

# Comment déterminer les zones d'intérêt visuelles sans *a priori* ? Analyse des fixations d'enfants autistes en oculométrie

## *How to determine visual areas of interest without any preconceptions? Eye-tracking fixation analysis in the field of autism*

Federica Cilia<sup>1</sup>, Alexandre Aubry<sup>1,2</sup>,  
Béatrice Bourdin<sup>1</sup>, Luc Vandromme<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche en Psychologie : Cognition, Psychisme et Organisations, (CRP-CPO, EA7273), Université de Picardie Jules-Verne, chemin du Thil, 80000 Amiens, France <federica.cilia@u-picardie.fr>

<sup>2</sup> Établissement du supérieur du professorat et de l'éducation d'Amiens

<sup>3</sup> Chirurgie et Extrémité céphalique, Caractérisation morphologique et fonctionnelle (Chimere, EA 7516), Université de Picardie Jules-Verne, chemin du Thil, 80000 Amiens, France

Pour citer cet article : Cilia F, Aubry A, Bourdin B, Vandromme L. Comment déterminer les zones d'intérêt visuelles sans *a priori*? Analyse des fixations d'enfants autistes en oculométrie. *Rev Neuropsychol* 2019 ; 11 (2) : 144-50 doi:10.1684/nrp.2019.0487

### Résumé

Les études en psychologie qui utilisent l'oculométrie ont permis d'apporter de nombreuses connaissances sur l'exploration visuelle des enfants présentant un trouble du spectre de l'autisme (TSA). L'oculométrie, largement utilisée dans l'étude du suivi du regard, permet d'analyser l'attention visuelle portée vers une cible (aussi appelée référent), ce qui en fait un outil particulièrement adapté pour l'étude de l'attention conjointe. Classiquement, les chercheurs analysent les fixations visuelles sur des aires d'intérêts prédéterminées, appelées AOI (*areas of interest*). Les résultats, issus de la plupart des études, proviennent donc d'un raisonnement de type *top-down*. Or, les données analysées uniquement sur les AOI *a priori* dépendent des hypothèses du chercheur et des particularités des enfants TSA. Il est donc intéressant d'analyser l'exploration visuelle en se basant sur l'ensemble des données de fixation. Dans cet article, nous montrons qu'une méthodologie *bottom-up* d'analyse de données, le *mean-shift clustering*, permet de révéler des effets habituellement indétectables avec les méthodes d'analyses classiques. En fonction de la densité des points de fixations, nous créons des AOI *a posteriori*, sur la base de l'agrégation des données réelles des participants. En comparant les données des deux méthodes, on observe que les enfants regardent moins le référent de l'attention conjointe avec une analyse des données *a priori*, comparativement à une méthode *a posteriori*. Ces résultats soulignent que les conclusions obtenues en utilisant un oculomètre doivent être interprétées avec précaution, car elles sont extrêmement dépendantes de la méthode utilisée pour analyser les données.

**Mots clés :** *eye-tracking* • autisme • oculométrie • *bottom-up* • attention conjointe

### Abstract

*Eye-tracking studies in psychology have provided much knowledge on the visual exploration of children with autism spectrum disorder (ASD), in particular for studying joint attention and gaze following. Authors studied fixation data from a "top-down" method i.e., from predetermined areas of interest (AOI). In this article, we suggest a "bottom-up" data analysis methodology: the "mean-shift clustering". Depending on the density of fixations, we create a posteriori AOI, based on the aggregation of the actual data of participants. The comparison between a priori and a posteriori methods shows that children with ASD look less at the target using a priori data than using a posteriori data. Assumptions made according to a priori AOI would therefore lead to different conclusions, compared to real data. Consequently, it seems essential in the study of visual exploration to take into account the real fixations determining areas of interest in relation to images.*

**Correspondance :**

F. Cilia

**Key words:** *eye-tracking* • autism • *bottom-up* • joint attention

L'oculométrie est un procédé non invasif qui permet de mesurer les mouvements oculaires et les points de fixation du regard. De plus en plus de recherches en psychologie utilisent l'oculométrie afin d'étudier l'exploration visuelle sur une surface plane, tel un écran d'ordinateur [1].

## ■ Comment fonctionne l'oculomètre ?

L'oculomètre se base sur l'étude du reflet cornéen, en envoyant une lumière infrarouge vers l'œil [2, 3]. L'appareil composé d'une caméra infrarouge, ou d'un détecteur optique, repère les bords de la pupille grâce au contraste avec l'iris, puis calcule la position du centre de la pupille. L'appareil indique la position de l'œil en se basant sur la position relative du reflet cornéen et de la pupille. Une phase de calibrage est nécessaire afin de lier, d'une part, le reflet de l'œil repéré sur un espace en  $x/y/z$  et, d'autre part, la position en  $x/y$  d'un point de calibrage sur l'écran [4]. L'oculomètre permet d'enregistrer la position du regard et les temps de fixation, afin d'obtenir les déplacements du regard sur un plan euclidien lors de la présentation d'un stimulus sur un écran. Les données prises habituellement en compte dans la littérature sont les fixations et les saccades. Une saccade oculaire est un mouvement bref et rapide des yeux entre deux positions stables. L'œil humain exécute généralement trois à quatre saccades chaque seconde [5]. Durant les fixations, l'œil reste relativement immobile pendant 300 ou 400 ms [5] et le système visuel va extraire des informations détaillées autour du point de fixation avec moins de  $1^\circ$  d'oscillation visuelle. En réalité, l'œil n'est jamais immobile très longtemps puisqu'il effectue des microsaccades (d'une amplitude inférieure à  $1^\circ$ ), mais les systèmes d'oculométrie ne permettent pas toujours de les mesurer. La plupart des algorithmes définissent les données des trois fixations en soustrayant les mesures des saccades entre différents points de mesures. Ces algorithmes simples sont basés sur l'utilisation de seuils de vitesse de déplacement de l'œil et de distance minimale entre deux positions spatiales, permettant ainsi d'isoler les périodes de fixation et de déterminer les durées de fixation [6].

## ■ L'analyse des données d'oculométrie

Dans les études oculométriques, le mouvement du regard (*scan-path*) est étudié en fonction d'aires d'intérêt (*areas of interest* [AOI]). Les AOI correspondent à des zones de l'écran bien définies par le chercheur, dans lesquelles les données seront extraites. Or, on constate une grande diversité dans les méthodologies permettant de définir les AOI [7], ce qui pourrait impacter la manière dont on définit une exploration visuelle typique [8]. Cet article a pour objectif d'apporter une réflexion méthodologique en présentant deux approches d'analyse de données : *top-down* et *bottom-up*.

Dans une approche *top-down*, certains chercheurs définissent *a priori* ces AOI pour analyser l'exploration visuelle (figure 2). Autrement dit, les données à partir desquelles les chercheurs éprouvent leurs hypothèses sont limitées aux fixations et aux saccades obtenues dans ces AOI dont la taille et la disposition sont déterminées *a priori* par le chercheur. Par exemple, le chercheur peut définir les zones des yeux et de la bouche afin d'étudier l'attention portée sur ces AOI prédéfinies par des individus ayant ou non un trouble du spectre autistique (TSA) [9]. Cette approche *top-down* de la définition des AOI peut limiter la portée de l'interprétation et la reproductibilité des résultats. En effet, le chercheur se focalise sur ses hypothèses *a priori* et ne tient pas compte de l'exploration « réelle » du participant, c'est-à-dire de l'exploration complète ou totale sur une zone de l'écran pendant une durée déterminée.

Partant de ce constat, certains auteurs ont créé de nouvelles techniques qui permettent d'analyser les résultats en utilisant une approche *bottom-up*. Par exemple, Heaton et Freeth [10] ont développé un algorithme permettant d'adapter la taille des AOI en fonction de la localisation des fixations réalisées par les enfants. Ils ont pour cela eu recours à une technique particulière d'analyse des données : la *convex hull* ou coque convexe. Cette dernière permet d'adapter la taille des AOI en fonction des fixations réelles pour créer un champ attentionnel exploré sur différentes images. Ils ont mis en évidence que, lors d'une exploration libre d'une scène sociale complexe, les mouvements oculaires d'adolescents TSA étaient différents de ceux de leurs pairs. Les mesures développées par les auteurs étaient les suivantes : la propagation ou diffusion des fixations, l'évolution de la longueur totale du chemin de balayage visuel, le taux de fixation, la persistance visuelle (c'est-à-dire la tendance à fixer une zone très spécifique sans déplacer son regard, et cela pendant un temps déterminé) et le retour vers des zones précédemment fixées. Leurs résultats montrent une « persistance de fixation », c'est-à-dire une tendance à explorer des zones proches de la première fixation. Cet exemple montre la possibilité de traiter les données quantitatives (c'est-à-dire la localisation des fixations et des saccades) afin de créer des AOI *a posteriori*.

Il est également possible de créer des AOI *a posteriori* en partant des logiciels constructeurs. La plupart du temps, les fixations sont représentées sous forme de points et les saccades correspondent aux traits qui lient deux points. Il existe également des représentations des données sous forme de cartes de chaleur (*heat-map*). Elles mettent en évidence les zones de l'image les plus regardées par les participants par un dégradé de couleurs, soit à un instant  $t$ , soit sur la durée totale de présentation du stimulus. À partir de ces représentations, le chercheur peut repérer visuellement les zones regardées préférentiellement par leur groupe d'étude, et ainsi créer les AOI suite à cette observation. Cette méthode est peu utilisée dans les études portant sur l'autisme. Pourtant, il semble intéressant d'utiliser l'ensemble des fixations pour définir les zones

préférentiellement regardées sur un stimulus donné. D'autres techniques ont été développées et peuvent être couplées pour déterminer les AOI : le *mean-shift clustering* [11-14] et la méthode du Voronoi-Tesselation [15]. Le principal avantage de coupler ces méthodes est qu'elles sont dépendantes de la nature de la distribution des fixations. De plus, contrairement à la création d'AOI par le chercheur, qui peut être parfois laborieuse et chronophage, ces méthodes peuvent être automatisées grâce à un algorithme.

### ■ Création d'AOI *a posteriori* par les méthodes du *mean-shift clustering* et du Voronoi-Tesselation

Le présent article analyse l'exploration visuelle à partir d'AOI créée *a posteriori* grâce à la méthode du Voronoi-Tesselation [15] qui s'appuie sur les densités de fixations estimées par le *mean-shift clustering* [6]. L'originalité de cet article réside dans l'utilisation conjointe de ces méthodes permettant une création d'AOI *a posteriori* quasi systématique en utilisant le logiciel libre R [16].

Dans un premier temps, les données brutes de l'oculomètre ont été analysées à partir de la librairie *Gaze-path* [17], permettant ainsi de classer les fixations, et les saccades grâce à l'algorithme de Mould *et al.* [18]. L'avantage de cet algorithme est d'adapter les différents seuils de détection en fonction de la qualité des données brutes. Plus les données sont de faible qualité, plus les seuils utilisés sont conservateurs [17]. Cette méthode est donc plus efficace que les logiciels constructeurs qui ont été développés à partir des données d'adultes et sont peu adaptés pour les enfants au développement typique et atypique [17]. Dans un deuxième temps, l'algorithme *mean-shift* nous permet d'identifier les différentes densités de fixations de tous les participants. Ainsi, nous obtenons les coordonnées de chaque densité des fixations visuelles des participants sur un plan euclidien. Autrement dit, la méthode du *mean-shift clustering* consiste à trouver le barycentre de la densité des données en créant un vecteur pour chaque point qui va contribuer à la moyenne locale. Chaque barycentre va permettre d'identifier le noyau de densité de la distribution. Enfin, l'algorithme est en mesure d'établir des regroupements de points de fixations (c'est-à-dire des *clusters*) en fonction du degré de convergence des coordonnées en position *x* et *y* de chaque point de fixation par rapport au barycentre de la densité. Dans un troisième temps, la méthode du Voronoi-Tesselation [15] a permis de créer des AOI suffisamment larges, afin d'être le moins sensible aux erreurs type de l'oculomètre [7]. La méthode du Voronoi-Tesselation, basée sur les diagrammes de Voronoï (voir [15] pour les détails), permet de créer des zones d'intérêts visuels correspondant à des cellules définies autour des différents barycentres des densités de fixations des participants identifiées par le *mean-shift clustering*. Cette approche *bottom-up* a l'avantage d'utiliser la totalité de la distribu-

tion des fixations visuelles des participants et de définir les coordonnées des différents centres de densité de fixations. L'expérimentateur n'intervient donc pas sur la taille et la localisation des zones d'intérêts visuels. Toutefois, l'automatisation de cette approche n'est pas totale. Les différentes AOI doivent être nommées par les expérimentateurs selon la localisation des différentes cellules ainsi générées sur l'image (*figure 2*). Suite à l'application de ces méthodes, les AOI définies *a posteriori* semblent correspondre à différentes parties du stimulus ayant attiré l'attention visuelle du participant.

### ■ Validité de l'application des méthodes du *mean-shift clustering* et du Voronoi-Tesselation

Pour illustrer l'intérêt de cette méthode, nous avons extrait les données d'oculométrie durant l'observation d'une photo appartenant à un protocole plus large portant sur l'attention conjointe. La photo a été présentée pendant 2900 ms. Elle nécessite un suivi du regard faisant appel à l'attention conjointe, c'est-à-dire la capacité de coordonner son attention avec celle du partenaire d'interaction pour partager une expérience commune autour d'un objet ou d'un événement [19].

Dans notre étude, les données d'exploration visuelle concernent 83 enfants, dont 28 enfants avec TSA, 25 enfants au développement typique appariés en âge de développement communicatif calculé à l'aide de l'Échelle d'évaluation de la communication sociale précoce (ECSP) [20] et 30 enfants au développement typique appariés en âge chronologique (*tableau 1*). Nous avons extrait les données de manière classique avec des AOI *a priori*. De plus, nous avons appliqué la méthode du *mean-shift clustering* et celle du Voronoi-Tesselation pour extraire les données avec des AOI *a posteriori*. Sur la *figure 1*, nous présentons, pour les trois groupes, les AOI, déterminées *a priori*. Ainsi, nous avons choisi le visage, en séparant les yeux et la bouche, ainsi que le référent de l'attention conjointe (c'est-à-dire le poster du chien de l'ECSP). Sur la *figure 2*, nous présentons les AOI définis *a posteriori* : l'AOI du visage et celui du référent. De plus, nous avons analysé les données issues de l'arrière-plan de l'image avec les deux méthodes. Enfin, sur la *figure 3*, nous présentons les données de fixation et les regroupements d'AOI créées *a posteriori* et nommés par le chercheur.

Après ce travail de création d'AOI *a posteriori*, nous avons choisi de nous intéresser à deux variables dépendantes classiquement retrouvées dans la littérature [21, 22] :

- la variable nombre de fixations relatives (NfR), c'est-à-dire le nombre de fixations sur une AOI en fonction du nombre de fixations totales de chaque enfant sur l'écran ;
- la variable temps de fixation relatif (TfR), qui prend en compte la durée de ces fixations en fonction de la durée

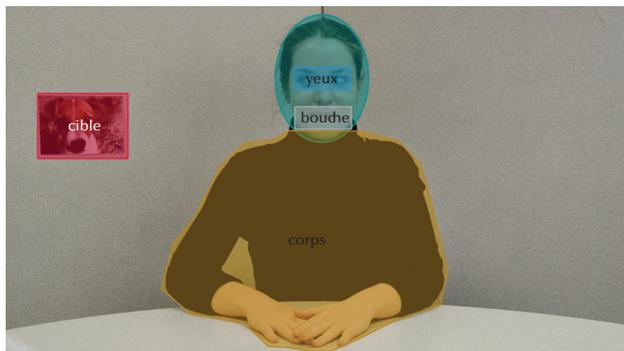
**Tableau 1.** Caractéristiques des populations.

	TSA (n = 28)		TD (n = 25)		TC (n = 30)	
	M	É-T	M	É-T	M	É-T
Âge chronologique <sup>a</sup>	7 ; 7	2 ; 7	2 ; 2	0 ; 7	8 ; 2	2 ; 11
Âge développemental à l'ECSP <sup>b</sup>	24 ; 10	7 ; 8	23 ; 15	6 ; 7	-	-
Score total ECSP	139,95	50,8	139,18	49,5	-	-
Score CARS	32,8	6,5	-	-	-	-

TSA : troubles du spectre autistique ; TD : enfants typiques appariés selon l'âge de développement ; TC : enfants typiques appariés selon l'âge chronologique ; ECSP : Échelle d'évaluation de la communication sociale précoce ; CARS : *Childhood Autism Rating Scale* (échelle d'évaluation de l'autisme infantile).

<sup>a</sup> L'âge chronologique est présenté en années ; mois.

<sup>b</sup> L'âge de développement est présenté en mois ; jours.

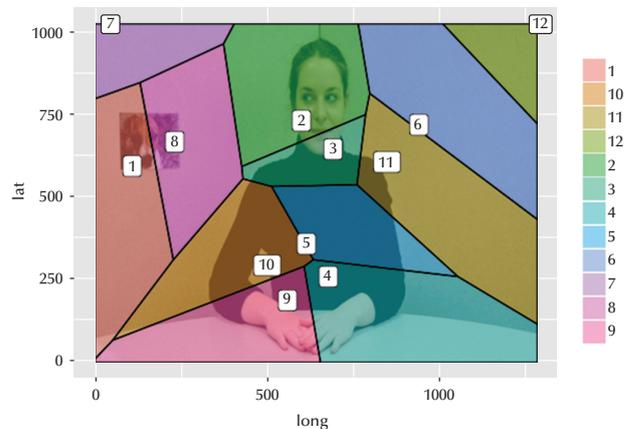


**Figure 1.** AOI (areas of interest) a priori créées à partir du logiciel BeGaze (aire des AOI en pixels : visage : 59 242 px ; yeux : 5 336 px ; bouche : 5 336 px ; corps : 196 545 px ; cible : 24 605 px ; arrière-plan : 105 2186 px).

totale des fixations de chaque enfant sur l'écran. Le TfR correspond donc au temps passé à fixer une zone par rapport au temps total passé sur l'écran.

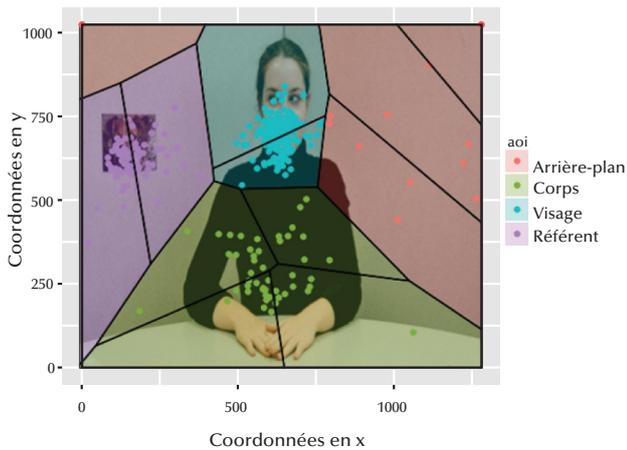
Nous avons mené une comparaison de moyenne avec un *t*-test entre le groupe TSA et chaque groupe témoin avec une correction de Bonferroni. Dans la condition a priori, les enfants TSA regardent moins, et moins longtemps, le visage que les TC (NfR :  $t(213) = 4,962$  ;  $p < 0,001$  ; TfR :  $t(213) = 4,917$  ;  $p < 0,001$ ) et les TD (NfR :  $t(341) = 5,385$  ;  $p < 0,001$  ; TfR :  $t(341) = 5,872$  ;  $p < 0,001$ ). Il n'y a aucune différence significative entre les groupes dans la condition a posteriori.

De plus, nous avons mené une comparaison de moyenne en intragroupe, entre les données issues de la méthode a priori et de la méthode a posteriori. Pour le visage, les NfR et les TfR sont supérieurs lors de la création a posteriori comparativement à la condition des AOI créés a priori pour les enfants TSA

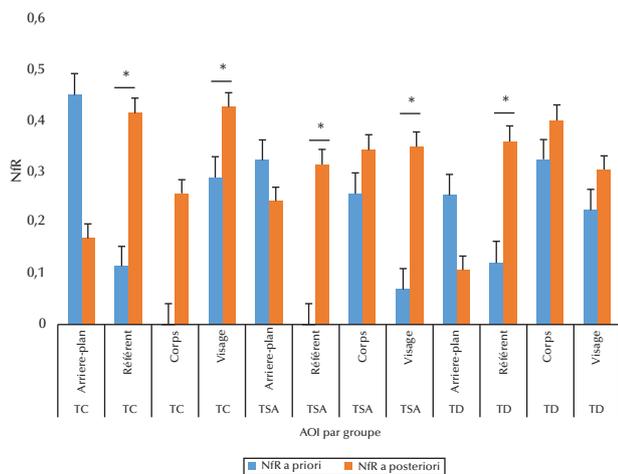


**Figure 2.** Représentation des AOI (areas of interest) créées a posteriori sur un stimulus, avant que le chercheur nomme les zones des polygones : 1 = 482 819 px ; 2 = 521 389 px ; 3 = 170 914 px ; 4 = 617 842 px ; 5 = 296 540 px ; 6 = 591 759 px ; 8 = 449 280 px ; 9 = 407 581 px ; 10 = 413 072 px ; 11 = 635 164 px ; 12 = 155 911 px). Note : au regard des zones 2 et 3 sur le haut et le bas du visage, nous avons fait le choix de ne pas séparer les données des yeux et de la bouche et de créer une AOI visage à partir de ces deux zones.

(NfR :  $t(110) = 0,809$  ;  $p < 0,001$  ; TfR :  $t(110) = 9,443$  ;  $p < 0,001$ ), TC (NfR :  $t(110) = 4,800$  ;  $p < 0,001$  ; TfR :  $t(110) = 6,477$  ;  $p < 0,001$ ) et TD (NfR :  $t(171) = 8,809$  ;  $p < 0,001$  ; TfR :  $t(171) = 9,821$  ;  $p < 0,001$ ). De plus, les NfR et les TfR de l'AOI référent sont inférieurs avec la méthode a priori par rapport à la méthode a posteriori, pour les TSA (NfR :  $t(110) = 3,895$  ;  $p = 0,003$  ; TfR :  $t(110) = 9,33$  ;  $p < 0,001$ ), les TC (NfR :  $t(110) = 4,396$  ;  $p = 0,005$  ; TfR :  $t(110) = 2,55$  ;  $p = 0,021$ ) et les TD (NfR :  $t(171) = 4,316$  ;  $p = 0,007$  ; TfR :  $t(171) = 2,97$  ;  $p = 0,009$ ). Les résultats des comparaisons intragroupe sont représentés sur les figures 4 et 5.



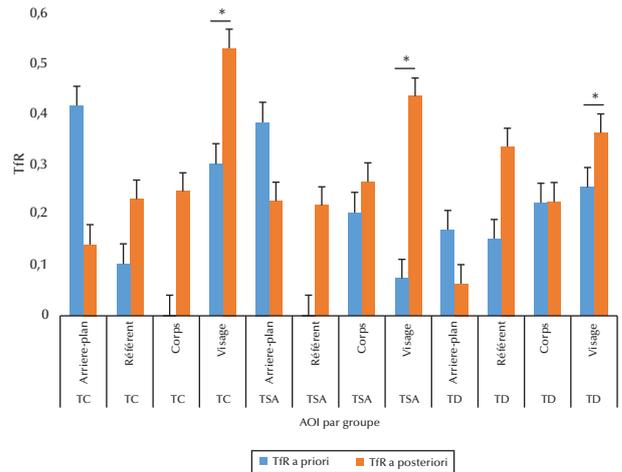
**Figure 3.** Représentation des données de fixation et des regroupements d'AOI (areas of interest) créées *a posteriori* sur un stimulus, après que le chercheur nomme les zones.



**Figure 4.** Moyenne des nombres de fixations relatives (NfR) par groupe et par AOI (areas of interest). Note. \* $p < 0,05$ .

## Discussion

L'oculométrie est de plus en plus utilisée dans l'étude de l'exploration visuelle des enfants présentant un TSA. Le caractère non invasif de cette méthode ainsi que l'élaboration d'expériences ne nécessitant pas la compréhension de consignes ont permis d'étudier des composantes de la cognition sociale, comme l'attention conjointe. Classiquement, pour étudier les fixations visuelles à partir d'un oculomètre, les auteurs utilisent une méthode *top-down* impliquant l'analyse des données sur des zones d'intérêt prédéterminées par le chercheur : les AOI *a priori*. Dans



**Figure 5.** Moyenne des temps de fixation relatif (TfR) par groupe et par AOI (areas of interest). Note. \* $p < 0,05$ .

la lignée de nouvelles recherches sur l'oculométrie, nous avons présenté une approche *bottom-up* alternative. Par la méthode du *mean-shift clustering* [6] combinée à celle de Voronoi-Tessellation [15], nous avons analysé les données issues des oculomètres en créant des AOI *a posteriori*. Afin de démontrer l'intérêt de cette méthode, nous avons comparé les résultats en créant des AOI *a posteriori* et *a priori*. Notre méthode basée sur la création d'AOI *a posteriori* ne nous a pas permis de séparer les données des fixations visuelles des enfants sur les yeux par rapport à la bouche de l'actrice comme cela a été fait sur de nombreuses études utilisant des AOI *a priori* [9, 23, 24]. Nous ne pouvons donc pas conclure à une aversion pour les yeux chez les enfants TSA comme l'ont rapporté de nombreux auteurs en utilisant des paradigmes expérimentaux différents [25-27]. En revanche, nos résultats sur les fixations du visage confirment les conclusions classiquement retrouvées dans la littérature à partir des AOI *a priori*. Les fixations sur le visage sont plus importantes chez les enfants au développement typique comparativement aux TSA [28-30]. Ce manque d'attrait pour le visage observé chez les enfants TSA montre un certain désintérêt pour un stimulus à dimension sociale [9]. En revanche, lorsque les AOI sont créés *a posteriori*, il n'y a pas de différence dans le nombre et la durée de fixations du visage entre les groupes d'enfants. Par ailleurs, les enfants TSA, ainsi que les enfants typiques appariés en âge de développement communicatif et en âge chronologique, fixent davantage et plus longtemps le visage et le référent de l'attention conjointe si les AOI sont créées *a posteriori*. En utilisant la méthode classique, les conclusions sur les fixations du visage et du référent pourraient donc être erronées, car elles prendraient en compte moins de fixations sur cette AOI prédéterminée. En effet, les AOI définies *a priori* ne permettent pas de transposer finement la position des fixations sur l'écran par rapport à l'image [7]. D'une

part, cela peut être dû au calibrage de l'œil qui n'est pas toujours exact, surtout chez des enfants pouvant présenter une certaine agitation motrice ou des populations atypiques comme les TSA [4]. D'autre part, cela peut être lié à l'écart inévitable entre l'emplacement réel du regard d'une personne et l'emplacement enregistré [7, 31]. De nouvelles recherches devront être conduites afin de mieux comprendre ces premiers résultats (ou afin de trancher entre ces deux explications hypothétiques).

Pour aider d'autres chercheurs à répondre à ces problématiques, sur demande, les auteurs partageront le script R de création d'AOI *a posteriori*.

## Conclusion

Par cette étude, nous montrons l'intérêt de l'utilisation des AOI *a posteriori* en apportant des données expérimentales sur l'exploration visuelle d'enfants TSA face à des stimuli qui impliquent un suivi du regard. Ainsi, en analysant les fixations sur les AOI *a priori*, nous montrons que

les enfants TSA regardent davantage la cible attentionnelle et l'arrière-plan. Cette caractéristique n'apparaît pas si on se contente de créer des AOI *a posteriori*. Les hypothèses formulées en fonction des AOI *a priori* conduisent donc à des conclusions différentes, comparativement aux données obtenues en créant des AOI *a posteriori*. Dans les études en oculométrie, il semble donc indispensable de prendre en compte l'exploration complète ou totale sur une zone de l'écran à un moment donné afin de déterminer des zones d'intérêt sur l'image. Enfin, si l'on souhaite pouvoir comparer ou reproduire les résultats obtenus dans d'autres recherches, il semble essentiel de préciser le choix méthodologique du chercheur dans la création des AOI en privilégiant des algorithmes qui permettent une création automatique et limitent les choix subjectifs des chercheurs [7]. ■

## Liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt en rapport avec cet article.

## Références

1. Rebillard C, Guillery-Girard B, Lebreton K. Perception et oculométrie : nouveau regard sur les troubles du spectre de l'autisme. *Rev Neuropsychol* 2017 ; 9 : 45-52.
2. Holmqvist K, Nyström M, Andersson R, et al. *Eye Tracking : A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford : Oxford University Press, 2011.
3. Duchowski AT. *Eye Tracking Methodology : Theory and Practice*. Oxford : British Library Cataloguing in Publication Data, 2014.
4. Nyström M, Andersson R, Holmqvist K, van de Weijer J. The influence of calibration method and eye physiology on eyetracking data quality. *Behav Res Methods* 2013 ; 45 : 272-88.
5. Karatekin C. Eye tracking studies of normative and atypical development. *Dev Rev* 2007 ; 27 : 283-348.
6. Santella A, DeCarlo D. Robust clustering of eye movement recordings for quantification of visual interest. ETRA'04 : *Proc Eye Track Res Appl Symp Eye Track Res Appl*. ACM Press, 2004.
7. Hessels RS, Kemner C, van den Boomen C, Hooge ITC. The area-of-interest problem in eyetracking research : A noise-robust solution for face and sparse stimuli. *Behav Res Methods* 2016 ; 48 : 1694-712.
8. Wang Q, Campbell DJ, Macari SL, Chawarska K, Shic F. Operationalizing atypical gaze in toddlers with autism spectrum disorders : a cohesion-based approach. *Mol Autism* 2018 ; 9 : 1-9.
9. Shic F, Macari S, Chawarska K. Speech disturbs face scanning in 6-month-old infants who develop autism spectrum disorder. *Biol Psychiatry* 2014 ; 75 : 231-7.
10. Heaton TJ, Freeth M. Reduced visual exploration when viewing photographic scenes in individuals with autism spectrum disorder. *J Abnorm Psychol* 2016 ; 125 : 399-411.
11. Drusch G, Bastien JMC. Analyzing visual scanpaths on the Web using the mean shift procedure and T-pattern detection. In : *Proceedings of the 2012 Conference on Ergonomie et Interaction homme-machine - Ergo/IHM '12* [Internet]. New York, USA : ACM Press : 2012. p. 181-4.
12. Duchowski AT, Driver J, Jolaoso S, et al. Scanpath Comparison Revisited. *Proc Symp Eye-Tracking Res Appl* 2010 ; 1 : 219-26.
13. Krejtz K, Duchowski AT, Kopacz A. Gaze Transitions when Learning with Multimedia. *J Eye Mov Res* 2013 ; 9 : 1-17.
14. Privitera CM, Stark LW. Algorithms for Defining Visual Regions-of-Interest : Comparisons with Eye Fixations. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 2000 ; 22 : 970-82.
15. Over EAB, Hooge ITC, Erkelens CJ. A quantitative measure for the uniformity of fixation density : The Voronoi method. *Behav Res Methods* 2006 ; 38 : 251-61.
16. R Development Core Team. *R : A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing, 2018.
17. van Renswoude DR, Raijmakers MEJ, Koornneef A, et al. GazePath : An eye-tracking analysis tool that accounts for individual differences and data quality. *Behav Res Methods* 2018 ; 50 : 834-52.
18. Mould MS, Foster DH, Amano K, Oakley JP. A simple nonparametric method for classifying eye fixations. *Vision Res* 2012 ; 57 : 18-25.
19. Mundy P, Sullivan L, Mastergeorge AM. A parallel and distributed-processing model of joint attention, social cognition and autism. *Autism Res* 2009 ; 2 : 2-21.
20. Guidetti M, Tourrette C. *Évaluation de la communication sociale précoce (ECSP)*. Paris : Eurotests éditions, 2009.
21. Cilia F, Garry C, Brisson J, Vandromme L. Attention conjointe et exploration visuelle des enfants au développement typique et avec TSA : synthèse des études en oculométrie. *Neuropsychiatr Enfance Adolesc* 2018 ; 66 : 304-14.
22. Guillon Q, Hadjikhani N, Baduel S, Rogé B. Visual social attention in autism spectrum disorder : Insights from eye tracking studies. *Neurosci Biobehav Rev* 2014 ; 42 : 279-97.
23. Chawarska K, Macari S, Shic F. Decreased spontaneous attention to social scenes in 6-month-old infants later diagnosed with autism spectrum disorders. *Biol Psychiatry* 2013 ; 74 : 195-203.
24. Jones W, Carr K, Klin A. Absence of preferential looking to the eyes of approaching adults predicts level of social disability in 2-year-old toddlers with autism spectrum disorder. *Arch Gen Psychiatry* 2008 ; 65 : 946-54.
25. Jones W, Klin A. Attention to eyes is present but in decline in 2-6-month-old infants later diagnosed with autism. *Nature* 2013 ; 504 : 427-31.
26. Kliemann D, Dziobek I, Hatri A, Steimke R, Heekeren HR. Atypical Reflexive Gaze Patterns on Emotional Faces in Autism Spectrum Disorders. *J Neurosci* 2010 ; 30 : 12281-7.
27. Wallace S, Coutanche MN, Leppa JM, Cusack J, Bailey AJ, Hietanen JK. Affective - motivational brain responses to direct gaze in children with autism spectrum disorder. *J Child Psychol Psychiatry* 2012 ; 7 : 790-7.

28. Chawarska K, Macari S, Shic F. Context modulates attention to social scenes in toddlers with autism. *J Child Psychol Psychiatry* 2012;8:903-13.
29. Franchini M, Glaser B, Gentaz E, Wood H, Eliez S, Schaer M. The effect of emotional intensity on responses to joint attention in preschoolers with an autism spectrum disorder. *Res Autism Spectr Disord* 2017;35:13-24.
30. Vivanti G, Fanning PAJ, Hocking DR, Sievers S, Dissanayake C. Social Attention, Joint Attention and Sustained Attention in Autism Spectrum Disorder and Williams Syndrome: Convergences and Divergences. *J Autism Dev Disord* 2017;47:1866-77.
31. Zhang Y, Hornof AJ. Mode-of-disparities error correction of eye-tracking data. *Behav Res Methods* 2011;43:834-42.