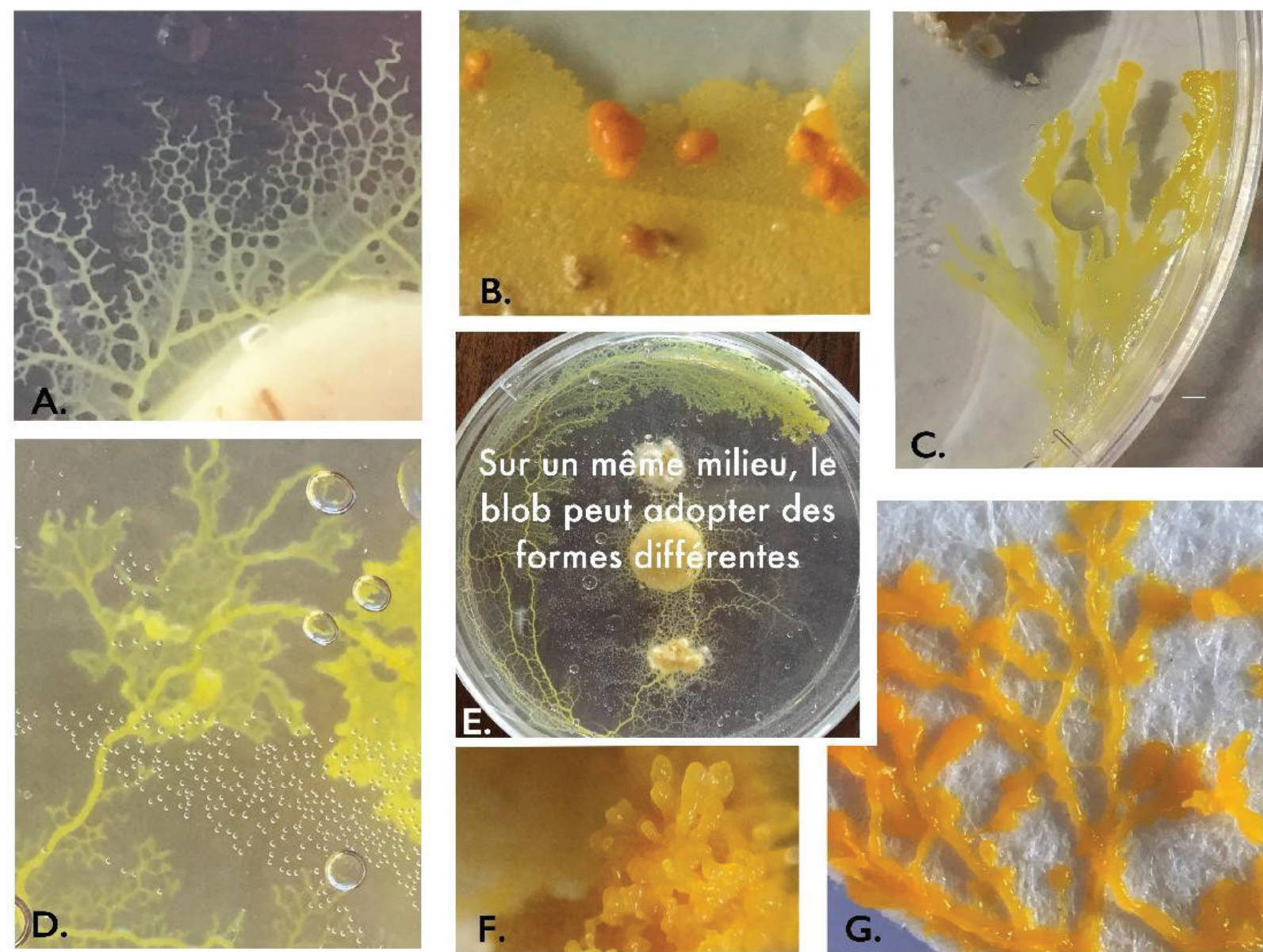


Notre ami le blob



Un *Physarum polycephalum* sur du bois en décomposition (© Futura Planète).

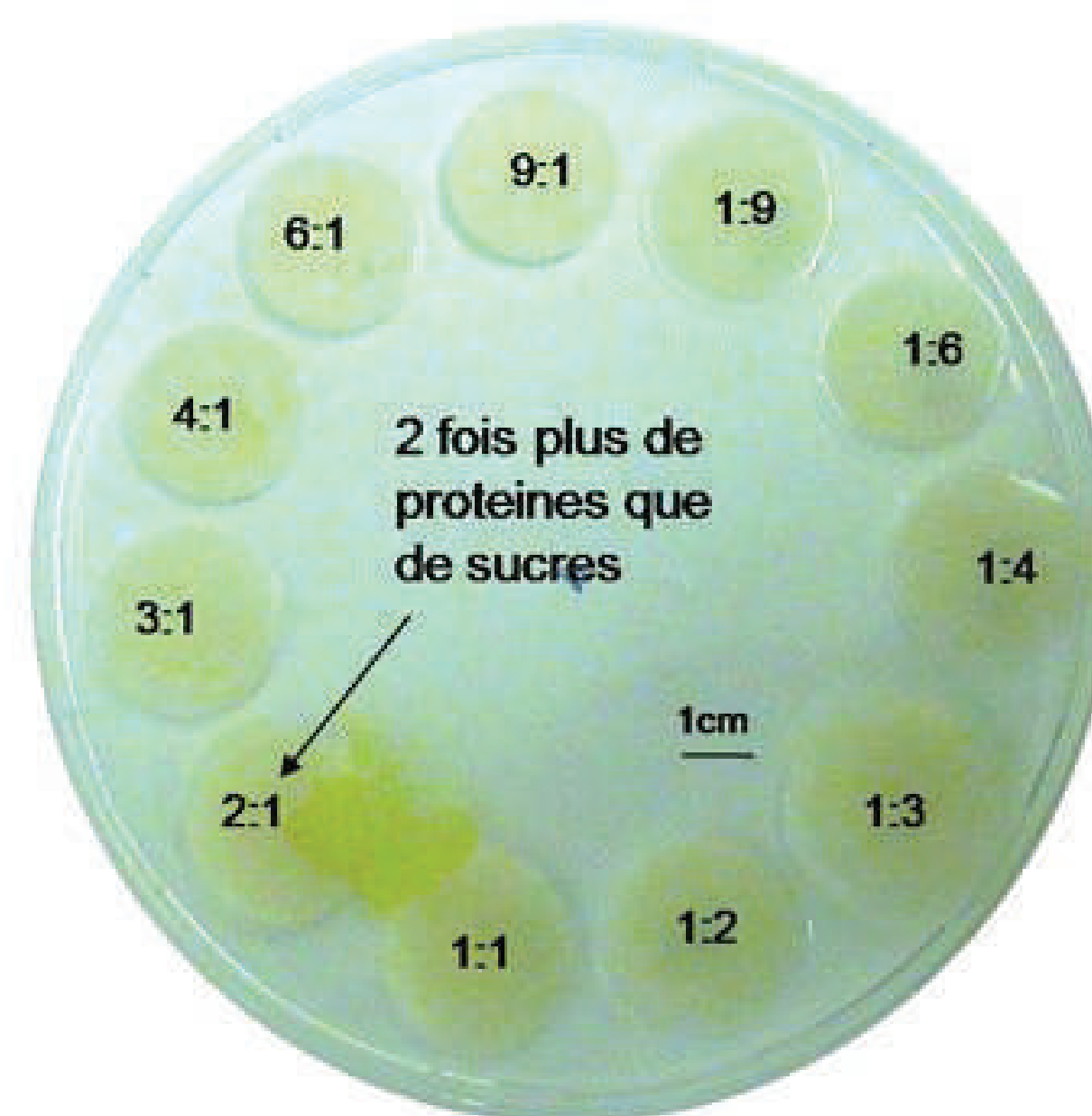
C'est quoi, un blob ? C'est un être vivant unicellulaire qui n'est ni un animal, ni un végétal, ni un champignon, même s'il se comporte un peu comme chacun d'eux. On le classe aujourd'hui parmi les amibozoaires, car il se déplace en se déformant comme les amibes. Parmi plus de 1000 espèces connues, la plus étudiée, *Physarum polycephalum*, est jaune vif mais il existe des blobs marron, bleus, verts, roses, ... Sous sa forme développée, appelée **plasmode**, il peut couvrir plusieurs centimètres carrés et se déplacer de 4 cm/h.



Différents états du blob : plasmode (A, C, D, E), formant des sporanges (B) ou en sclérote (F, G)

Où vit-il ? On le trouve sur tous les continents, dans des lieux humides, doux et ombragés, en forêt, dans des arbres ou dans la litière en décomposition, mais aussi dans le désert ou sous la neige.

Que mange-t-il ? Tandis que les plantes et les champignons se nourrissent par absorption, le blob se nourrit par **phagocytose**, comme nos globules blancs lorsqu'ils mangent des bactéries. Dans la nature, il se nourrit de champignons, de bactéries, de levures. En laboratoire on le nourrit souvent de flocons d'avoine ou de flans aux œufs. Il dispose de récepteurs chimiques membranaires qui lui permettent de détecter certaines substances, comme le glucose ou les protéines, à quelques centimètres. Si on lui donne le choix, il peut composer lui-même son menu équilibré.



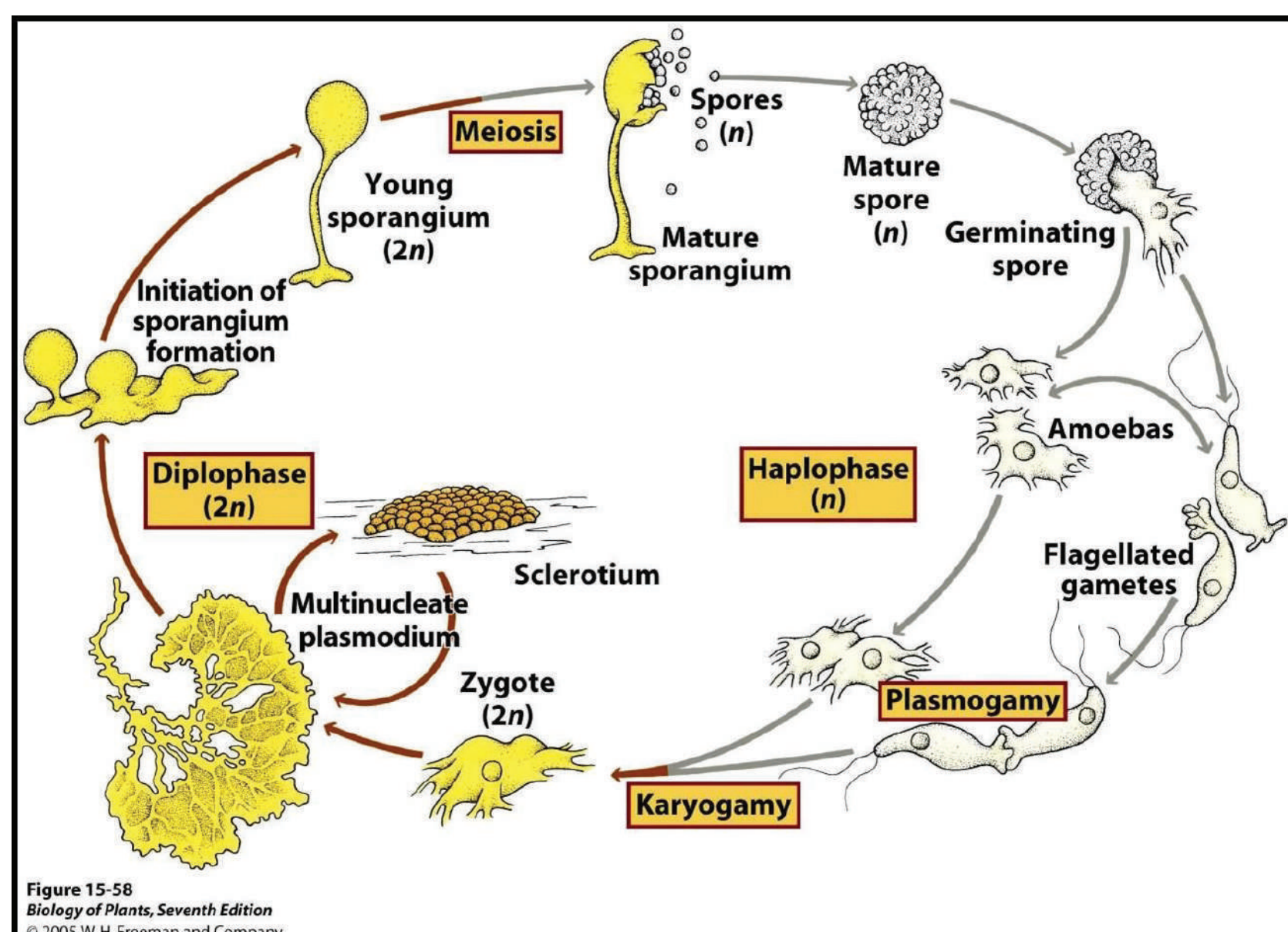
Le blob choisit un régime équilibré (© A. Dussutour)

Par contre, le blob évite le sel ou les substances amères (quinine, caféine), même non toxiques.

Produit-il des déchets ? Le blob sécrète sur son chemin un mucus qu'il évite par la suite. Ce mucus lui rappelle les endroits visités et joue le rôle de **mémoire externe**. Le blob peut aussi éliminer des polluants en perdant de l'eau et des protéines (dessiccation).

Quand est-il apparu sur Terre ? Le blob est apparu il y a au moins **500 millions d'années**, bien avant les plantes (300 millions d'années) et les êtres humains (200 000 ans).

Le cycle de vie du blob

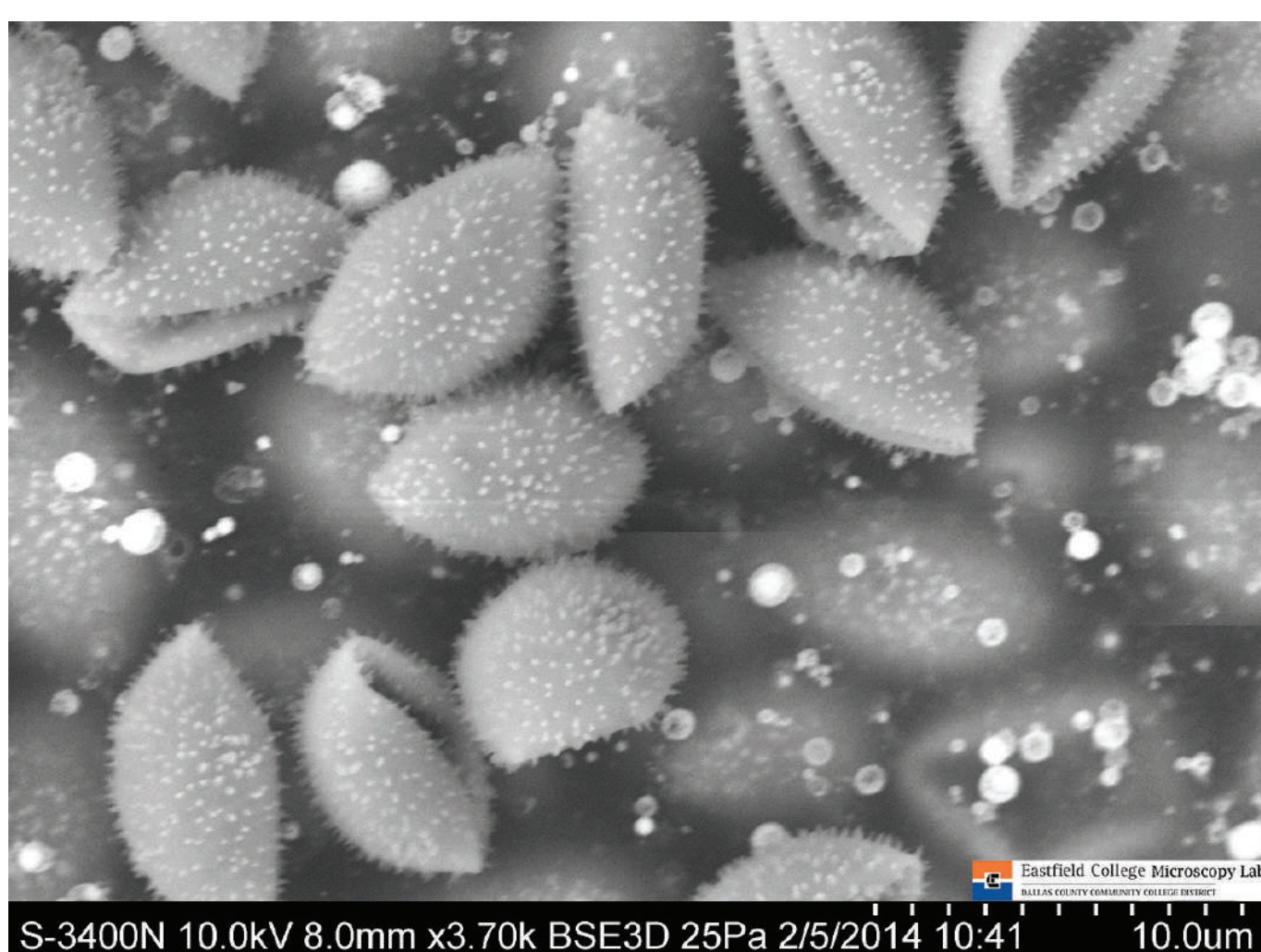


Le cycle de vie du blob est relativement compliqué. Il peut passer par plusieurs phases, selon les conditions environnementales. Le **plasmode** est sa forme développée, visqueuse et mobile. C'est une **cellule géante** pouvant contenir plusieurs milliards de noyaux génétiquement semblables, qui répliquent leur ADN et se divisent en synchronie toutes les 8h.

Reproduction sexuée : Lorsqu'il est affamé ou exposé à la lumière, le blob peut créer des **sporanges** et se reproduire, comme les champignons, en émettant des **spores**.



Sporanges de *Physarum polycephalum* prêts à émettre des spores (© Carolina).



Des spores de blob (© Eastfield College Microscopy Lab).

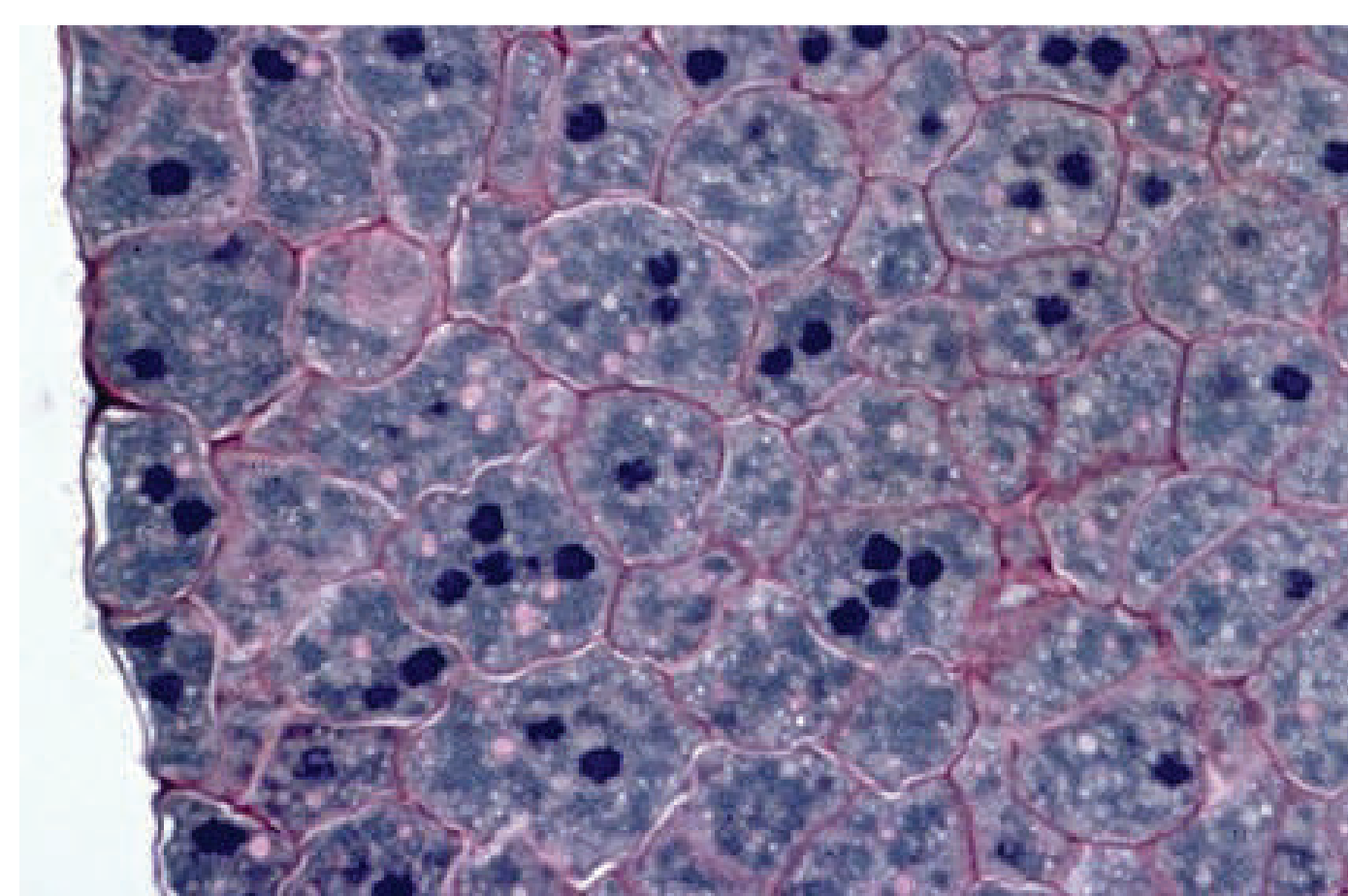
Ces spores sont des cellules contenant chacune quatre noyaux **haploïdes** (n chromosomes). Chaque spore peut survivre plusieurs années avant d'engendrer une **amibe** haploïde, capable de fusionner avec une autre amibe de la même espèce pour former un **zygote diploïde** ($2n$ chromosomes). Le blob se reproduit ainsi de manière sexuée.

L'amibe de blob se déplace en créant des **pseudopodes**, comme toutes les amibes. Elle peut aussi développer une petite queue, ou **flagelle**, adaptée au déplacement dans l'eau, ou s'enkyster en milieu sec. Ces transformations sont réversibles.

Reproduction asexuée : Le noyau de ce zygote diploïde peut se dédoubler par **mitose sans division cellulaire**. Ce processus crée de nombreux noyaux dans une grande membrane cellulaire et forme un nouveau plasmode. Le cycle est alors complet.

On peut aussi reproduire le blob en le coupant en morceaux, qui cicatrisent au bout de quelques minutes, sans séquelles apparentes, chacun continuant sa petite vie de blob.

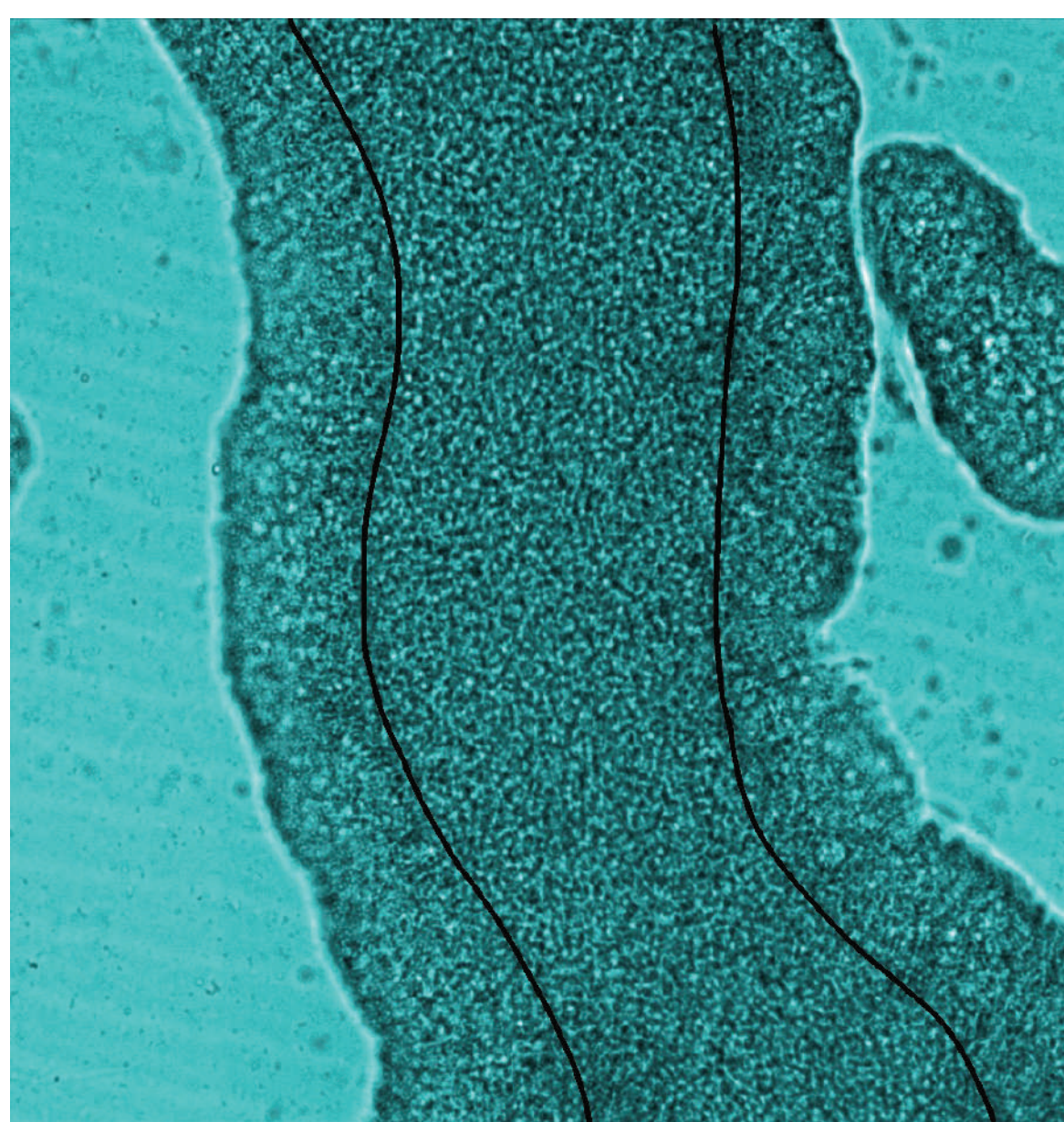
Survivre sous forme de sclérote : Dans des conditions difficiles (lumière, acidité, dénutrition, froid, métaux lourds), le plasmode peut aussi se dessécher et former un **sclérote**. Il perd alors 70 % de ses protéines et se refait ainsi une jeunesse. Le sclérote peut survivre quelques mois et redevenir un plasmode lorsque les conditions le permettent.



La coupe d'un sclérote révèle des petits groupes de cellules enkystées, chacune contenant plusieurs noyaux (© Hawaiï University).

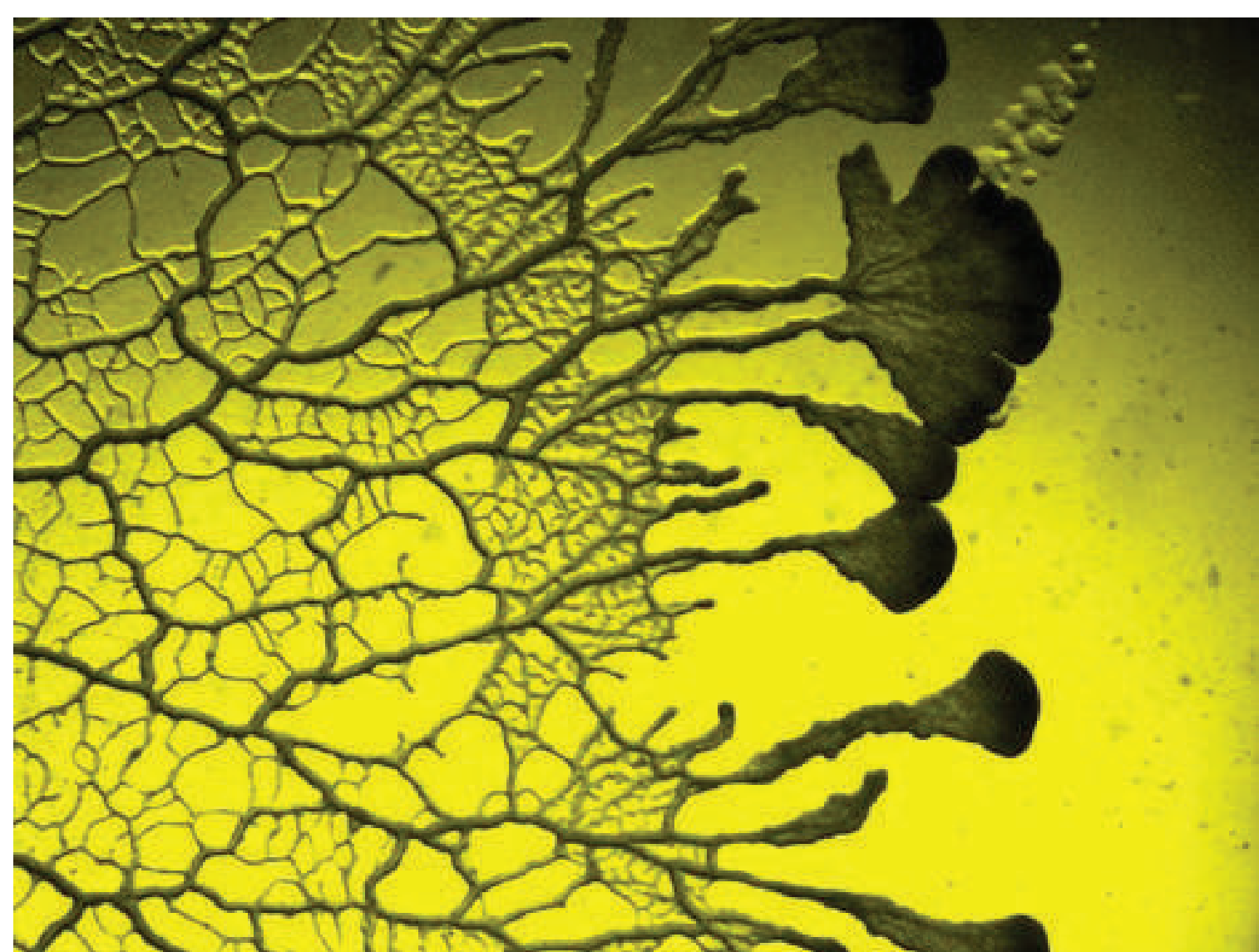
Bouger plus pour manger plus

Le réseau vasculaire du blob. Bien que le blob n'ait ni cœur ni muscles, il est doté d'un organe qui lui permet à la fois de transporter les nutriments et de se déplacer : un vaste réseau vasculaire dont les parois contiennent des filaments d'actine reliés à des fibres de myosine, molécules que l'on retrouve aussi dans nos muscles.



Une veine du plasmode : les traits noirs délimitent ses parois (© Marc Durand)

Dans une cellule géante, les courants diffusifs sont trop lents pour acheminer rapidement l'oxygène, les nutriments, ou les déchets. Cependant le réseau vasculaire du blob, porteur d'écoulements oscillants générés par la contraction de la couche membraneuse entourant les tubes, permet un transport efficace.



Le réseau vasculaire du blob et ses dendrites (© Marc Durand).

Ce réseau peut changer de forme et se réorganiser en fonction de la position des sources de nourriture. Lors de cette réorganisation, des embranchements du réseau disparaissent et sa structure semble suivre un schéma d'optimisation. Dans le même temps, le reste du plasmode se résorbe de sorte que l'organisme se résume essentiellement à de fins vaisseaux reliant les sources de nourritures.

Les pulsations du réseau. Ces vaisseaux se contractent périodiquement par **péristaltisme**, comme nos intestins, ce qui permet aussi d'acheminer efficacement la masse corporelle pendant la croissance ou le déplacement du plasmode. Ceci nécessite à la fois un **contrôle local de la fluidité du cytoplasme** (transition sol-gel) et une **synchronisation de l'activité contractile dans tout l'organisme** pour générer une onde de compression se propageant à travers le plasmode.



Les extrémités du réseau vasculaire pulsent en synchronie (© Marc Durand).

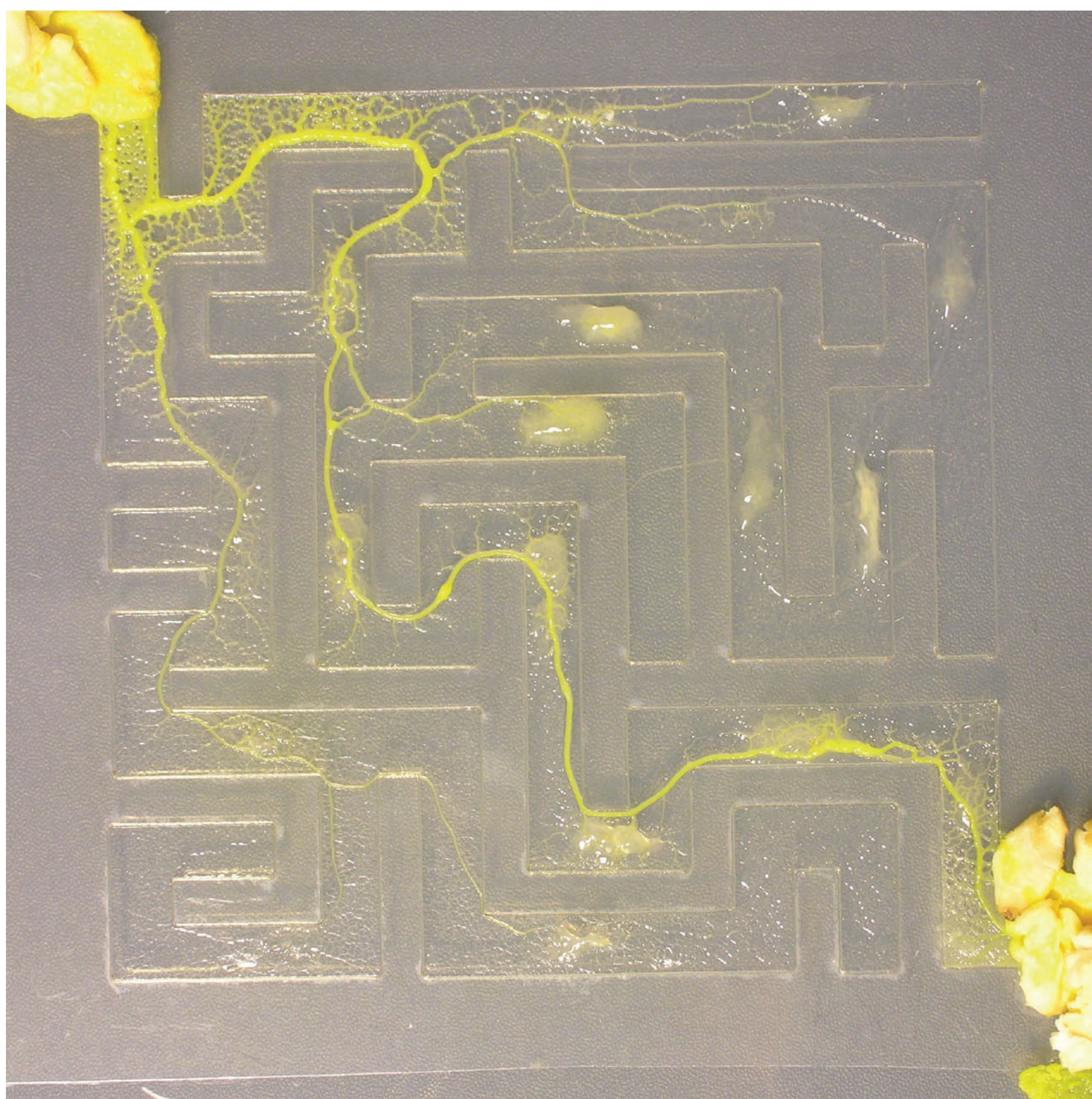
L'équipe de Marc Durand (Université Paris-Diderot) s'attache à comprendre comment le blob réalise de telles prouesses, et s'intéresse à l'action de l'écoulement sur le remodelage du réseau vasculaire et sur la synchronisation de ses pulsations. Ils ont montré que la forme du blob influençait le sens de propagation des ondes de contraction, ainsi que la sélection des longueurs d'onde de ces vaguelettes.

L'intelligence du blob

Comment un être unicellulaire, dépourvu de cerveau et de neurones, peut-il être intelligent ?

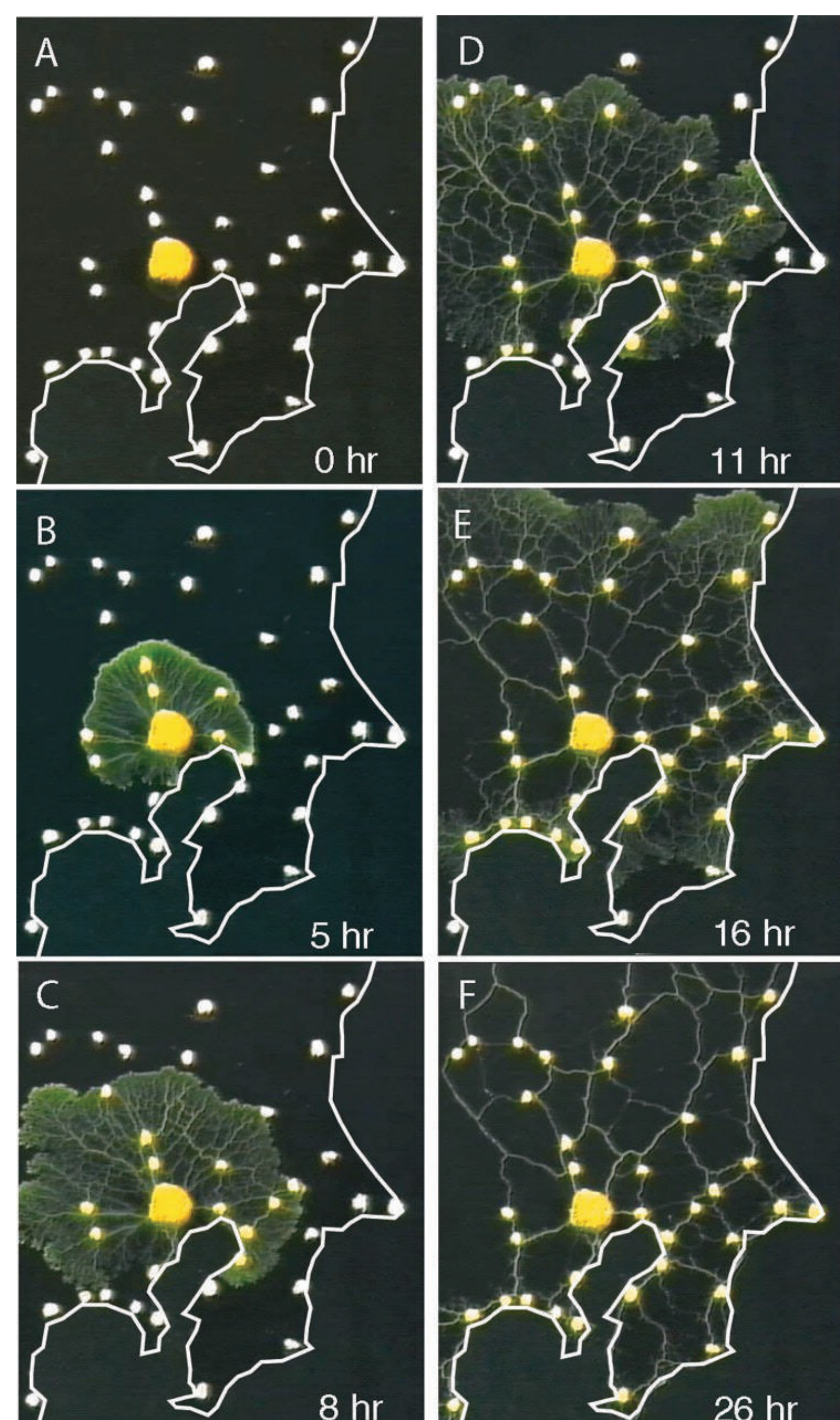
Pour se nourrir, le blob recherche sa nourriture grâce à la **chimiotaxie**. C'est la capacité à détecter de petites différences de concentration de molécules afin de se diriger vers leur source. De plus, pour optimiser ses déplacements, il laisse sur son chemin une **trace de mucus** qu'il évite par la suite et qui lui sert de mémoire externe.

L'expérience du labyrinthe : En 2000, Toshiyuki Nakagaki (Université d'Hokkaido) a mis un blob dans un petit labyrinthe à l'entrée et à la sortie duquel il avait posé des flocons d'avoine. Le blob a exploré le labyrinthe puis, une fois la nourriture trouvée, s'est rétracté suivant le plus court chemin qui menait de l'entrée à la sortie. En optimisant le transport des nutriments dans son réseau vasculaire, il a pu résoudre ce problème difficile pour un être humain.



Des flocons d'avoine placés à l'entrée et la sortie d'un labyrinthe aident le blob à optimiser son parcours pour en sortir (© Karen Alim).

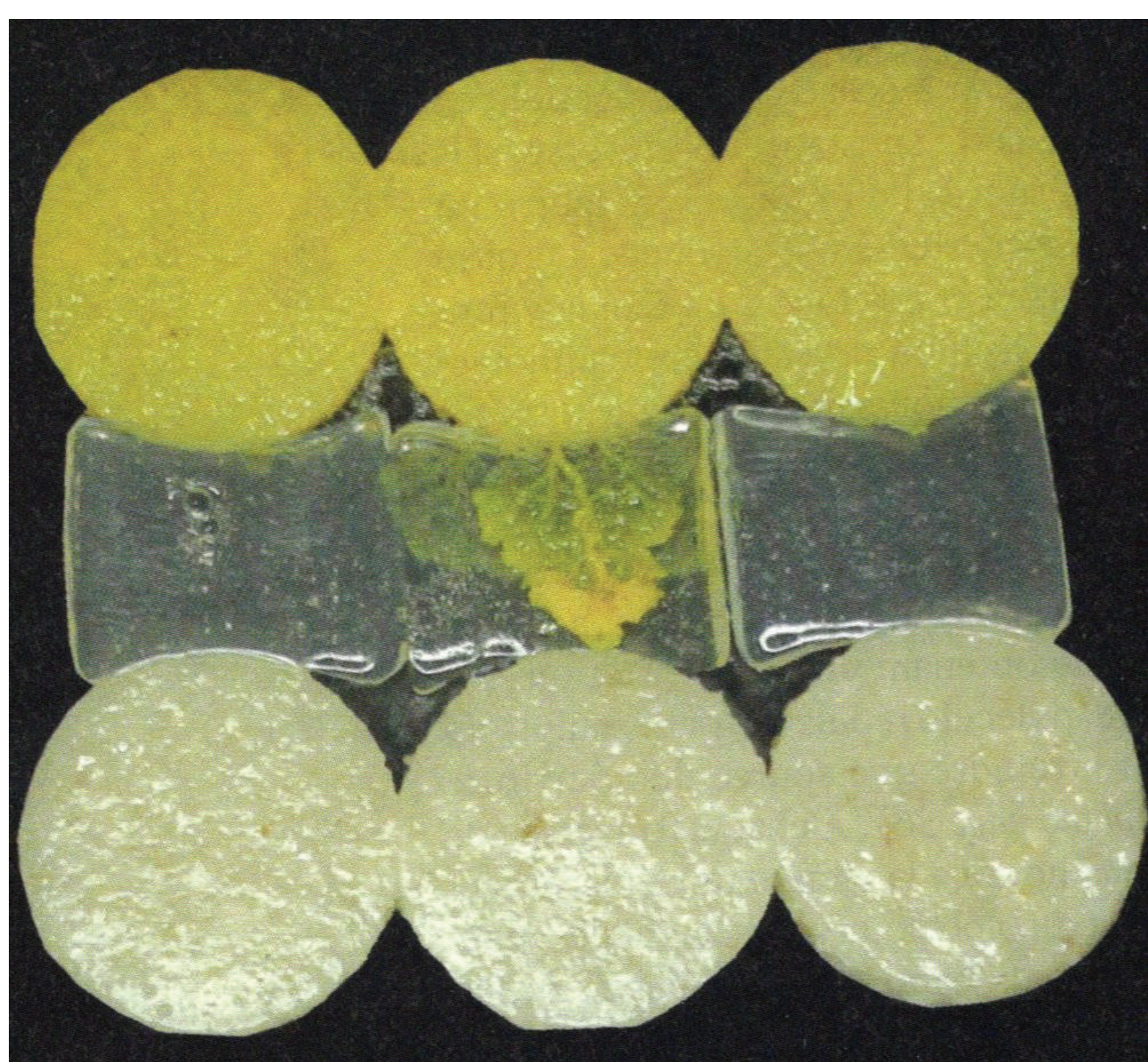
L'expérience du réseau ferré : En 2010, Toshiyuki Nakagaki récidive en dessinant dans une boîte de Petri un plan de la région de Tokyo. Chaque ville était représentée par un flocon d'avoine et il disposa un blob sur Tokyo. Celui-ci explora la boîte et, après quelques heures, avait dessiné entre les flocons un graphe comparable au réseau ferré existant mais plus robuste (en cas de panne) et moins redondant que celui construit par les hommes ! Des centaines de millions d'années d'évolution ont donné au blob la capacité de créer un **réseau de transport optimal en termes de coût, d'efficacité et de résilience**.



Le blob dessine un réseau de transport optimal dans une boîte de Petri.

(© Toshiyuki Nakagaki).

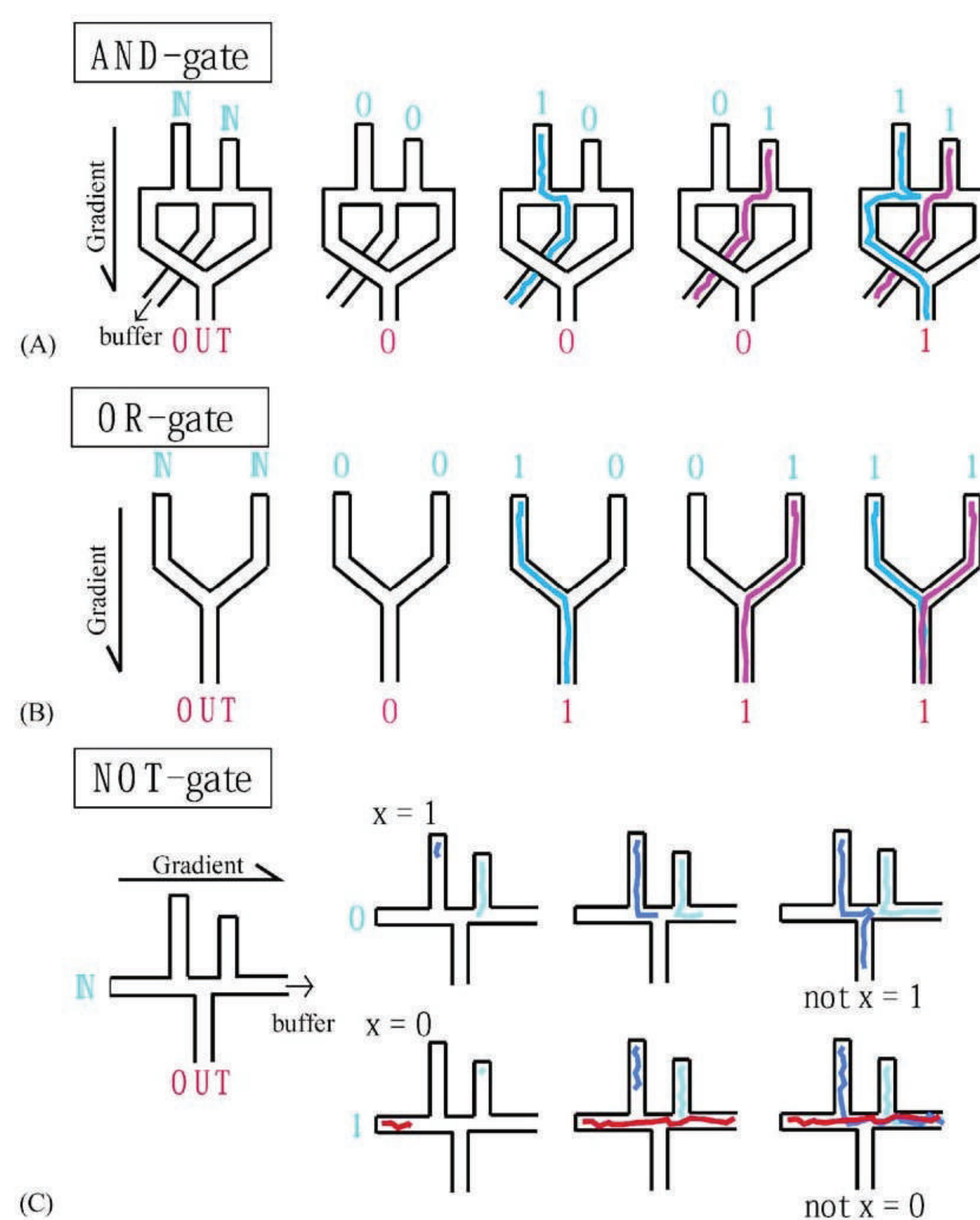
L'expérience du pont amer : Afin de savoir si le blob peut apprendre à passer des obstacles, Audrey Dussutour (Université Paul-Sabatier, Toulouse) a conçu une expérience où, pour atteindre sa nourriture, il devait traverser une zone badigeonnée de quinine, substance amère mais non toxique. En l'absence d'amertume, un blob franchit le pont en 30 min. Sur un pont amer, il met 2h le premier jour puis un peu moins les jours suivants. Après six jours, il franchit aisément le pont amer en 30 min.



Un blob habitué à traverser un pont amer (centre) est plus rapide que des blobs naïfs (gauche et droite) mais leur transmet son expérience par contact (© David Vogel).

L'expérience est réversible : après ce supplice, il franchit un pont sans amertume en 30 min. mais si on remet de la quinine il met à nouveau 2h pour le franchir. Ainsi, le blob apprend et il oublie ! Cette forme d'apprentissage élémentaire, appelée **habituation**, est transmissible. Faisons fusionner un blob qui a appris à passer un pont amer et un blob naïf, qui n'a pas encore appris. Attendons quelques minutes, puis coupons en deux le blob obtenu. Alors, chaque nouveau blob sait traverser rapidement le pont amer. Le blob savant a donc transmis son savoir au blob naïf.

Des ordinateurs à blob ? Le plasmode du blob passe son temps à calculer le meilleur chemin pour rejoindre des sources de nourriture. Si on contraint son environnement avec des répulsifs comme la lumière ou du sel, il peut réaliser des opérations élémentaires comme des **portes logiques**.



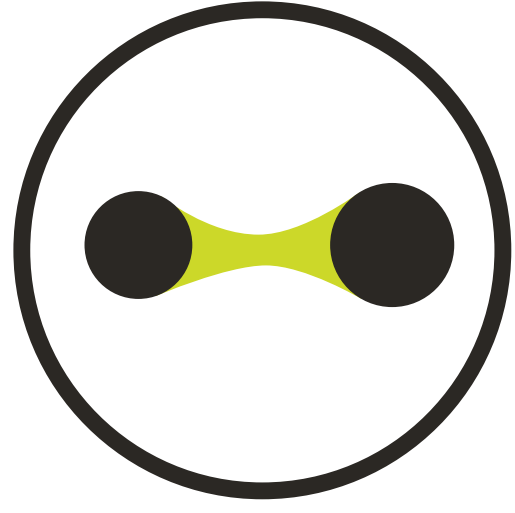
Portes logiques à blob : le gradient indique la direction vers la nourriture.

Les entrées sont marquées N et les sorties OUT.

La présence d'un blob est marquée 1, son absence est marquée 0 (© S. Tsuda).

Andrew Adamatsky (University of the West of England, Bristol) a suggéré que le blob était un exemple vivant de **Machine de Kolmogorov-Uspensky**, modification de la Machine de Turing où le ruban linéaire, qui stocke usuellement les instructions et les calculs, est remplacé par un graphe dont la forme évolue pendant l'exécution du programme. Le graphe évolutif est défini par le réseau vasculaire du blob, dont la forme change pendant l'exploration de son environnement.

Des recherches en laboratoire sur le plasmode de *Physarum polycephalum* révèlent sa capacité à résoudre certains problèmes :



Des cellules individuelles peuvent essaimer et fusionner en un seul organisme



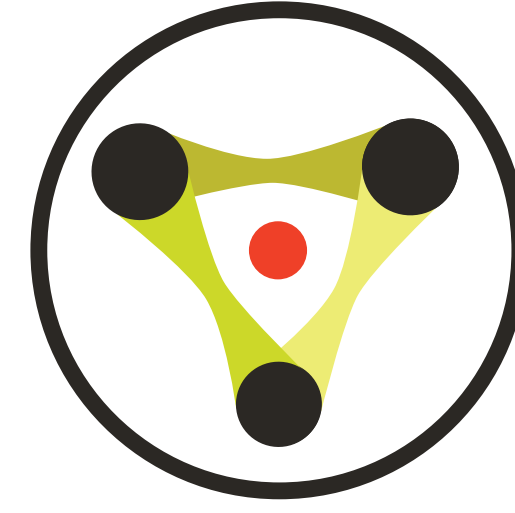
Sentir des nutriments et d'autres substances chimiques à distance et les localiser à deux dimensions



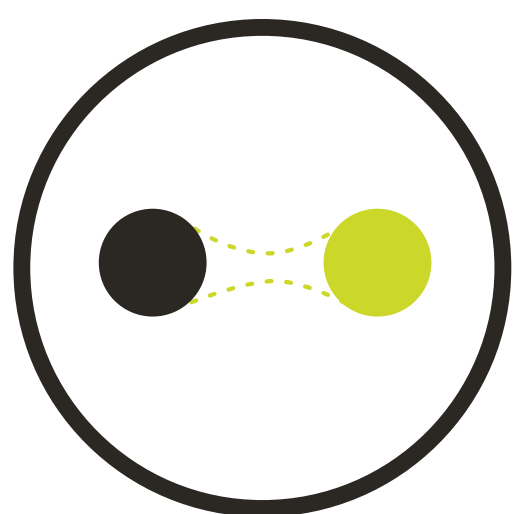
Explorer un environnement et décider rationnellement quand s'arrêter pour exploiter une ressource



Trouver un compromis optimal entre l'évitement de la lumière et l'accès à la nourriture



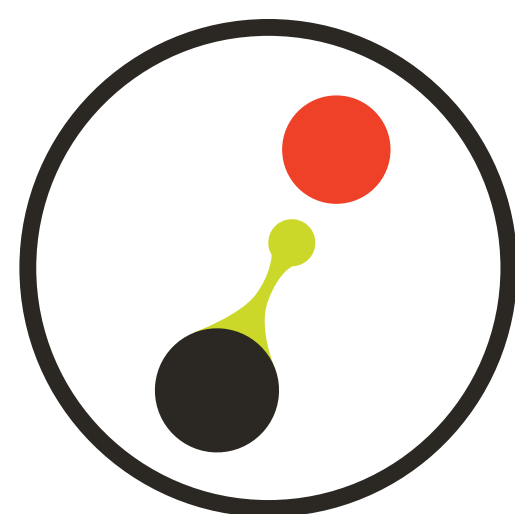
Apprendre par habitude et chercher des aliments en se fondant sur l'expérience acquise, et oublier peu à peu ce qui a été appris



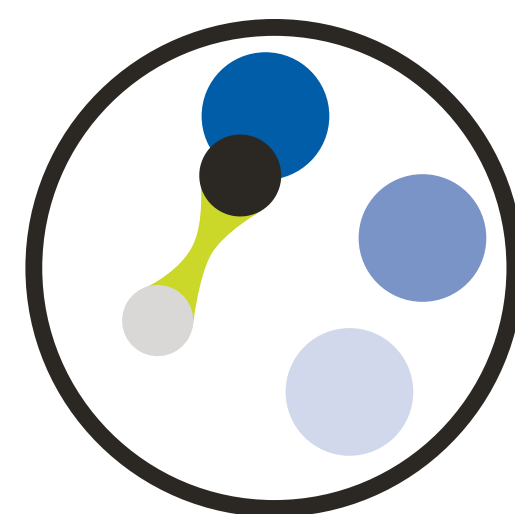
Se diviser en plusieurs organismes ou faire des spores



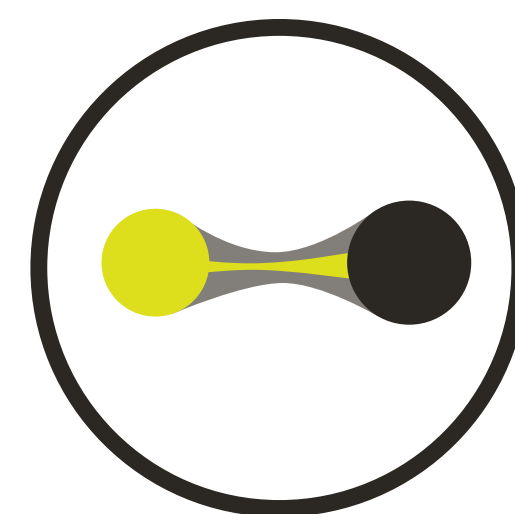
Former un réseau sur une surface pour se nourrir de multiples sources isolées



Éviter la lumière en s'éloignant des zones illuminées



Équilibrer un régime alimentaire en évaluant le bilan nutritionnel de chaque source ou en se répartissant entre des sources de protéines et de glucides



Transférer un comportement acquis à un congénère novice en fusionnant avec lui



Former des tentacules et pomper des nutriments des extrémités vers le centre de l'organisme



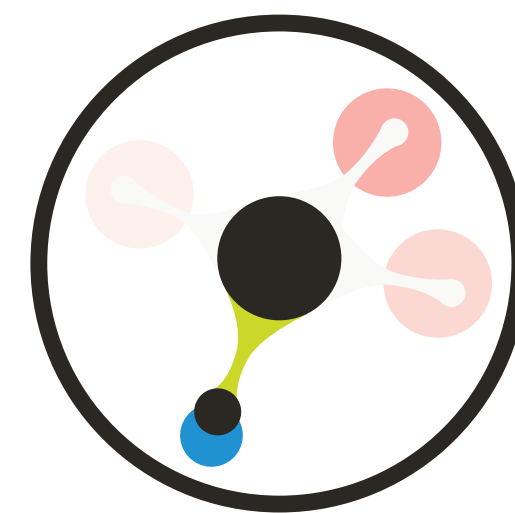
Former des réseaux d'alimentation optimaux mais redondants pour assurer une résilience et un réacheminement par des vaisseaux secondaires si les conditions changent



Éviter la lumière en se fragmentant temporairement ou en formant des spores



Se souvenir d'une activité en laissant des marqueurs chimiques, puis en les détectant ultérieurement



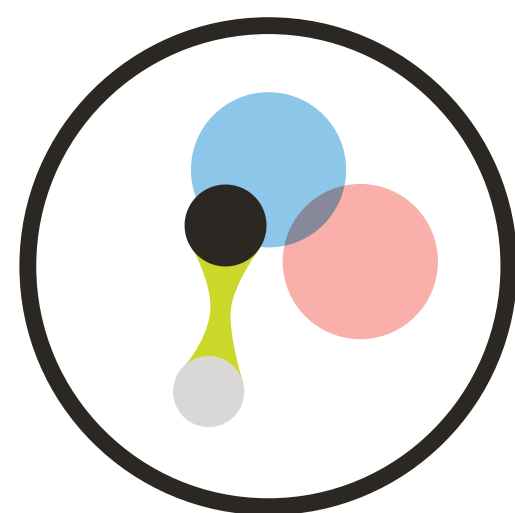
Se souvenir de stimuli récurrents et anticiper leurs itérations futures en agissant préemptivement



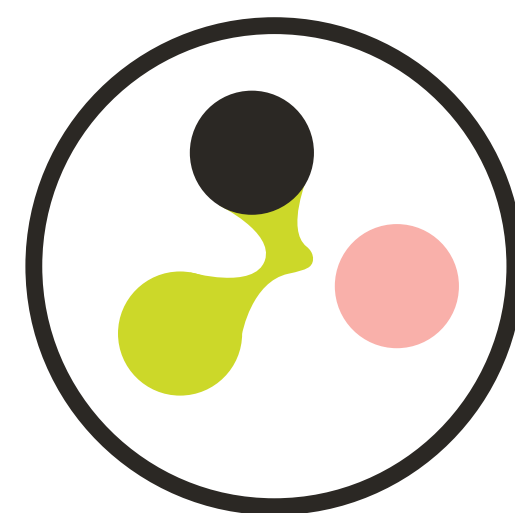
Chercher de la nourriture dans un labyrinthe plan



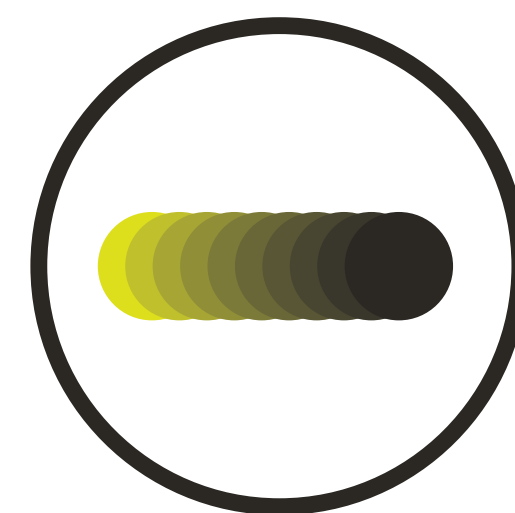
Optimiser un parcours pour une dépense métabolique minimale, en évaluant les distances et les dénivelés



Discerner des couleurs du domaine visible et y répondre différemment



Déterminer l'activité passée d'autres plasmodes en détectant des marqueurs chimiques étrangers



Évoluer rapidement par mutations régulières de son ADN

Grâce à ces aptitudes, on peut guider le plasmode dans une boîte de Petri et lui faire résoudre des problèmes par les moyens suivants :

- Manipulation directe du plasmode
- Placement et distribution de plusieurs plasmodes
- Placement et distribution de sources de nourriture
- Réalisation d'obstacles physiques ou chimiques à l'accès aux sources de nourriture
- Arrangement de zones sombres ou lumineuses
- Moduler la couleur des sources de lumière
- Répartition des sources de protéines et de glucides selon leurs proportions,
- Déplacement et redistribution de sources alimentaires
- Nourrissage régulier ou irrégulier
- Modulation de la température et de l'humidité ambiantes
- Utilisation de surfaces répulsives
- Modélisation d'environnements tridimensionnels

On suit la réponse du plasmode en étudiant son comportement :

- Vitesse et direction du mouvement
- Distribution de sa biomasse après une durée donnée
- Forme des réseaux multicellulaires après une durée donnée
- Modification progressive du réseau
- Fragmentation et agrégation de biomasse
- Sporulation
- Comportement acquis et mémoire

LÉGENDE

- Plasmode
- Activité
- Attracteur
- Répulsif

D'après une exposition du Plasmodium Consortium, au Hampshire College Art Gallery (Mars 2018).
© Thom LONG