

## Détection collective

---

jean louis Dessalles  
Télécom Paris - Département Informatique  
46 rue Barrault - 75634 PARIS Cedex 13  
Tel.: (1) 45 81 75 29 - Fax: (1) 45 81 31 19  
E-Ⓜ: dessalles@enst.fr

### résumé

Pour qu'une entité puisse être qualifiée d'intelligente, il faut qu'on soit en mesure de lui prêter des capacités de perception et/ou des capacités d'action suffisamment intégrées pour qu'elles soient adaptables. En particulier, elle doit être capable de *détecter* les situations qui appellent un changement de représentation ou une action appropriés.

Nous considérons ici plus particulièrement le cas d'une entité capable de percevoir de manière intégrée, et dont les différents niveaux d'intégration, y compris le niveau le plus élevé, restent distribués. Une telle entité peut être considérée de ce point de vue comme dépourvue de contrôle central. Le fonctionnement des différents niveaux, et notamment du niveau supérieur, tel que nous pouvons l'imaginer à partir de notre compréhension du système nerveux, peut nous fournir un modèle de certains processus collectifs intelligents, notamment les processus qui permettent à un système collectif de réaliser des opérations de détection sans centralisation d'information.

**mots clés:** détecteur, décision collective, émergence, connexionnisme, cohérence

### 1. Hirondelles et neurones

Un système qui ne disposerait pas du moyen de détecter les situations pertinentes dans lesquelles il doit agir ou modifier son état pourrait difficilement être qualifié d'intelligent. Il en est de même pour un système intelligent collectif. La question se pose alors de savoir comment une situation peut être collectivement détectée. De plus, lorsque la détection conduit à une décision (modification des représentations et/ou déclenchement d'action), nous devons comprendre comment la détection collective peut mener à la décision.

Prenons le cas d'une entité capable de réaliser une action qualitative particulière. Cette entité est supposée disposer de capteurs qui lui fournissent l'état de son environnement par l'intermédiaire de paramètres qui prennent à chaque instant une valeur dans un ensemble éventuellement continu. Si cette entité est adaptée à son environnement, alors l'action n'est pas déclenchée au hasard, mais pour certains domaines de valeurs des paramètres. Le lien qui relie les paramètres à l'action est donc

non linéaire, il comporte typiquement des seuils. Nous appelons détecteur un système non linéaire comportant deux états (actif et non actif), capable de s'activer dans des régions de l'espace des paramètres qu'il reçoit en entrée. Il peut transmettre son activation à d'autres détecteurs ou à des effecteurs. L'entité évoquée ci-dessus comporte nécessairement un détecteur. S'il s'agit d'une entité fortement intégrée, elle comportera de nombreux étages de détection.

Un neurone formel est un bon exemple de détecteur. Mais nous nous intéressons ici à des détecteurs collectifs, c'est-à-dire à des détecteurs formés de plusieurs éléments identiques et fonctionnellement équivalents. Donnons deux exemples de détecteurs collectifs.

Du point de vue du traitement de l'information, un humain peut être considéré grossièrement comme une collection de neurones. Personne n'imagine sérieusement que le niveau d'intégration le plus élevé, qui est éventuellement celui qui relie la perception d'une situation donnée à une action, puisse être assuré à un moment quelconque par un neurone unique. Au niveau neuronal, la reconnaissance d'une situation entraînant le déclenchement d'une action particulière est une reconnaissance collective.

Notre deuxième exemple provient d'une modélisation, sans doute sommaire et inexacte, du comportement migratoire des hirondelles. Mais peu importe l'adéquation entre le modèle et la réalité ornithologique, puisqu'il s'agit ici de montrer la faisabilité de certains types de détection collective.

Dans notre petit modèle concernant les hirondelles, la décision de migrer n'est pas non plus le fait d'une hirondelle unique. Les hirondelles du quartier se rassemblent un jour en grand nombre sur un toit ou sur des lignes électriques (alors qu'on ne les voit jamais se poser en temps normal). Elles ne se rassemblent qu'une seule fois, et ce jour-là est celui du départ. La détection du moment opportun apparaîtra dans notre modèle comme une détection collective, car nous décrirons ce phénomène comme une conséquence du comportement de chaque individu, sans qu'aucune centralisation de l'information n'ait lieu.

## **2. Détection collective et niveaux d'organisation**

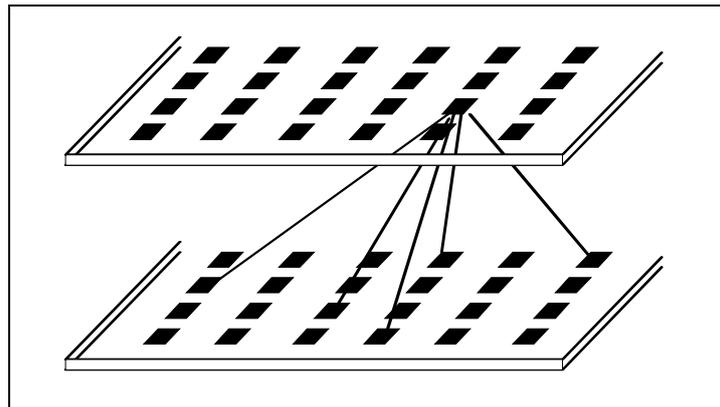
Le phénomène de détection collective est loin d'être marginal. Si l'on prend l'exemple d'une entité fortement intégrée comme le système nerveux, l'opération de détection n'intervient pas seulement au niveau d'intégration le plus élevé, mais aussi aux niveaux d'organisation intermédiaires. Le fait même de parler de niveaux d'organisation suppose qu'un élément du niveau  $n$  puisse être activé pour certaines configurations d'activation des éléments de niveaux  $n-1$ , et que les éléments de chaque niveau soient donc des détecteurs [dessalles 1992]. Nous pouvons émettre et explorer l'idée que ces détections intermédiaires, comme les détections du niveau le plus élevé, sont elles-mêmes collectives.

Le concept de détection collective devient alors essentiel pour la description des niveaux d'organisation d'un système intégré. Dans le cas du système nerveux, il permet de donner une plausibilité biologique à la notion de détecteur, qui n'est au départ qu'une notion abstraite postulée pour rendre compte de phénomènes perceptifs.

En effet l'organisation de la perception en niveaux de détection rend bien compte de phénomènes comme la perception d'objets émergents [dessalles 1992], elle est compatible avec le traitement hiérarchisé observé par exemple dans le système visuel, mais elle semble contradictoire avec le fait généralement admis qu'aucune fonction perceptive n'est concentrée sur un seul neurone (inexistence des neurones "grand-mère"). Autrement dit le rôle de détecteur perceptif ne saurait être

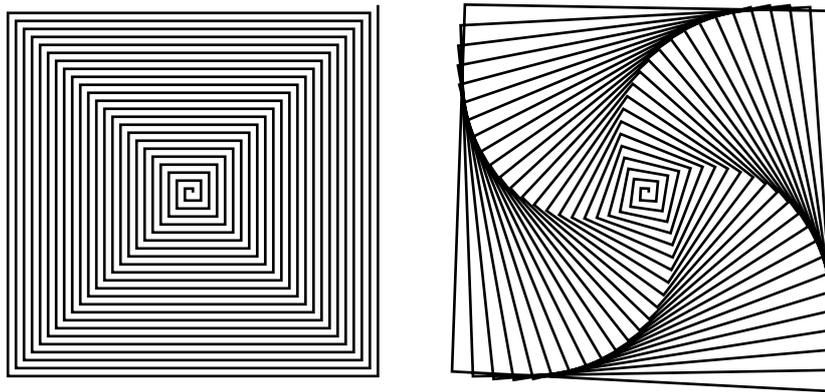
assuré par un neurone unique. Il s'agit alors de savoir comment les détecteurs sont matériellement représentés.

Dans la version localiste d'une hiérarchie de détecteurs câblés (figure 1), chaque détecteur de la couche  $n$  reçoit des connexions physiquement identifiables de détecteurs de la couche  $n-1$ . Une telle organisation permet d'assurer que les objets détectés par tous ces détecteurs dans une situation donnée sont structurés en une hiérarchie d'appartenance [dessalles 1992]. On peut ainsi expliquer des phénomènes comme la perception d'un objet émergent de niveau  $n$ , lorsqu'un détecteur de niveau  $n$  est soudainement activé par des détecteurs actifs de niveau  $n-1$ .



**figure 1:** hiérarchie de détecteurs câblés: chaque détecteur reçoit comme entrées les sorties de détecteurs du niveau immédiatement inférieur. On peut imaginer qu'un détecteur est une porte "AND", un neurone formel, ou comme suggéré ici, un groupe de neurones.

Pour prendre l'exemple du système visuel, notre perception des formes semble fortement hiérarchisée, comme les travaux classiques de D. Hubel & T. Wiesel ont commencé à le montrer il y a plus de vingt ans. L'intégration commence dès la rétine, et se poursuit jusqu'au néocortex. Schématisons-la par la chaîne suivante: pixels rétinien → centres on-off → segments élémentaires orientés → contours → objets → scène. Les objets détectés dans une scène donnée par cette chaîne de détection sont bien dans une hiérarchie d'appartenance. Par exemple, les segments élémentaires d'un objet perçu appartiennent à cet objet. Cela est dû au fait que les détecteurs de contours sont alimentés par les détecteurs de segments élémentaires, comme on peut le vérifier en voyant "émerger" la spirale à droite de la figure 2. Les détecteurs de niveau contour, qui ne détectaient que la spirale carrée continue dans la figure de gauche, sont maintenant activés par la perception de segments éloignés en dimension 1 mais qui, avec l'angle de  $89^\circ$ , sont devenus voisins en dimension 2. Leur agencement provoque l'activation d'un détecteur de contour qui, lorsqu'elle est "soudaine", se traduit dans le sentiment perceptif que la spirale arrondie de droite émerge.



**figure 2:** La spirale quasi carrée (angle de  $89^\circ$ ) créée par la tortue Logo à droite fait "émerger" une spirale arrondie à quatre branches (d'après [Lawler 1980]).

Le phénomène d'émergence est donc caractéristique d'une organisation en niveaux, et nous avons ainsi de bonnes raisons de penser que de nombreux systèmes naturels de perception intégrée sont réalisés par des détecteurs structurés en niveaux. Mais rien n'indique que le lien qui transmet l'activation d'un niveau vers le niveau supérieur adjacent soit de type localiste.

Si l'on considère le cas des systèmes neuronaux, des considérations biologiques et connexionnistes (distribution, fiabilité, taux d'intégration,...) laissent penser qu'au contraire, les détecteurs d'un niveau donné ne sont pas constitués par des neurones, mais par des groupes de neurones. Autrement dit, le schéma de la figure 1 explique ce qui se passe au niveau fonctionnel, mais une implémentation avec des détecteurs collectifs correspond à la structure décrite en figure 3.

Le lien qui permet à un détecteur de niveau  $n-1$  d'activer un détecteur de niveau  $n$  n'est donc pas matérialisé par un axone. Les détecteurs des systèmes neuronaux naturels semblent distribués quel que soit leur niveau, et les neurones qui les composent réalisent donc des détections collectives.

Il nous faut donc tenter de donner un schéma plausible pour de tels détecteurs collectifs, en expliquant comment se manifeste l'activation et comment elle se transmet.

### 3. Détection collective et cohérence temporelle

Tout modèle de fonctionnement d'un détecteur collectif doit par définition respecter la contrainte de non-centralisation de l'information détectée. En particulier, l'activité du détecteur doit être portée par un phénomène physique défini au niveau collectif et dépourvu de signification au niveau d'un composant du détecteur. Il en est de même pour le système physique qui transmet l'activation: il doit lui aussi rester collectif.

Par quoi, donc, se traduit l'activation d'un détecteur collectif ? Pour quelques raisons que nous allons expliciter, nous suggérons que cette activation peut être caractérisée dans le cas neuronal par une activité cohérente des neurones qui composent le détecteur. Nous envisagerons ensuite l'extension éventuelle à d'autres cas de détection collective.

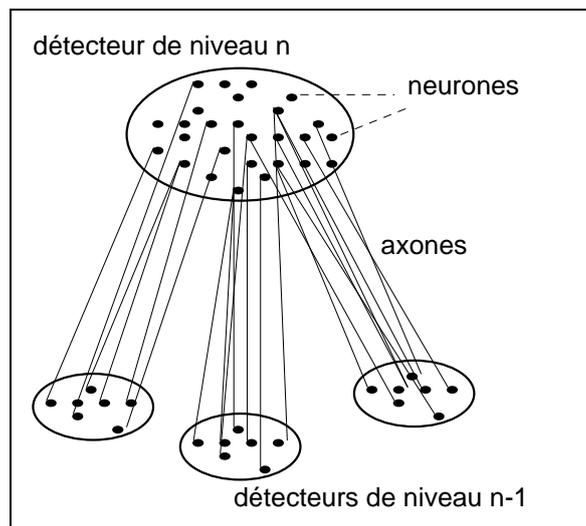
Dans le cas des neurones naturels, la cohérence se traduit par une émission synchronisée de potentiels d'action. Les neurones émettent spontanément des potentiels d'action, mais généralement sans coordination avec d'autres neurones. La cohérence temporelle est un bon candidat pour caractériser l'activation d'un détecteur collectif neuronal pour au moins trois raisons.

Tout d'abord, il s'agit d'une relation simple entre les neurones, et nous sommes "en droit" d'attendre une relation simple. En effet, le problème étant symétrique par nature, nous pouvons

exiger du motif d'activation qu'il soit lui-même symétrique, ou stochastiquement symétrique (i.e. rôle statistiquement équivalent pour chaque neurone). La synchronisation est l'une des relations symétriques les plus simples que l'on puisse imaginer. L'avantage d'une relation simple est que son déclenchement pourra être simple lui aussi. On comprend aisément comment la synchronisation des neurones d'un détecteur de niveau  $n$  peut être obtenue par synchronisation avec les neurones afférents de niveau  $n-1$ , autrement dit par l'action des détecteurs afférents actifs au niveau  $n-1$ . Nous détaillerons cet aspect plus loin.

Le deuxième argument vient de ce que la synchronisation neuronale est biologiquement vraisemblable. Elle est observée par exemple dans le cortex visuel, où l'on vérifie que les neurones répondant à une même zone du champ visuel, mais situés dans des aires différentes (comme l'aire V4 qui traite la couleur et l'aire V5 (aire MT) où les mouvements sont détectés), deviennent synchrones lorsqu'ils répondent au même objet du champ visuel [Zeki 1992]. Le même phénomène a été observé dans des zones sous-corticales comme le bulbe olfactif [Freeman 1991].

La troisième raison qui nous pousse à considérer la synchronisation comme un phénomène possible pour marquer le résultat d'une détection collective vient de notre connaissance de mécanismes inter-neuronaux qui la rendent possible. Par exemple, une stabilisation des synapses qui suit la loi de Hebb peut rendre un réseau de neurones artificiels *cohérent* : deux neurones d'un réseau cohérent seront soit toujours simultanément actifs, soit jamais actifs en même temps.



**figure 3:** implémentation neuronale de deux niveaux de détection collective. Chaque détecteur correspond à un carré élémentaire dans le schéma de la fig. 1, et un groupe d'axones implémente un trait de la fig. 1. Les neurones d'un détecteur reçoivent des synapses excitatrices de leurs voisins, ainsi que des synapses excitatrices en provenance de neurones appartenant à des détecteurs de niveau inférieur (ou à des capteurs). Si peu de détecteurs de niveau  $n-1$  sont actifs de manière synchrone, peu de neurones du détecteur de niveau  $n$  peuvent sommer une activité suffisante, et cette activité "se perd" dans les connexions latérales. En revanche, l'activité d'un nombre suffisant de détecteurs de niveau  $n-1$  permet au détecteur de niveau  $n$  de "s'embraser": ses neurones deviennent synchrones.

Il reste à expliquer comment l'activation est transmise d'un niveau à l'autre, et dans le cas des neurones, grâce à quel câblage. Il s'agit ensuite de se demander comment un tel câblage peut s'établir.

## 4. Déclenchement d'une détection collective neuronale

La notion de niveaux de détection est au départ une notion abstraite. Elle est postulée pour rendre compte notamment de certains effets perceptuels (émergence, illusions, etc.). Elle reste remarquablement compatible avec ce que l'on sait de l'organisation neuronale naturelle, mais sa plausibilité suppose que nous puissions imaginer un mécanisme vraisemblable pour le fonctionnement des détecteurs.

Nous sommes donc confrontés à la question de savoir comment un détecteur collectif peut être déclenché par l'activité de détecteurs collectifs du niveau inférieur, autrement dit nous devons préciser le type de câblage, au niveau neuronal, qui permet d'"alimenter" les détecteurs collectifs. Plus précisément, dans notre optique, il s'agit de comprendre comment l'activité synchrone de neurones de niveau  $n-1$  peut déclencher l'activité d'un groupe de neurones donné au niveau  $n$ . Il s'agit en quelque sorte de définir ce qui caractérise les niveaux d'un point de vue structurel.

### *Des détecteurs collectifs cohérents*

L'hypothèse la plus simple que nous pouvons faire semble être qu'un détecteur collectif est formé d'un ensemble cohérent de neurones: les connexions internes au détecteur sont excitatrices, et les connexions avec des neurones externes sont inhibitrices<sup>1</sup>. Il peut s'ensuivre un phénomène de seuil, caractéristique de tout détecteur: si très peu de neurones du détecteur sont actifs de manière synchrone, alors les excitations qu'ils propagent ont peu de chance d'être sommées par d'autres neurones du détecteur. En revanche, sous l'effet d'une excitation synchrone extérieure, un nombre suffisant de neurones du détecteur peuvent devenir actifs et ainsi "embraser" le détecteur (cf. figure 3).

Un tel schéma suppose l'existence d'un câblage excitateur interne au détecteur, et d'un câblage excitateur en provenance des détecteurs afférents. Et la question se pose de savoir comment un tel câblage peut s'établir. Cette question est essentielle dans les systèmes naturels, pour lesquels il faut résoudre le contraste entre l'apparente complexité du câblage ( $10^{15}$  synapses) et la relative simplicité de son codage génétique (moins de  $10^5$  gènes).

### *Des détecteurs collectifs pseudo-locaux*

Sans prétendre fournir une réponse précise, nous pouvons rappeler ici quelques éléments de réponse souvent mentionnés dans des contextes similaires. Le câblage excitateur interne peut être associé à la topologie des détecteurs. Si l'on pense à des détecteurs constitués de neurones proches (détecteurs collectifs pseudo-locaux), alors un système de connexions latérales rappelant le "chapeau mexicain" de T. Kohonen [1984] peut définir un ensemble de détecteurs collectifs avec un coût de codage architectural très faible.

De plus, le câblage excitateur afférent peut être lui aussi réalisé avec un faible coût grâce aux propriétés topologiques de tels détecteurs collectifs pseudo-locaux. Il suffit que des connexions en provenance d'un détecteur afférent se projettent à l'intérieur du détecteur cible. La mise au point fine peut être assurée par une sélection synaptique. Seules sont conservées les synapses qui sont fonctionnelles au sens de Hebb: lorsque tous les détecteurs afférents, ou une grande partie d'entre eux, sont actifs, le détecteur cible devient actif aussi, même si le câblage est grossier. Les synapses qui favorisent cette synchronisation sont alors stabilisées. En revanche les synapses qui se perdent dans des détecteurs voisins, non actifs, dégénèrent. Une telle stabilisation peut s'opérer sans apport d'information extérieure, par exemple grâce à des générateurs aléatoires qui respectent la topologie [Shatz 1992]. Le coût de codage d'une telle architecture reste faible.

---

<sup>1</sup> Les connexions externes peuvent être aussi quelconques ou inexistantes, mais des connexions inhibitrices permettent d'augmenter le contraste, comme le note T. Kohonen [1984].

Ce schéma n'est pas le seul auquel on puisse penser, et surtout il n'implique pas nécessairement une architecture *neuronale* hiérarchique avec propagation ascendante, contrairement à ce qui était suggéré par la figure 3. Rappelons que dans notre modèle, la hiérarchie existe entre les détecteurs, mais rien n'est dit du niveau neuronal. En particulier, on peut imaginer que les mêmes neurones peuvent être impliqués dans des détecteurs de niveaux différents ! Les détecteurs de haut niveau étant par exemple caractérisés par des synapses excitatrices internes de poids plus faible.

## 5. Détection collective et décision

Dans le cas neuronal, ce qui a été dit pour la liaison entre deux détecteurs de niveaux adjacents n'a pas à être modifié pour rendre compte de la "décision" collective<sup>2</sup>, c'est-à-dire de la connexion d'un détecteur du niveau le plus élevé avec l'un des effecteurs collectifs disponibles. Un tel système est un modèle simple de décision collective, et il peut rendre compte de certaines décisions du type perception → action.

L'analogie entre la description que nous venons de faire d'un mode de fonctionnement neuronal possible et d'autres situations de décision collective ne va pas toujours de soi, mais nous pensons qu'elle peut néanmoins se révéler féconde dans certains cas.

Elle ne va pas de soi parce que contrairement à ce qui semble être le cas dans le cerveau, les éléments qui constituent les détecteurs sont souvent les mêmes entités physiques que ceux qui constituent les effecteurs (penser aux abeilles, aux hirondelles, aux agents économiques, etc.). De plus, dans les cas de décision collective couramment évoqués, les mêmes éléments sont systématiquement impliqués dans des niveaux de détection différents.

Nous ne tenterons pas ici de pousser l'analogie trop loin, en nous contentant d'insister sur les effets de seuil qui définissent la détection, et sur la présence d'une synchronisation qui caractérise l'activité d'un détecteur collectif dans de nombreuses situations.

Pour voir comment fonctionne l'analogie, considérons à nouveau notre modélisation très simple de la décision de migrer des hirondelles. Lorsque l'automne s'avance, les oiseaux se rassemblent, sur un toit ou sur des lignes électriques par exemple, puis s'envolent ensemble pour un voyage de plusieurs milliers de kilomètres. Il s'agit de comprendre comment le jour du départ est déterminé, en supposant que les hirondelles ne disposent pas de moyen d'opter toutes exactement pour le même jour, d'après les indices environnementaux.

Nous supposons que les hirondelles ressentent une pulsion migratrice (qui s'accompagne de changements hormonaux dans beaucoup d'espèces) dont l'intensité dépend de paramètres comme le raccourcissement de la durée diurne (photopériode). Nous supposons aussi que les hirondelles ont une attirance pour tout rassemblement de taille  $K$ , qui croît avec  $K$  et avec la pulsion migratrice, et qui, si elle est suffisante, les pousse à aller se poser avec les hirondelles déjà posées. On peut dresser le parallèle suivant entre une détection neuronale et la situation présente:

---

<sup>2</sup> Nous employons le terme "décision" dans le sens: déclenchement d'action. Une décision collective est donc un mécanisme collectif pour déclencher une action collective. Par exemple, le mouvement d'un muscle du bras est une action collective, car il met en jeu des milliers de contractions de fibres musculaires. Comme indiqué plus haut, il s'agit, au niveau neuronal, d'une "décision" collective, puisque l'information détectée dans l'environnement et qui conduit à la contraction n'est jamais centralisée dans un neurone unique.

hirondelle	↔	neurone
ensemble des hirondelles du quartier	↔	détecteur collectif
hirondelle posée sur le toit	↔	neurone actif
rassemblement général	↔	activation du détecteur collectif
attirance pour un groupe posé	↔	synapse excitatrice interne
pulsion migratrice	↔	synapse excitatrice afférente (capteur)

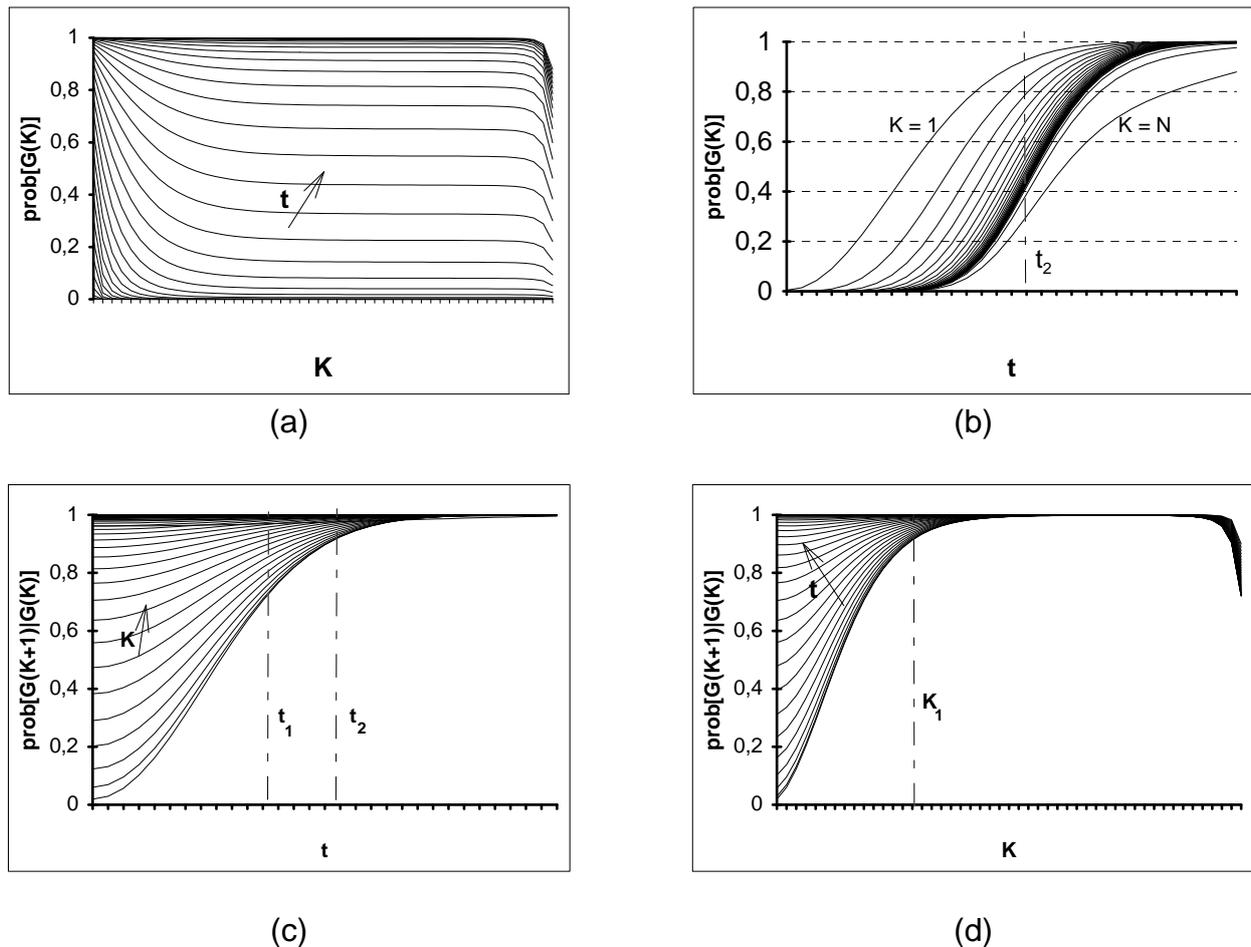
Des tentatives de rassemblement ont sans doute lieu à maintes reprises à l'approche de la période propice, mais comme nous allons le vérifier, la non-linéarité de la détection collective fait qu'on ne peut observer qu'un seul rassemblement de taille significative. Ce rassemblement sera général et marquera le jour du départ.

L'activation du détecteur collectif, ici le rassemblement, est bien un phénomène physique qui n'a pas de signification au niveau des hirondelles individuelles. Mais il faut aussi comprendre que la non-linéarité de ce détecteur se situe elle aussi au niveau collectif. Pour le voir, calculons la probabilité que le rassemblement atteigne la taille  $K$  ce jour-là. Dans la formule qui suit,  $N$  désigne le nombre des hirondelles du quartier, et  $G(K)$  le fait que la taille du rassemblement atteigne  $K$  au jour  $t$  (nous omettons  $t$  pour alléger l'écriture). L'événement  $G(K+1)$  contient donc  $G(K)$ . La probabilité que la taille du groupe passe de  $K$  à  $K+1$  correspond à la probabilité qu'une au moins des  $(N-K)$  hirondelles restantes se joigne au groupe. La probabilité  $p_f(K)$  qu'une hirondelle se pose avec un groupe de taille  $K$  est une fonction supposée croissante de  $K$  et de l'avancement de la saison,  $t$  :

$$\text{Prob}[G(K+1) | G(K)] = \frac{\text{Prob}[G(K+1) \& G(K)]}{\text{Prob}[G(K)]} = \frac{\text{Prob}[G(K+1)]}{\text{Prob}[G(K)]} = 1 - [1 - p_f(K)]^{N-K}$$

La figure 4 montre  $\text{Prob}[G(K)]$  en fonction de  $K$  et de  $t$ , ainsi que la probabilité d'accroissement du groupe  $\text{Prob}[G(K+1)|G(K)]$ .

Le principal résultat montré par ces courbes est que le rassemblement est un phénomène "tout-ou-rien". Si un rassemblement a lieu, il est général. Il n'y a pas de gradualité pour le rassemblement (contrairement à ce qui se passe au niveau individuel, avec la fonction  $p_f(K)$ ). Seule la probabilité du déclenchement est graduelle, quoique non-linéaire (figure 4b) : cette probabilité devient de plus en plus grande lorsqu'on approche de  $t_2$ .



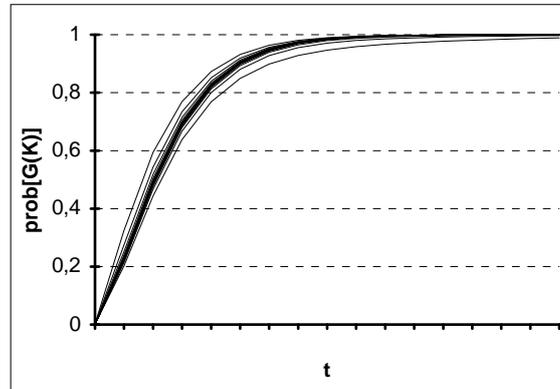
**figure 4:** ces courbes donnent  $\text{Prob}[G(K)]$  en fonction de  $K$  et de  $t$ , ainsi que la probabilité d'accroissement du groupe  $\text{Prob}[G(K+1)/G(K)]$ . Le tracé dépend de la probabilité  $p_1(K)$  qu'une hirondelle se joigne à un groupe de taille  $K$  au jour  $t$ . Pour cette figure, cette probabilité est supposée parabolique :  $p_1(K) = A.K^2 + B.t^2 + C$ . Les tracés (a) et (b) montrent que la probabilité d'un rassemblement dépend très peu de la taille de ce rassemblement. Le tracé (c) montre que tout rassemblement s'accroît presque sûrement dès que  $t$  dépasse la valeur  $t_2$ . Après  $t_1$ , un début de rassemblement fortuit a de fortes chances de conduire à un rassemblement général. Le tracé (d) met en évidence le fait que les rassemblements de taille intermédiaire (égale ou supérieure à  $K_1$ ) sont fortement improbables: s'ils ont pu se produire, leur probabilité d'accroissement est très élevée.

Ce mécanisme permet au rassemblement de jouer le rôle d'un détecteur. Lorsque la période propice  $t_2$  est proche, un début de rassemblement, causé par exemple par des individus précoces<sup>3</sup>, provoque le rassemblement général. Ce n'est pas le cas avant  $t_1$  : les figures 4c et 4d montrent qu'un petit rassemblement a alors très peu de chances de croître. Dans la période  $[t_1, t_2]$ , le nombre des individus prêts à migrer devient significatif, ce que le mécanisme du rassemblement va détecter.

Ce détecteur fait jouer le même rôle à tous les individus. En effet, le rôle éventuel joué par les individus précoces est tout à fait marginal et n'apporte pas d'information. Il s'agit d'un bruit qui peut provoquer légèrement plus tôt le basculement vers le rassemblement général, en amenant le groupe rassemble à un accroissement quasi sûr (le long d'une courbe de la fig. 4d). Nous sommes donc bien en présence d'un cas de détection *collective*.

<sup>3</sup> Le modèle ne représente pas la variabilité de  $p_1(K,t)$  selon les individus. En raisonnant de manière qualitative, nous pouvons néanmoins voir que cette variabilité ne remet pas en cause l'existence des seuils, ni même leur valeur.

Il est important de constater que ce phénomène collectif de détection a sa réalité autonome, c.à.d. qu'il n'est pas directement lié à l'existence d'une détection au niveau individuel. En effet, la forme de  $p_I(K)$  importe peu, pourvu qu'elle soit fonction croissante de  $K$  et de  $t$ . Cette fonction peut même être linéaire (voir figure 5) ! Autrement dit, il y aura détection au niveau collectif même si  $p_I(\cdot)$  ne présente strictement aucun seuil, c'est-à-dire même si les individus sont dépourvus de détecteur.



**figure 5:** cet ensemble de courbes est similaire à celui de la figure 4b, mais cette fois  $p_I(K)$  a une croissance linéaire en  $K$  et en  $t$  :  $p_I(K) = A.K + B.t + C$ . Même dans ce cas limite peu réaliste, on observe encore un phénomène de détection au niveau collectif, en l'absence de tout seuil au niveau individuel : en effet, comme en fig. 4b, ces courbes sont quasiment confondues, ce qui fait du rassemblement un phénomène tout-ou-rien.

On voit ainsi comment une décision collective, celle de migrer, est obtenue à l'aide d'un détecteur collectif, le rassemblement. Comme dans notre modèle neuronal, ce détecteur fonctionne à travers l'activité synchrone des éléments qui le composent. Cette synchronisation repose sur un comportement des individus qui a dû être élaboré par la sélection naturelle : les individus actuels descendent de ceux qui n'ont pas fait l'erreur de migrer en petit groupe. Le comportement des individus (attraction pour le groupe qui augmente avec le temps) conduit à la constitution d'un détecteur collectif qui assure la non-linéarité de la décision de migrer : la probabilité de se rassembler, et donc de migrer, est une fonction non-linéaire (seuil) du nombre d'individus prêts à migrer.

## 6. Conclusion

La notion de détecteur apparaît comme fondamentale dès que nous voulons rendre compte de l'organisation de systèmes qui sont capables de réaliser des fonctions en s'adaptant à leur environnement.

Dans le cas du système nerveux, les détecteurs apparaissent comme distribués, et les neurones qui les composent réalisent des détections collectives. Bien que les détecteurs soient au départ postulés comme des entités abstraites, nous avons pu suggérer une organisation neuronale biologiquement fondée, basée sur la cohérence temporelle et sur les propriétés topologiques des détecteurs, qui puisse assurer les fonctions de détections organisées hiérarchiquement.

Une décision collective observée dans des collections d'agents quels qu'ils soient suppose un mécanisme non-linéaire, typiquement un effet de seuil. On peut parler de détection collective lorsque l'existence de ce seuil est la conséquence du seul comportement des agents, sans qu'aucune centralisation de l'information détectée n'ait lieu. Il est alors parfois possible de s'inspirer d'une analogie avec les détecteurs collectifs neuronaux pour parvenir à une meilleure description du comportement collectif observé.

## Références

- Dessalles Jean Louis (1992). Les aspects cognitifs de l'émergence. In Amy Bernard, Ducret J-J, Grumbach A., *Emergence dans les modèles de la cognition - Actes des journées*, TELECOM-Paris 92-S-003, Paris 1992, pp. 47-59
- Freeman Walter (1991). La physiologie de la perception. *Pour la Science n° 162*, 1991, pp. 70-78
- Kohonen Teuvo (1984). *Self-Organization and Associative Memory*. Springer Verlag, Berlin 1988
- Lawler Robert W. (1980). *Extending a Powerful Idea*. A.I. Memo 590, Massachusetts Institute of Technology, 1980
- Shatz Carla (1992). La maturation du cerveau. In *Pour La Science n° 181*, 1992, pp. 50-59
- Zeki Semir (1992). Les images visuelles. In *Pour La Science n° 181*, 1992, pp. 60-68