

# Transparence, constance et apparence des couleurs

Kenneth KNOBLAUCH et Michel DOJAT

## Comment le cerveau perçoit-il la transparence ou l'illusion de la transparence ?

L'aisance avec laquelle nous percevons le monde en termes d'objets distincts aux propriétés stables et invariantes, comme la couleur et la forme, est d'autant plus remarquable que les informations projetées sur la rétine sont ambiguës. Par exemple, malgré les changements de l'éclairage d'un objet, sa couleur ne nous paraît en général pas significativement altérée : c'est la constance des couleurs. Inversement, le même stimulus physique, c'est-à-dire la même image formée sur la rétine, peut conduire, selon le contexte, à des perceptions différentes. Deux lignes peuvent ainsi paraître fort différentes alors qu'elles sont de même longueur (voir la figure 1).

Toute image formée sur la rétine est sujette à de multiples interprétations. Dans des conditions naturelles toutefois, le cerveau parvient à une interprétation correcte et stable des objets, gage de notre adaptation à l'environnement. Les mécanismes du système visuel nous permettent de distinguer les aspects des stimuli qui sont associés à l'objet, donc persistants, comme le coefficient de réflexion, de ceux qui varient avec le contexte, comme son éclairage. Grâce

à ces mécanismes de détection de régularités, le cerveau soustrait les variations qui ne sont pas intrinsèques aux objets et lève les ambiguïtés de perception. Pour mieux comprendre ces mécanismes, nous avons privilégié la perception de la transparence, dont les spécialistes supposent qu'elle est liée à la perception de la constance de couleur. Cette constance résulte en effet d'un mécanisme conçu pour soustraire les variations spectrales de la lumière qui ne sont pas intrinsèques aux objets.

### La transparence

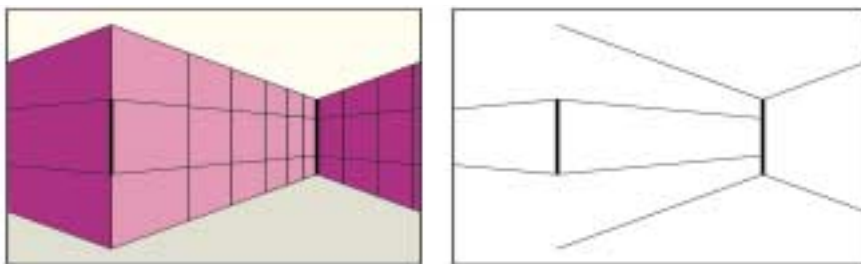
Comment le système visuel reconnaît-il la transparence ? Autrement dit, de quelle manière détermine-t-il que deux couleurs sont superposées, l'une étant un filtre à travers lequel l'autre couleur est vue ? Nous verrons que cette transparence résulte d'un changement de couleur perçue comme « cohérent » par le cerveau. L'imagerie cérébrale révélera quelles aires cérébrales interviennent dans cette perception.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les psychologues gestaltistes s'intéressent déjà à la transparence. Ce mouvement de pensée

naît en réaction à l'idée que la perception est entièrement expliquée en termes de sensations élémentaires et isolées. Pour les gestaltistes, la perception ne se réduit pas à la somme des excitations engendrées par un stimulus. Pour illustrer leur hypothèse, ils utilisent des groupements visuels où l'objet perçu dépend de la relation entre ses éléments constitutifs et non pas simplement des éléments *per se*. Le psychologue Kurt Koffka défend alors l'idée que la transparence révèle une représentation perceptive duale.

Comment fonctionnerait cette représentation ? Dès qu'une région est vue comme transparente, nous percevons deux surfaces au même endroit, l'une semblant « filtrer » la lumière de l'autre, alors qu'en réalité, seuls des champs de lumière adjacents sont projetés sur la rétine. Dans notre vision de la transparence, nous ne voyons pas seulement deux surfaces, nous apprécions aussi la couleur de chacune : nous pouvons voir simultanément les couleurs verdâtre et rougeâtre d'une image formée au même endroit sur la rétine, alors qu'habituellement ces couleurs ne sont jamais perçues ensemble, signe de l'organisation de la vision des couleurs en mécanismes antagonistes (le rouge et le vert sont antagonistes).

Plusieurs groupes de chercheurs se sont attachés à l'étude de la perception de la transparence dans des images achromatiques (en niveau de gris) et ils ont noté l'importance de la luminance relative entre les surfaces adjacentes aux bords de la région perçue comme transparente, c'est-à-dire la manière dont cette luminance varie entre les surfaces adjacentes (la luminance, qui est l'intensité lumineuse émise, diffère de la luminosité, qui correspond à l'intensité perçue). Ainsi, dans les années 1970, Fabio Metelli proposa que, pour être perçues comme transparentes, les luminances des régions de part et d'autre de la



1. LES LIGNES VERTICALES en gras, dessinées sur les coins proches et éloignés, sont de même longueur, mais celle du fond paraît plus grande dans la scène (à gauche). Dans l'illusion de Müller-Lyer, les indices majeurs de profondeur ont été retirés, mais l'illusion persiste (à droite).

frontière de transparence devait satisfaire certaines inégalités.

Le rôle des relations géométriques entre les régions adjacentes a été aussi souligné. Par exemple, sur la figure 2a, le fait que la région transparente ne soit pas alignée avec les carrés sous-jacents aide sans doute à percevoir la transparence.

Quelle est l'influence de la couleur sur la transparence ? Pouvait-elle être expliquée d'une manière analogue à la théorie proposée par Michaël D'Zmura, de l'Université d'Irvine en Californie, pour expliquer la constance de couleur ?

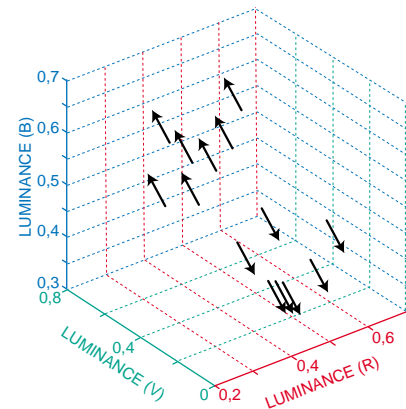
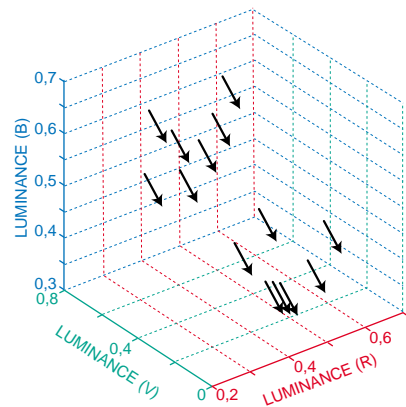
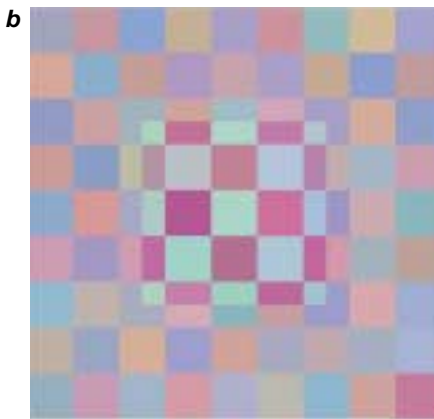
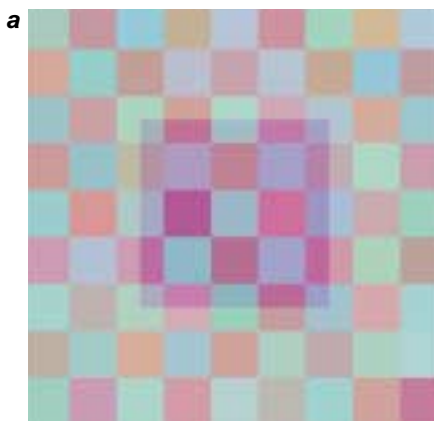
## La constance de couleur

Les caractéristiques spectrales de la lumière sont codées précocement dans le système visuel par l'excitation de trois canaux aux sensibilités spectrales différentes. Ces spectres de sensibilité se recouvrent et ont leur maximum dans les courtes, moyennes et grandes longueurs d'onde (approximativement dans le bleu, le vert et le rouge). C'est la base physiologique de la trichromie de la vision humaine normale (voir *Les illusions de couleur*, par Françoise Viénot et Jean Le Rohellec, dans ce dossier).

Ainsi, toute lumière est caractérisée par trois coordonnées dans un espace de couleurs, par exemple un mélange de rouge, de vert et de bleu d'un tube cathodique de téléviseur. Des lumières avec les mêmes coordonnées dans l'espace des couleurs – les valeurs trichromatiques – ont la même apparence lorsqu'elles sont observées dans des contextes identiques.

M. D'Zmura nota qu'une modification du spectre de l'éclairage (la répartition de l'intensité des différentes longueurs d'onde) d'un ensemble de surfaces colorées modifie les valeurs trichromatiques de la lumière réfléchiée par toutes les surfaces : les nouvelles valeurs trichromatiques se rapprochent de celles de la lumière de l'éclairage. Toute surface prise isolément paraît alors changer radicalement de couleur. En revanche, dans leur ensemble, les couleurs de toutes les surfaces paraissent peu altérées, comme si le système visuel ne codait que les valeurs trichromatiques des surfaces, une information qui change peu lors d'une modification de l'éclairage.

La situation est analogue lorsque nous déduisons une forme à partir d'un mouvement : quand un ensemble de points dans le plan se déplace de façon cohérente, nous percevons un objet à condition que le déplacement des points



**2. UN FOND DE DAMIER COLORÉ** semble recouvert par une région centrale aux couleurs différentes. À droite, dans l'espace des couleurs (où chaque point définit les caractéristiques de luminosité ou intensité lumineuse d'une couleur), les vecteurs représentent le passage de la zone du fond à la zone centrale : l'origine des vecteurs correspond aux couleurs des points situés sur le fond, en bordure de la région centrale, mais à l'extérieur de celle-ci, et leur extrémité correspond aux couleurs des points situés en bordure de la région centrale, mais à l'intérieur de celle-ci. Dans le cas du haut (a), les vecteurs sont tous parallèles, ce qui indique qu'en passant de l'extérieur vers l'intérieur du carré central, les changements correspondent à une translation dans l'espace des couleurs : la région centrale est perçue comme transparente. En bas (b), les vecteurs dénotent un « cisaillement » dans l'espace des couleurs : les changements chromatiques ne produisent pas de région centrale transparente.

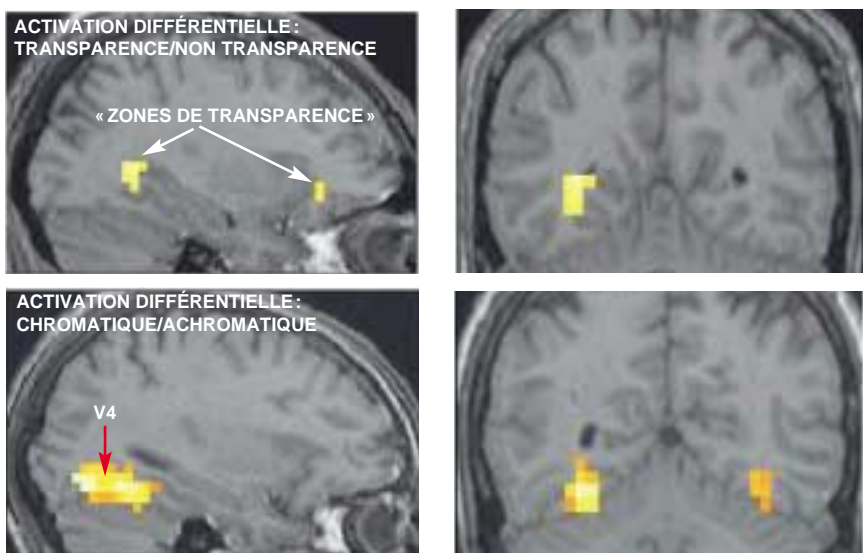
correspond à celui d'un objet tridimensionnel projeté, c'est-à-dire si nous jugeons que le déplacement des points est cohérent. La constance de couleur procède d'un phénomène analogue où ce sont les coordonnées trichromatiques qui se déplacent de manière cohérente. Ainsi, la constance chromatique résulterait de la perception d'une structure dans le déplacement chromatique engendré par la modification d'éclairage.

Un filtre transparent superposé à une image peut être considéré comme un changement local de l'éclairage, similaire à l'apparition d'une ombre ou d'un gradient de lumière dans l'image. Pourquoi ne pas imaginer que le système visuel utilise pour voir la transparence des mécanismes identiques à ceux qui sont utilisés pour extraire des propriétés sur la surface des objets dans des conditions d'éclairage variables ? La perception de la transparence serait-elle asso-

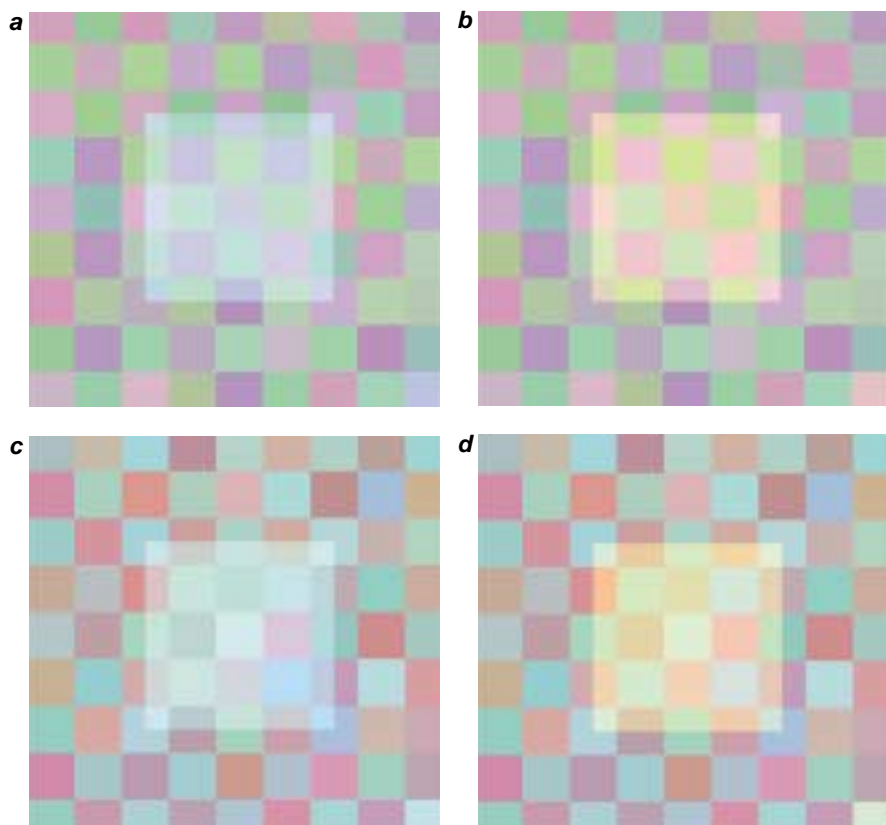
ciée à un déplacement systématique des valeurs trichromatiques d'une région ? Les résultats montrent que lorsque le changement dans l'espace des couleurs entre la région du fond et la région superposée peut être décrit comme une translation ou comme une convergence (ou la composition des deux), l'observateur perçoit cette région comme transparente.

Par exemple, sur la figure 2a, la surface centrale ajoutée correspond, dans l'espace des couleurs, à une translation des coordonnées trichromatiques des couleurs situées de part et d'autre de la frontière de cette surface. La surface centrale est bien perçue comme transparente. À l'inverse, sur la figure 2b, la modification des coordonnées trichromatiques ne correspond pas à une translation : la transparence n'est pas perçue.

Ces déplacements systématiques de couleur modélisent les effets des mécanismes physiques qui engendrent la



**3. EN HAUT, DES COUPES CÉRÉBRALES** montrent les différences d'activations obtenues par soustraction de la perception de transparence (*damier de la figure 2a*) et de la condition de non-perception de la transparence (*damier de la figure 2b*). Sur la ligne inférieure, des coupes cérébrales un peu différentes font ressortir la région activée par la perception de la couleur (soustraction entre la perception d'une image colorée et d'une image achromatique), la zone V4. Les « zones de transparence » (*flèches sur l'image en haut à gauche*) sont donc spécifiques à la perception de la transparence.



**4. LES OBSERVATEURS PEUVENT SÉPARER LA COULEUR** du filtre de celles des surfaces sous-jacentes. Les couleurs des surfaces sous-jacentes en *a* et *b* sont identiques ainsi qu'en *c* et *d*. Les couleurs des filtres en *a* et *c* sont les mêmes ainsi qu'en *b* et *d*. Lorsqu'on demande aux observateurs de choisir une surface colorée telle qu'elle égale un des champs colorés recouverts par le filtre, les résultats sont similaires à ceux qui sont obtenus lorsqu'on réalise des expériences où l'éclairage est changé globalement dans une scène. Lorsqu'on demande aux observateurs de choisir une lumière qui soit équivalente à celle du filtre, ils le font avec une surprenante précision et la couleur des surfaces sous-jacentes a un faible effet sur leur choix.

transparence. L'effet d'une translation où les vecteurs pointent vers une décroissance de luminance est grossièrement similaire à un filtre coloré placé sur l'image. Lorsque la translation est dirigée vers une augmentation de luminance, la région transparente apparaîtrait comme éclairée par un spot lumineux. Parfois, des translations des coordonnées à luminance constante produisent aussi un effet de transparence, bien que ce type de translation ne corresponde à aucun éclairage naturel possible ou à aucun filtre physique réalisable. Les changements de couleur décrits par une convergence correspondent à des filtres qui diffusent ou dispersent la lumière. Le brouillard, par exemple, est un filtre qui engendre des changements de couleurs décrits par une convergence. En fait, la translation n'est qu'une convergence vers un point situé à l'infini. Hormis la translation et la convergence, les autres types de changements de coordonnées n'engendrent pas de perception de la transparence (*comme sur la figure 2b*).

### Scission des couches colorées

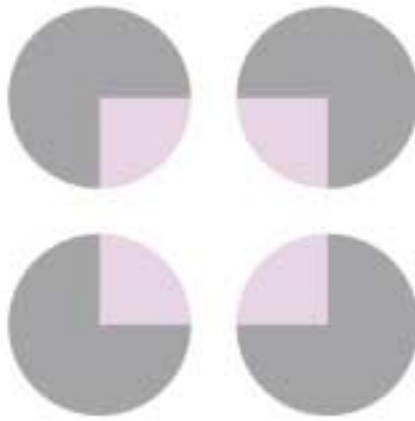
Afin de détecter qu'une région est transparente, le système visuel doit reconnaître que les changements chromatiques le long de ses bords varient de manière cohérente. Quand tel est le cas, le système visuel scinde l'image en couches colorées distinctes.

Les mécanismes visuels précoces qui sont sensibles à l'orientation et aux contrastes chromatiques dans le cortex visuel primaire (l'aire V1), première aire du cortex visuel à recevoir les informations rétinienne, peuvent coder les différences chromatiques autour de la région centrale de l'image. Cependant, le champ récepteur des neurones de l'aire V1, c'est-à-dire la région spatiale à laquelle ces neurones sont sensibles, est très petit : ces neurones intègrent l'information sur moins d'un degré dans le champ visuel central. La scission perceptive nécessiterait donc une intégration des réponses de plusieurs de ces détecteurs locaux autour de la région transparente. Or une telle intégration nécessite la participation de neurones avec de larges champs récepteurs, tels ceux des aires visuelles situées au-delà de l'aire V1. Pour tester cette hypothèse, la neuroimagerie est d'un grand secours.

Avec Løys Piettre, nous avons commencé une étude par imagerie fonctionnelle cérébrale par résonance magnétique nucléaire (IRMf). Les variations

## 5. LA PERCEPTION DE LA TRANSPARENCE

semble être impliquée dans de nombreuses illusions de couleur. Dans le contour subjectif (*à gauche*), on perçoit un carré transparent superposé à quatre disques gris. Cette figure est ambiguë. Avec un peu d'effort, il est aussi possible de percevoir les disques gris comme des trous transparents, le carré apparaissant alors derrière les trous. Dans l'illusion de White (*à droite*), les couleurs des bandes bleues et jaunes diffusent sur les carrés gris adjacents qui sont en réalité tous du même gris. Les bandes verticales ont tendance à apparaître transparentes, surtout la bande centrale.



*figure 3*). Cette découverte corrobore le fait que la perception de la transparence nécessiterait une participation d'aires visuelles situées au-delà de l'aire visuelle primaire V1.

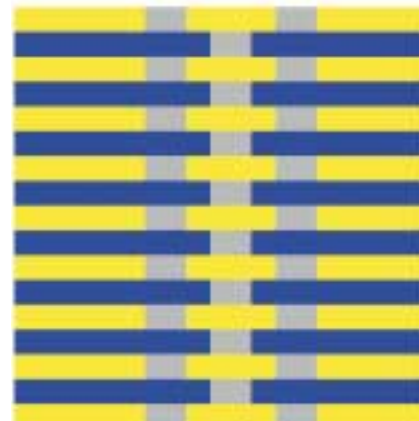
### Une représentation séparée?

Est-ce que les représentations dans le cerveau de la surface transparente et de celle qui nous paraît en dessous sont séparées? D'autres études de neuroimagerie fonctionnelle nous le diront, mais il nous semble probable que la réponse soit positive. Comme la scission impose d'ordonner en profondeur les surfaces, elle nécessiterait la participation d'aires impliquées dans la perception de la profondeur.

L'existence d'une représentation séparée est aussi suggérée par le fait que nous pouvons attribuer de manière efficace des couleurs différentes à la surface recouverte et à celle du filtre (*voir la figure 4*). En fait, par les mécanismes de constance chromatique, même si nous soustrayons de façon automatique la couleur de l'éclairage pour estimer la réflexion des surfaces, nous avons implicitement conscience de sa couleur. Ainsi, nous percevons que l'éclairage est jaunâtre avec une lampe à incandescence et bleuâtre sous la lumière du jour.

Les images qui illustrent cet article ont été fabriquées et ne correspondent pas à des objets réels. Chaque image est construite à partir d'un ensemble de surfaces colorées adjacentes. Comme le proposaient les psychologues gestaltistes, la perception de la transparence colorée ne dépend pas des couleurs individuelles dans les images, mais de leurs relations. La transparence perçue est une illusion, provoquée ici par les changements cohérents, dans l'espace des couleurs, que nous avons introduits dans les images.

La transparence apparaît aussi en conjonction avec plusieurs illusions



visuelles, par exemple, dans le contour subjectif de la figure 5. Dans l'illusion de White, la couleur des bandes alternativement bleues et jaunes diffuse sur les rectangles gris interposés sur les lignes alternées (*voir la figure 5*). Les explications de ce phénomène par des mécanismes de contraste ou bien d'assimilation (où une couleur se mélange avec l'autre) n'ont pas été fructueuses, car l'illusion semble cohérente avec les deux types d'explication. Comme les carrés gris alignés verticalement semblent former des bandes transparentes, une explication possible résiderait dans un déplacement de couleur: le système visuel, dans sa tentative de séparer les couleurs des régions transparentes et des régions opaques recouvertes, attribuerait faussement des couleurs différentes aux régions qui ont le même niveau de gris dans l'image. De manière similaire, on pourrait expliquer l'apparence du carré translucide subjectif de la figure 5 à gauche: le système visuel dissocierait une région transparente et une région opaque.

La perception de la transparence illustre un cas particulier d'une opération générale réalisée par le cerveau comme indispensable à la perception de la surface des objets. Des mécanismes similaires fonctionnent probablement lors de notre perception des surfaces en relation avec les ombres ou les gradients de lumière d'une scène, bien que, dans ces cas, la tâche soit compliquée par le fait que le filtre superposé ne soit pas nécessairement constant sur toute sa surface.

Ken KNOBLAUCH travaille à l'Unité INSERM 371, Cerveau et vision à Lyon. Michel DOJAT est ingénieur de recherche à l'INSERM et il travaille dans l'Unité neuroimagerie fonctionnelle et métabolique (UMR 594, Université de Grenoble-INSERM).

D'ZMURA, M. et al., *Color transparency*, in *Perception*, 1997, vol. 26, p. 471-492.

hémodynamiques et métaboliques révèlent les aires cérébrales activées durant une tâche cognitive ou sensorielle. Afin d'identifier les aires qui interviennent dans la scission colorée, nous avons comparé les signaux détectés lors de la présentation des deux sortes d'images, les unes dont les changements chromatiques sont décrits par une translation (perception de la transparence), les autres où les changements chromatiques sont décrits en termes de cisaillement (pas de perception de la transparence).

Sur les deux figures présentées aux sujets, les changements locaux sont identiques, et seule la perception globale diffère. Ainsi, on s'attend à ce que les régions cérébrales qui intègrent les différences locales de couleurs, afin de former une perception globale, soient activées dans la présentation de la figure transparente. Sur la seconde figure, le «cisaillement des coordonnées» trichromatiques empêcherait cette intégration. Les aires corticales pour lesquelles les différences locales sont codées, mais non intégrées, devraient être identiques sur les deux types de présentation.

Que montrent nos résultats? Les images neuronales qui indiquent la différence d'activité cérébrale – obtenue par soustraction des images dans les deux conditions étudiées – révèlent que plusieurs régions sont activées. L'une d'elles, dénommée V4, est activée lorsqu'on présente aux sujets uniquement des damiers colorés sans transparence. Autrement dit, cette région V4 est activée lorsqu'on analyse des zones colorées. D'autres expériences avaient d'ailleurs souligné la forte sensibilité à la couleur de l'aire V4. Ainsi, nous avons découvert des aires cérébrales spécifiques qui s'activent lors de l'extraction de la cohérence globale, nécessaire à la reconnaissance de la transparence colorée; ces régions diffèrent de celle qui entre en jeu dans la perception de la chromaticité seule (*voir la*