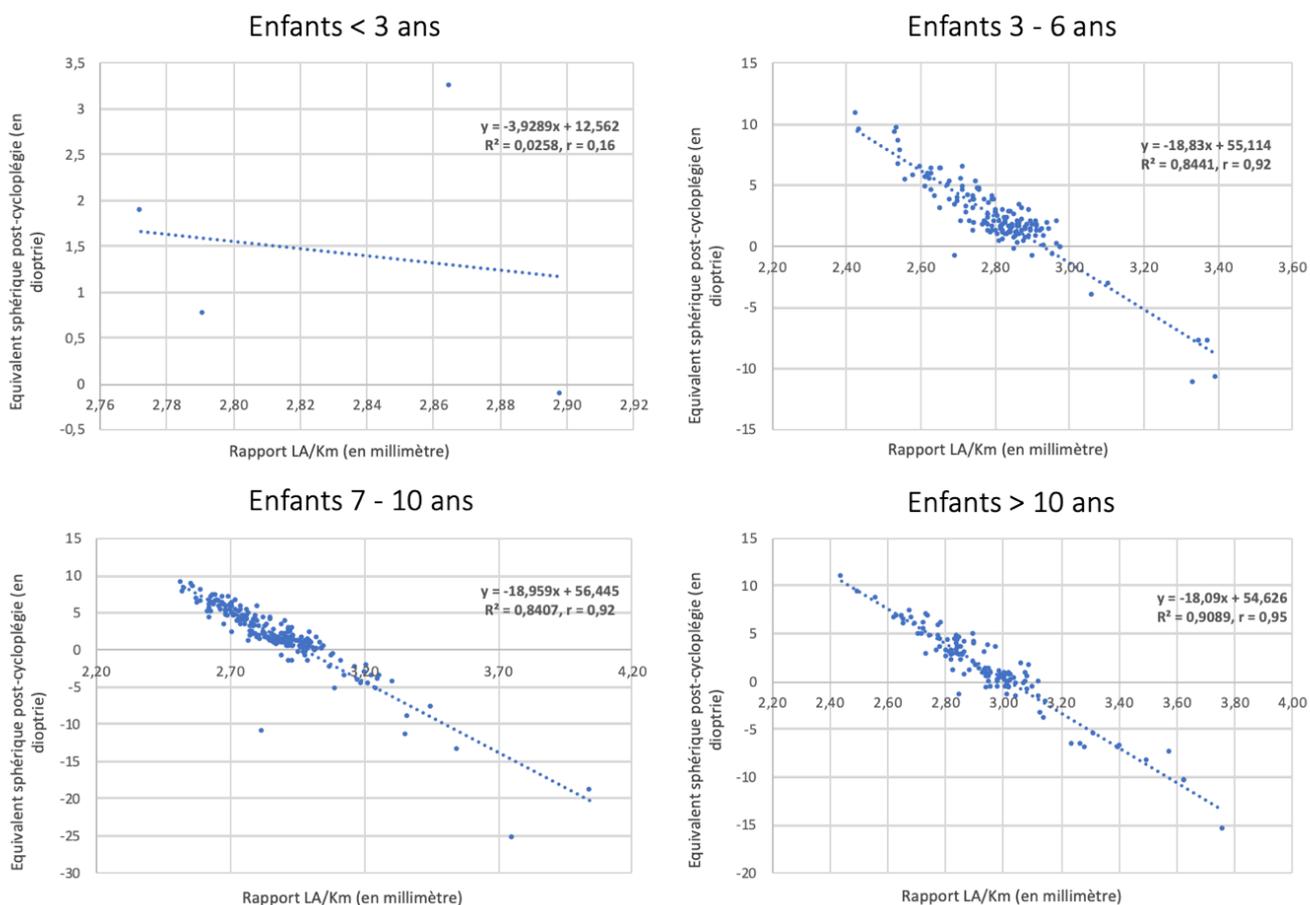


Figure 12. Corrélation entre le rapport LA/Km et l'équivalent sphérique post-cycloplégie en fonction des strates d'âge.

4.4.2 Tableau récapitulatif des paramètres intrinsèques et extrinsèques des formules appliquées aux différentes strates d'âge

Dans cette partie, nous exposons les paramètres intrinsèques et extrinsèques des formules utilisées précédemment sur le 4 classes d'âges différents. Ces tests sont présentés pour quatre seuils réfractifs différents :

4.4.2.1 Enfants de moins de 3 ans

n = 502	Paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests															
	$\leq - 0,75 \delta$				$\leq - 1 \delta$				$\geq + 0,75 \delta$				$\geq + 3,5 \delta$			
Seuils																
Tests	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sensibilité	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	0,67	0,67	1	1	NC	NC	NC	NC
Spécificité	1	1	1	1	1	1	1	1	NC	NC	1	0	1	1	1	1
VPP	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	1	0,75	NC	NC	NC	NC
VPN	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	NC	1	1	1	1

1 : ES pré-cycloplégie, 2 : ES estimé par RANC, 3 : ES estimé par la LA, 4 : ES estimé par le rapport LA/Km, NC : non calculable.

4.4.2.2 Enfants de 3 à 6 ans

n = 502	Paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests															
	$\leq - 0,75 \delta$				$\leq - 1 \delta$				$\geq + 0,75 \delta$				$\geq + 3,5 \delta$			
Seuils																
Tests	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sensibilité	1	0,78	0,67	0,67	1	1	0,83	1	0,65	0,94	0,86	0,87	0,6	0,74	0,67	0,74
Spécificité	0,91	0,99	0,95	0,98	0,93	0,99	0,96	1	1	0,65	0,7	0,6	1	0,96	0,9	0,94
VPP	0,43	0,88	0,46	0,67	0,38	0,75	0,45	1	1	0,95	0,95	0,93	1	0,89	0,73	0,82
VPN	1	0,99	0,98	0,98	1	1	0,99	1	0,32	0,62	0,44	0,41	0,87	0,91	0,88	0,90

1 : ES pré-cycloplégie, 2 : ES estimé par RANC, 3 : ES estimé par la LA, 4 : ES estimé par le rapport LA/Km, NC : non calculable.

4.4.2.3 Enfants de 7 à 10 ans

n = 502	Paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests															
	$\leq - 0,75 \delta$				$\leq - 1 \delta$				$\geq + 0,75 \delta$				$\geq + 3,5 \delta$			
Seuils																
Tests	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sensibilité	0,96	0,79	0,71	0,79	0,96	0,88	0,72	0,84	0,76	0,95	0,82	0,90	0,66	0,83	0,74	0,9
Spécificité	0,97	0,99	0,93	0,96	0,97	0,99	0,93	0,97	0,98	0,76	0,71	0,84	1	0,94	0,87	0,97
VPP	0,84	0,92	0,59	0,73	0,83	0,92	0,58	0,78	0,99	0,93	0,91	0,95	1	0,89	0,75	0,78
VPN	0,99	0,97	0,96	0,97	0,99	0,98	0,96	0,98	0,54	0,80	0,53	0,69	0,84	0,91	0,86	0,98

1 : ES pré-cycloplégie, 2 : ES estimé par RANC, 3 : ES estimé par la LA, 4 : ES estimé par le rapport LA/Km, NC : non calculable.

4.4.2.4 Enfants de plus de 10 ans

n = 502	Paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests															
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$				$\leq - 1 \delta$				$\geq + 0,75 \delta$				$\geq + 3,5 \delta$			
Tests	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sensibilité	0,95	0,71	0,67	0,76	1	0,78	0,78	0,83	0,80	0,95	0,84	0,92	0,67	0,79	0,67	0,62
Spécificité	0,88	1	0,90	0,92	0,94	1	0,93	0,93	1	0,84	0,65	0,84	1	0,98	0,90	0,91
VPP	0,63	1	0,58	0,67	0,75	1	0,67	0,65	1	0,90	0,79	0,90	1	0,94	0,74	0,75
VPN	0,99	0,95	0,93	0,95	1	0,96	0,96	0,97	0,77	0,98	0,73	0,87	0,87	0,91	0,86	0,84

1 : ES pré-cycloplégie, 2 : ES estimé par RANC, 3 : ES estimé par la LA, 4 : ES estimé par le rapport LA/Km, NC : non calculable

4.5 Utilisation des formules d'estimation appliquées sur la population 2

4.5.1 Enfants issus de la population hospitalière

Nous avons appliqué les formules extraites de la population 1 (hospitalière) sur une nouvelle base de données issus du CHU de Nantes constituée de 100 enfants (inclus au CHU).

La colonne 1 représente les performances de l'équivalence sphérique pré-cycloplégie seul de la population 2.

Nous y avons ensuite appliqué les formules précédemment décrites sur la population 2 :

La colonne 2 teste la formule issue de la corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie de la population 1 (**figure 7**) ;

La colonne 3 teste la formule extraite de la corrélation entre l'équivalent sphérique post-cycloplégie et la longueur axiale de la population 1 (**figure 8**) ;

La colonne 4 teste la formule extraite de la corrélation entre l'équivalent sphérique post-cycloplégie et le rapport LA/Km de la population 1 (**figure 9**).

n = 100	Paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests															
Seuils	$\leq - 0,75 \delta$				$\leq - 1 \delta$				$\geq + 0,75 \delta$				$\geq + 3,5 \delta$			
Tests	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sensibilité	0,97	0,67	0,60	0,92	0,97	0,69	0,59	0,92	0,68	0,94	0,72	0,78	0,71	0,79	0,79	0,85
Spécificité	0,87	0,94	0,85	0,94	0,86	0,96	0,89	0,91	0,98	0,86	0,89	0,92	0,98	0,97	0,95	0,98
VPP	0,81	0,87	0,71	0,90	0,78	0,89	0,73	0,85	0,97	0,85	0,83	0,88	0,83	0,79	0,69	0,85
VPN	0,98	0,83	0,78	0,95	0,98	0,86	0,81	0,95	0,79	0,94	0,81	0,84	0,96	0,97	0,97	0,98

1 : ES pré-cycloplégie, 2 : ES estimé par RANC, 3 : ES estimé par la LA, 4 : ES estimé par le rapport LA/Km

4.5.2 Enfants issus de la population libérale

Dans cette 2nd section, nous avons analysé les formules issues de la corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégié et la longueur axiale, ainsi que les formules issues de la corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégié et le rapport LA/Km issues de la population 1. Ces formules ont été appliquées à une population d'enfants issue de consultation en ophtalmologie libérale (population 2). Nous n'avons pas pu analyser les formules issues de l'équivalent sphérique pré-cycloplégie ni les comparer à l'équivalent sphérique pré-cycloplégié seul car le recueil des données provenant des consultations libérales n'incluait pas les données pré-cycloplégiées.

n = 58	Paramètres intrinsèques et extrinsèques des différents tests							
	$\leq - 0,75 \delta$		$\leq - 1 \delta$		$\geq + 0,75 \delta$		$\geq + 3,5 \delta$	
Seuils								
Tests	1	2	1	2	1	2	1	2
Sensibilité	0,43	0,29	0,50	0,50	0,78	0,94	0,50	1
Spécificité	0,96	1	0,96	1	0,50	0,82	0,84	0,89
VPP	0,60	1	0,50	1	0,86	0,96	0,25	0,50
VPN	0,93	0,91	0,96	0,97	0,35	0,75	0,94	1

1 : ES estimé par la LA, 2 : ES estimé par le rapport LA/Km

5. Discussion

5.1 La population

5.1.1 La réfraction

5.1.1.1 La sphère

Pour analyser la sphère, il convient d'utiliser l'équivalent sphérique. Dans la population 1, on constate une différence statistiquement significative entre l'équivalent sphérique pré- et post cycloplégie pour l'ensemble de la population, pour toutes les tranches d'âge en dehors de la tranche < 3 ans où l'on ne retrouve pas cette différence statistiquement significative, comme le montre le **tableau 7** ($p= 0,05$). En effet, ce panel n'est constitué que de 4 enfants du fait de la difficulté de la réalisation d'une biométrie. L'équivalent sphérique après cycloplégie était plus élevé en faveur de la convexité, ce qui est en accord avec la littérature et la physiologie oculaire. La cycloplégie a permis de démasquer, en moyenne, une hypermétropie latente de + 0,98 δ

pour l'ensemble de la population. On constate que l'équivalent sphérique de 6,4 % de la population 1 a diminué après la cycloplégie, dont 50% avait une différence $\geq + 1 \delta$ en faveur de la concavité. Ce constat est, sur le plan physiopathologique, difficilement explicable, et pose la question d'erreurs de recueil ou d'un protocole cycloplégique mal réalisé. Ce résultat est un élément pouvant expliquer des sensibilités moins bonnes pour certaines formules.

Parmi les hypermétropes de la population 1 dont l'équivalent sphérique post-cycloplégie était $\geq + 0,75 \delta$, la différence des équivalents sphériques retrouvée est de $+ 1,1 \delta$ ($p < 0,001$). Chez les enfants myopes de la population 1 dont l'équivalent sphérique post-cycloplégie était $\leq - 0,75 \delta$, la différence des équivalents sphériques était de $+ 0,19 \delta$ ($p = 0,51$). Cette différence non statistiquement significative chez les enfants myopes peut être expliquée par un plus petit effectif d'enfants myopes (11,55% de la population 1) versus hypermétropes (76,29% de la population 1). Néanmoins, ces résultats nous confortent dans l'intérêt et la difficulté de cibler le dépistage des enfants hypermétropes. En effet, la moyenne des différences est plus faible dans le groupe de myopes et s'explique par un besoin d'accommodation moins important.

Les valeurs maximales et minimales du panel d'enfants de la population 1 peuvent également constituer un biais statistique, puisque 7% ont un équivalent sphérique post-cycloplégie $\geq + 6,5 \delta$ avec une valeur maximale de $+ 11 \delta$. Concernant les valeurs minimales, 4% de la population 1 avait un équivalent sphérique post-cycloplégie $\leq - 6 \delta$, avec une valeur minimale de $-25,25 \delta$, ce qui pousse les valeurs vers le bas.

Comme la détection des myopies $< - 6 \delta$ ne constitue pas une difficulté particulière, nous simulons d'exclure les valeurs extrêmes dans la **figure 13** (page suivante). Par exemple, pour la longueur axiale, on peut se rendre compte que le coefficient de corrélation, entre l'équivalent sphérique post-cycloplégie et la longueur axiale, est plus fort après exclusion des quelques valeurs s'éloignant de la droite de corrélation (à droite de la figure).

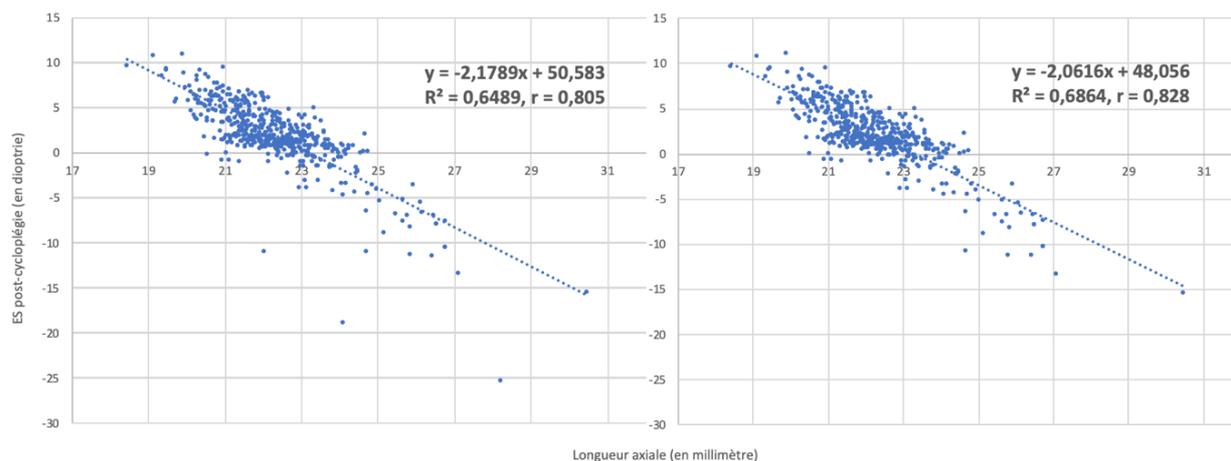


Figure 13. Corrélation entre l'équivalent sphérique post-cycloplégie et la longueur axiale (gauche : corrélation initiale, droite : exclusion des valeurs extrêmes).

Cette étude n'a pas pris en compte l'anisométrie, très pourvoyeur d'amblyopie. Cette amétropie pourra être étudiée dans la nouvelle étude (en cours) au sein d'une population libérale.

5.1.1.2 Le cylindre

Le statut du cylindre est essentiel, puisque celui-ci rentre dans la formule de l'équivalent sphérique. On distingue un astigmatisme fort au-delà d'environ 2δ de puissance cylindrique. Dans la population 1, on dénombre 15,5% d'astigmatisme au réfractomètre $> 2 \delta$ et 24,3% d'astigmatisme biométrique $> 2 \delta$. Ce résultat est particulièrement élevé et peut constituer un biais de recrutement. Cependant, un cylindre $> 2 \delta$ n'est pas particulièrement compliqué à mettre en évidence à l'aide de la réfractométrie automatique puisque celui-ci est plutôt stable avant et après cycloplégie⁶. Dans la population 1, il n'y a pas de différence statistiquement significative entre le cylindre pré- et post-cycloplégie comme le montre le **tableau 4** ($\rho = 0,85$), ce qui est concordant avec la littérature⁶. De plus, l'astigmatisme est probablement le paramètre le plus stable de la réfraction au cours du temps, spécifiquement pour les astigmatismes moyens et forts⁶⁵.

5.1.2 L'âge

Notre étude s'est attachée à étudier la réfraction des enfants de 2 à 16 ans, cependant, lorsque nous analysons les données épidémiologiques de la population 1, les tranches d'âge sont inégales. Les enfants de 3 à 6 ans concernent 42,6 % de la population 1, alors que la tranche 13-16 ans constitue 11,8% de la population. Ces inégalités peuvent constituer des biais réfractifs, spécifiquement lorsque l'on extrait et utilise des formules pour les appliquer à une population générale. Cependant, l'effectif de la tranche 3-6 ans reste une force puis qu'il s'agit d'une tranche d'âge capitale, puisqu'elle est la plus concernée par le dépistage des amétropies. Concernant l'âge et la réfraction, on note qu'il existe une différence statistiquement significative entre la moyenne des différences (avant et après cycloplégie) dans presque toutes les strates d'âge, sauf pour la strate < 3 ans. Ce résultat est expliqué par un effectif trop faible pour les enfants de moins de 3 ans dans notre étude. Le faible taux d'enfants de moins de 3 ans ne permet pas de conclure à des formules fiables sur cette tranche d'âge, avec des corrélations faibles (**figures 11 et 12**).

La littérature sur l'épidémiologie de la réfraction de l'enfant caucasien est dominée par les études de dépistage scolaire chez les moins de 6 ans, avec des taux d'amétropie parfois très variables. Cependant, les études s'accordent sur une majorité de sujets hypermétropes (2/3 des amétropies) chez les enfants en dessous de 6 ans²⁰. Le taux d'hypermétropes $\geq 0,75 \delta$ chez les enfants ≤ 6 ans est de 86,5% dans la population 1, ce qui semble être un taux très élevé. Après l'âge de 6 ans, la littérature devient plus pauvre avec cependant une nette tendance à la diminution de l'hypermétropie divisée par un facteur 2 à 3²⁰. Dans la population 1, le taux d'hypermétropie $\geq 0,75 \delta$ chez les plus de 6 ans était de 71,7%, ce qui semble être un résultat également plus fort que dans la littérature, pouvant constituer un biais. Nous résumons dans ce tableau, ci-après, les moyennes des équivalents sphériques post-cycloplégie en fonction des strates d'âge :

Strates d'âge	< 3 ans	3 – 6 ans	7 – 10 ans	> 10 ans
Moyenne de l'ES post-cycloplégie	+ 1,44 δ	+ 2,26 δ	+ 2,01 δ	+ 1,42 δ

Les valeurs d'équivalents sphériques dans la strate en dessous de 3 ans n'est pas représentative du fait d'un faible effectif.

5.1.3 Le sexe

Concernant le sex-ratio dans les différentes populations recueillies, on note un relatif équilibre du sex-ratio dans la population 1, ce qui est un point fort dans notre étude :

	Population 1	Population 2	
		Hôpital	Libéral
Nombre de filles	255	59	23
Nombre de garçons	247	41	35
Sexe ratio (M/F)	0,97	0,70	1,52

Cependant, dans la population 2, la parité n'est pas respectée, ce qui peut constituer un biais. En effet, il existe quelques travaux scientifiques évoquant une différence réfractive entre les sexes, principalement sur la myopie. En effet, le processus myopique est différent entre le sujet masculin et féminin²⁸, avec une hétérogénéité biométrique pour des niveaux intermédiaires de myopies (de -5 à -10 dioptries), cette différence s'annulant au-delà de -15 dioptries⁶⁶. Le mécanisme étant en faveur de l'élongation du globe pour les 2 sexes, auquel on rajoute l'augmentation de la puissance cornéenne⁶⁶ chez la femme.

Une étude taiwanaise note que la prévalence de la myopie inférieure à -6 dioptries est de 20% chez les filles et de 12% chez les garçons de moins de 18 ans⁶⁷. Une étude américaine note une longueur axiale significativement plus courte chez la fille⁶⁸. Une étude indienne retrouve que l'hypermétropie était associée au sexe féminin⁶⁹ (OR à 1,72), ce constat était retrouvé en Chine, au Népal, et au Chili^{69,70}.

Dans une prochaine étude, nous pourrions envisager de recueillir l'âge afin de réaliser des formules différentes pour garçon et fille. L'âge a d'ailleurs récemment été inclus dans des formules prédictives via des régressions multiples⁷¹.

5.1.4 L'ethnie

L'idée de ce paragraphe n'est pas de faire une liste exhaustive des taux d'amétropies dans le monde, les ouvrages des professeurs Guy Clergeau et Alain Péchereau gardant toutes leurs actualités dans les cahiers de sensorio-motricité. Notre étude s'est concentrée sur une population incluse à l'hôpital, ce qui peut constituer un biais de recrutement quant à l'origine ethnique de nos patients. Nous n'avons relevé ni le phototype ni l'origine ethnique pour la majorité de nos patients inclus. La seule donnée ethnique que nous avons pu relever est le taux de patient inclus via la clinique d'Alger et constituant 11 patients sur 502 (soit 2,2% de la population totale). L'inclusion de ces patients au sein d'un panel de patients français ne constitue pas forcément un biais, la population non caucasienne consultant à l'hôpital étant probablement plus forte que ce chiffre. Aucune étude n'existe sur les différences ethniques entre une population hospitalière ou libérale, bien qu'une étude évoque une augmentation de la diversité ethnoculturelle, particulièrement pour l'hôpital⁷². On peut ainsi penser qu'une diversité ethnique est plus forte à l'hôpital avec des variations réfractives possibles, occasionnant une différence avec un panel d'enfants caucasiens. Dans la littérature, il existe des différences réfractives entre les ethnies.

Les caucasiens ont un profil plus hypermétrope alors que les enfants de 11-15 ans ont des réfractions plus myopes avec des longueurs axiales plus fortes chez les patients asiatiques⁷³, ainsi que dans les régions urbaines⁷⁴. Les données asiatiques sont à confronter à l'épidémie de myopie dans ces pays, avec des enfants myopes de plus en plus tôt⁶⁷. Il existe des disparités mondiales, et la littérature varie concernant les taux d'amétropies. En Chine, une étude estime à 50% le taux de myopie chez les enfants âgés de 12 ans⁷⁵. Ces taux baissent chez les enfants indiens avec des taux inférieurs à 10% pour la myopie^{69,76} et moins de 8% d'hypermétropes chez les enfants indiens⁶⁹. Ces taux semblent moins forts chez les enfants scolarisés en Afrique du Sud, avec des taux de 4% de myopie et de 2,6% d'hypermétropie⁷⁷. Ces taux sont à mettre en balance avec la méthodologie et les seuils réfractifs parfois différents entre les études. Cependant, il semble utile de recueillir cette donnée dans une étude ultérieure, ainsi, nous pourrions envisager des formules différentes pour des sujets caucasiens, africains ou asiatiques. A notre sens, notre étude sur une population majoritairement caucasienne constitue une force dans une littérature actuellement dominée par des données asiatiques.

5.1.5 Les paramètres biométriques étudiés

On remarque que l'évolution de la longueur axiale à travers les tranches d'âge est globalement cohérente avec les valeurs décrites dans la littérature⁴⁶, cependant, la longueur axiale chez les enfants < 3 ans paraît plus forte, on note 21,47 mm dans cette strate, alors que les travaux de Gordon l'estime à $20,2 \pm 0,3$ mm pour cette tranche d'âge. On remarque que les moyennes des kératométries ont tendance à augmenter entre les classes 3 – 6 ans et 7 – 10 ans (paragraphe 4.1.3), ce qui n'est pas physiologiquement admis puisque la kératométrie diminue au fil de l'enfance. Cependant, les données kératométriques moyennes de la population 1 se situe au sein des écarts-types et il n'existe pas de différence statistiquement significative entre ces 2 classes d'âge ($p = 0,27$, **tableau 5**).

Concernant les groupes d'âge et les paramètres anatomiques, on note une différence statistiquement significative entre tous les groupes d'âge, concernant la longueur axiale, sauf entre les enfants < 3 ans et les enfants 3-6 ans, expliquée par une faible puissance (**tableau 4**). On note une différence statistiquement significative pour la kératométrie moyenne pour tous les groupes < 3 ans par rapport aux autres strates, mais sans différence statistiquement significative pour les autres groupes, due au fait que la kératométrie soit globalement stable dans notre population au-delà de 3 ans (**tableau 5**).

5.2 La méthodologie

5.2.1 Les critères d'inclusion

Les critères d'inclusion étaient volontairement simples, de sorte à inclure le plus de patients. Nous avons exclu logiquement toutes les pathologies interférant sur l'axe visuel, et compromettant une réfraction physiologique, à savoir les pathologies cornéo-cristaliniennes et vitréo-rétiniennes. Cependant, le recueil n'a pas exclu les pathologies strabiques et on sait que le profil réfractif des sujets strabiques s'écarte du profil physiologique²⁰. Cela peut constituer un biais de recrutement en faveur des amétropies pathologiques. En effet, on sait que le profil du patient strabique est en faveur de l'hypermétropie, la prévalence myopique étant considérée comme faible chez le patient strabique. À âge égal, l'hypermétropie du sujet

strabique est plus forte que celle du patient non strabique²⁰. Sa réfraction initiale moyenne, au début du traitement du strabisme de l'hypermétrope, est double à celle d'une réfraction physiologique²⁰. Ainsi, pour une étude ultérieure, il semble judicieux de séparer les enfants strabiques des non strabiques, car les mélanger contribue à un biais statistique incontestable.

5.2.2 Les seuils réfractifs

S'il apparaît évident qu'il est primordial de statuer sur des paramètres réfractifs précis constituant ainsi le cœur du problème, il est, en pratique, compliqué à trouver, dans une littérature riche de différences. Fixer des seuils réfractifs, revient à trouver une valeur au-delà de laquelle, on peut qualifier une amétropie « d'amétropie maladie ». Le rapport d'Ophtalmopédiatrie²⁸ de 2017 fixe les valeurs suivantes pour l'âge verbal :

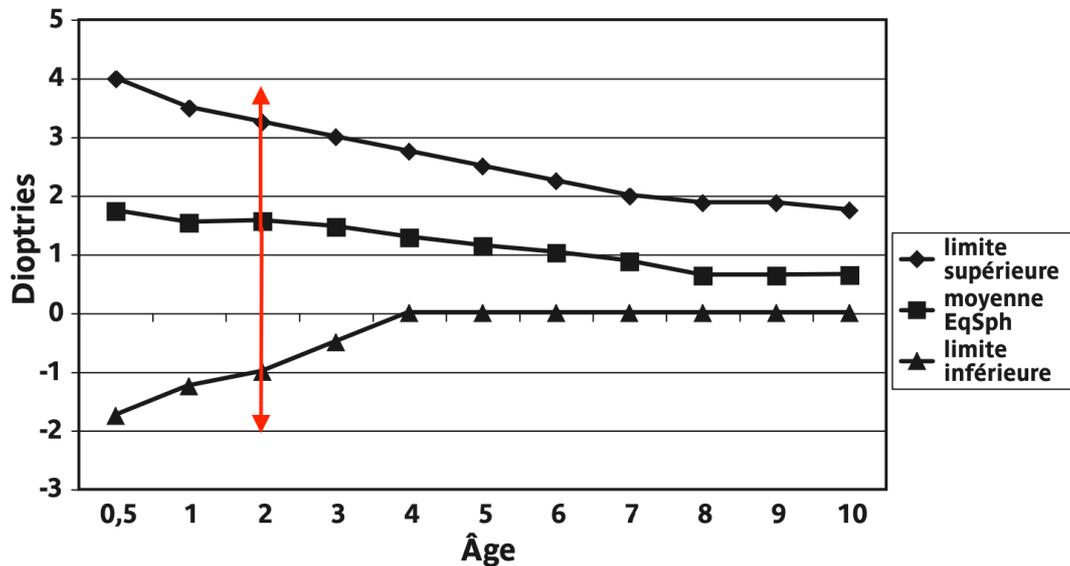
- Une hypermétropie si l'équivalent sphérique est $\geq + 3,5 \delta$;
- Un astigmatisme si le cylindre est $\geq 1 \delta$;
- Une myopie si l'équivalent sphérique est $\leq - 0,75 \delta$.

Une méta-analyse de 2015 a étudié l'épidémiologie des amétropies dans le monde. Dans sa méthodologie : sur 91 articles s'intéressant à l'hypermétropie chez l'enfant, 45 ont fixé le seuil de l'hypermétropie à un ES cycloplégié $\geq + 2,0 \delta$. Sur 67 articles s'intéressant à la myopie chez l'enfant, 49 articles ont fixé le seuil de la myopie à un ES cycloplégié $\leq - 0,50 \delta$. Concernant l'astigmatisme, la littérature s'attarde plutôt sur des puissances cylindriques $\geq + 0,75 \delta$.

En 2013, l'AAPOS (American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus)⁷⁸ définissait les seuils réfractifs non cycloplégiés suivants pour lesquels il existe des facteurs de risque d'amblyopie :

	Hypermétropie	Myopie	Astigmatisme
Enfants de 12 à 30 mois	$> + 4,5 \delta$	$< - 3,5 \delta$	$> 2 \delta$
Enfants de 31 à 48 mois	$> + 4 \delta$	$< - 3 \delta$	$> 2 \delta$
Enfants de plus de 49 mois	$> + 3,5 \delta$	$< - 1,5 \delta$	$> 1,5 \delta$

Dans le riche ouvrage « La réfraction de l'enfant » paru en 2008, un graphique résume l'évolution de la réfraction physiologique (en dioptries) en fonction de l'âge :



Graph 1. Évolution de la réfraction physiologique.

Graphique tiré de l'ouvrage « La réfraction de l'enfant » (Dr Guy Clergeau - A & J Péchereau)

On note, dans ce graphique, qu'au-delà de 2 ans (matérialisé en rouge) les valeurs hors limites physiologiques sont une myopie $\leq - 1$ D et une hypermétropie $\geq + 3,5$ δ . Ces deux seuils semblent donc avoir du sens et sont validés par le rapport d'ophtalmopédiatrie²⁸, raison pour laquelle, nous les avons étudiés. Nous avons également étudié de façon secondaire les seuils $\leq - 0,75$ δ et $\geq + 0,75$ δ , comme évoqué dans certaines études⁹.

5.2.3 La correction optique

Notre avons initialement recueilli le port d'une correction optique dans la base de données dans la population 1. Ce port était effectif pour 70,1 % de la population, ce qui soulève plusieurs problèmes :

- Nous n'avons pas noté si la correction optique portée était emmétropisante, et si celle-ci avait été initialement réalisée via une cycloplégie, ainsi que le produit et le protocole employé ;

- Ce fort chiffre laisse penser que la population étudiée n'est pas une population représentative d'enfants du fait d'amétropies possiblement plus compliquées ;
- De plus, dans cette étude, nous cherchons aussi à dépister des amétropies de l'enfant, or, 70,1 % de la population étudiée porte déjà des lunettes au moment de la consultation.

Il existe peu d'études sur l'impact d'un port prolongé de la correction optique totale et l'évolution de la réfraction, on peut retenir que le port de la correction optique n'altère pas les processus d'emmétropisation et le bon développement de la réfraction de l'enfant⁷⁹. Ainsi le port de la correction optique dans notre population ne semble pas être un biais conséquent.

5.2.4 Les collyres cycloplégiants

La réalisation d'une étude comparative qui utilise plusieurs produits cycloplégiants semble être un biais. Cependant, dans la population 1, on note une majorité de cycloplégie via le Cyclopentolate, soit 98,8%. Ce critère constitue une force, puisque la réalisation d'une étude comparative et analytique semble plus pertinente si un même produit est utilisé. L'Atropine constitue le cycloplégiant le plus puissant^{16,20,28}, mais sa réalisation est probablement plus marginale du fait de sa durée d'action et de sa rémanence. En ce qui concerne la population 2 : 97% ont eu recours au Cyclopentolate dans la population libérale. En ce qui concerne le panel d'enfants issus de la population hospitalière de la population 2, les collyres cycloplégiants n'ont pas été recueillis, ce qui constitue un biais altérant possiblement les paramètres intrinsèques et extrinsèques d'une formule issue d'une population majoritairement cycloplégié avec du Cyclopentolate (population 1), comme montré dans le paragraphe 4.5.1.

5.2.5 L'effet « centre tertiaire »

Notre étude se concentre sur l'étude de la « population 1 », elle-même issue d'une population d'enfants inclus au CHU de Nantes pour la plupart. Ce recueil pose la question d'un biais de recrutement. En effet, l'hôpital est considéré comme un centre tertiaire, via un adressage d'ophtalmologistes libéraux, avec des patients parfois plus « compliqués » à traiter. Ainsi, nos formules ont pu être extraites d'une population biaisée. Nous nous posons ainsi la question

d'un éventuel décalage d'une courbe de Gauss vers les amétropies fortes. La problématique des amétropies fortes concerne essentiellement les myopies fortes. Il est communément admis qu'une myopie forte est inférieure à -6δ . Des études asiatiques évoquent d'autres seuils pour définir la myopie pathologique à partir de -4δ jusqu'à 5 ans et -6δ de 6 à 8 ans⁸⁰. Dans la population 1 : 6% des enfants ont un équivalent sphérique cycloplégié $\leq -4 \delta$. Les seuils concernant les hypermétropies fortes chez l'enfant sont moins évidents, avec des seuils entre $+3,5 \delta$ et $+4,5 \delta$ ⁸¹. Ainsi, dans la population 1, on compte 30,5% d'enfants avec un équivalent sphérique cycloplégié $> +3,5 \delta$ et 20,7% supérieur à $+4,5 \delta$, ce dernier étant possiblement un taux important.

Afin de trouver des formules plus fiables, une étude prospective sur une population libérale semble être judicieuse afin d'appliquer des formules sur un effectif à échelle nationale.

5.2.6 Les méthodes statistiques utilisées

Comme expliqué précédemment, chaque formule a été testée afin d'en calculer un équivalent sphérique estimé, ces résultats étaient ensuite comparés à l'équivalent sphérique cycloplégié, considéré comme le gold-standard pour calculer les paramètres intrinsèques et extrinsèques de chaque formule. Certaines études^{9,71} se sont intéressées à étudier des formules prédictives d'équivalent sphérique cycloplégié avec une méthodologie statistique différente. En effet, afin de tester leurs formules, une étude a comparé les données cycloplégiées et les données prédites via leurs formules. L'étude de Magome et al retrouve un équivalent sphérique estimé, par leur formule, hautement corrélé avec l'équivalent sphérique cycloplégié ($r = 0,961$). Une analyse similaire pour la population 1 a été réalisée a posteriori pour les formules issues de la réfraction non cycloplégiée, de la longueur axiale puis du rapport LA/Km dans la figure jointe en page suivante.

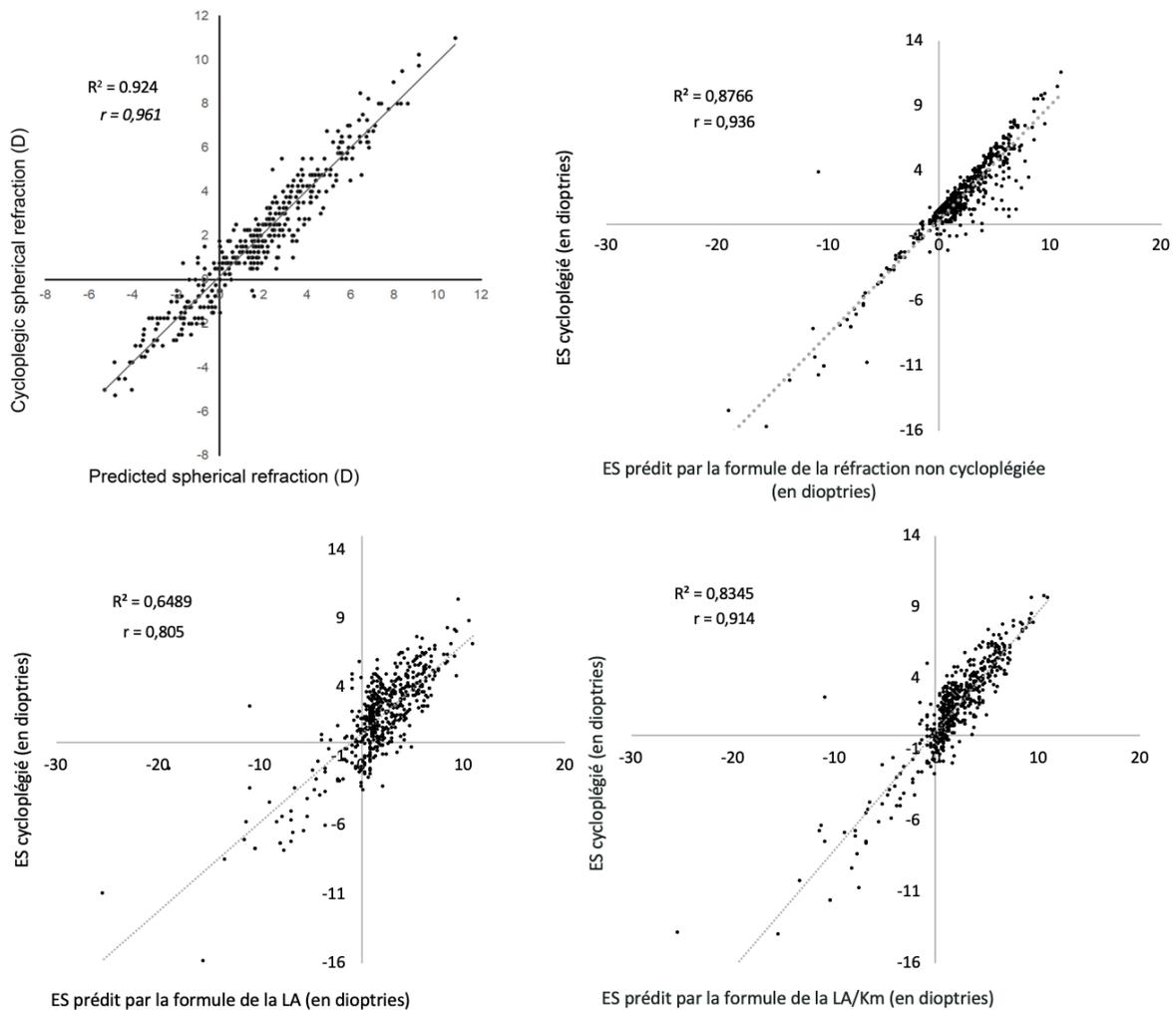


Figure 13. Application à notre étude d'une méthodologie statistique similaire à celle de Magome et al⁷¹.

On note avec ce graphique, que la corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégé et l'équivalent sphérique estimé par nos différentes formules est moins bonne que la formule testée dans l'étude de Magome et al (graphique en haut à gauche). Pour une étude ultérieure, une méthodologie similaire à celle de Magome et al pourrait être envisagée.

Ce travail ne comporte pas de courbe ROC (Receiver Operating Characteristic), paramètre intéressant lorsque l'on cherche un compromis entre une bonne sensibilité et une bonne spécificité. En effet, le but de ce travail est de comparer la fiabilité de plusieurs tests, sans chercher à optimiser ces derniers. D'autre part, la réalisation de courbes ROC pour chaque test étudié aurait compliqué l'analyse en la rendant moins compréhensible.

5.3 Corrélations et paramètres biométriques

5.3.1 Analyse de l'astigmatisme

Les résultats présentés dans le paragraphe 4.2.1, relatifs à l'astigmatisme, montrent qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre le cylindre avant et après cycloplégie, ainsi que sur l'axe de l'astigmatisme. Ce résultat est conforté par la littérature⁶, à savoir que les composantes de l'astigmatisme (cylindre et axe) ne sont pas ou peu modifiées après cycloplégie⁸², à la différence de l'équivalent sphérique⁸³.

Concernant la comparaison entre les données cylindriques pré-cycloplégie et post-cycloplégie, on retrouve (**figure 5**) une bonne corrélation, avec un coefficient de corrélation r à 0,90. Eu égard aux résultats précédents, ce constat n'est pas surprenant. Nous avons ensuite analysé l'astigmatisme biométrique (représenté par la différence $K2 - K1$ en dioptries), en étudiant (**figure 6**) la corrélation entre le cylindre post-cycloplégie et de l'astigmatisme biométrique ($r = 0,84$). On retrouve, dans la littérature, une corrélation $r = 0,86$ ⁸⁴ entre le cylindre à l'autoréfractométrie et le cylindre au brouillard.

Dans le **tableau 8**, nous analysons la performance d'un test biométrique dans la détection de l'astigmatisme. « L'astigmatisme réfractif (RA) » correspond à la performance des valeurs cylindriques pré-cycloplégiées (comparé aux valeurs cylindriques post-cycloplégiques). « L'astigmatisme biométrique » correspond à la différence entre $K1$ et $K2$ en dioptries. On constate que, pour les 2 seuils étudiés, le test « biométrique » n'est pas supérieur à l'astigmatisme réfractif seul (réfractométrie automatique). Ceci est dû au fait que la biométrie étudie la face antérieure de la cornée alors que l'astigmatisme réfractif prend en compte toutes les composantes de l'astigmatisme (notamment cornéen et cristallinien). Il semble donc que les composantes cylindriques de l'autoréfractométrie sans cycloplégie donnent un bon reflet de l'astigmatisme, possiblement suffisante pour le dépistage. Néanmoins, cela ne dispense pas d'une recherche fine et précise du cylindre et de l'axe en consultation grâce, notamment, à la méthode du cylindre croisé de Jackson⁸¹.

Les études prédictives de l'astigmatisme via la biométrie optique sont rares, cette thématique est étudiée essentiellement lors de l'estimation d'un astigmatisme induit en post-chirurgie (cataracte, chirurgie cornéenne). Magome et al étudient un modèle prédictif d'astigmatisme, sur une population pédiatrique, en réalisant une formule par régression linéaire multiple dont l'équation est la suivante :

$$\text{Predicted cylinder refraction} = -2.877 + (0.911 \times \text{corneal astigmatism [D]}) + (0.077 \times \text{sex [boy} \\ = 1, \text{ girl} = 0]) + (0.055 \times \text{axial length [mm]}) + (-0.028 \times \text{age [years]}) + (0.031 \times \text{corneal} \\ \text{refractive power [D]})$$

Comme dans notre travail, cette équipe cherche à estimer l'astigmatisme prédit, entre autres, par la biométrie. L'analyse entre le cylindre sous cycloplégie et le cylindre prédit par leur formule conclut à un coefficient de corrélation de 0,844.

5.3.2 Analyse de la sphère avant et après cycloplégie

Comme déjà abordé dans le paragraphe 5.1.1.1, et à la différence du cylindre, on constate une différence statistiquement significative de l'équivalent sphérique avant et après cycloplégie en faveur de la convexité après la cycloplégie. Ainsi, notre étude confirme que la réfraction non cycloplégiée sous-estime l'hypermétropie. Cette différence, comme noté dans le **tableau 9**, n'est pas statistiquement significative dans le groupe inférieur à 3 ans, cependant, cette classe d'âge n'est constituée que de 4 enfants, ce qui ne correspond pas à un effectif assez important pour conclure. Puis, à partir de 3 ans, cette différence des équivalents sphériques avant et après cycloplégie a tendance à diminuer avec l'âge ce qui est un résultat attendu du fait de la diminution du pouvoir de l'accommodation. Cette différence des équivalents sphériques était la plus forte dans la catégorie 3-6 ans (**tableau 9**).

5.3.3 Apport de la réfraction non cycloplégiée en tant que formule

Nous avons étudié la corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie dans notre population, celle-ci était excellente avec un coefficient r de 0,94. Ce résultat est retrouvé dans la littérature avec des coefficients r de 0,93⁷¹ à 0,95⁹. Une formule est extraite, puis

analysée en tant que test de dépistage des amétropies de l'enfant. Ce calcul est en effet discutable, puisqu'une très bonne corrélation était forcément attendue, de plus cette formule n'intègre en rien les paramètres biométriques. Nous avons cependant décidé de laisser ces calculs dans les résultats. Ainsi, nous obtenons une droite de corrélation $y = 0,9761x + 1,0074$ (**figure 7**). Sankaridurg et al (2017) ont étudié la même corrélation et retrouvent une droite de corrélation à $y = 1.07x + 0,69^9$ (où x correspond à l'équivalent sphérique non cycloplégié dans nos 2 études). Par rapport à la réfraction non cycloplégiée seule, on constate que les paramètres intrinsèques et extrinsèques de cette formule sont moins bons dans la détection des sujets myopes (Se à 98% et Sp à 95% versus Se à 84% et Sp à 99% pour la formule d'estimation pour le seuil $\leq -1 \delta$). Cependant, on constate une meilleure spécificité. La puissance de la formule extraite est supérieure pour les sujets hypermétropes (Se à 65% et Sp à 100% versus Se à 80% et Sp à 96% pour la formule d'estimation pour le seuil $\geq + 3,5 \delta$). La formule de la corrélation précédemment citée de l'étude de Sankaridurg et al n'a pas été utilisée telle quelle, mais a introduit la notion d'âge et d'acuité visuelle sans correction optique. Elle retrouve un coefficient de corrélation r de 0,95. Leur formule prédictive est : $y = 0.831 + (0.954 \times \text{noncycloplegic SE}) + (-0.065 \times \text{âge}) + (0.539 \times \text{UCVA})$, où y représente l'équivalent sphérique cycloplégié prédit. Ce modèle prédictif de l'équivalent sphérique cycloplégié retrouve une sensibilité de 89,3% et une spécificité de 97,6% pour la détection des sujets myopes ($ES \leq - 0,75 \delta$), et une sensibilité de 76,8% et une spécificité de 85% pour la détection des sujets hypermétropes ($ES \geq + 0,75 \delta$). Comme dans notre étude, le modèle prédictif de Sankaridurg et al n'améliore pas la détection des sujets myopes (sensibilité pour la détection des sujets myopes de 99,2% et spécificité de 88,2% avec les valeurs non cycloplégiées versus sensibilité de 89,3% et spécificité de 97,6% pour le modèle proposé). En ce qui concerne la détection des sujets hypermétropes, le modèle permet d'améliorer les résultats par rapport aux valeurs non cycloplégiées (sensibilité de 25,6% et spécificité de 99,2% pour les valeurs non cycloplégiées versus une sensibilité de 76,8% et une spécificité de 85% pour le modèle proposé). Cependant, les seuils utilisés dans cette étude sont les suivants : un sujet est myope si l'équivalent sphérique est $\leq - 0,75 \delta$ et hypermétrope si $\geq + 0,75 \delta$, à noter que leur étude dénombre 43,1% de sujets hypermétropes après cycloplégie.

Dans notre étude, la corrélation entre l'équivalent sphérique pré- et post-cycloplégie reste excellente dans toutes les strates d'âge, comme le montre la **figure 10**. On constate que chaque formule, extraite de chaque strate et appliquée à celle-ci, améliore le dépistage des sujets hypermétropes avec une meilleure sensibilité par rapport aux valeurs de la réfractométrie automatique comme évoqué dans les tableaux du paragraphe 4.4.2.

Comme le montre le tableau du paragraphe 4.5.1, ces formules améliorent la sensibilité, quel que soit le seuil, des sujets hypermétropes lorsque cette formule est appliquée à la population 2 par rapport aux données pré-cycloplégées.

Bien que cette formule (RANC) soit discutable, elle constitue un point intéressant, puisqu'elle améliore la sensibilité et la spécificité des sujets hypermétropes au sein d'une autre population. L'équivalent sphérique non cycloplégié peut être envisagé dans un modèle prédictif, en complément des données anatomiques, au sein d'une formule de régression linéaire multiple future.

5.3.4 Apport de la longueur axiale seule dans la détection des amétropies

La longueur axiale présente une forte corrélation avec l'équivalent sphérique cycloplégié dans notre étude avec un coefficient de corrélation r à 0,81. Ce résultat est retrouvé dans la littérature^{50,13} quel que soit le type d'amétropie. Il s'agit d'un paramètre biométrique qui va évoluer avec la croissance de l'enfant, ce qui en fait un paramètre déterminant. Une étude sur un profil d'enfants asiatiques a montré la corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégié et la longueur axiale, et conclut à un coefficient de corrélation r de 0,77⁹.

L'équation de la droite de corrélation entre l'équivalent sphérique cycloplégié et la longueur axiale (**figure 8**) est étudiée en tant que test de dépistage des amétropies. On constate dans le tableau récapitulatif du paragraphe 4.3.3, que cette formule est moins performante que les valeurs pré-cycloplégées dans le dépistage des enfants myopes (par exemple, pour le seuil $\leq -1 \delta$, on retrouve une sensibilité de 0,80 et spécificité de 0,94 pour la formule étudiée contre une sensibilité de 0,98 et une spécificité de 0,95 pour les valeurs pré-cycloplégées seules). En revanche, ce test a des paramètres intrinsèques et extrinsèques légèrement plus performants

que les valeurs pré-cycloplégiées seules dans la détection des enfants hypermétropes pour les deux seuils étudiés (par exemple, pour le seuil $\geq + 3,5 \delta$, on retrouve une sensibilité de 0,67 et spécificité de 0,84 pour la formule étudiée contre une sensibilité de 0,65 et une spécificité de 1 pour les valeurs pré-cycloplégiées seules). Ainsi, un tel test peut s'avérer utile chez les enfants hypermétropes.

On remarque, en **figure 11**, que la corrélation est de plus en plus forte lorsque l'enfant grandit. Ce constat peut être expliqué par la moins grande dispersion des valeurs dans la strate > 10 ans par rapport aux groupes 3-6 ans et 7-10 ans.

Lorsque l'on applique les formules issues de la corrélation avec la longueur axiale à une autre population hospitalière (paragraphe 4.5.1), on remarque que ces formules ne permettent pas d'améliorer la détection des sujets myopes avec une diminution de la sensibilité pour les 2 seuils étudiés. En revanche, elle permet d'augmenter la sensibilité dans la population hypermétrope. Bien que nous ne puissions pas les comparer aux valeurs pré-cycloplégiées seules (par manque de données), cette formule semble peu efficace lorsque l'on regarde les résultats dans une population libérale (sensibilité de 0,50 pour le seuil $\geq + 3,5 \delta$, ce qui est expliqué par le faible taux d'hypermétropes à 10% pour ce seuil). La moyenne des équivalents sphériques post-cycloplégie pour la population 1 ($n = 502$) est de $+ 1,93 \delta$ alors que la moyenne des équivalent sphériques post-cycloplégie pour la population libérale ($n = 58$) est de $+ 0,93\delta$. Cette population libérale se prête donc moins à la détection des hypermétropies modérées.

5.3.5 Apport du rapport LA/Km dans la détection des amétropies

Nous retrouvons une excellente corrélation entre le rapport de la longueur axiale et de la kératométrie avec la réfraction cycloplégiée dans notre étude (**figure 9**), avec un coefficient de corrélation r de 0,91. La corrélation de cet index se retrouve dans la littérature^{43,85} avec une bonne corrélation ($r = 0,81^{86}$). Certaines études montrent une corrélation entre l'équivalent sphérique et le rayon de courbure antérieur seul, sans corrélation avec le rayon de courbure postérieur⁵⁰. A noter, qu'à la différence de la longueur axiale, la kératométrie évolue plus rapidement dans les premiers mois de la vie⁴⁷.

Dans le tableau récapitulatif du paragraphe 4.3.3, on note que cette formule est moins performante que les valeurs pré-cycloplégiées dans le dépistage de la myopie (par exemple, pour le seuil $\leq -1 \delta$, on retrouve une sensibilité de 0,88, et spécificité de 0,96 pour la formule étudiée contre une sensibilité de 0,98 et une spécificité de 0,95 pour les valeurs pré-cycloplégiées seules). En revanche, ce test a des paramètres intrinsèques et extrinsèques plus performants que les valeurs pré-cycloplégiées seules dans la détection des enfants hypermétropes pour les deux seuils étudiés (par exemple, pour le seuil $\geq +3,5 \delta$, on retrouve une sensibilité de 0,80 et spécificité de 0,93 pour la formule étudiée contre une sensibilité de 0,65 et une spécificité de 1 pour les valeurs pré-cycloplégiées seules). Ainsi, ce test peut s'avérer intéressant afin de mieux dépister les enfants hypermétropes par rapport aux valeurs pré-cycloplégiées seules. He et al (Shanghai) ont cherché à détecter les enfants myopes grâce à la longueur axiale et à la kératométrie par la formule suivante : $SE = 32,208 - 10.724 AL/CR - 0.234 * Gender$ (par régression linéaire multiple). Cette précédente étude, pour le rapport de la longueur axiale et de la kératométrie, retrouve une sensibilité de 72,98% pour une spécificité à 90,0% dans la détection de la myopie (seuil fixé à un ES $\leq -0,50 \delta$). Cependant, cette étude ne s'est pas intéressée aux enfants hypermétropes, de plus la cycloplégie a été réalisée au Tropicamide.

Les données de notre étude se retrouvent pour toutes les classes d'âge (paragraphe 4.4.2), sauf dans la strate > 10 ans où cette formule n'est étonnamment pas meilleure que les valeurs pré-cycloplégiées pour le seuil $\geq +3,5 \delta$. A noter que 31% de la catégorie > 10 ans ont un équivalent post-cycloplégie $\geq +3,5 \delta$. Par ailleurs, la corrélation est excellente dans toutes les strates d'âge (**figure 12**) sauf pour la catégorie < 3 ans en raison de l'effectif trop faible.

De la même façon (paragraphe 4.5), on s'aperçoit que les formules issues de la population 1 et appliquées à la population 2 hospitalière permettent d'améliorer le dépistage des enfants hypermétropes mais pas celui des enfants myopes. Ce test a une très forte sensibilité chez les sujets hypermétropes dans la population libérale, à la différence de la formule issue de la longueur axiale seule. Cependant, cet échantillon est trop faible pour permettre de généraliser une telle formule chez les sujets hypermétropes. Une étude réalisée sur 349 enfants de Singapour, âgés de 3 ans, s'est intéressée à la corrélation entre la réfraction et les éléments

anatomiques comme la longueur axiale et la kératométrie et conclut que le rapport LA/Km a une meilleure corrélation par rapport à la longueur axiale et à la kératométrie séparée⁸⁷. Cette étude propose de se servir de ce ratio lorsque l'examen est compliqué chez les enfants de 3 ans, bien que celui-ci ne remplace pas la cycloplégie.

5.3.6 Analyse des tests combinés

Dans la littérature, les formules de prédiction réfractive grâce à la biométrie sont dominées par les études sur l'estimation réfractive en post-opératoire de chirurgie de cataracte⁸⁸. A notre connaissance, il n'existe pas d'étude s'intéressant spécifiquement à l'estimation d'un équivalent sphérique cycloplégié au sein d'une population caucasienne, ce qui en fait la force de notre étude. Notre étude s'est également intéressée à coupler les différentes formules étudiées afin de mieux dépister les hypermétropes. He et al ont couplé certains de leurs tests, dans la détection des enfants myopes, ce qui améliore la sensibilité de 72,98% pour le rapport AL/CR (axial length / corneal radius of curvature) à 82,96% lorsqu'ils y associent l'acuité visuelle non corrigée. Mais cette association n'est testée que pour la détection de la myopie dans cette étude.

De la même manière que les formules prédictives prises isolément, nous avons associé les formules, récapitulé dans le tableau du paragraphe 4.3.4. Les résultats du tableau récapitulatif confirment les résultats généraux de cette étude. Ainsi, on constate que les paramètres des tests associés ne sont pas améliorés chez l'enfant myope pour les 2 seuils étudiés, alors que l'on retrouve une meilleure sensibilité pour les tests associés pour le sujet hypermétrope. Pour le seuil $\geq + 3,5 \delta$, il existe une sensibilité à 65% pour l'équivalent sphérique pré-cycloplégié seul, cette sensibilité passe à 84%, 88% puis 96% lorsqu'on associe respectivement aux données pré-cycloplégiées : la longueur axiale, le rapport LA/Km puis pour les 3 tests associés. En voulant mieux dépister les hypermétropes, le nombre de faux-positifs augmente et la spécificité chute. Nous n'avons pas associé les différents tests au sein de la population 2, ces calculs seront réalisés dans une nouvelle étude.

5.4 Les autres paramètres à inclure

5.4.1 La problématique du cristallin

Dans notre étude, le mécanisme accommodatif (régulièrement évoqué via la cycloplégie) et le rôle central du cristallin est un élément manquant de notre étude. En effet, il n'est malheureusement pas si aisé de recueillir le pouvoir réfractif du cristallin en pratique courante. La géométrie du cristallin est un élément peu étudié malgré son rôle optique important. La manière d'appréhender son rôle se fait aujourd'hui par l'intermédiaire de ses mesures anatomiques (épaisseur du cristallin) ou de ses conséquences sur d'autres segments (profondeur de chambre antérieure). Ces éléments sont disponibles par la biométrie optique. Une étude pédiatrique chinoise s'est intéressée au changement structurel du cristallin pendant la cycloplégie, et démontre que la courbure antérieure du cristallin (anterior curvature of the lens) et l'épaisseur du cristallin (lens thickness) sont statistiquement différentes avant et après cycloplégie⁸⁹. Il s'agit d'éléments manquants dans notre étude, qui pourront être recueillis lors d'une prochaine étude. Bien que plus adapté à l'étude de la cornée, l'Orbscan, technique récente associant vidéokératoscopie et le balayage d'une fente lumineuse⁹⁰ permet une mesure du rayon de courbure antérieure du cristallin. Dans la littérature, on note que le rayon de courbure antérieure du cristallin n'est pas corrélé avec l'équivalent sphérique subjectif⁹¹ sur une population d'adulte.

5.4.2 Les autres paramètres

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur les 2 paramètres anatomiques que nous avons considérés comme étant les plus puissants. Cependant, il existe d'autres paramètres dont certains sont corrélés avec l'équivalent sphérique, comme la profondeur de chambre antérieure⁵⁰.

Une récente étude japonaise de 2021 sur 617 enfants s'est également intéressée à établir des formules prédictives de la réfraction cycloplégie via la biométrie. Cette étude a recueilli comme données biométriques, en plus de celles précitées : la profondeur de la chambre antérieure et l'épaisseur du cristallin⁷¹. Elle permet de conclure à la formule suivante, via une régression linéaire multiple :

$$\text{Predicted spherical refraction} = 96,803 + (-2,588 \times \text{axial length [mm]}) + (-0,985 \times \text{corneal refractive power [D]}) + (0,285 \times \text{age [year]}) + (1,501 \times \text{anterior chamber depth [mm]}) + (0,377 \times \text{corneal astigmatism [D]}) + (0,453 \times \text{sex [boy = 1, girl = 0]}) + (-0,479 \times \text{lens thickness [mm]})$$

On note dans cette formule que l'âge et le sexe ont également été inclus dans la formule. Dans une étude ultérieure, en plus des données anatomiques, ces données pourront être également incluses. Il semble judicieux d'inclure d'autres éléments pour améliorer la puissance de nos formules.

L'acuité visuelle non corrigée (UCVA : uncorrected visual acuity) est un paramètre supplémentaire que certaines études asiatiques intègrent dans leurs modèles prédictifs d'équivalent sphérique cycloplégié⁹. Il s'agit d'un paramètre plus intéressant dans la détection des myopies, paramètre essentiel lorsque l'on connaît l'épidémie de myopie qui touche ces pays⁸⁶. Cependant, ce paramètre seul n'est pas suffisant pour détecter les hypermétropies et des astigmatismes légers à modérés⁹². Il s'agit donc d'un paramètre moins intéressant sur une population pédiatrique caucasienne, majoritairement hypermétrope.

5.5 L'avenir

5.5.1 Fabrication d'un biomètre portatif

Dans ce travail, nous rappelons l'importance de la réalisation de la biométrie dans la compréhension et le suivi d'une amétropie pédiatrique. Nous démontrons également que ces mesures biométriques peuvent constituer une aide, dans la détection d'une amétropie pouvant occasionner des troubles visuels chez l'enfant. A l'ère du numérique et de la confection d'appareils de plus en plus compacts et pratiques à utiliser, il semble très intéressant d'imaginer

la fabrication d'un biomètre portable, n'existant pas, à ce jour, afin d'y être intégré directement dans une politique de dépistage (PMI, orthoptistes...). Le recueil de ces données biométriques, couplé à une application numérique fiable permettant d'estimer un équivalent sphérique cycloplégié semble très séduisant.

Des applications ont vu le jour via un smartphone⁹³ par analyse photographique. Il s'agit de prendre une photo avec flash sur pupille non dilatée et d'estimer la réfraction, cependant, elle ne permet actuellement pas de s'affranchir d'une cycloplégie⁹⁴. Un appareil portable permettant de prendre une réfraction non cycloplégié par photoscreening à quelques mètres (permettant de ne pas stimuler l'accommodation) avec un module biométrique couplé, semble intéressant.

5.5.2 Confection de formules fiables

Des formules intégrées dans une application numérique pourront être accessibles aux professionnels de santé concernés par ce dépistage afin d'y estimer un équivalent sphérique. Cependant, l'élaboration de formules fiables et simples n'est pas aisée. Comme montré dans le paragraphe 4.5, les formules étudiées et appliquées sur d'autres population ont permis de conclure à une bonne sensibilité et spécificité de la formule issue du rapport LA/Km en particulier. Cependant, des études complémentaires prospectives, notamment en évitant les biais de population comme évoqué dans les paragraphes 5.1 et 5.2, sont nécessaires afin d'y extraire des formules encore plus puissantes pour espérer être intégrées dans une application à répercussion nationale.

5.5.3 Le carnet de santé

Nous avons pu montrer dans cette étude la bonne corrélation entre la biométrie (longueur axiale et la kératométrie) et l'équivalent sphérique cycloplégié sur une population majoritairement caucasienne. Si un biomètre portable fiable et abordable est commercialisé, nous pourrions tout à fait intégrer cet appareil dans l'arsenal d'un médecin traitant ou d'un pédiatre (comme un ECG ou un tensiomètre), afin de colliger les données anatomiques de l'œil au sein d'une formule dans une application. Ces données pourraient aussi être référencées au

sein d'une courbe (comme les courbes de croissance des enfants). Nous avons créé une courbe de croissance en nous basant sur les chiffres rapportés par l'étude de Gordon et al :

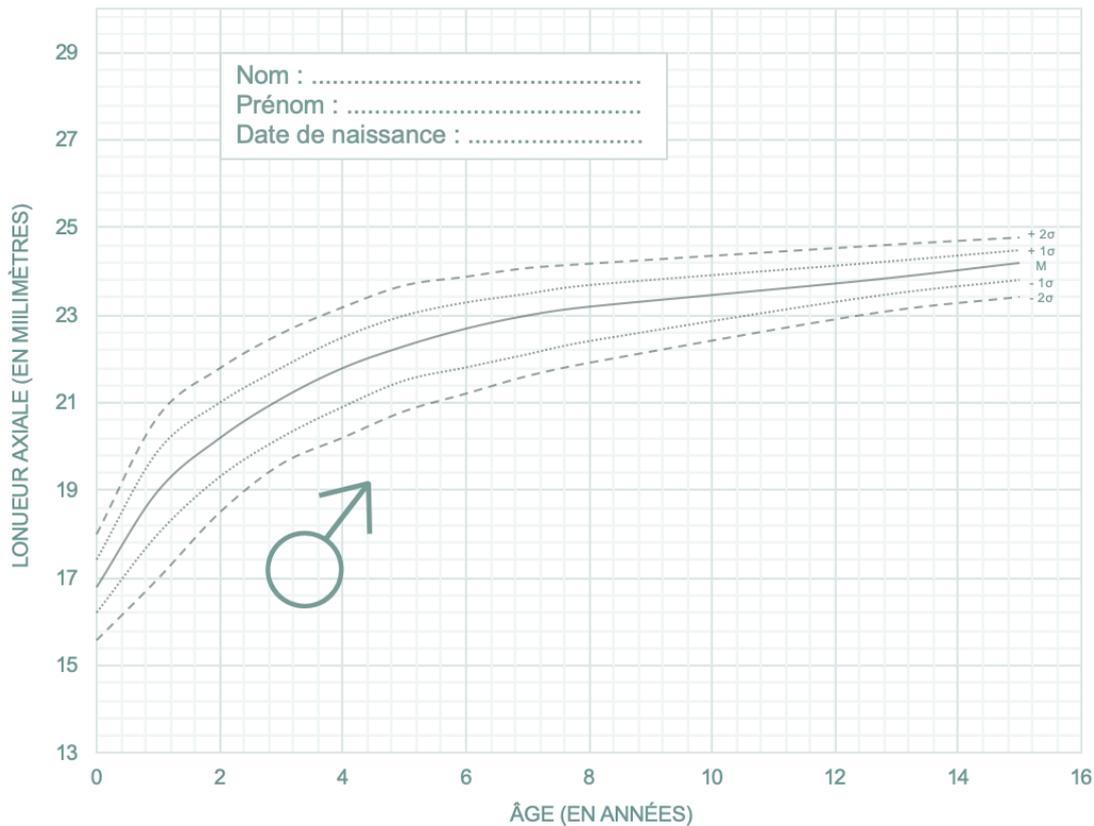


Figure 14. Courbe de croissance d'un œil (longueur axiale) imaginée et inspirée des travaux de Gordon⁴⁶

Le carnet de santé est un bon outil afin de concentrer les paramètres médicaux de l'enfant, nous pourrions imaginer un feuillet de santé visuelle plus complet en y intégrant les éléments de la croissance oculaire. L'enfant serait alors adressé si celui-ci dépasse les valeurs limites afin de réaliser une cycloplégie par un ophtalmologiste. Ce concept pourrait aussi bien être possible pour le rapport LA/Km, données pouvant être recueillies par un biomètre portatif si ce dernier voit le jour. Certains items pourraient être également associés à ces mesures tel que le temps passé en extérieur ou l'existence de myopie parentale, étant des éléments considérés comme des facteurs de risque de myopie⁹⁵.

5.5.4 Intégration de la biométrie dans le dépistage

Comme le montrent certains travaux^{9,71}, des formules prédictives, possiblement appliquées à différentes strates d'âge, voire à certains phototypes pourraient être extraites afin d'estimer un équivalent sphérique cycloplégié via la biométrie. Alors, une politique de dépistage pourrait être possible via un biomètre portable intégré aux consultations de médecine générale, PMI, pédiatre, orthoptiste... Le professionnel renseignerait dans une application les données anatomiques, afin d'en calculer une estimation. Si celle-ci dépasse les seuils fixés, l'enfant devrait être adressé à un ophtalmologiste afin de réaliser une cycloplégie pour dépister une amétropie.

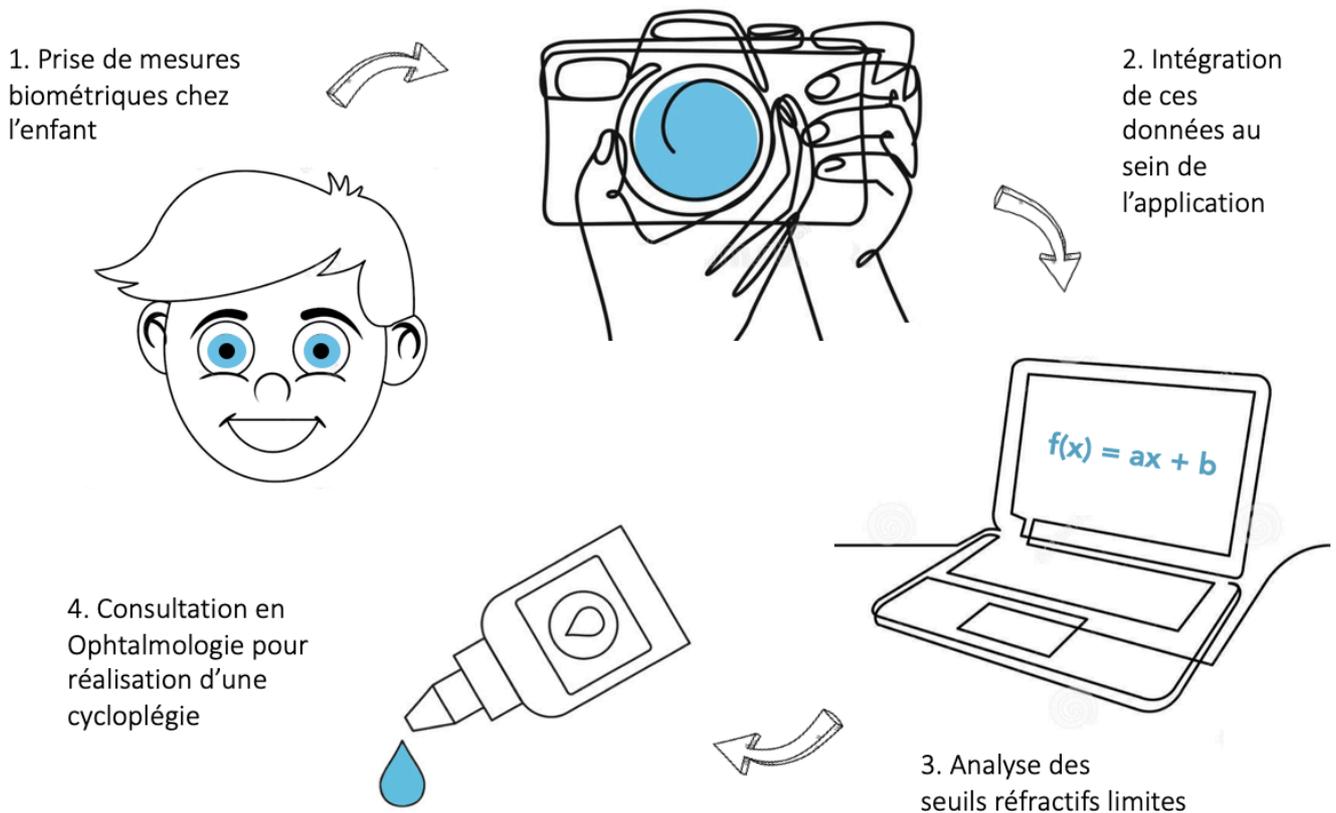


Figure 15. Modèle intégrant les paramètres biométriques dans une politique de dépistage

6. Conclusion

La réfraction cycloplégée reste actuellement le « gold-standard diagnostic » des amétropies chez les enfants⁸. La cycloplégie reste parfois mal perçue par les familles du fait d'un inconfort et d'un temps d'attente allongé ; parfois même par certains confrères ophtalmologiques. Néanmoins, celle-ci reste absolument indispensable pour une bonne prise en charge ophtalmologique. L'autoréfractométrie sans cycloplégie est la première porte d'entrée pour obtenir le statut réfractif objectif de l'enfant, cependant, elle ne permet pas, aujourd'hui, d'être assez précise⁹⁶ afin de s'affranchir d'une cycloplégie en raison de la puissance accommodative du cristallin de l'enfant⁹⁷.

Notre étude a permis de confirmer la bonne corrélation des éléments biométriques étudiés et de la réfraction cycloplégée chez l'enfant caucasien. Ainsi, via des formules simples, elle met en évidence une amélioration de la détection des enfants hypermétropes. Cependant, les paramètres intrinsèques et extrinsèques de tel tests restent encore insuffisamment fiables afin d'être étendus à une population pédiatrique large en vue d'un dépistage de masse. Ces conclusions méritent une étude ultérieure sur un panel d'enfants plus large (actuellement en cours).

Notre étude se démarque par le fait qu'elle étudie une population pédiatrique caucasienne, à l'heure où la littérature sur ce sujet est dominée par la population asiatique, dont le profil réfractif est différent avec une forte prédominance de patients myopes¹⁰. Certains biais ont pu être mis en lumière, et des éléments d'amélioration ont été évoqués afin d'améliorer les résultats, notamment sur l'inclusion d'éléments tel que l'âge, le sexe, le cristallin...

Une nouvelle étude sur une population pédiatrique en cabinet libéral d'ophtalmologie est actuellement en cours, pour, peut-être un jour, inclure la biométrie via un biomètre portatif dans une politique de dépistage.

7. Bibliographie

1. Denis D, Benso C, Wary P, Fogliarini C. La réfraction chez l'enfant : épidémiologie, évolution, évaluation et mode de correction des amétropies. *Journal Français d'Ophthalmologie*. 2004;27(8):943-952. doi:10.1016/S0181-5512(04)96242-0
2. Preslan MW, Novak A. Baltimore Vision Screening Project. *Ophthalmology*. 1996;103(1):105-109. doi:10.1016/s0161-6420(96)30753-7
3. Williams KM, Verhoeven VJM, Cumberland P, Bertelsen G, Wolfram C, Buitendijk GHS, Hofman A, van Duijn CM, Vingerling JR, Kuijpers RWAM, Höhn R, Mirshahi A, Khawaja AP, Luben RN, Erke MG, von Hanno T, Mahroo O, Hogg R, Gieger C, Cougnard-Grégoire A, Anastasopoulos E, Bron A, Dartigues J-F, Korobelnik J-F, Creuzot-Garcher C, Topouzis F, Delcourt C, Rahi J, Meitinger T, Fletcher A, Foster PJ, Pfeiffer N, Klaver CCW, Hammond CJ. Prevalence of refractive error in Europe: the European Eye Epidemiology (E3) Consortium. *Eur J Epidemiol*. 2015;30(4):305-315. doi:10.1007/s10654-015-0010-0
4. Chenu C, Institut national de la santé et de la recherche médicale. *Déficits visuels: dépistage et prise en charge chez le jeune enfant*. Éditions Inserm; 2002. Accessed June 5, 2021. http://ist.inserm.fr/basisrapports/deficit_visuel.html
5. Roth A. La réfraction de l'œil : du diagnostic à l'équipement optique. 2007.
6. Bagheri A, Feizi M, Shafii A, Faramarzi A, Tavakoli M, Yazdani S. Effect of Cycloplegia on Corneal Biometrics and Refractive State. *J Ophthalmic Vis Res*. 2018;13(2):101-109. doi:10.4103/jovr.jovr_196_17
7. Zhao J, Mao J, Luo R, Li F, Pokharel GP, Ellwein LB. Accuracy of Noncycloplegic Autorefractometry in School-Age Children in China: *Optometry and Vision Science*. 2004;81(1):49-55. doi:10.1097/00006324-200401000-00010
8. Morgan IG, Iribarren R, Fotouhi A, Grzybowski A. Cycloplegic refraction is the gold standard for epidemiological studies. *Acta Ophthalmol*. 2015;93(6):581-585. doi:10.1111/aos.12642
9. Sankaridurg P, He X, Naduvilath T, Lv M, Ho A, Smith E, Erickson P, Zhu J, Zou H, Xu X. Comparison of noncycloplegic and cycloplegic autorefractometry in categorizing refractive error data in children. *Acta Ophthalmol*. 2017;95(7):e633-e640. doi:10.1111/aos.13569
10. Lam CS-Y, Lam C-H, Cheng SC-K, Chan LY-L. Prevalence of myopia among Hong Kong Chinese schoolchildren: changes over two decades: Changes in myopia prevalence over two decades. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2012;32(1):17-24. doi:10.1111/j.1475-1313.2011.00886.x
11. Hc F, Hj F, T R. Oculometric characteristics of extreme hypermetropia in two faroese families. *Optom Vis Sci*. 2004;81(10):762-768. doi:10.1097/00006324-200410000-00008
12. E G-V, Lm K. High myopia associated with retinopathy of prematurity is primarily lenticular. *Journal of AAPOS : the official publication of the American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. 2005;9(2). doi:10.1016/j.jaapos.2004.12.018
13. Loudot C, Zanin E, Fogliarini C, Boulze M, Souchon L, Denis D. Étude de la biométrie oculaire chez l'enfant hypermétrope : apport du biomètre Lenstar LS 900 (Haag-Streit®). *Journal Français d'Ophthalmologie*. 2011;34(6):369-375. doi:10.1016/j.jfo.2010.12.008
14. Touzeau O. Sphère, cylindre et axe : quelles relations ? Published online 2014:3.
15. Clergeau G. Épidémiologie des amétropies. In: *La Réfraction de l'œil : Du Diagnostic à l'équipement Optique*. Elsevier Masson. ; 2007.
16. Ingram RM. Refraction of 1-year-old children after atropine cycloplegia. *Br J*

Ophthalmol. 1979;63(5):343-347.

17. Clergeau G. Amétropies de l'enfant et leurs évolutions (myopie, hypermétropie, astigmatisme). *La Revue Du Praticien.* 57:2011.
18. Abrahamsson et al. A longitudinal study of a population based sample of astigmatic children. 2009.
19. Abrahamsson M, Fabian G, Sjöstrand J. A longitudinal study of a population based sample of astigmatic children: II. The changeability of anisometropia. *Acta Ophthalmologica.* 2009;68(4):435-440. doi:10.1111/j.1755-3768.1990.tb01672.x
20. Clergeau G. La réfraction de l'enfant. ED A & J. Péchereau, Nantes, 2008.
21. Gwiazda J, Scheiman M, Mohindra I, Held R. Astigmatism in children: changes in axis and amount from birth to six years. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1984;25(1):88-92.
22. Harvey EM, Miller JM, Twelker JD, Sherrill DL. Longitudinal Change and Stability of Refractive, Keratometric, and Internal Astigmatism in Childhood. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2015;56(1):190-198. doi:10.1167/iovs.14-13898
23. Ehrlich DL, Atkinson J, Braddick O, Bobier W, Durden K. Reduction of infant myopia: a longitudinal cycloplegic study. *Vision Research.* 1995;35(9):1313-1324. doi:10.1016/0042-6989(94)00228-E
24. Clergeau G. [Infant ametropias and their evolutions (myopia, hyperopia, astigmatism)]. *Rev Prat.* 2007;57(18):2009-2013.
25. Touzeau O. Quantification de la composante sphérique de la réfraction. Published online 2014:3.
26. Fotouhi A, Morgan IG, Iribarren R, Khabazkhoob M, Hashemi H. Validity of noncycloplegic refraction in the assessment of refractive errors: the Tehran Eye Study. *Acta Ophthalmologica.* 2012;90(4):380-386. doi:https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.2010.01983.x
27. The Pediatric Eye Disease Investigator Group. A Randomized Trial of Atropine vs Patching for Treatment of Moderate Amblyopia in Children. *Archives of Ophthalmology.* 2002;120(3):268-278. doi:10.1001/archophth.120.3.268
28. Denis D. *Ophthalmologie Pédiatrique.*; 2017.
29. Barjol A. La réfraction chez l'enfant. Published online 2013:3.
30. ATROPINE ALCON 0,3 % collyre. VIDAL. Accessed June 5, 2021. <https://www.vidal.fr/medicaments/atropine-alcon-0-3-collyre-1675.html>
31. Rosenbaum AL, Bateman JB, Bremer DL, Liu PY. Cycloplegic refraction in esotropic children. Cyclopentolate versus atropine. *Ophthalmology.* 1981;88(10):1031-1034. doi:10.1016/s0161-6420(81)80032-2
32. Khurana AK, Ahluwalia BK, Rajan C. Status of cyclopentolate as a cycloplegic in children: a comparison with atropine and homatropine. *Acta Ophthalmol (Copenh).* 1988;66(6):721-724. doi:10.1111/j.1755-3768.1988.tb04069.x
33. Bagheri A, Givrad S, Yazdani S, Reza Mohebbi M. Optimal dosage of cyclopentolate 1% for complete cycloplegia: a randomized clinical trial. *Eur J Ophthalmol.* 2007;17(3):294-300. doi:10.1177/112067210701700303
34. Mohan K, Sharma A. Optimal dosage of cyclopentolate 1% for cycloplegic refraction in hypermetropes with brown irides. *Indian Journal of Ophthalmology.* 2011;59(6):514-516. doi:10.4103/0301-4738.86329
35. Tropicamide : substance active à effet thérapeutique. VIDAL. Accessed June 5, 2021. <https://www.vidal.fr/medicaments/substances/tropicamide-3944.html>
36. Kleinstein RN, Mutti DO, Manny RE, Shin JA, Zadnik K. Cycloplegia in African-American children. *Optom Vis Sci.* 1999;76(2):102-107. doi:10.1097/00006324-199902000-00017

37. Caputo AR, Lingua RW. The problem of cycloplegia in the pediatric age group: a combination formula for refraction. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*. 1980;17(2):119-128.
38. Yazdani N, Sadeghi R, Momeni-Moghaddam H, Zarifmahmoudi L, Ehsaei A. Comparison of cyclopentolate versus tropicamide cycloplegia: A systematic review and meta-analysis. *J Optom*. 2018;11(3):135-143. doi:10.1016/j.optom.2017.09.001
39. Anderson HA, Hentz G, Glasser A, Stuebing KK, Manny RE. Minus-Lens–Stimulated Accommodative Amplitude Decreases Sigmoidally with Age: A Study of Objectively Measured Accommodative Amplitudes from Age 3. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2008;49(7):2919. doi:10.1167/iovs.07-1492
40. Hashemi H, Khabazkhoob M, Emamian MH, Shariati M, Miraftab M, Yekta A, Ostadimoghaddam H, Fotouhi A. Association between Refractive Errors and Ocular Biometry in Iranian Adults. *J Ophthalmic Vis Res*. 2015;10(3):214-220. doi:10.4103/2008-322X.170340
41. Gaurisankar ZS, Rijn GA van, Lima JEE, Ilgenfritz AP, Cheng Y, Haasnoot GW, Luyten GPM, Beenakker J-WM. Correlations between ocular biometrics and refractive error: A systematic review and meta-analysis. *Acta Ophthalmologica*. 2019;97(8):735-743. doi:https://doi.org/10.1111/aos.14208
42. Ip JM, Huynh SC, Kifley A, Rose KA, Morgan IG, Varma R, Mitchell P. Variation of the Contribution from Axial Length and Other Oculometric Parameters to Refraction by Age and Ethnicity. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2007;48(10):4846. doi:10.1167/iovs.07-0101
43. Iyamu E, Iyamu J, Obiakor CI. The Role of Axial Length-Corneal Radius of Curvature Ratio in Refractive State Categorization in a Nigerian Population. *ISRN Ophthalmology*. 2011;2011:1-6. doi:10.5402/2011/138941
44. Grignolo A, Rivara A. Observations biométriques sur l'oeil des enfants nés a terme et des prématurés au cours de la première année. *undefined*. Published online 1968. Accessed June 6, 2021. /paper/Observations-biom%C3%A9triques-sur-l%27oeil-des-enfants-a-Grignolo-Rivara/fe2759dc5c92a19e417f26b67256c962fb5d2809
45. Larsen JS. The sagittal growth of the eye. IV. Ultrasonic measurement of the axial length of the eye from birth to puberty. *Acta Ophthalmol (Copenh)*. 1971;49(6):873-886. doi:10.1111/j.1755-3768.1971.tb05939.x
46. Gordon, R.A., & Donzis, P. B. (1985). Refractive Development of the Human Eye. *Archives of Ophthalmology*, 103(6), 785-789.
47. Inagaki Y. The rapid change of corneal curvature in the neonatal period and infancy. *Arch Ophthalmol*. 1986;104(7):1026-1027. doi:10.1001/archophth.1986.01050190084044
48. Shufelt C, Fraser-Bell S, Ying-Lai M, Torres M, Varma R. Refractive Error, Ocular Biometry, and Lens Opalescence in an Adult Population: The Los Angeles Latino Eye Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2005;46(12):4450-4460. doi:10.1167/iovs.05-0435
49. Chen M-J, Liu Y-T, Tsai C-C, Chen Y-C, Chou C-K, Lee S-M. Relationship Between Central Corneal Thickness, Refractive Error, Corneal Curvature, Anterior Chamber Depth and Axial Length. *Journal of the Chinese Medical Association*. 2009;72(3):133-137. doi:10.1016/S1726-4901(09)70038-3
50. Touzeau O, Allouch C, Borderie V, Kopito R, Laroche L. Corrélation entre la réfraction et la biométrie oculaire. *J Fr Ophtalmol*. 2020;26:9.
51. Jivrajka. Variability of axial length, anterior chamber depth, and lens thickness in the cataractous eye.
52. ANAES. GUIDE MÉTHODOLOGIQUE : COMMENT ÉVALUER A PRIORI UN PROGRAMME DE DÉPISTAGE ?2004.
53. AFSOP. Dépistage des troubles visuels de l'enfant.June 2019.

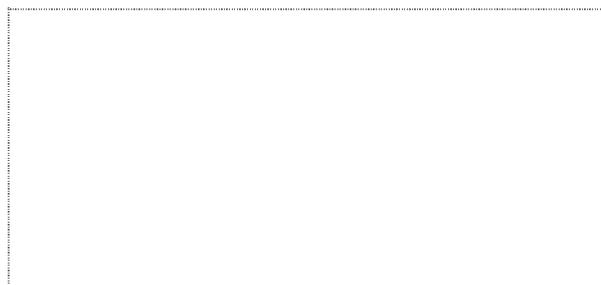
54. Fricke T, Holden B, Wilson D, Schlenther G, Naidoo K, Resnikoff S, Frick K. Global cost of correcting vision impairment from uncorrected refractive error. *Bull World Health Organ*. 2012;90(10):728-738. doi:10.2471/BLT.12.104034
55. WHO | Global data on visual impairment. WHO. Accessed March 28, 2021. <http://www.who.int/blindness/publications/globaldata/en/>
56. Smith TST, Frick KD, Holden BA, Fricke TR, Naidoo KS. Potential lost productivity resulting from the global burden of uncorrected refractive error. *Bull World Health Organ*. 2009;87(6):431-437. doi:10.2471/blt.08.055673
57. Hidden A. Dépistage des troubles visuels chez l'enfant de 0 à 3 ans en médecine générale: élaboration d'un outil par méthode Delphi. :124.
58. Saguet P, Lux A-L, Denion G, Denion E. Les items d'ophtalmologie du carnet de santé sont-ils réalistes ? *Archives de Pédiatrie*. 2016;23(1):14-20. doi:10.1016/j.arcped.2015.10.002
59. HAS. Propositions portant sur le dépistage individuel chez l'enfant de 28 jours à 6 ans, destinées aux médecins généralistes, pédiatres, médecins de PMI et médecins scolaires. 2005.
60. CADET. DÉPISTAGE VISUEL DE L'ENFANT - examen visuel du nouveau-né et jusqu'à 4 mois. http://cadet-association.fr/images/telechargements/depistage_0_3ans_cadet.pdf.
61. CADET. FICHE PRATIQUE DEPISTAGE 3-6 ANS. http://cadet-association.fr/images/telechargements/depistage_3_6ans_cadet.pdf.
62. Lequeux L, Thouvenin D, Couret C, Audren F, Costet C, Dureau P, Leruez S, Defoordt-Dhellemmes S, Daien V, Espinasse Berrod M-A, Arsene S, Lebranchu P, Denis D, Bui-Quoc E, Speeg-Schatz C. Le dépistage visuel chez l'enfant : les recommandations de l'Association Francophone de Strabologie et d'Ophtalmologie Pédiatrique (AFSOP). *Journal Français d'Ophtalmologie*. 2021;44(2):244-251. doi:10.1016/j.jfo.2020.07.005
63. Joish VN, Malone DC, Miller JM. A cost-benefit analysis of vision screening methods for preschoolers and school-age children. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. 2003;7(4):283-290. doi:10.1016/S1091-8531(03)00116-2
64. Hashemi H, Fotouhi A, Yekta A, Pakzad R, Ostadimoghaddam H, Khabazkhoob M. Global and regional estimates of prevalence of refractive errors: Systematic review and meta-analysis. *J Curr Ophthalmol*. 2017;30(1):3-22. doi:10.1016/j.joco.2017.08.009
65. Fledelius HC, Stubgaard M. Changes in refraction and corneal curvature during growth and adult life. A cross-sectional study. *Acta Ophthalmol (Copenh)*. 1986;64(5):487-491. doi:10.1111/j.1755-3768.1986.tb06959.x
66. Masson E. Caractérisation du profil biométrique oculaire d'une population myope fort : la myopie forte correspond-elle à un phénotype homogène ? EM-Consulte. Accessed July 11, 2021. <https://www.em-consulte.com/article/286415/caracterisation-du-profil-biometrique-oculaire-dun>
67. Lin LL, Shih YF, Tsai CB, Chen CJ, Lee LA, Hung PT, Hou PK. Epidemiologic study of ocular refraction among schoolchildren in Taiwan in 1995. *Optom Vis Sci*. 1999;76(5):275-281. doi:10.1097/00006324-199905000-00013
68. Gwiazda J, Marsh-Tootle WL, Hyman L, Hussein M, Norton TT, COMET Study Group. Baseline refractive and ocular component measures of children enrolled in the correction of myopia evaluation trial (COMET). *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2002;43(2):314-321.
69. Murthy GVS, Gupta SK, Ellwein LB, Muñoz SR, Pokharel GP, Sanga L, Bachani D. Refractive error in children in an urban population in New Delhi. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2002;43(3):623-631.
70. Maul E, Barroso S, Munoz SR, Sperduto RD, Ellwein LB. Refractive Error Study in Children: results from La Florida, Chile. *Am J Ophthalmol*. 2000;129(4):445-454.

doi:10.1016/s0002-9394(99)00454-7

71. Magome K, Morishige N, Ueno A, Matsui T-A, Uchio E. Prediction of cycloplegic refraction for noninvasive screening of children for refractive error. *PLOS ONE*. 2021;16(3):e0248494. doi:10.1371/journal.pone.0248494
72. Nobre T, Gabahn KM. La prise en compte des différences ethnoculturelles des patients à l'hôpital : une étude exploratoire en contexte français. *Humanisme et Entreprise*. 2011;n° 305(5):37-48.
73. Ip JM, Huynh SC, Robaei D, Kifley A, Rose KA, Morgan IG, Wang JJ, Mitchell P. Ethnic differences in refraction and ocular biometry in a population-based sample of 11–15-year-old Australian children. *Eye*. 2008;22(5):649-656. doi:10.1038/sj.eye.6702701
74. He M, Zeng J, Liu Y, Xu J, Pokharel GP, Ellwein LB. Refractive error and visual impairment in urban children in southern china. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2004;45(3):793-799. doi:10.1167/iovs.03-1051
75. Zhao J, Pan X, Sui R, Munoz SR, Sperduto RD, Ellwein LB. Refractive Error Study in Children: results from Shunyi District, China. *Am J Ophthalmol*. 2000;129(4):427-435. doi:10.1016/s0002-9394(99)00452-3
76. Kalikivayi V, Naduvilath TJ, Bansal AK, Dandona L. Visual impairment in school children in Southern India. *Indian Journal of Ophthalmology*. 1997;45(2):129.
77. Naidoo KS, Raghunandan A, Mashige KP, Govender P, Holden BA, Pokharel GP, Ellwein LB. Refractive error and visual impairment in African children in South Africa. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2003;44(9):3764-3770. doi:10.1167/iovs.03-0283
78. Donahue SP, Arthur B, Neely DE, Arnold RW, Silbert D, Ruben JB. Guidelines for automated preschool vision screening: A 10-year, evidence-based update. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*. 2013;17(1):4-8. doi:10.1016/j.jaapos.2012.09.012
79. Atkinson J, Anker S, Bobier W, Braddick O, Durden K, Nardini M, Watson P. Normal emmetropization in infants with spectacle correction for hyperopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2000;41(12):3726-3731.
80. Tokoro T. On the definition of pathologic myopia in group studies. *Acta Ophthalmol Suppl*. 1988;185:107-108. doi:10.1111/j.1755-3768.1988.tb02681.x
81. A & J Péchereau. La réfraction - École d'Orthoptie de Nantes. Version 03.1.
82. Goyal S, Phillips PH, Rettiganti M, Gossett JM, Lowery RS. Comparison of the Effect of Cycloplegia on Astigmatism Measurements in a Pediatric Amblyopic Population: A Prospective Study. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*. 2018;55(5):293-298. doi:10.3928/01913913-20180410-02
83. Péchereau, Lavenant. Influence de la cycloplégie sur la réfraction évaluée au réfractomètre automatique.1993.
84. Touzeau O, Gaujoux T, Bullet J, Allouch C, Borderie V, Laroche L. Relations entre les paramètres de la réfraction : sphère, cylindre et axe. *Journal Français d'Ophthalmologie*. 2012;35(8):587-598. doi:10.1016/j.jfo.2011.12.006
85. Ojaimi E, Rose KA, Morgan IG, Smith W, Martin FJ, Kifley A, Robaei D, Mitchell P. Distribution of Ocular Biometric Parameters and Refraction in a Population-Based Study of Australian Children. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2005;46(8):2748-2754. doi:10.1167/iovs.04-1324
86. He X, Zou H, Lu L, Zhao R, Zhao H, Li Q, Zhu J. Axial Length/Corneal Radius Ratio: Association with Refractive State and Role on Myopia Detection Combined with Visual Acuity in Chinese Schoolchildren. *PLoS One*. 2015;10(2). doi:10.1371/journal.pone.0111766

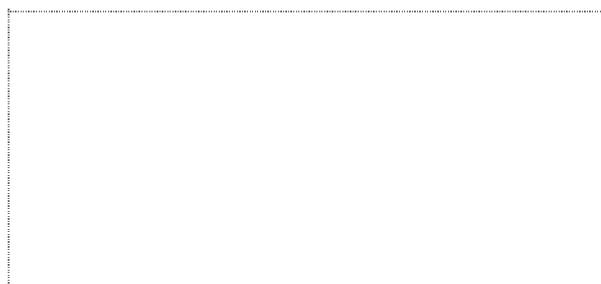
87. Foo VHX, Verkicharla PK, Ikram MK, Chua SYL, Cai S, Tan CS, Chong Y-S, Kwek K, Gluckman P, Wong T-Y, Ngo C, Saw S-M, on behalf of the GUSTO study group. Axial Length/Corneal Radius of Curvature Ratio and Myopia in 3-Year-Old Children. *Transl Vis Sci Technol.* 2016;5(1):5. doi:10.1167/tvst.5.1.5
88. Behndig A, Montan P, Lundström M, Zetterström C, Kugelberg M. Gender differences in biometry prediction error and intra-ocular lens power calculation formula. *Acta Ophthalmologica.* 2014;92(8):759-763. doi:10.1111/aos.12475
89. Dai C, Liu M, Lv X, Li B. Subtle changes of the crystalline lens after cycloplegia: a retrospective study. *BMC Ophthalmology.* 2021;21(1):124. doi:10.1186/s12886-021-01884-9
90. Masson E. Topographie d'élevation et analyse du segment antérieur par balayage d'une fente lumineuse (Orbscan). EM-Consulte. Accessed August 29, 2021. <https://www.em-consulte.com/article/7667/topographie-d-elevation-et-analyse-du-segment-ante>
91. Allouch C, Touzeau O, Kopito R, Borderie V, Laroche L. Étude biométrique du cristallin par échographie A et Orbscan. *Journal Français d'Ophtalmologie.* 2005;28(9):925-932. doi:10.1016/S0181-5512(05)81116-7
92. Leone JF, Mitchell P, Morgan IG, Kifley A, Rose KA. Use of Visual Acuity to Screen for Significant Refractive Errors in Adolescents: Is It Reliable? *Archives of Ophthalmology.* 2010;128(7):894-899. doi:10.1001/archophthol.2010.134
93. Peterseim MMW, Rhodes RS, Patel RN, Wilson ME, Edmondson LE, Logan SA, Cheeseman EW, Shortridge E, Trivedi RH. Effectiveness of the GoCheck Kids Vision Screener in Detecting Amblyopia Risk Factors. *Am J Ophthalmol.* 2018;187:87-91. doi:10.1016/j.ajo.2017.12.020
94. Satou T, Niida T, Ito M. Biometry: a tool for the detection of amblyopia risk factor in children. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 2019;257(9):2049-2056. doi:10.1007/s00417-019-04391-2
95. French AN, Morgan IG, Mitchell P, Rose KA. Risk Factors for Incident Myopia in Australian Schoolchildren. *Ophthalmology.* 2013;120(10):2100-2108. doi:10.1016/j.ophtha.2013.02.035
96. Wesemann W, Dick B. Accuracy and accommodation capability of a handheld autorefractor. *Journal of Cataract and Refractive Surgery.* 2000;26(1):62-70. doi:10.1016/S0886-3350(99)00325-9
97. Choong Y-F, Chen A-H, Goh P-P. A Comparison of Autorefraction and Subjective Refraction With and Without Cycloplegia in Primary School Children. *American Journal of Ophthalmology.* 2006;142(1):68-74.e1. doi:10.1016/j.ajo.2006.01.084

Vu, le Président du Jury,
(tampon et signature)



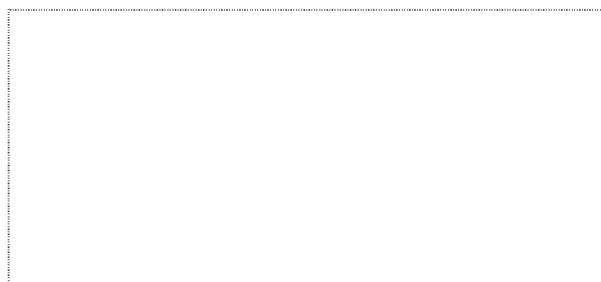
Professeur Michel WEBER

Vu, le Directeur de Thèse,
(tampon et signature)



Docteur Chloé COURET

Vu, le Doyen de la Faculté,



Professeur Pascale JOLLIET

Corrélation entre la biométrie et la réfraction cycloplégiée chez l'enfant et application de la biométrie dans le dépistage des amétropies de l'enfant.

Objectif : établir une corrélation entre les données biométriques (longueur axiale et kératométrie) et la réfraction cycloplégiée de l'enfant caucasien et appliquer ces formules de corrélation en vue d'un dépistage des amétropies de l'enfant.

Matériels et méthodes : Nous avons inclus, de façon rétrospective, 502 enfants de 2 à 16 ans consultant au CHU de NANTES principalement, et à la Clinique d'Alger entre 2016 et 2020 ayant bénéficié d'une cycloplégie et d'une biométrie optique. Afin de tester nos formules extraites, celles-ci ont été appliquées sur une deuxième population (100 enfants issus de consultations hospitalières et de 58 enfants libéraux).

Résultats : la courbe de corrélation entre l'équivalent sphérique (ES) pré- et post-cycloplégie montre un excellent coefficient de corrélation r de 0,94, la corrélation entre l'ES cycloplégié et la longueur axiale montre un coefficient r de 0,81 et la corrélation entre l'ES cycloplégié et le rapport LA/Km montre un excellent coefficient r de 0,91 dans notre population. Les performances du dépistage via la biométrie pour le seuil de détection des myopies $\leq -1 \delta$ sont moins bonnes (sensibilité de 0,80 et spécificité de 0,94 pour la longueur axiale seule ou le rapport LA/Km : sensibilité de 0,88 et spécificité de 0,96) que celles de la réfraction non cycloplégiée seule (sensibilité de 0,98 et spécificité de 0,95). Les performances du dépistage via la biométrie pour le seuil de détection des hypermétropies $\geq +3,5 \delta$ sont meilleures (sensibilité de 0,67 et spécificité de 0,84 pour la longueur axiale seule ou le rapport LA/Km : sensibilité de 0,80 et spécificité de 0,93) par rapport à la réfraction non cycloplégiée seule (sensibilité de 0,65 et spécificité de 1).

Conclusion : La corrélation entre les éléments biométriques étudiés et la réfraction cycloplégiée de l'enfant est bonne sur une population caucasienne. Le dépistage des troubles visuels par la biométrie offre de meilleures performances que l'autoréfractométrie seule pour les enfants hypermétropes pour tous les seuils étudiés grâce aux formules de corrélation.

Mots-clés : enfants, amétropie, cycloplégie, biométrie, kératométrie, longueur axiale, dépistage visuel