



# Comprendre les circuits cérébraux de l'attention visuelle et leur importance en radiologie

## *Understanding the brain networks of visual attention and their importance in radiology*

**Sébastien Marti**

Ingénieur-Chercheur, Unité de neuro-imagerie cognitive, Inserm U992, Centre NeuroSpin CEA Saclay

### Résumé

Explorer des yeux notre environnement visuel est un acte que nous effectuons continuellement, parfois même sans en avoir véritablement conscience. Avec un minimum d'effort, nous sommes capables de localiser un élément spécifique dans notre environnement. Pourtant, au cours de cet acte anodin, le cerveau traite une quantité colossale d'information. En quelques centaines de millisecondes, il analyse, mémorise, évalue, compare, synthétise et prend des décisions. L'examen radiologique est un exemple très concret de recherche visuelle. Le médecin scrute une image à la recherche d'un ou de plusieurs éléments anormaux. Mais comment le cerveau parvient-il à reconnaître l'information pertinente ? Comment les yeux et l'attention sont-ils guidés dans la scène visuelle ? Pour comprendre et améliorer la manière dont les médecins effectuent ces tâches, il est nécessaire de comprendre comment fonctionne le « moteur de recherche » neuronal.

### Mots-clés

Analyse visuelle ; Radiologie ; Circuits cérébraux

### Abstract

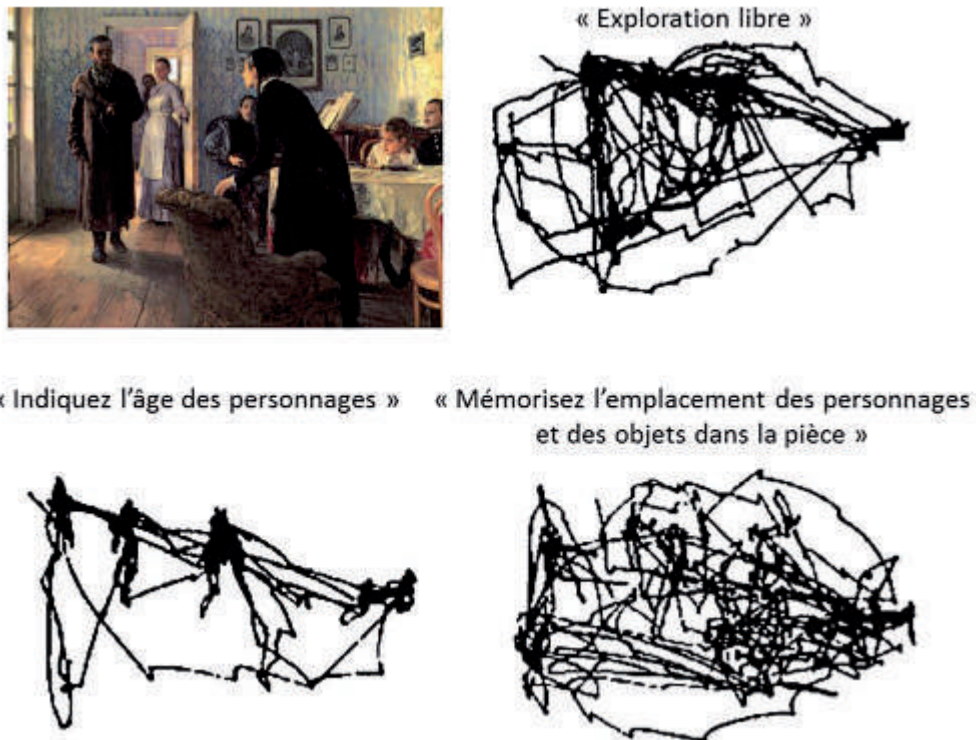
*We continuously explore our environment by means of eye movements, sometimes even without being truly aware of it. With minimal effort, we are able to localize a specific object in the visual scene. Yet, during this simple act, the brain processes a huge amount of information. Within a few hundred milliseconds, it analyses, stores, evaluates, compares, synthesizes and makes decisions. Radiological examination is a very concrete example of visual search. The doctor scans an image in search of one or more abnormal elements. But how does the brain manage to recognize relevant information? How are the eyes and attention guided in the visual scene? In order to understand and improve the way doctors perform these tasks, it is necessary to understand how the neural "search engine" works.*

### Keywords

Visual process; Radiology; Neural network

## Comment explorons-nous notre environnement visuel ?

Le cerveau est extrêmement efficace pour reconnaître des objets dans la scène visuelle. Moins de 200 ms sont nécessaires pour détecter un visage ou un lieu familier, et ce, sans que le moindre effort soit nécessaire. Cette simplicité et cette efficacité surpassent (pour l'instant) largement les meilleurs algorithmes de reconnaissance que l'homme ait pu inventer. Pourtant, il y a des limites à ces capacités. Lorsque de nombreux objets sont présents dans notre environnement, il est souvent nécessaire de chercher, d'explorer la scène visuelle pour trouver l'objet qui nous intéresse car nous sommes simplement incapables de reconnaître une multitude d'objets simultanément. Un radiologue est confronté régulièrement à ce genre de situation. Même avec la pratique, examiner une radiographie ou les résultats d'une IRM demande une inspection minutieuse de l'image pour déterminer si un ou des éléments anormaux sont présents.



**Figure 1**  
*Mouvements oculaires pendant l'exploration visuelle de la peinture « Un visiteur inattendu » d'I.E. Repin dans trois conditions différentes.*

La recherche en neuroscience et en psychologie cognitive s'est évertuée à décortiquer ces mécanismes neuronaux. Dans les années 50, Alfred Yarbus de l'académie des sciences de Moscou a été l'un des premiers à s'intéresser à la manière dont l'homme explore la scène visuelle. En enregistrant les mouvements oculaires, il a révélé que ceux-ci variaient en fonction de la tâche effectuée par un observateur (Figure 1). Les trajectoires des yeux sont drastiquement différentes si la personne explore librement une scène visuelle ou si elle s'intéresse à des points particuliers. Ceci montre que l'attention n'est pas déployée au hasard. Elle est guidée par les buts de l'observateur et par les éléments présents dans la scène visuelle.

Il existe plusieurs systèmes de guidage des yeux et de l'attention. D'abord, les éléments présents dans la scène visuelle, de par leurs caractéristiques physiques, ont une certaine « saillance ». Un objet de couleur rouge au milieu d'objets de couleur verte attirera l'attention d'un observateur que celui-ci soit en train de chercher un objet rouge ou pas. Ensuite, l'attention est guidée par nos objectifs. Si un observateur recherche par exemple la lettre « T » écrite en rouge, l'attention sera d'abord dirigée vers les éléments rouges et tous les éléments ne partageant pas cette caractéristique seront négligés. De manière similaire, un radiologue recherchant des nodules dans un scanner thoracique se focalisera sur des éléments qui sont semblables à des nodules et négligera les autres éléments de la scène visuelle. Cette stratégie permet d'optimiser l'inspection visuelle. Plutôt que de « scanner » systématiquement l'image dans son intégralité, l'attention et les yeux sont guidés directement vers les éléments les plus pertinents. Par exemple, une étude a montré que des radiologues recherchant des nodules pulmonaires ne parcouraient que 26 % du parenchyme pulmonaire, ce qui est relativement peu, mais le volume inspecté contenait 75 % des nodules [1].

Finalement, les propriétés statistiques de la scène visuelle et le contexte peuvent influencer la recherche visuelle. Un radiologue à la recherche d'un nodule n'effectuera sa recherche que dans des zones où des nodules ont effectivement une probabilité d'apparaître. Cette adaptation de notre moteur de recherche semble avisée : Il est plus efficace de considérer d'abord les cas les plus probables et de négliger les cas improbables. Dans le cadre de l'examen radiologique, cette stratégie peut cependant se retourner contre le médecin. La prévalence d'une maladie influence le taux de faux négatifs, c'est-à-dire d'éléments manqués. Plus la maladie est rare, plus les risques de rater ces éléments sont importants. Une étude a par exemple montré qu'augmenter artificiellement la prévalence du cancer du sein permet de diminuer fortement le taux de faux négatifs lors de l'examen mammographique [2].

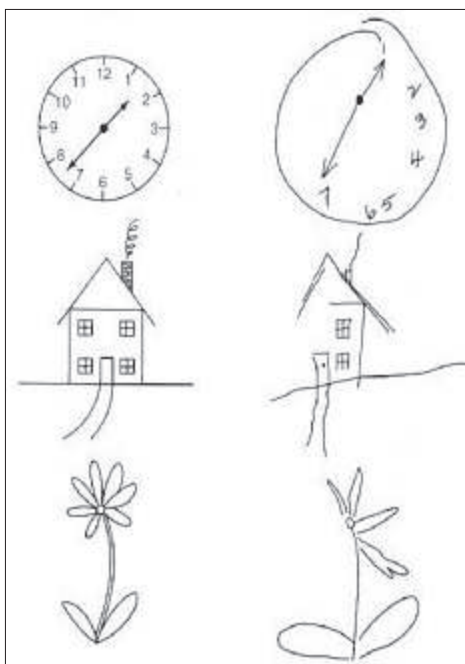


## Comment modéliser l'attention ?

Il semble évident que ces différents systèmes de guidage de l'attention se combinent pour accroître l'efficacité de l'inspection visuelle. Mais par quels mécanismes cette combinaison s'opère-t-elle ? Est-il possible de modéliser le fonctionnement de l'attention chez l'homme ? Anne Treisman de l'université de Princeton a proposé un premier modèle pouvant expliquer une partie des observations expérimentales. La première étape de ce modèle consiste en l'analyse par le cortex visuel des caractéristiques physiques de l'image et de chaque stimulus qui la compose. Ces différentes caractéristiques sont traitées de manière automatique et inconsciente par des régions spécialisées du cortex. Le cerveau formerait ensuite une carte des caractéristiques présentes dans l'image. Dans la seconde étape de traitement, l'attention permettrait d'intégrer les différentes caractéristiques individuelles de chaque stimulus pour former une représentation unifiée. L'ensemble de ces représentations formerait une seconde carte, dite « maîtresse », des éléments présents dans la scène visuelle. C'est grâce à cette carte maîtresse que l'observateur pourra procéder à l'inspection de chacun des éléments présents [3].

Inspiré par l'idée d'une carte maîtresse, Christof Koch de l'Allen Institute for Brain Science et ses collaborateurs ont proposé la notion de « saillance » sensorielle d'un stimulus. La saillance représente la différence d'un stimulus par rapport au reste de la scène visuelle [4]. Le cerveau pourrait ainsi construire une carte de saillance sensorielle représentant tous les stimuli présents dans la scène visuelle. Chaque élément de cette carte représente un élément de la scène visuelle et à quel point celui-ci se distingue du reste de l'image. Implémenté sous forme d'algorithme, ce modèle fut capable de prédire avec succès les mouvements oculaires de sujets humains effectuant une recherche visuelle. Jeremy Wolfe de l'université d'Harvard a proposé par la suite que les cartes de saillance puissent correspondre à l'intégration à la fois des influences sensorielles mais aussi des influences volontaires, guidées par les buts de l'observateur. Ceci permettrait de déterminer un ordre de priorité dans l'exploration visuelle correspondant à la stratégie du sujet pour localiser la cible le plus efficacement possible [5]. L'attention est dirigée sur les éléments successifs de cette carte dans l'ordre de leur priorité. Les éléments sont sélectionnés les uns après les autres et comparés à la représentation interne de la cible. À chacune de ces étapes, une décision est prise : est-ce que cet objet correspond à la cible recherchée ?

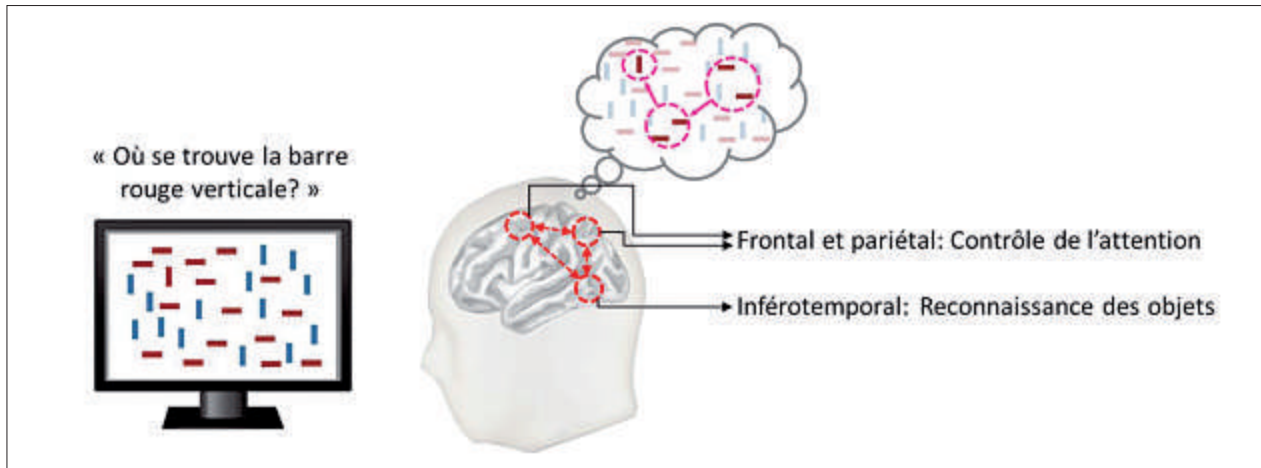
Ces modèles computationnels permettent d'inférer les types d'opération effectuées par le cerveau pendant l'exploration de la scène visuelle. S'ils diffèrent dans leurs mécanismes précis, la plupart suggèrent que notre capacité à explorer notre environnement visuel repose sur des interactions dynamiques entre un système chargé de la reconnaissance des objets et un système chargé du contrôle de l'attention et des mouvements. Existe-t-il des corrélats neuronaux de ces systèmes ? Existe-t-il des régions cérébrales capables de représenter la saillance sensorielle d'un stimulus ? Les techniques de neuro-imagerie appliquées à l'homme et à l'animal ont permis des avancées décisives sur cette question et les résultats expérimentaux permettent de compléter les modèles théoriques.



### Neuroanatomie fonctionnelle d'un moteur de recherche

C'est l'examen clinique de patients atteints de lésions cérébrales qui a permis une première identification des régions impliquées dans le contrôle de l'attention. Des lésions dans les cortex pariétal et frontal entraînent un déficit attentionnel ou « héminegligence ». Les patients ne sont pas aveugles mais ont d'énormes difficultés à porter attention aux objets présents dans l'hémi-champ visuel contra-latéral à l'hémisphère lésé. Ils mettent beaucoup plus de temps pour trouver un élément cible dans la scène visuelle et le nombre d'erreurs augmente. Dans la figure 2, un patient atteint d'une lésion pariétale droite tente de reproduire trois dessins. Dans les trois cas, la partie gauche du dessin — qui est traitée par l'hémisphère droit — est systématiquement omise.

**Figure 2**  
*Reproduction de trois dessins (gauche) par un patient atteint d'héminegligence (droite)*



**Figure 3**

*Schématisation des mécanismes neurologiques de l'attention. Un observateur tente de localiser le plus rapidement possible la barre verticale rouge sur un écran. Les cortex pariétaux et frontaux, chargés du contrôle spatial de l'attention, modulent l'activité du cortex inférotemporal chargé de la reconnaissance des formes.*

La neuroimagerie et l'électrophysiologie ont permis une exploration plus détaillée des structures cérébrales impliquées dans le contrôle de l'attention. Dans le champ oculaire frontal par exemple, une région située dans la partie postérieure des gyri frontaux supérieurs et moyens (figure 3), on trouve typiquement des neurones impliqués dans le contrôle des mouvements oculaires. Ces neurones sont sélectifs d'un endroit dans l'espace et s'activent lorsque les yeux doivent être déplacés à cet endroit précis. Cependant, des études ont révélé qu'il existait aussi dans cette région des neurones qui s'activent même lorsqu'aucun mouvement n'est accompli. Ces neurones sont sélectifs du stimulus recherché, et cette sélectivité évolue en fonction de la pertinence du stimulus plutôt qu'en fonction de ses caractéristiques physiques. L'activité neuronale dans le champ oculaire frontal est donc tout à fait compatible avec l'hypothèse d'une carte de saillance influencée par la tâche que l'observateur est en train d'accomplir.

D'autres cartes de saillance ont également été observées dans le sulcus intrapariétal latéral, un sillon profond dans la partie postérieure du lobe pariétal. Dans cette région, les neurones s'activent initialement pour tous les stimuli présentés, qu'ils soient pertinents ou non pour la tâche effectuée. Cependant, après environ 130 ms, leur activité est modulée par la pertinence du stimulus, et cette modulation est directement liée à la réponse de l'observateur [6].

Les régions du cerveau impliquées dans le contrôle de l'attention interagissent directement avec celles impliquées dans la reconnaissance des objets. Celles-ci sont principalement localisées dans les régions ventrales et inférieures du lobe temporal. Les neurones spécifiques de la reconnaissance des visages par exemple sont localisés dans le gyrus fusiforme alors que ceux impliqués dans la reconnaissance d'un endroit familier sont situés dans une région plus médiale, le gyrus parahippocampique. Lorsque plusieurs objets sont présentés, le cerveau doit déterminer lequel est pertinent pour la tâche. Des études ont montré que l'activité des neurones est amplifiée lorsque l'objet présenté est une cible (pertinent pour la tâche effectuée). Cette modulation de l'activité neuronale est forte lorsque l'observateur identifie correctement une cible alors qu'elle est beaucoup plus faible lorsqu'il commet une erreur. Aussi, lorsqu'un élément « distracteur » est présenté, c'est-à-dire un stimulus qui a des caractéristiques physiques communes avec la cible sans en être une, la même modulation de l'activité neuronale est observée mais pour une période très brève uniquement.

Les interactions entre ces régions est un élément essentiel de la sélection et de la reconnaissance d'un objet dans l'espace. En fait, l'inactivation artificielle du champ oculaire frontal pendant l'exploration visuelle élimine l'effet de l'attention. Tous les objets dans la scène visuelle sont traités de la même manière par les neurones de la région inférotemporale et la performance de l'observateur se dégrade [7]. A l'inverse, la stimulation électrique du champ oculaire frontal augmente la réponse neuronale dans la région inférotemporale et biaise l'attention du sujet vers la région spatiale stimulée.

Ces études montrent que la sélection et la reconnaissance d'un objet dans le champ visuel repose sur l'interaction entre différentes aires cérébrales formant un réseau. Chaque aire a des propriétés spécifiques mais celles-ci peuvent évoluer au cours du temps et en fonction des opérations effectuées par les autres





membres du réseau. Il est intéressant de noter par exemple que ce réseau cérébral est essentiellement le même que l'observateur effectue ou non des mouvements oculaires. Seule la connectivité du réseau est modifiée si la tâche nécessite une réponse motrice.

## Les limites du moteur de recherche neuronal

Si notre système de guidage de l'attention est très efficace, il n'est pas infaillible pour autant. Parfois des erreurs ou des négligences se produisent. L'attention agit comme un filtre et l'observateur restera « aveugle » à toute information qui ne correspond pas à ce filtre. Une expérience très célèbre a illustré ce genre d'aveuglement fonctionnel de manière frappante. Un observateur regarde deux équipes de basket ball (joueurs en noir et joueurs en blanc) qui s'échangent le ballon. On demande à la personne de compter le nombre de passes que font les joueurs en blancs. La tâche est difficile — de nombreux joueurs se déplacent et les passes sont nombreuses — mais la majorité des gens s'en sortent honorablement. Au milieu de la séquence, sans que les personnes soient prévenues, un nouveau joueur entre sur le terrain mais déguisé en gorille noir. Il s'arrête, effectue quelques pas de danse puis repart. Aussi surprenant que cela puisse paraître, la plupart des observateurs ne s'aperçoivent pas de la présence du gorille [8]. Pendant qu'il compte les passes, l'observateur se focalise sur les joueurs en maillot blanc. La couleur noire est ainsi filtrée par l'attention et le personnage déguisé en gorille, aussi inattendu soit-il, n'est pas perçu consciemment. Bien entendu, cet effet disparaît totalement si on demande à l'observateur de compter les passes des joueurs en noir. Dans cette situation, l'attention se focalise sur la couleur noire et le gorille est alors perçu.

Ce type d'aveuglement est observable également dans un contexte clinique. L'équipe de Jeremy Wolfe a conduit une expérience dans laquelle des radiologues examinaient des images de tomodensitométrie à la recherche de nodules pulmonaires. L'image d'un gorille — en hommage à l'expérience de Simons — était insérée dans l'une des images de poumon. Plus de 80 % des radiologues ne se sont pas aperçus de la présence du gorille dans le poumon. Pourtant la plupart d'entre eux ont effectivement regardé le dessin du gorille — en moyenne les radiologues fixaient le gorille pendant environ 1 seconde — mais malgré tout, le stimulus n'était pas perçu consciemment. Même après un entraînement intensif, la perception des médecins est elle aussi sujette à « l'aveuglement par inattention » illustré par l'expérience de Simons.

Il existe d'autres limites à notre perception liées à l'incapacité du cerveau humain à exécuter plusieurs tâches simultanément. Par exemple, si on demande à une personne d'identifier deux images différentes présentées en moins d'une demi-seconde, la perception de la première image dégrade fortement la perception de la seconde, à tel point que la personne aura parfois l'impression que seule la première image a été présentée. C'est un effet purement attentionnel : si on demande à la même personne de n'identifier que la seconde image, alors la performance de reconnaissance est parfaitement normale. Ceci montre que l'effort d'attention déployé pour identifier la première image va temporairement dégrader l'identification de la seconde image. Par analogie au clignement des yeux, on parle alors de clignement de l'attention [9]. Pendant l'exploration de la scène visuelle, lorsque l'observateur perçoit un élément intéressant, ses chances de percevoir un second élément tout aussi pertinent sont fortement diminuées pendant environ une demi-seconde [10]. Des études en neuro-imagerie ont récemment montré que ces limitations étaient fondamentalement liées à la manière dont notre cerveau traite l'information sensorielle. Les cortex sensoriels sont capables de traiter une multitude d'information simultanément, mais la représentation consciente de cette information est une étape strictement sérielle [11]. Cette opération centrale permet la « reconstruction » du stimulus — associer la forme d'un stimulus à sa couleur, sa position dans l'espace, sa position dans le temps et sa position par rapport à d'autres objets — et permet également de déterminer s'il peut être associée à une réponse motrice.

Ces études montrent que notre perception est un processus de reconstruction qui a ses propres contraintes et ses propres limites. La manière dont nous explorons l'environnement va véritablement modeler la manière dont nous le percevons.

## Les traitements non-conscients

Les contraintes que nous venons d'évoquer s'appliquent essentiellement à notre représentation consciente de l'environnement. Mais le cerveau traite en réalité beaucoup plus d'information. Ces dernières années, plusieurs laboratoires de recherche ont tenté de comprendre et d'évaluer la complexité des opérations



que le cerveau effectue inconsciemment. Par exemple, une erreur grammaticale dans une phrase, le sens d'un mot, ou la moyenne approximative de plusieurs chiffres peuvent être détectés inconsciemment. Une étude a examiné dans quelle mesure des radiologues étaient capables de déterminer l'anormalité d'une image médicale lorsque celle-ci était présentée très brièvement. Même lorsque l'image était présentée pendant seulement un quart de seconde, les radiologues étaient capables d'estimer si elle contenait une anomalie avec un score de performance au-dessus du hasard. En comparaison, des personnes n'appartenant pas au corps médical répondaient complètement au hasard. Ce qui est le plus surprenant dans cette étude, c'est que même si les radiologues avaient l'impression qu'une image était anormale, ils étaient malgré tout incapables de déterminer où se trouvait l'anomalie. La même expérience fut répliquée avec des cytologistes et des images de micrographie et les mêmes résultats ont été obtenus [12].

Ces études montrent que les opérations effectuées inconsciemment par notre cerveau peuvent être d'une complexité surprenante et que l'information issue de ces opérations n'est pas totalement perdue. Elle peut dans une certaine mesure être utilisée et peut influencer nos perceptions et nos décisions.

## Conclusion

Notre connaissance de la neurologie de l'attention s'est incroyablement développée ces dernières décennies mais des questions importantes restent à résoudre, et plusieurs d'entre elles sont directement pertinentes pour l'examen radiologique : Peut-on déterminer une stratégie optimale de recherche visuelle ? Comment palier aux contraintes et limites de notre moteur de recherche ? L'information traitée inconsciemment pourrait-elle être mieux utilisée ? Une assistance à la recherche visuelle par ordinateur pourrait-elle être véritablement efficace ? Ces questions sont centrales et les futures recherches dans ce domaine auront un impact non seulement en radiologie, mais également en sciences fondamentales et en intelligence artificielle.

## Références

1. Rubin GD, Roos JE, Tall M, Harrawood B, Bag S, Ly DL, Seaman DM, Hurwitz LM, Napel S, Roy Choudhury K. Characterizing search, recognition, and decision in the detection of lung nodules on CT scans: elucidation with eye tracking. *Radiology* 2015;274:276-286.
2. Evans KK, Birdwell RL, Wolfe JM. If you don't find it often, you often don't find it: why some cancers are missed in breast cancer screening. *PLoS One* 2013;8:e64366.
3. Treisman, A, Gelade, G. A feature-integration theory of attention. *Cogn Psychol* 1980;12:97-136.
4. Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry. *Human neurobiology* 1985;4:219-27.
5. Wolfe JM, Cave KR, Franzel SL. Guided search: an alternative to the feature integration model for visual search. *Journal of experimental psychology* 1989;15:419-33.
6. Thomas NW, Pare M. Temporal processing of saccade targets in parietal cortex area LIP during visual search. *Journal of neurophysiology* 2007;97:942-47.
7. Monosov IE, Sheinberg DL, Thompson KG. Paired neuron recordings in the prefrontal and inferotemporal cortices reveal that spatial selection precedes object identification during visual search. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2010;107:13105-13110.
8. Simons, DJ, Chabris CF. Gorillas in our midst: sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception* 1999;28:1059-74.
9. Raymond JE, Shapiro KL, Arnell KM. Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: an attentional blink? *Journal of experimental psychology* 1992;18:849-60.
10. Adamo SH, Cain MS, Mitroff SR. Self-induced attentional blink: a cause of errors in multiple-target search. *Psychol Sci* 2013;24:2569-74.
11. Marti S, King JR, Dehaene S. Time-Resolved Decoding of Two Processing Chains during Dual-Task Interference. *Neuron* 2015;88:1297-1307.
12. Evans KK, Georgian-Smith D, Tambouret R, Birdwell RL, Wolfe JM. The gist of the abnormal: above-chance medical decision making in the blink of an eye. *Psychonomic Bulletin & Review* 2013;20:1170-75.

**Lien d'intérêt : aucun**