

Calcul des indices anthropométriques

LEXIQUE

Allométrie	Elle décrit comment les caractéristiques d'un individu changent avec sa taille
Analyse des composantes principales :	Technique statistique permettant de passer d'un grand nombre de variables à quelques variables nommées « composantes principales », afin de simplifier l'analyse des données
Analyse Procrustéenne :	Technique pour comparer les formes
Centroïde :	Centre de gravité
Composantes principales :	Des constructions statistiques qui n'ont aucune réalité biologique
Configuration :	L'ensemble des points-repères qui décrivent l'objet étudié
Conformation :	Forme de l'objet indépendamment de la taille (conformation géométrique)
Dimorphisme :	Différence d'aspect du mâle et de la femelle. Caractéristique de certains êtres vivants d'une même espèce à pouvoir prendre 2 formes distinctes
Distance procrustéenne :	Distance mesurée entre deux configurations d'un même objet, après superposition Procruste. Elle permet de quantifier les différences de formes entre deux conformations
Forme de consensus :	Forme moyenne
Forme :	Association de la taille et de la conformation d'une configuration
Modèle classificateur :	Algorithme de classification
Morphométrie géométrique :	Méthode de biologie comparative permettant de quantifier et de visualiser les différences statistiques de forme et de taille
Ontogénie :	Développement biologique de l'individu depuis la conception jusqu'à l'âge adulte
Repère de Référence Anatomique :	Points précis et homologues, repérables de façon certaine sur l'ensemble des individus comparés dans l'échantillon
Semi-repères de référence anatomique :	Série de points ordonnés désignant une zone, un contour, ou une surface
Superposition procrustéenne :	Processus qui permet de comparer deux conformations géométriques différentes (ou plus), en s'affranchissant des paramètres de position, d'orientation et d'échelle des objets à comparer
Taille centroïde :	C'est la mesure de taille la plus utilisée en morphométrie géométrique. Elle correspond mathématiquement à la racine carrée de la somme de chaque distance [point repère-centroïde]

I. INTRODUCTION

Selon l’OMS (1982), la malnutrition est un état pathologique résultant de la carence ou de l’excès relatif ou absolu d’un ou de plusieurs nutriments essentiels, que cet état se manifeste cliniquement ou ne soit décelable que par des mesures anthropométriques, biochimiques / physiologiques ou cliniques. Il existe 3 types de malnutrition par carence : la carence en micronutriments qui est le résultat d'un apport et/ou d'une absorption insuffisant (es) de micronutriments essentiels, le retard de croissance qui se traduit par une taille insuffisante par rapport à l’âge et la malnutrition aiguë (Shrimpton et al., 2012).

Cette dernière est due à un déséquilibre entre les apports et les besoins chez les enfants et se manifeste par une émaciation, un poids corporel insuffisant par rapport à la taille. Elle peut être modérée (MAM) ou sévère (MAS) selon la gravité (Fiorentino et al., 2016 ; OMS, 2018). Elle est directement induite par une alimentation monotone ou insuffisante et des maladies récurrentes (UNICEF, 1997 ; OMS, 2018 ; UNICEF/WHO/World Bank Group, 2018). Les pratiques de soins inadéquats, l’environnement familial et les facteurs socio-culturels constituent entre autres des facteurs sous-jacents à la malnutrition aiguë. Cette dernière a d’importantes conséquences sur la survie, l’incidence des maladies aiguës et chroniques, le développement des enfants ainsi que la productivité (Lancet’s series on maternal and child undernutrition, 2013). Selon le Fonds des Nations Unies pour l’Enfance (UNICEF, 2018), la malnutrition aiguë entraîne une baisse des performances scolaires et intellectuelles. Elle affaiblit le système immunitaire et contribue majoritairement à la morbidité et à la mortalité infantiles (Scrimshaw, 1968 ; Fiorentino et al., 2016 ; UNICEF/WHO/World Bank Group, 2018).

Dans le monde, en 2018 plus de 49 millions d’enfants de moins de cinq ans souffrent de malnutrition aiguë ou sont à risque dont 17 millions atteints de la forme sévère (MAS) (UNICEF/WHO/World Bank Group, 2019). Près d’un quart (14 millions) de ces enfants vivent en Afrique dont 8,1 % en Afrique de l’Ouest (UNICEF/WHO/World Bank Group, 2019). Au Sénégal, même si la malnutrition aiguë a tendance à diminuer, la situation nutritionnelle des enfants âgés de 6-59 mois reste précaire avec une prévalence de 9% de la malnutrition aiguë globale (MAG) dont 2% souffrant d’une forme sévère à l’échelle nationale (ANSD, 2018). Les résultats du rapport de l’enquête nutritionnelle nationale utilisant la méthodologie SMART (Standardized Monitoring and Assessment for Relief and Transition) montrent que dans toutes les régions du Sénégal, les prévalences de la MAG augmentent durant les périodes de soudure avec des taux supérieurs à celui considéré comme acceptable (5%) dans toutes les strates (SMART, 2015). Les régions du Nord sont les plus affectées par l’insécurité alimentaire et présentent une situation nutritionnelle critique avec des prévalences de MAG de 16,5% à Matam, 16,1% à Louga et 18,2% à Podor. Les prévalences de la MAS dépassent le seuil d’urgence (2%) dans ces 3 régions (SMART, 2015) malgré les nombreux programmes

d'intervention nutritionnelle mis en œuvre dans ces zones. Les résultats de la dernière enquête SMART montrent que les prévalences obtenues en période post-récolte (décembre) sont plus faibles même si elles restent préoccupantes et sont respectivement de 10,5%, 9,4% et 9,6% pour Matam, Louga et Podor (SMART, 2017).

L'évaluation anthropométrique de l'état nutritionnel est basée sur les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui définit la malnutrition aiguë par un indice poids pour taille PTZ inférieur à -2 z scores, un périmètre brachial (PB) inférieur à 125 mm et/ou la présence d'œdèmes nutritionnels (De Onis, 2007). Cependant des études ont montré qu'il existe des différences entre ces deux critères de diagnostic (Grellety & Golden 2016 ; Fiorentino et al., 2016 ; Custidio et al., 2018). Par exemple, la méta-analyse faite par Grellety & Golden (2016) dans 47 pays dont le Sénégal chez des enfants âgés de 6-59 mois, a montré que la capacité des critères à diagnostiquer les enfants mal nourris varie d'un pays à l'autre. Au Sénégal, l'indice PTZ détecte plus les enfants souffrant de MAG (78,4 %) que le PB (6,8 %) avec un taux de chevauchement de 14,8 % pour les deux critères (DC) (Grellety & Golden 2016). Plus récemment, une analyse rétrospective menée par le Laboratoire de Recherche en Nutrition et Alimentation Humaine (LARNAH) en partenariat avec le Programme Alimentaire Mondial (PAM) sur des données d'enquête SMART de 2011 à 2017 d'enfants Burkinabé âgés de 6-59 mois a montré que le PB a une faible performance diagnostic de la MAG et de la MAS (Onifade, 2019). L'étude de Fiorentino et al. (2016) faite au Cambodge chez des enfants âgés de 6-59 mois a montré que le PB dépiste plus les garçons souffrant de malnutrition aiguë que les filles. Il a été aussi démontré que les valeurs du PTZ et celles du PB augmentent avec l'âge des enfants (Grellety & Golden 2016 ; Fiorentino et al., 2016 ; Custidio et al., 2018). Par ailleurs, au Sénégal le dépistage de la malnutrition aiguë en milieu communautaire se fait avec le PB comme recommandé par le Ministère de la Santé et de l'Action Sociale (DAN, 2013) car il est difficile d'effectuer un dépistage par d'autres mesures anthropométriques chez des enfants âgés de 6 à 59 mois. Ces mesures nécessitent des ressources humaines qualifiées, de la logistique et un budget assez lourd pour la prise en charge des prestataires de service. De même, des erreurs de mesure sont susceptibles de se produire lors du dépistage (Grellety et Golden, 2016 ; Corsi et al., 2017) entraînant une mauvaise évaluation des enfants malnutris. Au Sénégal, l'accès à certaines zones reste aussi difficile surtout pendant l'hivernage où certaines routes deviennent impraticables pour le transport en sécurité du matériel anthropométrique.

Sur la base de ce constat, l'Organisation Non Gouvernementale « Action Contre la Faim-Espagne » (ACF-Espagne) a pris l'initiative de mettre en place un projet de recherche pour développer un outil alternatif de diagnostic par image de la malnutrition aiguë chez les enfants en temps réel dénommé « Diagnostic par image de la malnutrition aiguë » (SAM Photo-D), basé sur le principe de la morphométrie géométrique. La

morphométrie géométrique (MG) est une technique dérivée de la morphométrie « traditionnelle » qui est une méthode de biologie comparative permettant d'étudier les variations morphologiques entre les formes biologiques ou entre les organismes (**Metairie, 2014**). La MG étudie la covariance des formes (**Bookstein, 1991**) et permet de concevoir un modèle à l'aide des points de repère de référence anatomiques (*Landmark* en anglais) (**Rohlf et Slice, 1990**). Elle permet de quantifier et de visualiser des différences statistiques de forme et de taille (**Rohlf et Marcus, 1993 ; Bookstein, 1996 ; Klingenberg, 2010**). La forme, résultant de la taille et de la conformation « forme = taille + conformation » (**Baylac, 1996**), est une propriété géométrique non affectée par les changements de taille, de position, de rotation ou de mise à l'échelle par contre la taille est une propriété géométrique influencée par ces changements (**Mitteroecker et al., 2013**). Chez les enfants de moins de 5 ans, la MG est utilisée par le biais de l'outil SAM Photo-D pour améliorer le dépistage, le diagnostic et la prise en charge rapide de la MAS en milieu communautaire (**Medialdea et al., 2018**). Ce dispositif de prise de photo est une innovation majeure pour les projets et programmes de lutte contre la malnutrition. Il permettra d'éviter des erreurs de mesure, de gagner plus de temps lors des séances de dépistage en augmentant le nombre d'enfants à dépister. Ainsi, les utilisateurs ont un accès plus facile à l'information et aux données relatives à la malnutrition surtout dans les zones les plus reculées afin de mieux orienter les interventions et programmes.

La première phase de ce projet visait à développer un logiciel pour ordinateur et une application mobile pour téléphone portable de type Android « SAM Photo-D ». Cette phase menée de novembre 2016 à juillet 2017, a porté uniquement sur les enfants ayant un état nutritionnel satisfaisant et ceux souffrant de MAS selon deux indicateurs, le PB et l'indice PTZ. Un algorithme mathématique permettant de diagnostiquer la MAS a été développé au cours de cette phase (**Medialdea et al., 2018**). Les résultats obtenus au cours de la phase I de l'étude ont montré que le bras gauche est la partie du corps qui renseigne plus sur le diagnostic de la MAS (**Medialdea et al., 2019**). Ces résultats nous ont poussés à voir si l'analyse des différences morphologiques du bras gauche des enfants, renseigne aussi sur le diagnostic de la MAM. Afin d'évaluer la spécificité et la sensibilité de l'algorithme du classificateur développé, ACF-Espagne a jugé nécessaire d'inclure les enfants à risque de malnutrition aiguë ($-2 < PTZ \leq -1$ z-scores) et ceux souffrant de MAM dans le cadre de la phase II du projet SAM Photo Diagnosis App (novembre 2018 à mars 2021). C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de mémoire de recherche mené par le Laboratoire de Recherche en Nutrition et Alimentation Humaine (LARNAH) de l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) en collaboration avec ACF-Espagne et qui porte sur la comparaison de la morphométrie d'enfants âgés de 6-59 mois pour le diagnostic de la malnutrition aiguë évaluée par l'indice poids pour taille et le périmètre brachial en milieu rural au Sénégal.

QUESTION DE RECHERCHE

Les enfants de 6-59 mois souffrant de malnutrition aiguë modérée (MAM) présentent-ils la même variabilité morphométrique du bras gauche selon le sexe, l'âge ou les critères de diagnostic (indice poids-pour-taille et/ou périmètre brachial) ?

OBJECTIF GENERAL

Comparer la variabilité morphométrique du bras des enfants sénégalais âgés de 6-59 mois souffrant de malnutrition aiguë modérée en milieu rural à Louga et à Matam par la technique de la morphométrie géométrique.

OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

- ❖ Évaluer l'état nutritionnel des enfants par anthropométrie à l'aide des indices z-scores poids-pour-taille, poids-pour-âge, taille-pour-âge, périmètre brachial-pour-âge
- ❖ Étudier les différences de forme du bras gauche des enfants selon le sexe (dimorphisme sexuel), l'âge (ontogénie) ou le critère de diagnostic
- ❖ Étudier la sensibilité et la spécificité de la morphométrie géométrique par rapport aux critères de diagnostic

II. METHODOLOGIE

1. CADRE DE L'ETUDE

L'étude est menée dans les districts sanitaires de Matam, Kanel, Ranérou et Thilogne de la région de Matam et dans les districts de Dahra et Linguère de la région de Louga.

2. TYPE D'ETUDE ET SUJETS

C'est une étude transversale de type descriptif portant sur l'utilisation de la MG pour le diagnostic de la MAM chez des enfants âgés de 6 à 59 mois au niveau communautaire. Les enfants souffrant de MAM sont choisis de façon raisonnée sur la base de l'indice PTZ ($-3 \leq PTZ < -2$ z-scores) (De Onis, 2007) et/ou du PB ($115\text{mm} \leq PB < 125 \text{ mm}$) à partir d'un échantillon cible de 150 enfants MAM prévus dans la phase II du projet SAM Photo-D. L'identification et la sélection des enfants MAM sont effectuées au niveau des villages par les équipes de terrain d'ACF.

2.1. Critères d'inclusion

Sont inclus dans l'étude les enfants :

- ❖ Âgés de 6 à 59 mois
- ❖ Diagnostiqués MAM selon les critères anthropométriques PTZ et/ou PB
- ❖ Dont le parent ou tuteur a signé les consentements libres et éclairés

2.2. Critères de non-inclusion

Ne sont pas inclus dans l'étude les enfants :

- ❖ Souffrant de maladies graves pouvant affecter leur morphologie
- ❖ Hospitalisés
- ❖ Souffrant de la MAS sans complication
- ❖ Présentant des œdèmes (MAS avec complication)

3. APPROBATION ETHIQUE

L'étude a obtenu l'approbation éthique du Comité National d'Éthique pour la Recherche en Santé (CNERS) du Ministère de la Santé et de l'Action Sociale (MSAS) du Sénégal sous le numéro Sen19/02 titré « Améliorer la gestion communautaire de la malnutrition aiguë : Diagnostic par image de la malnutrition aiguë ». La signature de deux consentements libres et éclairés (l'un pour participer à l'étude et l'autre pour la prise des photos qui sont considérées comme des données à caractère personnel) par les parents ou tuteurs

légaux des enfants est requise avant la prise des mesures anthropométriques et des photos. Toutes les mesures permettant de garder l'anonymat des sujets ainsi que la confidentialité des données sont prises. Les photos ne permettent pas d'identifier les enfants étant donné que seules les images des bras sont utilisées pour diagnostiquer la malnutrition avec SAM Photo-D.

Toutes les images prises après transfert sur le serveur ACF, sont supprimées des appareils mobiles une fois le diagnostic établi. Elles sont ensuite éliminées du serveur après analyse des données, seules les coordonnées dérivées des repères enregistrés sont gardées pour la description de la forme du bras gauche. Les données sont traitées de manière confidentielle, des mesures techniques et organisationnelles nécessaires sont mises en place pour assurer la sécurité des données (de haut niveau puisque l'étude contient des renseignements sur la santé personnelle) et éviter leur altération, perte, traitement ou accès non autorisé. Tout est en conformité avec la législation sénégalaise dans ce domaine.

4. SENSIBILISATION

Une réunion d'information a eu lieu à Dakar au niveau du Ministère de la Santé et de l'Action Sociale division de l'Alimentation et la Nutrition (DAN), à Matam et à Louga auprès des Médecins Chef de Région (MCR) qui ont signé à leur tour des lettres de soutien certifiant qu'ils appuient l'étude. Des fiches informatives comportant les objectifs et le déroulement de l'étude ont été remises aux MCR ainsi qu'aux infirmiers chefs de poste (ICP) de chaque district. Des réunions de sensibilisation ont été effectuées au préalable au niveau communautaire avec les relais et les parents ou tuteurs légaux, l'accent a été mis sur les différentes mesures à prendre et les conditions de la prise des photos.

5. ECHANTILLONNAGE

L'échantillon est constitué de 96 enfants MAM âgés de 6-59 mois sélectionnés de façon raisonnée à partir de la base de données du projet SAM photo D qui cible 600 sujets dont 150 MAM. Parmi ces enfants, il y a 32 diagnostiqués selon le PTZ, 32 selon le PB et 32 selon les deux critères (DC). La répartition de cet échantillon selon le sexe et les tranches d'âge (<24 mois ; ≥24 mois) est indiquée dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Plan d'échantillonnage en fonction de l'indicateur de diagnostic de la MAM, de l'âge et du sexe

Âge	Sexe	MAM selon PTZ	MAM selon PB	MAM selon les deux critères (DC)	TOTAL
≥ 24 mois	Filles	8	8	8	24
	Garçons	8	8	8	24
< 24 mois	Filles	8	8	8	24
	Garçons	8	8	8	24
TOTAL		32	32	32	96

6. COLLECTE DES DONNEES

Les données qualitatives et quantitatives sont collectées par un questionnaire électronique, par des mesures anthropométriques et par des photos. La collecte s'est effectuée sur 2 phases qui ont duré respectivement 2 et 3 mois. Elle est faite par 2 équipes constituées chacune d'un superviseur et d'un enquêteur. Pour chaque enfant, les équipes ont mis environ 30 à 45 min pour collecter toutes les données.

6.1. Mesures anthropométriques

Les mesures anthropométriques sont prises pour tous les enfants sélectionnés conformément aux principes éthiques de la déclaration d'Helsinki (AMM, 2013). Elles sont effectuées en double pour plus de précision et les données sont reportées sur des fiches anthropométriques, sur la base de données ODK Collect version 1.25.1 (Jekyll and Mistakes, 2019) et sur l'application SAM Photo-D.

6.1.1. Poids

Le poids en kilogramme (kg) est mesuré avec une balance numérique (SECA modèle Clara 803, GmbH et Co, Hambourg, Allemagne) d'une précision de 100 g et d'une capacité minimale de 10 kg et maximale de 150 kg. La balance, posée sur une surface plane, est calibrée à l'aide d'un poids étalon de 5 kg au préalable. Les enfants de plus de 24 mois portent leurs habits mais débarrassés de tous leurs accessoires. Ils se tiennent debout sur la balance, pieds joints, mains pendantes, menton relevé et tête maintenue suivant le prolongement de leur corps. La méthode de la double pesée avec la mère est utilisée pour les enfants de moins de 24 mois, ceux qui ont un poids inférieur à 10 kg et les enfants non-coopérants (agités).

6.1.2. Taille/Longueur

La taille en cm est mesurée au millimètre (mm) près chez les enfants âgés de plus de 24 mois ou qui ont une taille équivalente ou supérieure à 87 cm. Elle est effectuée par deux personnes, un mesureur et un assistant mesureur grâce à une toise verticale (**Pimolchai Board, Thailand**) d'une précision de 1 mm. Les enfants sont mesurés pieds nus et joints, en regardant droit devant eux, les 5 points de contact (talons, genoux, fesses, épaules et nuque) touchant bien la toise.

Chez les enfants âgés de moins de 24 mois ou ayant une taille inférieure à 87 cm, la longueur en centimètre (cm) est prise à l'aide d'une toise horizontale (**Pimolchai Board, Thailand**) d'une précision de 1 mm. Les mesures sont effectuées par deux personnes, un mesureur et un assistant. L'enfant est mesuré, allongé, pieds nus, genoux ou tibias maintenus afin qu'il ait les jambes droites, les pieds bien à plat sur le curseur, la tête est maintenue doucement et fermement des deux côtés, le regard droit vers le ciel (plan de Frankfurt).

6.1.3. Périmètre brachial

Il est mesuré en millimètre (mm) à l'aide d'un ruban mètre gradué pour enfant (**Rosscraft modèle « Anthrotape »**) d'une précision de 1 mm. Des informations sur la prise de la mesure sont données aux parents ou tuteurs de l'enfant au préalable. La mesure est faite sur le bras gauche de l'enfant à mi-distance entre l'acromion et l'olécrane.

6.2. Calcul des indices anthropométriques

Les enfants sont classés suivant leur état nutritionnel en fonction des seuils définis par l'OMS (**De Onis, 2007**) à l'aide des tables de l'OMS (**WHO, 2006**). Les indices anthropométriques, PTZ, TAZ, PAZ et PBZ z-score sont recalculés à l'aide du logiciel WHO-Anthro[®] version 3.2.2 (<https://www.who.int/childgrowth/fr/>). En effet, il a été démontré que la prévalence de la MAG obtenue avec l'indice PBZ z-score est similaire à celle obtenue avec l'indice PTZ par contre celle basée sur le PB (mm) non rapporté à l'âge était beaucoup plus faible (**Custodio et al., 2018**).

6.3. Collecte des données par questionnaire électronique

Un questionnaire est soumis au parent ou tuteur légal des enfants chez qui les photos seront prises. Le questionnaire permet de collecter les données sociodémographiques du ménage, la parité et la position de l'enfant dans la fratrie et au sein du ménage. Il est réalisé avec un téléphone portable Android (BQ Aquaris M5) à l'aide de l'application ODK Collect version 1.25.1 (**Jekyll et Mistakes, 2019**).

6.4. Collecte des données par photographie

Les photos sont prises avec un téléphone Android (BQ Aquaris M5) ayant l'application SAM Photo-D, son utilisation nécessite un nom d'utilisateur et un mot de passe. Le mode opératoire consiste à sélectionner l'option "nouveau cas", à renseigner les informations concernant l'identification du participant (le pays, la région, le nom du village, le numéro de l'enfant, le genre et la tranche d'âge), à sélectionner le critère de diagnostic (PTZ, PB ou les deux) et l'état nutritionnel de l'enfant (bien portant, à risque, MAM, MAS) sur les listes déroulantes, à prendre la photo et à cliquer sur finaliser puis envoyer. Une fois que l'appareil mobile est connecté à Internet (via Wi-Fi ou données mobiles), les photos codées sont envoyées plus tard sur le serveur d'ACF.

La prise des photos dure entre 2 et 5 min en fonction du comportement de l'enfant (coopérant ou non), elle est effectuée par l'enquêteur celui-ci est assisté par le superviseur. L'agent de santé communautaire ainsi que le parent ou tuteur légal sont impliqués dans les séances de prises de photos afin qu'ils se sentent concernés, ils rassurent également l'enfant afin qu'il ne soit pas agité. Les images sont prises sur une surface plane, dans un endroit suffisamment éclairé. Les enfants, dont le bras gauche est débarrassé de tous les accessoires (bracelets, amulettes), sont allongés en position dorsale, bras bien droit et perpendiculaire au tronc, tête dirigée vers le ciel. Des points de repère de référence anatomiques (RRA) sont indiqués au niveau du téton, de l'aisselle, de l'acromion, de l'olécrane et du poignet avec un crayon de maquillage en couleur, sans effet dermatologique, pour plus de visibilité. Une échelle présentant des carrés noirs et blancs est placée sous le bras gauche. L'appareil portable est ajusté jusqu'à ce que les points ainsi que l'échelle soient visibles, le bras bien positionné est cadré dans la zone démarquée puis la photo est prise (**Figure 1**).



Figure 1 : Prise de photo du bras gauche

7. MORPHOMÉTRIE GEOMETRIQUE

Le diagnostic de la malnutrition aiguë par la technique de la morphométrie géométrique, développée par ACF-Espagne lors de la première phase de l'étude (**Medialdea et al., 2019**), est appliquée sur les images collectées avec l'outil SAM Photo-D. La technique de la MG permet de concevoir un modèle à l'aide des points de RRA de type I (repères anatomiques externes ou squelettiques) et de type II (courbures maximum) afin de représenter la meilleure forme du corps et les parties les plus affectées en cas de malnutrition (extrémités, crâne, visage, etc.). Le principe repose sur l'identification des points de repère anatomiques et des semi-repères, la digitalisation et des images la superposition procrustéenne.

7.1. Identification des repères de référence anatomiques homologues

Les RRA sont définis sur le plan opérationnel comme des coordonnées de position sur un objet, situées de façon fiable et répétées chez tous les individus étudiés (**Rohlf, 1990**), dans un espace de mesure euclidien bidimensionnel qui mesure les distances entre repères (**MacLeod et Rose, 1993**). Les repères anatomiques homologues (RRA) clés du corps sont situés au niveau de l'acromion, le méso-brachial, l'ilion-spinal, le cubitus, le sous-scapulaire, le carpe, le métacarpe et les phalanges chez les enfants (**Medialdea et al., 2019**). Ils sont généralement de trois types :

❖ **Les repères de référence anatomiques de type 1** : juxtapositions discrètes des tissus

Ils correspondent aux points de l'espace où se rencontrent trois structures (os, nerf etc.) tels que les points de ramification des structures arborescentes de positions constantes (main, coude par exemple). Ils peuvent être en deux ou trois dimensions (**Figure 2**).

❖ **Les repères de référence anatomiques de type 2** : maxima des courbures

Ils représentent les points extrêmes des renflements et ceux des invaginations au niveau de l'épaule et des aisselles (**Figure 2**).

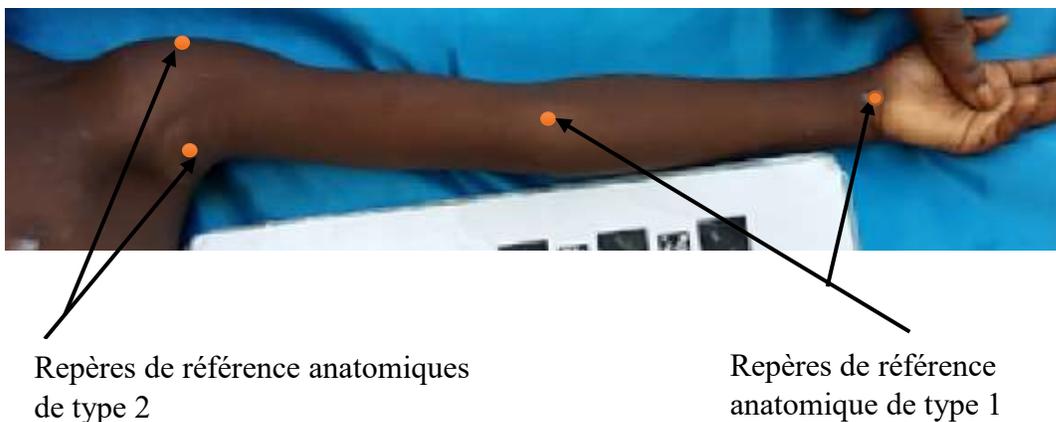


Figure 2 : Représentation des repères de référence anatomiques de type 1 et 2

7.2. Préparation des images

La préparation des images est effectuée avec le logiciel **Gimp 2.10.12** (Wilber, 2019). Elle consiste à s'assurer que :

- ❖ Les images du bras gauche sont dans la bonne position (bras bien droit, sans bracelets ni amulettes)
- ❖ Les RRA sont bien positionnés au bon endroit à défaut ils sont repositionnés
- ❖ Un filtre de teinte et de saturation est utilisé pour minimiser l'effet de l'ombre afin que les contours des bras soient bien identifiés

7.3. Calcul des distances et identification des semi-repères de référence anatomiques

Le calcul se fait à l'aide du logiciel **Gimp 2.10.12** (Wilber, 2019) et permet d'identifier les semi-repères de référence anatomique (semi-RRA) qui sont des repères géométriques situés à égale distance des segments obtenus. La distance entre deux RRA est calculée puis subdivisée en 4 segments égaux. Les extrémités des segments sont marquées par des droites verticales qui coupent de part et d'autre le contour du bras. Ces points de coupures sont les semi-RRA. Au total 16 semi-RRA sont identifiés (**Figure 3**).

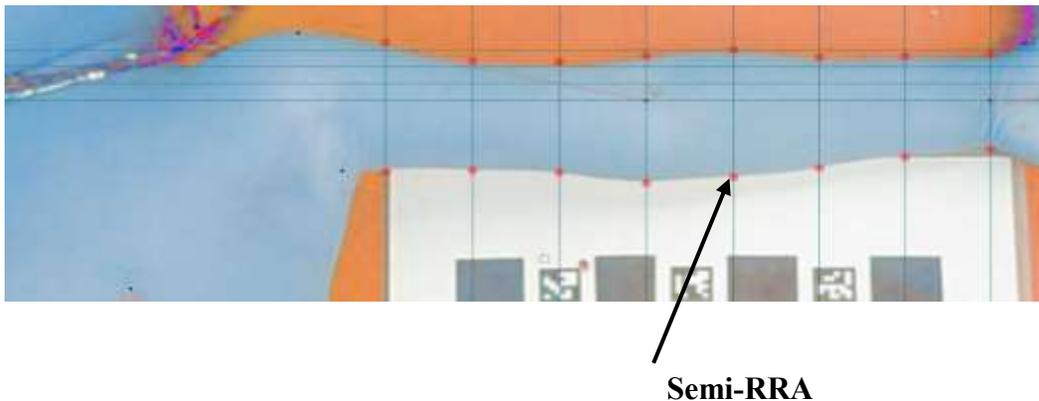


Figure 3 : Représentation graphique du semi-repère de référence anatomique

7.4. Digitalisation des points de repère et leurs coordonnées X et Y

Le logiciel TPSdig2 version 2.31 (Rohfl, 2017) est utilisé pour la digitalisation des points de repère en coordonnées (x et y). Celles-ci constituent les variables de forme pour la description de la morphologie du bras gauche de chaque enfant. La configuration des points de repère de chaque enfant est analysée grâce à la méthode de l'Analyse Généralisée de Procrustes (AGP) en utilisant le logiciel MorphoJ version 1.07a (Klingenberg, 2019). L'AGP est une technique basée sur la superposition des configurations des points de

repère qui représentent le bras gauche de chaque enfant de l'échantillon après rotation, translation et mise à l'échelle de chaque configuration (**Rohlf & Slice, 1990**). Ceci permet de supprimer la composante « taille » de sorte que les analyses qui seront effectuées, soient associées et standardisées à la variable « forme ».

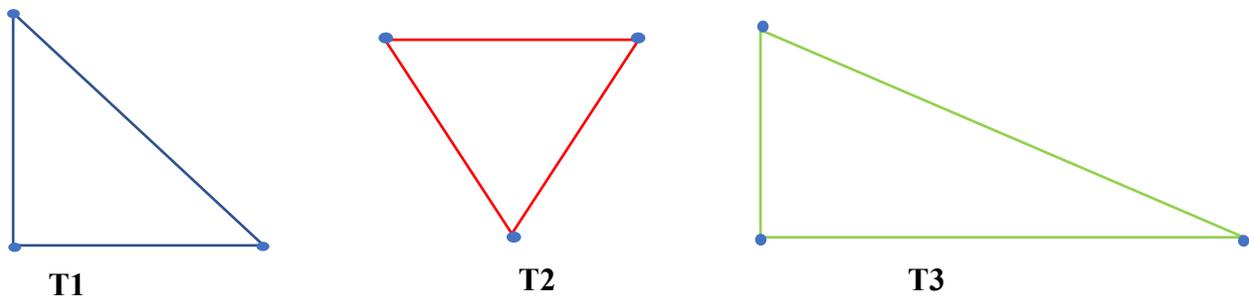
7.5. Normalisation des données

La première étape pour appliquer la morphométrie géométrique passe par la normalisation des données via la superposition procrustéenne qui place tous les bras gauches des enfants dans un même espace morphologique. Celle-ci permet d'enlever l'effet de la taille relative après identification des repères anatomiques homologues (repères de référence anatomique) afin de pouvoir visualiser et quantifier les formes. Elle se fait en trois phases (**Bookstein, 1991**) :

❖ La mise à l'échelle

C'est une mise à l'échelle des différentes formes de configuration. La **Figure 4** représente par exemple, trois triangles (T1 couleur bleu, T2 le rouge et T3 le vert) de forme et de taille différentes.

Figure 4 : Exemple de différentes formes de triangle



Pour chacun de ces triangles, la taille centroïde (centre de gravité) est calculée selon la formule : racine carrée de la somme des carrés des distances entre son centre et chacun de ses points (**Figure5**)

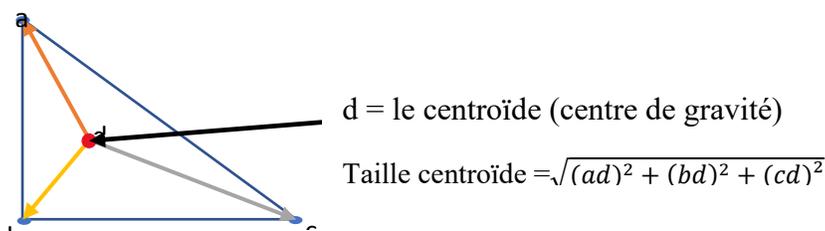


Figure 5 : Exemple de calcul de la taille centroïde de T1

Les tailles centroïdes des 3 triangles sont toutes rapportées à une unité pour qu'elles soient homologues afin d'obtenir des triangles de même taille (**Figure 6**).

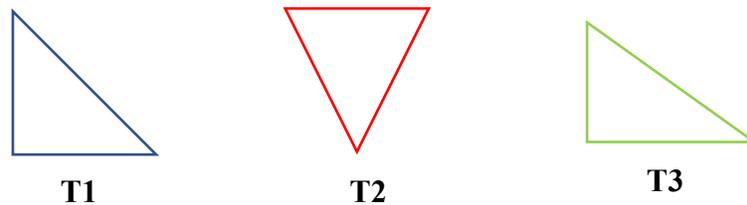


Figure 6 : Mise à l'échelle des triangles

❖ La rotation

Elle se fait suivant l'axe X du repère sur lequel deux points de la forme sont fixés et les autres points sont en rotation (**Figure 7**).

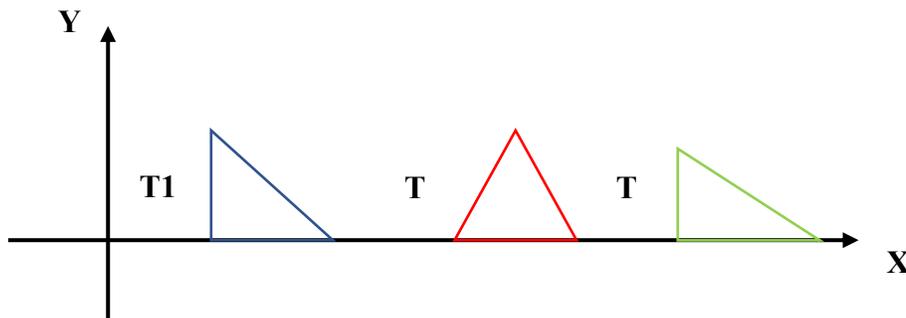


Figure 7 : Triangle en rotation

❖ La translation

C'est la phase de superposition des différentes formes des configurations pour obtenir la représentation géométrique de la forme des configurations afin de la visualiser. Les centroïdes des différentes formes sont superposés de sorte à avoir un seul centroïde, l'origine du repère est déplacée vers ce centroïde (**Figure 8a**). Pour chaque côté, les sommets des différentes formes sont marqués par des points (**Figure 8b**), la déviation moyenne est calculée (somme des repères) puis le point moyen marqué (points de couleur orange) de la **Figure 8c**. L'ensemble des points moyens constituent la représentation géométrique de la forme de consensus représentée en couleur orange (**Figure 8d**).

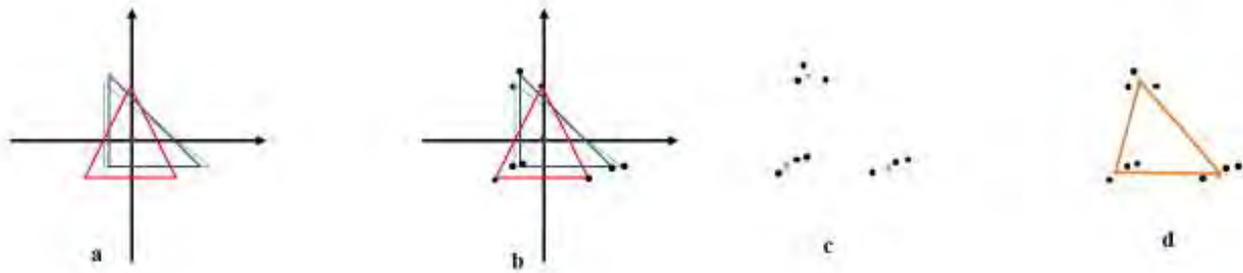


Figure 8 : Les étapes de la translation

L'ensemble des écarts entre les points superposés indique la direction de la variabilité morphométrique de l'ensemble des conformations par rapport à la forme de consensus.

8. TEST INTRA OBSERVATEUR

Le test intra observateur consiste à voir les erreurs faites par la même personne lors de la préparation (identification des repères, digitalisation) des images et celles effectuées par cette même personne lors de la digitalisation des images uniquement. Il permet de minimiser les erreurs de variabilité des RRA. Le test est effectué à partir d'un échantillon de 15 images de bras gauche d'enfants MAM choisis au hasard parmi les 91 images d'enfants à l'aide du logiciel ENA for SMART (<http://www.nutrisurvey.net/ena/ena.html>). Les 15 images choisies sont préparées (pool A) et l'opération est répétée sur les images brutes les 2 semaines suivantes (pools B et C) ; la digitalisation est effectuée sur les images du pool A et celle-ci est répétée 2 fois. Ainsi la taille de l'échantillon final à analyser pour le test est de 45 images préparées et 45 images digitalisées. La durée du test intra observateur est de 3 semaines.

9. ANALYSE STATISTIQUE

La saisie et l'analyse des données sont effectuées avec les logiciels WHO Anthro (<https://www.who.int/childgrowth/fr/>), Excel 2016 (Microsoft Corporation Redmond USA), ODK Collect version 1.25.1 (Jekyll et Mistakes, 2019), ENA for SMART (<http://www.nutrisurvey.net/ena/ena.html>), Gimp 2.10.12 (Wilber, 2019), TpsDig2.32 (Rohfl, 2017), TpsUtil32 version 1.78, MorphoJ version 1.07a (Klingenberg, 2019), PAST version 2.17c (Hammer et al., 2013) et R Studio 1.1.456 (Boston, USA, 2018). Une analyse descriptive est effectuée pour décrire les caractéristiques sociodémographiques des enfants. Les résultats sont exprimés en moyenne \pm écart type, en médiane [percentile 25 ; percentile 75] et en

pourcentage. Les tests de normalité de Shapiro Wilk et d'homoscédasticité de Levene sont effectués pour toutes les variables quantitatives continues. Le test t (t -test) de Student est utilisé pour la comparaison des moyennes des variables dont la distribution est normale l'analyse de variance (ANOVA) associée au test Tukey HDS quand l'hypothèse d'homogénéité des variances est validée. Le test de Kruskal Wallis associé au test Pairwise a permis de comparer les médianes des variables de distribution anormale ou qui n'ont pas une dispersion homogène. Le test de Tukey HDS et le test Pairwise ont permis de faire l'estimation des différences entre les groupes d'enfants diagnostiqués MAM par PTZ, PB ou par les deux critères (PTZ et PB) (deux à deux). Le test du chi carré (χ^2) et le test F de Fisher sont utilisés pour la comparaison des variables catégorielles. L'ANOVA procrustéenne est effectuée pour évaluer les quantités relatives de variation entre les individus en fonction des variables d'intérêts (âges, sexe, critères de diagnostic). Une analyse des composantes principales (ACP) est effectuée pour visualiser les similitudes et les différences de formes selon les variables étudiées. L'ACP est une technique statistique qui consiste à combiner les points de coordonnées (x, y) dépendants afin de réduire le nombre de variables de forme pour rendre l'information plus pertinente.

La régression linéaire multivariée est utilisée pour analyser les variations de forme par tranche d'âge, étudier l'association entre les variables morphométriques et anthropométriques en vue d'identifier les parties du corps essentielles au diagnostic. La corrélation de Pearson est appliquée entre les variables anthropométriques de l'état nutritionnel et les variables de forme en fonction de l'âge. L'analyse des fonctions discriminantes est effectuée pour voir la performance du modèle à 20 RRA à diagnostiquer la MAM par rapport aux critères de diagnostic (PB, PTZ). La valeur de la précision est comparée à la précision minimale qui est de 75% (Kemkes et Göbel 2006). Cette précision minimale est obtenue à partir de la probabilité à avoir des enfants MAM par PB ou par PTZ qui est de 50% car c'est un modèle à deux choix. Associée à la probabilité du hasard qui est de 25 %. Cette analyse permet de tester la sensibilité et la spécificité de la MG par rapport à chaque critère de diagnostic (PTZ et PB). La sensibilité de la MG par rapport au PB est définie comme le pourcentage d'enfants MAM par PB classés comme tel par la MG par rapport au PB et la spécificité de la MG par rapport au PB, le pourcentage d'enfants non MAM par PB classés comme tel par la MG par rapport au PB. La sensibilité de la MG par rapport au PTZ est définie comme le pourcentage d'enfants MAM par PTZ classés comme tel par la MG par rapport au PTZ et la spécificité du PTZ, le pourcentage d'enfants non MAM par PTZ classés comme tel par la MG par rapport au PTZ. Pour toutes ces analyses statistiques, un seuil de signification de 5% est retenu.