

L'étrange monde du synesthète

E.M. Hubbard, Inserm U562, service hospitalier
Frédéric-Joliot, Orsay

SCIENCES COGNITIVES

2 est-il rouge ou bleu, plus loin dans l'espace que 8 ou à gauche de 5 ? La plupart des gens trouveront ces questions absurdes, mais certains répondront « Pour moi, 2 n'est pas rouge mais plutôt orangé ». Ces personnes ne sont pas folles mais synesthètes, c'est-à-dire que chez elles une perception active simultanément différentes représentations. La synesthésie, longtemps considérée comme une curiosité, intéresse désormais les neurologues comme une clé pour comprendre le développement. Si nombres et espace sont associés, ou sons et couleurs, c'est qu'il existe des connexions entre les régions cérébrales qui traitent ces informations, connexions normalement éliminées au cours du développement. A quoi servent-elles ? Comment sont-elles éliminées ? E. Hubbard décrit ces phénomènes étranges pour qui ne les perçoit pas. Les enfants seraient apparemment plus synesthètes que les adultes. Ne vous étonnez donc pas la prochaine fois qu'un de vos petits patients vous affirmera sérieusement que *a* est bien plus vert que *o* ! G. Dehaene-Lambertz

La synesthésie est un phénomène dans lequel une stimulation unimodale conduit à une perception dans une autre modalité. Par exemple, des notes de musique, des lettres et des chiffres peuvent entraîner la perception de couleurs, ou des goûts peuvent être associés à des formes tactiles. Des recherches récentes ont montré que la synesthésie est un phénomène bien réel, avec des corrélats génétiques, perceptifs et cérébraux. Nous allons présenter dans cet article quelques-uns de ces faits ainsi que les questions qui nécessitent encore des investigations, notamment chez l'enfant. Les prochaines générations de scientifiques et de pédiatres devront reconnaître la synesthésie chez l'enfant pour en explorer les racines développementales et leurs conséquences.

En 1871, Arthur Rimbaud publia un sonnet intitulé *Voyelles*, qui a amené le monde artistique européen de la fin du 19^e siècle à s'intéresser au phénomène de la synesthésie, lequel associe, par exemple, certaines lettres avec certaines couleurs. Bien qu'il soit généralement admis que Rimbaud n'était pas sy-

nesthète lui-même, son poème demeure une description frappante de ce que cela doit être d'expérimenter cette insolite association des sens. Certains synesthètes perçoivent du bleu lorsqu'ils entendent la note *ré* jouée sur un piano et du rouge pour la note *fa* (audition colorée), ou même ressentent des formes tactiles lorsqu'ils goûtent différentes nourritures. D'autres synesthètes voient en couleur les lettres de l'alphabet, même lorsqu'elles sont imprimées en encre noire. Ces personnes ne sont ni folles, ni atteintes d'un désordre neurologique. Elles font partie du petit groupe, estimé entre 1/20 et 1/2000 individus, de gens normaux qui sont synesthètes. Chez eux, les sens, toucher, goût, audition, vision et odorat, sont « mélangés » au lieu de rester séparés.

Nous ignorons quand ce phénomène a été remarqué pour la première fois, mais Sir Francis Galton en a conduit la première étude systématique. Ses papiers, publiés dans *Nature* en 1880 [1, 2], se focalisent sur les trois manifestations les plus communes de la synesthésie : dans la première forme, les sons évoquent des couleurs (audition colorée) ;

dans la seconde, les nombres sont associés avec des localisations précises dans l'espace (synesthésie nombre-espace) ; dans la troisième, les différents nombres apparaissent teintés de différentes couleurs (synesthésie graphème-couleur). D'autres scientifiques ont bientôt suivi, et vers 1910 plus de cinquante articles avaient été publiés sur la seule audition colorée par certains des plus fameux psychologues de l'époque, comme Alfred Binet, Théodore Flournoy et Edouard Claparade. Pourtant, après cette vague d'intérêt initiale, l'étude de la synesthésie s'est alanguie, et ce phénomène a depuis été considéré comme une simple curiosité de la psychologie et des neurosciences (pour une revue voir [3]). Cette tendance s'est récemment inversée et une nouvelle génération de psychologues et de neuroscientifiques ont recommencé à s'intéresser à la synesthésie. Plus d'articles portant sur la synesthésie ont été publiés dans les quatre dernières années que pendant les quarante années précédentes. Dans cet article, je voudrais :

1. discuter les preuves expérimentales montrant que la synesthésie est un phénomène perceptif réel. Ces sujets ne faiblit pas ;
2. faire le point sur les propositions théoriques de ce qui se passe dans le cerveau des synesthètes qui les distinguent des non-synesthètes ;
3. rapporter les faits de la littérature suggérant que la synesthésie pourrait être fréquente chez l'enfant.

LES EXPLICATIONS HISTORIQUES DE LA SYNESTHÉSIE

Une explication classique de la synesthésie est que ces personnes revivent des associations et des mémoires de l'enfance. Peut-être que le petit Charles jouait avec des lettres aimantées sur la porte du réfrigérateur et que le 5 était rouge et le 6 vert. Bien sûr, cela n'explique pas pourquoi seulement certaines personnes restent « collées » à ces mémoires sensibles saisissantes ni pourquoi seulement

certains groupes de stimulus, comme les lettres, les nombres et les notes de musique, sont les plus probables pour créer des perceptions synesthésiques.

Une deuxième explication que l'on entend souvent est que ces personnes utilisent de vagues images métaphoriques quand ils disent que la note *ré* est rouge ou que le poulet a un goût pointu, de la même façon que l'on parle d'une chemise criarde ou d'un fromage piquant. Cette hypothèse estime que la langue regorge de ce genre de métaphores et que les synesthètes sont simplement plus prolixes à cet égard. Toutefois, dire que la synesthésie est une histoire de métaphores n'aide pas réellement non plus à comprendre ce phénomène, car personne n'a une bonne idée de comment les métaphores marchent ni de comment elles sont décodées par le cerveau.

Aucune de ces explications ne rend compte des caractéristiques que moi-même et d'autres avons observées dans les études récentes de la synesthésie. Par exemple, plusieurs études ont montré que les rapports des synesthètes sont cohérents (> 90 %) à travers des séances répétées de tests, même quand les séances sont séparées par des périodes de plus d'un an [3, 4]. Des sujets contrôles, par comparaison, ne sont cohérents que dans 30 % des cas. De la même façon, quand on présente à un synesthète un chiffre écrit dans une couleur qui ne correspond pas à sa perception, le temps qu'il lui faut pour nommer la couleur de l'encre est plus longue que celui qui lui est nécessaire quand le chiffre est imprimé dans la couleur adéquate [4, 5]. Ces faits montrent bien que la synesthésie est un phénomène automatique et digne de foi, mais ils ne répondent pas à la question de savoir si ces perceptions colorées sont liées à des associations mémorisées ou à des processus perceptifs particuliers.

LA RÉALITÉ PERCEPTIVE DE LA SYNESTHÉSIE

Pour tester l'hypothèse que la synesthésie est un phénomène perceptif, nous

avons utilisé un test « d'isolement perceptif ». Si vous regardez un groupe de points verts dispersés parmi une « forêt » de points rouges, les points verts vont vous sauter aux yeux (pop-out). Si vous regardez des groupes de 3 dispersés au milieu d'autres chiffres (figure 1a), ils se mélangent avec l'arrière-plan. Ils sont difficiles à distinguer sans inspecter chaque élément un à un. Mais si vous regardez les chiffres rouges de la figure 1b, vous pouvez instantanément les séparer de l'arrière-plan et les regrouper mentalement pour former une figure séparée de triangle.

Notre question était de savoir ce qui se passerait si on montrait cette figure à un synesthète qui voit les 3 rouges, les 4 verts et les 5 bleus. S'il pense simplement à rouge et à vert quand il voit des 3 et des 5, alors, comme vous et moi, il ne verra pas le triangle instantanément. Si par contre la synesthésie est un vrai phénomène perceptif, et pas seulement une association mémorisée, alors le triangle lui sautera aux yeux, comme dans la figure 1b, car pour lui les nombres sont vraiment colorés. La réponse fut claire comme de l'eau de roche : les synesthètes étaient bien meilleurs que les non-synesthètes [6, 7]. Nous avons testé un second groupe de contrôles non-synesthètes avec des figures colorées comme les perceptions des synesthètes. Dans ce cas, les non-synesthètes avaient de meilleures performances que les synesthètes, ce qui est cohérent avec le fait que les synesthètes rapportent que les couleurs qu'ils perçoivent sont réelles mais plus fades que celles du monde réel.

Ces résultats sont une preuve évidente

L'unité Inserm 562 est en train de mettre au point des expériences pour tester ces hypothèses. Nous sommes donc à la recherche de volontaires qui pensent être synesthètes. Si vous pensez être synesthète, quel que soit le type de synesthésie que vous présentez, contactez : Edward M. Hubbard ou Manuela Piazza, Inserm Unité 562, service hospitalier Frédéric-Joliot CEA, 4 place du Général-Leclerc, 91401 Orsay ; tél. : 01 69 86 77 65 ; courriel : edhubbard@gmail.com.

que les couleurs perçues par les synesthètes sont vraiment d'origine sensitive. Cette expérience montre également que les synesthètes ne sont pas fous ou mythomanes. Comment une personne folle pourrait-elle être plus efficace que des sujets normaux ? Il n'y a aucun moyen de triquer. Pour la première fois depuis Francis Galton, nous avons une preuve non équivoque que la synesthésie est bien un processus sensitif.

Dans une deuxième expérience, nous avons tiré parti d'un phénomène visuel, la saturation (crowding). Si vous fixez la croix de la figure 2b, vous trouverez assez facile de percevoir le nombre 5 sur le côté, même si vous ne le regardez pas directement. Mais si on entoure ce 5 de quatre autres nombres de même couleur (comme des 3 noirs), vous ne pouvez plus identifier le nombre du milieu (figure 2a). Cela n'est pas dû à une réduction de l'acuité en périphérie. Après tout, le 5 était parfaitement évident quand il n'était pas entouré de 3. Une hypothèse est que la saturation est due à des ressources attentionnelles limitées. Les 3 qui flanquent le 5 distraient l'attention du stimulus central et empêchent les sujets de le voir. Nous eûmes une grande surprise lorsque nous avons montré la figure 2a à nos synesthètes. Ils regardèrent la figure et firent des remarques du genre : « Je ne peux pas voir le nombre du milieu. C'est flou mais c'est un flou bleu, donc je devine que cela doit être un 5 ». Cela suggère que, bien qu'ils n'aient pas enregistré consciemment le nombre du milieu, ce nombre était traité quelque part dans le cerveau à un niveau inconscient et évoquait la couleur appropriée. Ils pouvaient ensuite utiliser cette couleur pour en déduire intellectuellement l'identité du nombre [8]. Néanmoins, cela n'était vrai que pour seulement 3 de nos 6 synesthètes, alors que, dans la tâche précédente d'isolation du triangle, le groupe des synesthètes avaient de meilleures performances que les contrôles [7]. Cela peut vouloir dire qu'il existe différents sous-groupes de synesthètes, une question sur laquelle nous reviendrons ci-dessous.

Figure 1

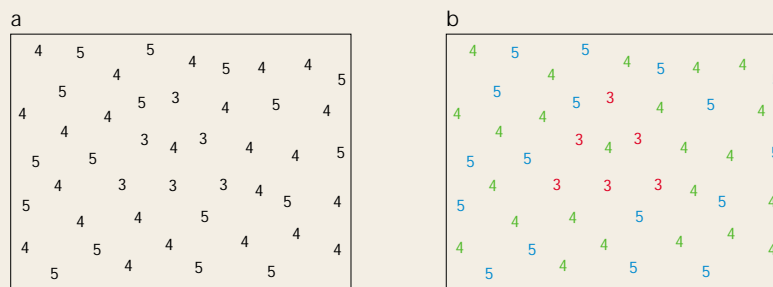
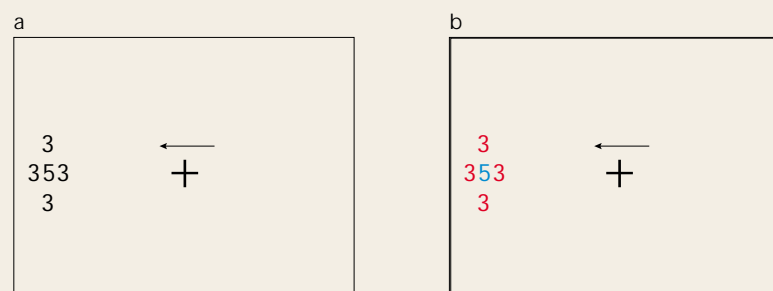


Figure 2



LES BASES NEURALES DE LA SYNESTHÉSIE GRAPHÈME-COULEUR

Pour comprendre pourquoi certaines personnes font l'expérience d'un tel phénomène, revenons d'abord sur les bases neurales du traitement des couleurs, des lettres et des nombres. Les signaux neuronaux en provenance de la rétine sont d'abord envoyés au cortex visuel primaire (V1), où l'image est analysée selon ses différents attributs, comme sa couleur, son mouvement, sa forme et sa profondeur. Ensuite, les informations sur ces différents éléments sont distribuées vers de nombreuses aires visuelles dans les régions temporales et pariétales. Les neuroscientifiques ont maintenant une connaissance assez précise de la manière dont les couleurs sont analysées. Après avoir été analysée par les cônes (les récepteurs de la couleur) dans l'œil et avoir été ensuite traitée dans des amas (blobs) dans V1, l'information colorée de la scène visuelle est envoyée vers l'aire hV4 dans le gyrus fusiforme. De là, elle est relayée vers les

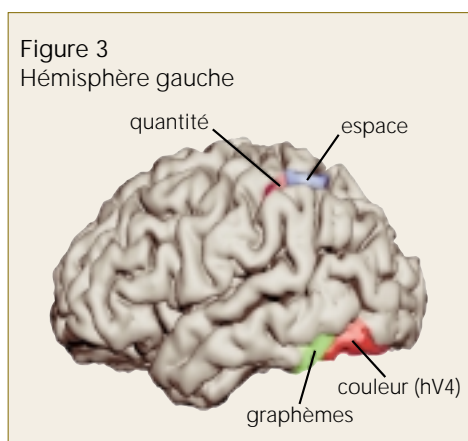
aires de couleur « supérieures », qui se trouvent plus haut, près de la région du lobe pariétal appelé gyrus angulaire. Ces aires supérieures seraient impliquées dans les aspects les plus sophistiqués du traitement de la couleur, comme la couleur typique de tel ou tel objet ou la discrimination de couleurs ambiguës.

Les représentations numériques sont également calculées en suivant plusieurs étapes. Une première étape dans le gyrus fusiforme reconnaît la forme des chiffres (graphèmes), alors que les stades plus tardifs dans le gyrus angulaire et le sillon intrapariétal interviennent dans les concepts numériques que sont l'ordinalité (l'ordre des nombres, 2 est avant 3 qui est lui-même avant 4 dans la liste des nombres) et la cardinalité (la quantité). Quand la région angulaire est détruite par un accident vasculaire cérébral ou une tumeur, le patient peut encore identifier les nombres mais ne peut plus ni diviser ni soustraire (voir revue en [9]). Les multiplications sont généralement moins affectées, car les tables sont souvent apprises par cœur dans l'enfance et peuvent permettre de trouver le résultat par récitation verbale.

Cette configuration anatomique, la proximité des régions traitant les couleurs et les nombres dans le gyrus fusiforme et dans le gyrus angulaire, suggère que la synesthésie nombre-couleur pourrait être la conséquence d'erreurs de câblage entre ces régions spécialisées (figure 3) [8]. La synesthésie est souvent présente chez plusieurs membres d'une même famille et le schéma de transmission suggère fortement une base génétique à ce phénomène. Peut-être qu'une mutation génétique entraîne un déficit d'élimination de connexions pré-existantes entre ces régions qui sont normalement séparées au cours du développement grâce à des phases d'élagage de connexions exubérantes. Si cette mutation s'exprime de façon inhomogène dans les tissus, cela expliquerait pourquoi certains synesthètes connectent couleurs et nombres tandis que d'autres voient des couleurs quand ils entendent des syllabes ou des notes de musique. Notez aussi qu'alors que presque toutes les régions cérébrales peuvent être connectées avec n'importe quelle autre, les régions qui présentent ces erreurs de câblage sont proches les unes des autres, expliquant pourquoi certaines formes de synesthésie sont plus fréquentes que d'autres.

Chez certains synesthètes, nous avons trouvé que les chiffres sous leur forme romaine (*V* pour 5) n'évoquaient aucune couleur. Ce fait est important, car il suggère que, pour ces sujets, ce n'est pas le concept numérique 5, mais la forme physique du chiffre qui est associée à la couleur. Cette observation est cohérente avec l'idée que les connexions exubérantes se trouvent pour ces sujets dans le gyrus fusiforme, cette structure étant principalement impliquée dans l'analyse des formes visuelles et non pas dans la signification conceptuelle du chiffre. Ces synesthètes de « bas niveau » étaient ceux qui avaient les meilleures performances dans notre tâche de saturation (figure 2).

Néanmoins, pour d'autres synesthètes, même les jours de la semaine ou les mois de l'année évoquent des couleurs. Lundi peut être vert, mercredi rose et



décembre jaune. Les jours de la semaine, les mois et les nombres partagent le même concept de séquence ou d'ordinalité. Chez ces personnes, c'est peut-être le concept abstrait de séquence numérique qui suscite la couleur plutôt que l'apparence visuelle du signe. Quelle est la différence entre ces deux groupes de synesthètes ? Comme nous l'avons déjà rapporté, après que la forme du nombre est reconnue dans le gyrus fusiforme, le message est relayé vers le gyrus angulaire et le sillon intrapariétal. Le gyrus angulaire est impliqué dans le traitement des quantités et des séquences numériques et dans le raisonnement arithmétique abstrait. Peut-être que chez certains synesthètes l'interférence se produit entre les deux régions de traitement de haut niveau de la couleur et du nombre dans le gyrus angulaire et non pas dans le gyrus fusiforme. Cela expliquerait pourquoi, chez ces personnes, la représentation abstraite du nombre ou l'idée de nombre évoquée par les jours de la semaine ou les mois de l'année suscite fortement la couleur. En d'autres termes, il y aurait différentes formes de synesthésie suivant les régions du cerveau dans lesquelles s'exprime le gène responsable. Les synesthètes de « haut niveau » seraient ceux dont l'expérience serait commandée par le concept numérique, alors que les synesthètes de « bas niveau » seraient ceux dont l'expérience serait commandée seulement par l'apparence physique. Cette hypothèse non seulement explique la connexion entre couleurs et

lettres ou nombres, mais aussi le rapport d'un synesthète qui dit ressentir un goût dans la bouche quand il entend des mots. Ainsi cette sensation serait due au fait que le cortex auditif et le cortex du goût sont adjacents respectivement dans le lobe temporal supérieur et dans l'insula. De la même façon, goûter des formes pourrait être dû à des connexions entre le cortex du goût dans l'insula et la représentation adjacente de la main dans le cortex somatosensoriel. Dans le cas de la synesthésie notes de musique et couleur, les régions impliquées sont loin l'une de l'autre (le cortex auditif et V4), mais il existe des preuves que des connexions longue distance entre ces deux régions sont présentes à la naissance. La persistance de ces connexions expliquerait la synesthésie notes de musique-couleur, même si cette synesthésie met en jeu des régions éloignées.

ÉTUDES D'IMAGERIE FONCTIONNELLE DES SYNESTHÉSIES GRAPHÈME-COULEUR

Pour tester cette théorie, nous avons mené une étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle chez 6 synesthètes et 6 contrôles. Nous avons mesuré les activations dans les régions cérébrales répondant à la couleur pendant que les sujets regardaient des lettres ou des nombres, en blanc sur un fond gris, qui alternaient avec des symboles non linguistiques appariés quant à la complexité visuelle de bas niveau. Comme le prédisait notre hypothèse, les synesthètes avaient plus d'activité que les contrôles dans toutes les régions visuelles de traitement précoce, et notamment dans hV4, la région répondant sélectivement à la couleur. De plus, les synesthètes qui avaient les meilleures performances dans les deux tâches décrites ci-dessus avaient également la plus forte activation dans hV4, suggérant que les synesthètes pourraient différer par l'intensité de leur coloration synesthé-

sique [7]. Ces différences pourraient également être dues à la distinction « haut et bas niveau » de traitement que nous avons soulignée ci-dessus, mais cela nécessite plus de recherche.

Une étude en IRMf antérieure avait étudié la synesthésie mots entendus-couleur et avait montré une augmentation de l'activité dans hV4 chez les synesthètes, similaire à celle que nous avons décrite dans la synesthésie graphème-couleur [10]. De plus, dans cette étude, les auteurs avaient entraîné les sujets contrôles à imaginer les mots en couleur et avaient montré que, malgré l'entraînement, les non-synesthètes n'avaient pas d'activation dans hV4. Ces résultats non seulement montrent la généralité de l'implication de V4 dans la perception synesthésique des couleurs, mais démontrent que cette activation ne peut pas être due simplement à des influences descendantes (top-down) comme dans l'imagerie mentale. Pris ensemble, ces résultats sont en faveur du modèle général d'activation croisée que nous avons proposé ci-dessus. Néanmoins, simplement montrer que ces régions sont actives n'explique pas totalement leur rôle fonctionnel, ni quelles sont les interactions entre gènes et environnement pouvant conduire à la synesthésie.

LES ÉTUDES DÉVELOPPEMENTALES DE LA SYNESTHÉSIE

Tout ce que nous avons récemment appris sur la synesthésie provient d'études chez l'adulte. Ces résultats intrigants conduisent pourtant à toute une série de questions sur la manière dont la synesthésie se développe. Par exemple, si l'hypothèse de l'élagage de connexions exubérantes est juste, nous devrions nous attendre à trouver plus de synesthètes chez les enfants que chez les adultes, puisque l'élimination synaptique se poursuit pendant l'enfance jusqu'à l'adolescence. De la même façon, étant donné que la synesthésie a une composante génétique mais dépend de

systèmes appris comme les lettres, les chiffres et les notes de musique, quelles peuvent être les interactions entre génétique et expérience qui conduisent à la forme adulte de synesthésie ?

La question de savoir si la synesthésie est plus fréquente chez les enfants n'a pas été envisagée dans les études récentes. Néanmoins, des données obtenues dans les premiers temps de la recherche sur la synesthésie suggèrent que cela est effectivement le cas (pour une revue voir [11]). Par exemple, Galton, en 1883, a noté la tendance pour les enfants à être plus synesthètes que les adultes. Charles Meyers, en 1914, a aussi remarqué cette tendance et a suggéré qu'il s'agissait juste d'une des nombreuses « perceptions indifférenciées » communes aux enfants. Heinz Werner, en 1940, a suggéré que la synesthésie pourrait concerner un enfant sur deux et que la prévalence de la synesthésie diminue avec l'âge après dix ans. Néanmoins, aucun de ces auteurs n'a utilisé les techniques expérimentales modernes pour vérifier la stabilité et le sérieux de ces associations synesthésiques. Par exemple, ils ne se sont pas assurés de distinguer entre synesthésie et possibilité de métaphore, ou autres images. Il s'agit donc clairement d'une question qui doit être réexaminée avec les méthodologies plus fiables qui sont à notre disposition maintenant.

Une autre question développementale intéressante est la relation entre génétique et expérience dans le développement de certaines associations synesthésiques. Bien qu'il soit clair qu'il existe une composante génétique dans la synesthésie, la concordance, même parmi des jumeaux monozygotes, n'est pas parfaite, suggérant également une composante environnementale [12]. Dans une étude récente de la synesthésie goût-mots entendus, Jamie Ward et Julia Sinner ont montré que leur synesthète JIW ressentait des goûts qui étaient liés au contenu sémantique et phonétique des mots, démontrant ainsi que des facteurs linguistiques et conceptuels jouent un rôle dans les associations synesthésiques [13]. Une autre étude ré-

cente a montré que, chez des anglophones, le *r* est par exemple plus souvent associé au rouge (red en anglais) et le *g* plus souvent au vert (green en anglais), suggérant un biais dans les associations colorées dû à la dénomination des couleurs. Néanmoins, cette association n'est pas parfaite, *o* étant souvent perçu comme noir ou blanc et non comme orange [14]. Chez d'autres synesthètes, entendre le mot « rouge » leur fait voir du vert, un effet que Gray et ses collègues [15] ont surnommé « l'effet de couleur étrangère » (alien color effect : ACE). Nous avons nous-mêmes rapporté le cas d'un synesthète qui avait un trouble de la vision des couleurs (déficit en cônes *s*) et avait des difficultés à distinguer les bleus des violets. Néanmoins, il rapportait qu'il percevait des couleurs synesthésiques qu'il ne pouvait pas voir dans le monde réel [6, 8]. En résumé, ces résultats contradictoires suggèrent un rôle important de l'environnement pour déterminer quelles sont les associations synesthésiques les plus probables, mais suggèrent également qu'il existe un certain degré d'aléatoire dans les connexions génétiquement spécifiées qui détermineront quelles sont les associations que le synesthète éprouvera.

CONCLUSIONS

L'étude de la synesthésie a explosé pendant ces dix dernières années. Au fur et à mesure que les chercheurs ont exploré ce phénomène énigmatique, ils ont pu montrer que ces couleurs synesthésiques ont des conséquences perceptives, démontrant la réalité de ce phénomène. Les études de neuro-imagerie ont montré que les synesthètes qui voient des stimulus induisant des perceptions colorées ont effectivement des activations dans les régions cérébrales traitant la couleur, suggérant que la synesthésie est due à des co-activations de régions adjacentes du cerveau impliquées dans le traitement de la couleur et dans le traitement du nombre. Alors qu'il est classiquement accepté qu'il existe une composante génétique dans

ce phénomène, il est nécessaire de lancer des recherches pour déterminer exactement la part de cette composante et la manière dont cette dernière inter-

agit avec des facteurs environnementaux pour créer les associations précises que les synesthètes ressentent. Cela est un objectif essentiel pour les futures re-

cherches de ce domaine où pédiatres et psychologues du développement devraient collaborer pour mieux comprendre ce phénomène curieux. □

Références

- [1] GALTON F. : « Colour associations », in BARON-COHEN S., HARRISON J.E. : *Synaesthesia : Classic and contemporary readings*, 1880, Blackwell, Oxford, England ; p. 43-8.
- [2] GALTON F. : « Visualised numerals », *Nature*, 1880a ; 21 : 252-6.
- [3] BARON-COHEN S., HARRISON J., GOLDSTEIN L.H., WYKE M. : « Coloured speech perception : Is synaesthesia what happens when modularity breaks down ? » *Perception*, 1993 ; 22 (4) : 419-6.
- [4] MATTINGLEY J.B., RICH A.N., YELLAND G., BRADSHAW J.L. : « Unconscious priming eliminates automatic binding of colour and alphanumeric form in synaesthesia », *Nature*, 2001 ; 410 (6828) : 580-2.
- [5] DIXON M.J., SMILEK D., CUDAHY C., MERIKLE P.M. : « Five plus two equals yellow : Mental arithmetic in people with synaesthesia is not coloured by visual experience », *Nature*, 2000 ; 406 (6794) : 365.
- [6] RAMACHANDRAN V.S., HUBBARD E.M. : « Psychophysical investigations into the neural basis of synaesthesia », *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences Series B*, 2001a ; 268 (1470) : 979-83.
- [7] HUBBARD E.M., ARMAN A.C., RAMACHANDRAN V.S., BOYNTON G.M. : « Individual differences among grapheme-color synesthetes : Brain-behavior correlations », *Neuron*, 2005 ; 45 (6) : 975-85.
- [8] RAMACHANDRAN V.S., HUBBARD E.M. : « Synaesthesia : A window into perception, thought and language », *Journal of Consciousness Studies*, 2001b ; 8 (12) : 3-34.
- [9] MOLKO N., WILSON A., DEHAENE S. : « La dyscalculie développementale, un trouble primaire de la perception des nombres », *Méd. Enf.*, 2005 ; 25 (3) : 165-70.
- [10] NUNN J.A., GREGORY L.J., BRAMMER M., WILLIAMS S.C.R., PARSLow D.M., MORGAN M.J., MORRIS R.G., BULLMORE E.T., BARON-COHEN S., GRAY J.A. : « Functional magnetic resonance imaging of synesthesia : Activation of V4/V8 by spoken words », *Nature Neuroscience*, 2002 ; 5 (4) : 371-5.
- [11] DANN K.T. : *Bright Colors Falsely Seen*, 1998, New Haven, CT, Yale University Press.
- [12] SMILEK D., MOFFATT B.A., PASTERNAK J., WHITE B.N., DIXON M.J., MERIKLE P.M. : « Synaesthesia : A case study of discordant monozygotic twins », *Neurocase*, 2002 ; 8 (4) : 338-42.
- [13] WARD J., SIMNER J. : « Lexical-gustatory synaesthesia : linguistic and conceptual factors », *Cognition*, 2003 ; 89 (3) : 237-61.
- [14] DAY S. : « Some demographic and socio-cultural aspects of synesthesia », in ROBERTSON L., SAGIV N. : *Synaesthesia : Perspectives from Cognitive Neuroscience*, 2005, Oxford University Press, New York, NY.
- [15] GRAY J.A., CHOPPING S., NUNN J., PARSLow D., GREGORY L., WILLIAMS S., BRAMMER M.J., BARON-COHEN S. : « Implications of synaesthesia for functionalism : Theory and experiments », *Journal of Consciousness Studies*, 2002 ; 9 (12) : 5-31.