

Les étonnantes inventions des Champignons, pour des « lancements » de spores toujours plus performants

Jean BÉGUINOT*

Résumé

Les connaissances relatives à la biologie générale des Champignons ont fait des progrès considérables ces dernières décennies et surtout ces dernières années. Les acquisitions les plus importantes ont même pris des allures de petites révolutions, telle la démonstration définitive et surtout multi-argumentée de l'autonomie totale du Règne fongique. Telle aussi, et plus déstabilisante encore, la refonte totale de la systématique du règne fongique, suite aux récents développements de la phylogénie moléculaire, qui aboutit à une restructuration des plus inattendues (BÉGUINOT, 2008). Mais bien d'autres aspects importants de la vie des Champignons ont bénéficié aussi d'apports décisifs, dont l'essentiel demeure pourtant souvent méconnu, en dehors du cercle des spécialistes. On peut citer, notamment :

- les aspects variés des choix et modes de nutrition parmi les différentes grandes catégories de Champignons et la très complexe chimie métabolique qui y est associée (en particulier chez les recycleurs de lignine et cellulose, dont les performances exceptionnelles en matière de capacité de dégradation de produits complexes – y compris plastiques – les font désormais utiliser dans toute une série de branches industrielles, dont papeteries et recyclage des déchets réfractaires) ;
- les stratégies de défense contre les invasions agressives des microorganismes (auxquelles les champignons sont par nature beaucoup plus exposés que la plupart des plantes et animaux), stratégies dont la subtilité et l'efficacité élargissent sans cesse les utilisations médicales dérivées, qui vont désormais bien au-delà de l'élaboration (bien connue) des antibiotiques ;
- les cycles de vie d'une extrême complexité chez les différents groupes de micromycètes parasites, accompagnés de capacités de reconnaissance tant physique que chimique des substrats qui peuvent à l'occasion dépasser de très loin les meilleures capacités discriminantes des sens y compris chez les animaux vertébrés ;
- les « secrets » du développement des carpophores, si souvent objets de fantasmes et légendes dans le grand public ; ainsi que les influences, jusque là peu connues, d'une série de facteurs environnementaux sur les détails de ce développement ;
- les étonnantes « inventions » qui ont progressivement permis aux Champignons d'optimiser la dispersion « aéroportée » de leurs spores, au moyen de mécanismes physiques surprenants et sans guère d'équivalents ailleurs. Inventions suggestives, qu'on détaillera un peu dans le présent article.

La plupart de ces résultats, malgré leur intérêt manifeste bien au delà de la seule sphère des professionnels, n'ont pas encore vraiment diffusé en dehors du cercle des revues spécialisées et, pour une bonne part, restent encore fort méconnus, non seulement du public curieux, mais même des mycologues amateurs.

C'est pour modestement tenter de combler un peu cette lacune que vient d'être rédigée une synthèse accessible d'une partie de ces récentes et surprenantes acquisitions de la science dans le domaine fongique. Cet épais document, intitulé « Une Balade philosophico-naturaliste dans l'intimité de la vie des Champignons » (BÉGUINOT, 2009) comporte une douzaine de chapitres consacrés aux différents aspects relatés plus haut. Le présent article reprend sensiblement le texte de l'un de ces chapitres, celui consacré aux surprenantes tactiques de lancement des spores élaborées, séparément, par les Ascomycètes et par les Basidiomycètes.

Noter que cette « Balade... » est accessible sur CD ainsi qu'en version papier (tirage limité) sur demande écrite à l'auteur.

Mots-clés : reproduction, basidiospore, ascospore, éjection, dispersion, BULLER.

* Société d'Histoire Naturelle du Creusot - 12 rue des Pyrénées - 71200 LE CREUSOT

Introduction

Tous les êtres vivants s'architecturent et s'organisent de telle sorte que, le plus tôt possible, l'acquisition de leurs nourritures préférées leur soit aisée – tant il est vrai que se nourrir est la première nécessité vitale.

Ainsi,

- la *Plante* s'équipe-t-elle de feuilles étalées autour de tiges érigées, pour capter au mieux le soleil, source énergétique de la photosynthèse ;
- l'*Animal* se dote-t-il de bouche, dents et mâchoires, et même de moyens actifs de recherche de leur pâture : capacité de locomotion active et sens perceptifs associés ;
- le *Champignon* enfin, quant à lui, développe son feutrage d'hyphes pénétrantes, dispositif qui vient drainer, de l'intérieur, le substrat nourricier (D'URRIEU, 1993). Noter que cette classification élémentaire et schématique, basée sur la fonctionnalité nourricière (tenue pour déterminante) est, de fait, *confirmée par la phylogénie du vivant*, telle que

récemment revisitée avec les outils de la biologie moléculaire : les Champignons, on le sait, forment bien un *Règne à part entière* et totalement autonome.

Ceci étant, si l'acquisition de la nourriture est essentielle à l'adulte, quel que soit le type d'être vivant, le problème est encore bien plus critique pour le tout jeune, le « bébé » qui vient de naître.

Il lui faut en effet rapidement, sans délai, constituer les outils indispensables à l'appropriation de la nourriture et ce, avant même de disposer des premières 'bouchées'. Il lui faut donc *quelques réserves de départ* disponibles en lui-même. Ainsi,

- chez les plantes, c'est la raison même de la *graine*, bourrée de glucides et protéines, réserve qui permettra de construire les toutes premières feuilles ;
- chez les animaux, c'est la raison même de l'*œuf* dont le riche contenu permettra l'ébauche minimale d'un corps embryonnaire capable, dès la naissance, d'une première prise de nourriture externe.

Le bébé, avant que de naître, doit donc disposer au moins de la *taille minimale* que lui impose son premier viatique de naissance.

Or on voit que, sous cet aspect, le Champignon est avantagé en ce sens que son « viatique » minimal pour inaugurer la vie peut être des plus modeste : en effet, pour peu que le « petit » ait l'opportunité d'arriver sur le substrat convenable, il lui suffit de pousser une cellule pénétrante pour bénéficier d'*emblée* du tout premier biberon.

Voilà pourquoi le Champignon fait, et de loin, *les plus petits bébés autonomes* au sein du monde vivant macroscopique : typiquement de l'ordre d'un petit centième de millimètre pour la « graine » de champignon, autrement dit la spore!

Le 'hic' étant bien sûr pour le bébé-champignon, la spore, de tomber d'*emblée* sur le support nourricier qui lui convient, c'est-à-dire à la fois approprié en nature et encore disponible pour exploitation.

Ceci étant, la Nature fait parfois bien les choses : pour qui fait des bébés minuscules, il est évidemment permis d'avoir, par compensation, une portée plus que nombreuse (à taille paterno-maternelle donnée). C'est pourquoi le Champignon individuel peut produire ses rejetons typiquement par *milliards* et même bien davantage encore ¹ !

Et, de fait, c'est bien ce qu'il fait, battant ainsi, une fois de plus, un record absolu dans le monde vivant macroscopique !

Cependant, pourquoi par milliards et plus ? Pourquoi faire tant (même si c'est permis par la microscopique taille des petits) ? A quoi bon cette

inimaginable pléthore puisque, malgré tout, les substrats propres au développement de nombre d'espèces de champignons ne sont quand même pas si rares ordinairement ?

C'est qu'il ne suffit pas d'arriver sur un substrat approprié, encore faut-il y arriver avant la progéniture issue de quelque autre congénère. Car, là comme ailleurs, la place est presque toujours au premier occupant, dans un monde où, dès la naissance, la compétition inter-individuelle est de règle !

Ainsi, admettons qu'une spore fongique ait, disons, une chance sur mille de tomber sur un substrat favorable. En l'absence de risque de compétition, quelques centaines ou tout au plus quelques milliers de spores émises par un individu fongique devraient certes suffire à garantir la pérennité de la descendance du champignon émetteur. Mais ce serait justement oublier l'existence de tels ou tels de ses voisins qui aurait décidé, « par goût du nombre », d'en produire dix ou cent fois plus. Alors, ce voisin libéral aurait, de ce fait et sans grand effort supplémentaire, beaucoup plus de chances de coloniser *en premier* de nombreux substrats favorables. Car les Champignons sont des colonisateurs très véloce.

Finalement, le premier Champignon évoqué, le 'raisonnablement économe en spores', ne tarderait pas à voir sa lignée éliminée par celui dont la production de spores plus massive aurait pu, au premier abord, paraître abusivement pléthorique.

Course indéfinie vers la démesure, aboutissement mécaniquement absurde, mais, en définitive, issue classique des compétitions quand ne règne pas un minimum de régulation... Issue qui n'est pas sans faire écho, bien sûr, à cette course illimitée aux signes extérieurs d'affirmation de soi et de possession que nous connaissons bien.

Voilà donc pourquoi les Champignons ont, et de très loin, à la fois *les plus nombreuses portées* et *les plus petits bébés*, parmi les trois Règnes macroscopiques.

Conséquence immédiate de la ténuité des petits : le recours généralisé au plus simple des moyens de transport : le *courant d'air* (recours beaucoup plus général en tous cas que chez plantes et animaux, même si, par exemple, les Phalles et quelques autres catégories de Champignons font exception avec leur transports de spores assurés par des insectes ou par d'autres moyens et vecteurs).

Juste une petite remarque préliminaire – *mais essentielle* – à ce sujet, remarque qui nous échappe totalement à notre échelle : l'air a une certaine *viscosité*, de sorte que, hors période spécialement ventée, les courants d'air tendent à s'amenuiser et même à s'annuler pratiquement au contact du sol ou des substrats solides : pour que l'aérostation des spores soit efficace il faudra donc que chacune d'elles soit libérée et livrée aux courants d'air à *une altitude* d'au moins quelques centimètres, voire dizaines de centimètres, au-dessus du substrat.

¹ ainsi, chaque Coprin chevelu (*Coprinus comatus*) émet 5 milliards de spores pendant sa sporée de 2 jours ; chaque Rosé des prés (*Agaricus campestris*) envoie 16 milliards de spores en une demi-douzaine de jours ; une belle console de Ganoderme plan (*Ganoderma applanatum*) délivre pas moins de 5 000 milliards de spores pendant sa période fertile de six mois ; enfin chaque Vespe de Loup géante (*Calvatia gigantea*) ne contient pas moins de 7 000 milliards de spores (WEBSTER & WEBER, 2007).

Voilà pourquoi le Champignon, être essentiellement cryptique, vivant caché dans la ressource même qu'il exploite, doit encore s'équiper, en plus, d'un appareil de lancement spécifique, *le carpophore*, appareil spécialement destiné à la « mise en altitude » quasi-indispensable des milliards de spores au moment de leur émission. Appareil qui, presque seul, trahit la présence du champignon hors de son obscur séjour habituel. A telle enseigne que, comme chacun sait, il est d'usage de réduire le Champignon à ce simple appareil de lancement !

Bref le Champignon *fait tout à l'envers, nous déroute à toute occasion*, lui qui se cache constamment pour vivre et ne s'exhibe que dans la plus ou moins brève période de sa reproduction...

La ténuité des spores, bien qu'elle facilite tant la sustentation aérienne, gage de lointaine dispersion, est, d'un autre côté, porteuse d'une terrible menace. Si d'aventure la minuscule spore vient, ne serait-ce qu'effleurer une quelconque surface avant d'être emportée par le zéphyr, son voyage est alors irrémédiablement terminé avant même que d'avoir commencé. C'est la conséquence inévitable de l'importance que prennent les phénomènes de tension (attraction) superficielle aux échelles de tailles aussi microscopiques que celles des spores fongiques. Les forces d'adhésion résultantes deviennent en effet comparativement énormes pour des objets de tailles si microscopiques.

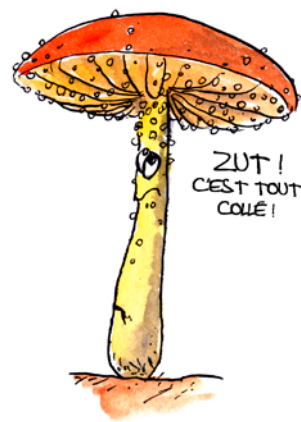
Si le problème est, par construction, restreint chez les Ascomycètes qui, comme on le verra, lancent leurs spores comme avec un mortier, le risque est en revanche beaucoup plus prégnant pour les Basidiomycètes qui libèrent d'abord leurs spores dans les *étroits* couloirs qui séparent les lamelles (ou les tubes) productrices de spores sous le chapeau.

De sorte que chez les *Champignons Basidiomycètes*, l'essentiel de la « philosophie » morphologique et même « comportementale » des basidiophores (les carpophores des Basidiomycètes) s'explique par cette double préoccupation :

- 1°) construire d'abord une petite tourelle, puis fabriquer les spores par milliards et enfin les lâcher ainsi à quelques centimètres (ou décimètres) au-dessus du substrat pour leur faire profiter d'un courant d'air minimal, même par temps calme,
- 2°) et ce, tout en évitant que ces milliards de spores ne viennent se coller bêtement, soit entre elles, soit sur le dispositif même de leur émission. En dépit des apparences, ce dernier problème est d'une extrême difficulté et a déterminé, chez les Basidiomycètes, la mise au point de l'un des dispositifs les plus remarquables et les plus originaux de l'ensemble du monde vivant : *l'extraordinaire système des « balisto-spores »* ('balisto-' issu de 'balistique').

Quant aux *Champignons Ascomycètes*, leur choix s'est orienté vers une solution de lancement vertical évoquant classiquement, on l'a dit, le tir au mortier, d'ailleurs poussé à des extrêmes de performances, comme on le montrera plus loin.

Apprécié sous cet angle fonctionnel, dans une logique constructive éclairante, le Champignon (sous-entendu son fruit : asco- ou basidio-carpe) prend un tout autre et nouvel intérêt, lequel complète et, à notre avis, transforme et magnifie l'attention qui lui est d'ordinaire consacrée.



Les Champignons lancent leurs spores : deux inventions étonnantes et également performantes

Pour que les courants d'air soient un vecteur efficace pour le grand voyage des spores, il faut bien entendu que les spores subsistent le plus longtemps en suspension dans l'air. A cet effet, il faut que les spores soient à la fois les plus larges possibles (afin que l'air ait le maximum de prise sur leur surface afin de freiner leur chute) et les plus légères possibles (pour réduire leur tendance à chuter). Autrement dit, le plus fort ratio taille sur poids est éminemment favorable à l'aérostation et à l'aéro-transportation passive.

Or, à chaque fois qu'on diminue la taille d'une spore, disons d'un facteur dix, on réduit certes sa surface d'un facteur $10 \times 10 = 100$, mais on réduit son volume, et donc aussi son poids, d'un facteur $10 \times 10 \times 10 = 1000$. Par conséquent on augmente son ratio {surface / poids} d'un facteur 10.

La cause est donc entendue : les spores fongiques se doivent d'être, comme on l'a déjà suggéré, au minimum de volume (= poids) qui leur conserve la capacité d'abriter l'atome de vie autorisant encore la germination (pour peu que la spore soit déposée sur la bonne ressource). Et ça tombe bien (si l'on peut dire) puisque voilà une troisième raison qui s'accorde avec la taille d'anachorète des spores des Champignons : minuscules elles *peuvent* l'être, vu leur mode simplissime de prise de nourriture dès l'origine, minuscules elles *doivent* l'être à la fois pour sécuriser leur dispersion lointaine aéroportée et permettre une « portée » suffisamment nombreuse.

Ainsi une spore de champignon basidiomycète typique, mesurant un centième de mm ($10 \mu\text{m}$) ne pèse que 5.10^{-10} gramme, c'est-à-dire qu'il en faut 2 milliards pour faire un gramme !

Facile donc pour ces spores de rester en suspension dans l'air. Et, semblerait-il, plus facile encore de les lancer...

Mais là justement non, c'est tout le contraire ! La viscosité de l'air, qui freine et quasi annule la chute des spores, s'oppose de la même façon à l'avancement des spores après lancement. Pour concrétiser la question, on peut considérer un exemple d'objet à fort ratio { surface / poids } qui soit mieux visible : par exemple, une baudruche bien gonflée.

Essayez donc, par la plus vigoureuse des pichenettes, de la lancer à travers une salle. Impossible : aussi vite soit-elle lancée, aussitôt elle s'arrête, immobilisée par la viscosité de l'air contre laquelle le faible élan de sa masse minime ne peut rien (tandis que bien sûr, une petite bille, de même masse que la baudruche mais de surface infime en comparaison, va traverser l'air sans aucun problème après lancement à la même vitesse).

Pour nos spores, si extraordinairement légères, c'est encore bien pire.

Le calcul et l'expérience s'accordent à conclure que pour progresser ne serait-ce que d'un millimètre ou d'un centimètre (ce qui n'est d'ailleurs pas peu par rapport à leur taille), il faut conférer à ces spores des accélérations de lancement *absolument gigantesques*. Ainsi, pour qu'une spore moyenne d'ascomycète de $30 \mu\text{m}$ s'élève en l'air de, disons, une dizaine de centimètres (en sorte de pouvoir commodément être happée ensuite par un courant d'air) il faut lui conférer une accélération prodigieuse, dépassant 500000 fois l'accélération 'g' de la pesanteur (soit 500000 'g'). Accélération énorme, comparées aux accélérations maximales admises dans le monde de l'aéronautique et de l'aérospatial, lesquelles restent bien inférieures à

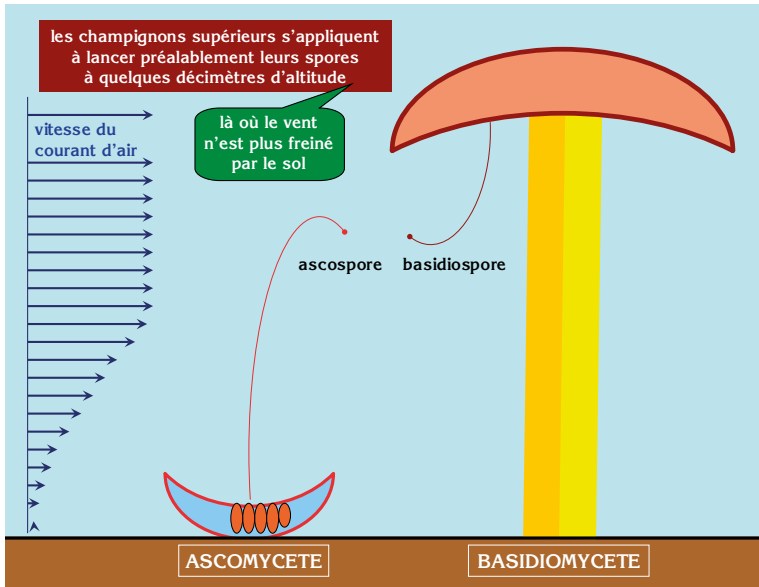


Figure 1. Carpophores des Ascomycètes et des Basidiomycètes : deux types d'inventions originales, deux solutions concurrentes pour assurer la « mise en aérostation » efficace des spores, à hauteur suffisante (quelques centimètres ou décimètres) pour que les courants d'air naturels puissent ensuite les emmener au loin...

A cet égard, d'ailleurs, remercions le ciel de nous avoir offert un air à viscosité non nulle, grâce à quoi, indirectement, peut s'exercer notre (pardonnable) addiction. Nul doute en effet qu'en cas contraire, c'est-à-dire avec un air plus fluide, les courants d'air naturels cesseraient alors de faiblir au contact du sol, de sorte que les Champignons, même supérieurs, ces grands paresseux, n'auraient alors qu'à peine cherché à émerger de leurs hospitalières et souterraines tanières et, sûrement, ne se seraient pas mis en peine de fabriquer de si volumineux (et parfois si savoureux) carpophores !

plus c'est petit, plus c'est costaud ...

Subir 500 000 'g' sans pour autant risquer mourir : ceci n'est pas du délire.

La théorie, comme l'observation, confirment la nécessité - et la possibilité - de telles accélérations prodigieuses au moment du lancement des spores fongiques. Pour comparaison, les accélérations subies par les pilotes de chasse ou les astronautes au lancement ne sont que de quelques 'g'. Vous direz alors : pourquoi ces spores, si infimes et semble-t-il si fragiles, ne s'écraseraient-elles pas tout comme nous ? Pas de souci pour elles ; le calcul et l'expérience nous assurent heureusement que, même soumises à ces accélérations drastiques, les spores ne subissent en fait aucun dommage. Là encore, question de rapport de taille. Les spores et nous différons d'un facteur 100 000 en taille (et 100 000 au cube en poids), autant dire que nous vivons dans des mondes radicalement différents quant aux conséquences des (mêmes) lois de la physique. On peut d'ailleurs le pressentir déjà pour des rapports de tailles moins exotiques, pour des choses non pas 100 000 mais simplement 10 fois plus petites que nous : pour peu qu'un chat et nous retombions sur nos pattes après une chute du cinquième étage, les conséquences ne seront pas les mêmes... question notamment de ratio non plus {surface / poids} mais {taille / poids} : au moment du contact au sol, les dégâts sur les corps sont, en gros, en proportion de l'effort subi c'est-à-dire du poids rapporté au bras de levier sollicité par l'effort. Autrement dit les efforts subis et les dégâts varient comme le rapport poids sur taille : à cet égard le chat est avantaagé par rapport à nous d'un facteur presque 100 fois plus faible. Au reste, les insectes - un milliard de fois plus volumineux que les spores fongiques et seulement un million de fois moins pesant que nous - vivent déjà dans un tout autre monde que le nôtre, où la chute libre, aussi haute soit-elle, n'est jamais fatale (même sans aile), un monde aussi où marcher sur l'eau fait partie de la banalité du quotidien... (pour ces 'effets de taille' souvent surprenants, comme à bien d'autres points de vue d'intérêt général, on consultera avec agrément et profit le célèbre ouvrage de D'ARCY-THOMPSON (1917).

10 'g' et encore avec l'usage impératif de combinaisons dites « anti-g » !

Concrètement ce que représentent des accélérations de la sorte : 500 000 'g' correspond à l'accélération fulgurante qui permet de se propulser de zéro à 125 km/h en à peine plus de 5 microseconde et après un parcours de seulement un dixième de mm. Avec quelques désagréables conséquences associées : 500 000 'g' représente une poussée qui, si elle nous était appliquée, multiplierait par 500 000 notre poids normal, soit environ 30 000 tonnes. Autant dire que sous une pareille poussée on serait mieux qu'écrasé, mieux que liquéfié : atomisé !

Nous oui mais, heureusement, pas les petites spores (voir encart ci-contre)...

Nous voilà donc rassurés quant à la survie de spores projetées à plus de 500 000 'g'.

Encore faut-il trouver le(s) *moyen(s) de lancement* propre(s) à assurer une telle force d'accélération des spores.



La solution des Ascomycètes : le tir au canon

Pour le champignon : "*aide toi le ciel t'aidera*", c'est débrouille-toi *d'abord* tout seul pour projeter ta marmaille avec la décoiffante accélération requise ; le ciel ne fera le reste qu'ensuite : souffler un doux zéphyr pour emmener les spores au loin ...

Évidemment, on a peine à croire qu'une simple petite fructification d'Ascomycète puisse imprimer une accélération de 500 000 'g' (fusse à ces minuscules choses). Et pourtant, c'est bien à quoi parvient « l'asque-canon » des Ascomycètes. Départ arrêté dans l'asque, *la spore en sort effectivement, 7 microsecondes plus tard, avec une vitesse supérieure à 100 km/h après un parcours de lancement*

d'un dixième de millimètre, (l'ordre de taille de l'asque-canon). Ce lancement, si bref et si véloce, est évidemment imperceptible pour nous, sans le secours d'une caméra spéciale ultra-rapide. Ce qui, d'ailleurs, a été fait et a permis de confirmer les durées, vitesses et accélérations prodigieuses susmentionnées.

Comment le champignon (et singulièrement l'asque-lanceur de spores) dispose-t-il de la force nécessaire pour parvenir à cet exploit incroyable ?

Curieusement c'est le talent premier des champignons, la capacité de perforer avec ces fines hyphes les substances dont il se nourrit, qui dans ce nouveau contexte, va encore servir (heureuse coïncidence si l'on peut dire, ou mieux habile exploitation polyvalente d'un précieux don originel).

Considérons par exemple un champignon lignicole. Pour percer le bois (fût-il pourri, mais pas toujours et souvent encore très dur...) avec une hyphe c'est-à-dire un simple filament souple, épais d'à peine un centième de millimètre, il faut évidemment que ce filament soit « bandé à mort » pour opérer cette vigoureuse pénétration sans fléchir... Pour ce faire une bonne solution, comme chacun sait, est de faire monter la pression dans le

liquide interne du tuyau. Ici, dans le liquide interne (le cytoplasme) de l'hyphe. Et dans ce domaine, les champignons sont - une fois encore - champions toutes catégories. Exploitant au maximum les processus d'osmose bio-chimique (voir encart ci-contre), le Champignon est capable de faire monter, à son gré, la pression interne dans ses hyphes jusqu'à des valeurs énormes, de l'ordre de 70 atmosphères (plus de 30 fois la pression dans nos pneumatiques de voitures).

Bon, avec de telles pressions, confinées entre de si minces parois, on va, à nouveau, être tenté de craindre pour l'intégrité, non plus cette fois de la spore, mais de l'hyphe... En effet, comment la paroi hyphale, épaisse d'à peine un micron (un millième de mm), pourrait-elle résister à une pression si énorme. Eh bien, là encore, pas de paradoxe, ce n'est à nouveau qu'une question d'échelle de taille. Avec un diamètre comme le pouce, ou ce qu'on voudra imaginer, l'éclatement serait en effet certain avec une paroi aussi fine. Mais pas pour un tuyauterie aussi ténue en diamètre : une fois de plus, simple affaire de bras de levier, comme pour les chutes comparées d'objets de tailles et poids bien différents, évoquées précédemment. Ainsi donc rassurés sur l'intégrité de l'hyphe, en pressant travail de pénétration nourricière, nous voilà donc avec des champignons dotés de tuyauteries capables de monter sous très hautes pressions. Or de telles tuyauteries pourraient bien voir leur usage judicieusement détourné en vue de servir de vecteur de lancement. Ce qui n'a évidemment pas échappé à l'astuce de nos Ascomycètes.

Question cependant : aussi forte que puisse être cette pression (de l'ordre donc de quelques dizaines d'atmosphères), suffira-t-elle cependant, par sa simple détente, à conférer aux spores la prodigieuse accélération requise ?

La réponse est oui, la meilleure preuve étant que ça marche ! Et pour qui resterait néanmoins sceptique malgré le 'choc des images', reste celui 'des mots' ou plutôt des calculs : l'Annexe propose, à cet usage, un calcul estimatif qui démontre l'effective parfaite plausibilité des faits allégués.

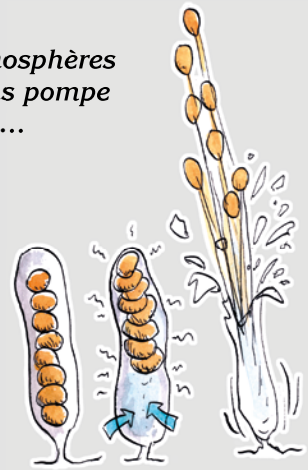
Malgré leur tempérament pacifique, les Ascomycètes, préoccupés de bien lancer leurs spores, se sont donc décidés à se faire grands **canonniers**.

Les Basidiomycètes, soucieux de ne pas être en reste, ont aussi élaboré une stratégie efficace pour le lancement de leurs spores. Mais comme il faut bien se distinguer, la voie suivie par eux est totalement distincte de celle des Ascomycètes.

soixante-dix atmosphères de pression, sans pompe ni piston ...

Les hyphes (boyaux de moins d'un centième de mm de diamètre) ne disposent évidemment pas de pompe pour faire monter leur pression interne. Ou plutôt ils possèdent bien une 'pompe', mais pas au sens mécanique habituel. Ils disposent en fait d'une sorte de pompe 'chimique'. L'astuce (bien connue aussi ailleurs dans le monde vivant mais que les champignons savent

exploiter en maîtres) consiste pour les hyphes à accumuler dans leur contenu liquide interne des éléments ou molécules dissous (ions minéraux, sucres,...voir WEBSTER & WEBER (2007), TRAIL *et al.* (2005) en teneurs bien supérieures à leur environnement aqueux naturel. Pour rétablir l'équilibre des teneurs (à quoi la physique tend toujours), la seule solution est que l'eau extérieure vienne pénétrer dans l'intérieur des hyphes, en traversant les fines parois, pour réduire ainsi la teneur en éléments dissous du liquide interne. Cette entrée en force d'eau dans les cellules (« osmose ») peut faire monter la pression à des niveaux vertigineux... Là est tout le secret de cette mise sous pression exceptionnelle (COLINVAUX, 1982). Une fois de plus c'est la chimie qui est mise à contribution à toutes les sauces, comme c'est si souvent le cas dans le monde vivant, mais plus particulièrement encore chez les Champignons...



La solution des Basidiomycètes : la haute tour de largage et la 'pichenette hydrodynamique'

Pour délivrer leurs spores aux 'altitudes' où règnent les courants d'air, les Basidiomycètes adoptent une tactique (à première vue) moins astucieuse que celle des Ascomycètes, car plus évidente et moins économe de matière. Les spores des basidiomycètes sont, chez la plupart des espèces, émises à partir d'une sorte de plateforme (le chapeau) érigée au sommet d'une tour (le pied ou stipe).

Noter qu'auprès du public gourmand, la relative débauche de matière nécessaire à la construction de l'édifice ne représente certes pas un mauvais choix et explique évidemment la popularité des Basidiomycètes (alors que les Ascomycètes, aux fructifications souvent peu charnues, sont ordinairement ignorés ou au moins délaissés (sauf dans les rares occurrences où le fruit est quelque peu consistant [morilles, truffes...], mais alors quel bonheur pour les papilles des gastronomes).

Ceci étant, la tactique ultérieure présidant au lancement des Basidiomycètes à partir de cette tourelle mérite pour le moins *autant attention et admiration* que la technique propres aux Ascomycètes.

Elle nous révélera une mécanique encore plus originale que le tir de mortier.

Voici donc les basidiospores, directement fabriquées 'en altitude' sous le chapeau-plateforme et enfin prêtes à être larguées dans le 'vide'.

Toutefois, le détachement des spores de leur berceau en surplomb ne pourra pas se faire aussi naturellement et simplement que s'il s'agissait de spores ayant les tailles honnêtes des graines végétales : une fois de plus question d'échelle dimensionnelle ! En effet, compte tenu du poids infime des basidiospores (usuellement, environ dix fois plus légères encore que ne le sont les ascospores), les forces de cohésion inter-faciales (cohésion de simple contact) deviennent comparativement extrêmement importantes. Au moment de leur détachement, les basidiospores devront donc *impérativement* éviter tout contact ou même simple effleurement avec les lamelles entre lesquelles elles sont émises. Pour éviter tout piégeage de la sorte, au cours de leur descente au long de l'étroit espace entre les lames, les spores devront donc être préalablement projetées à mi-distance de l'intervalle inter-lamellaire (ou, pour les champignons porés, projetées vers l'axe des tubes). L'effort de projection semble, cette fois, devoir rester modeste, pour un parcours qui ne doit alors guère dépasser l'ordre du demi-millimètre.

En fait l'accélération imprimée devra rester considérable car, bien plus légère encore que les ascospores, les basidiospores vont rencontrer une résistance de l'air encore bien plus forte. Le calcul (similaire à celui évoqué précédemment pour les Ascomycètes mais qu'on ne reprendra pas ici) aussi bien que l'observation au moyen de micro-caméras

ultra-rapides, montrent que l'accélération à communiquer aux basidiospores reste encore énorme (et toujours effroyablement « écrasante » à notre échelle) : de l'ordre de 10 000 'g'. La vitesse de largage initiale correspondante, d'environ 1 200 mm/s, conduirait à un parcours de 200 000 fois la longueur de la spore en une seconde (ramené à notre taille, cela ferait quelque 300 km par seconde !). La folle envolée des basidiospores durera évidemment infiniment moins longtemps qu'une seconde, l'air arrêtant la lancée en seulement une fraction de microseconde. Temps suffisant néanmoins pour *éloigner suffisamment* la basidiospore de l'hyménium, en lui faisant franchir le demi-millimètre salvateur. Permettant, dès lors, une tranquille descente entre les lamelles ou les tubes générateurs, sans risque de collage aux parois, jusqu'à trouver enfin l'air libre et le souffle léger qui emportera les spores vers de lointains atterrissages.

C'est la façon de créer cette petite pichenette à 10 000 'g' qui fait toute la *remarquable originalité* des Basidiomycètes dans ce domaine.

La méthode utilisée apparaît d'autant plus singulière que, pour une fois, elle ne semblerait pas avoir été copiée, jusqu'à présent, par notre technologie. Il est vrai que cette invention semble assez clairement réservée au monde microscopique et, dans cette perspective, pourrait peut-être avoir un jour des applications relevant des nano-technologies. La force motrice utilisée est en effet, ici, la *tension superficielle*, force qui ne saurait, en pratique, se révéler efficace que dans le monde des forts ratios surface/volume, autrement dit essentiellement dans le monde microscopique.

Détailons : les basidiospores se forment à l'extrémité de petites pointes (stérigmates) qui, par quatre, couvrent la baside, cellule génératrice des spores (figure 2). Or, dès le début du siècle dernier, des observateurs minutieux (BULLER, 1922 ; INGOLD, 1939) avaient déjà observé, au plus fort grossissement du microscope optique, qu'au point d'insertion de la spore sur le stérigmate, apparaît progressivement une petite gouttelette sphérique dont l'origine et surtout la fonction devaient rester longtemps mystérieuses, jusqu'à ce que, récemment, le mystère soit enfin dévoilé, en même temps que la performance balistique associée.

Chacun a pu constater, à l'occasion, que lorsque deux gouttes d'eau, étalées sur une surface (par exemple du verre) se trouvent à venir en mutuel contact, alors, brusquement la plus petite se précipite *vers* puis *dans* l'autre, pour enfin se fondre en elle en un infime instant. On en connaît bien la raison, qui est que la fusion des deux gouttes diminue

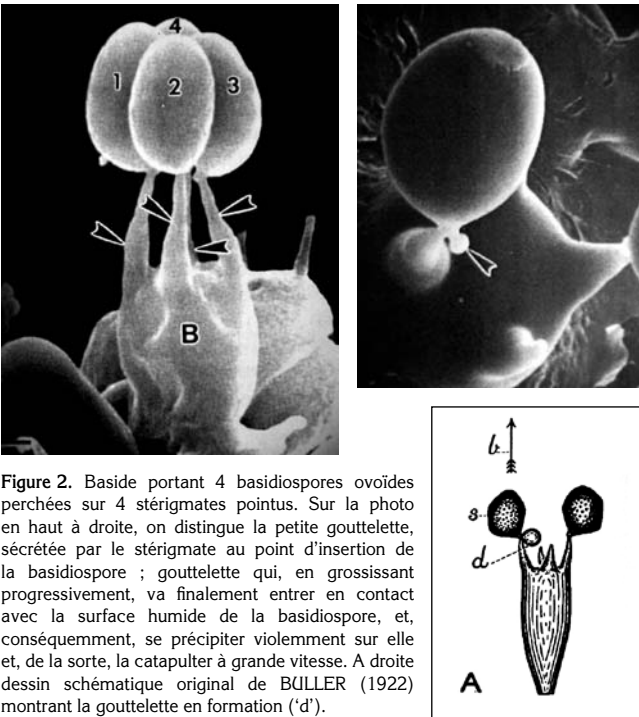


Figure 2. Baside portant 4 basidiospores ovoïdes perchées sur 4 stérigmates pointus. Sur la photo en haut à droite, on distingue la petite gouttelette, sécrétée par le stérigmate au point d'insertion de la basidiospore ; gouttelette qui, en grossissant progressivement, va finalement entrer en contact avec la surface humide de la basidiospore, et, conséquemment, se précipiter violemment sur elle et, de la sorte, la catapulte à grande vitesse. A droite dessin schématique original de BULLER (1922) montrant la gouttelette en formation ('d').

leurs surfaces libres cumulées et diminue d'autant l'énergie superficielle qui 'tient' la goutte d'eau (la 'peau' de l'eau). Or, on voit ainsi que, déjà à l'échelle centimétrique ou millimétrique des gouttes ordinaires, cette force est suffisante pour projeter assez violemment la petite goutte sur la grosse. On imagine dès lors qu'à l'échelle mille fois plus petite du micron – celle des spores – l'effet est mieux que décuplé en raison de l'accroissement considérable du ratio surface/masse : multiplié par 1 000.

Et c'est bien là le processus de lancement des basidiospores : quand la spore est mature, le stérigmate secrète la petite gouttelette sus-mentionnée à la base de la spore (figure 2).

La spore elle-même est humide en surface, en sorte que lorsque la gouttelette, croissant en volume, arrive au contact de la spore, elle vient, avec une inimaginable célérité, se fondre sur la surface sporale, communiquant à celle-ci, par entraînement, une quantité de mouvement absolument énorme, comparativement à sa masse. La conversion de cette énergie superficielle en énergie cinétique lance la spore avec la prodigieuse accélération (environ 10 000 'g') nécessaire !

Encore une fois, l'intuition a du mal à intégrer les conséquences surprenantes liées au changement d'échelle.

Les faits, à échelle microscopique, semblent vouloir violer le bon sens ! Mais il en est pourtant bien ainsi cependant. Et, après tout, pourquoi ne pas apprécier que les Champignons nous offrent, à ce point de vue aussi, tant de dépaysement...

des faits d'observation incontestables

Des observations expérimentales minutieuses menées récemment sur des Ascomycètes (TRAIL *et al.*, 2005) montrent que les spores bénéficient bien d'une vitesse de lancement de plusieurs dizaines de m/s au sortir de l'asque (en l'occurrence pour le cas considéré, 35 m/s soit pas moins de 125 km/h !), leur permettant de s'élever des quelques centimètres ou décimètres favorables au grand départ aéro-sustenté. Comme on a dit, la résistance visqueuse de l'air, face à ces 'poids-plume', est en effet suffisamment intense pour ramener leur vitesse initiale (typiquement 'autoroutière') à zéro après guère plus d'un décimètre de parcours à travers l'air 'poisseux'. Autrement dit, les spores, dès que lancées, subissent une prodigieuse décélération qui est semblable à celle subie par les occupants d'une voiture projetée à 125 km/h contre un mur quasi rigide : l'air oppose bien littéralement 'un vrai mur' à l'avancement des spores ! Pour autant, pas d'inquiétude pour le bien-être des spores, on l'a déjà souligné et expliqué : leur minuscule taille les situe dans un autre monde (à cet égard meilleur) que celui qui nous est familier.

La vitesse de 125 km/h acquise au sortir de l'asque, après un lancement d'environ un dixième de millimètre, correspond, par définition même de l'accélération, à une valeur de l'ordre de 600 000 g, comme on s'en convaincra sur parole ou mieux encore, en consultant l'Annexe.

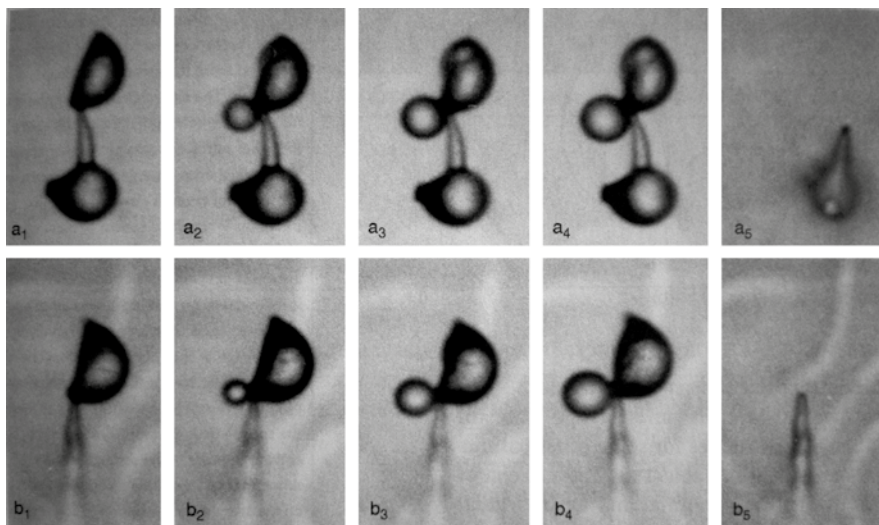


Figure 3. Deux séquences montrant chacune : de 1 à 4, le grossissement progressif de la gouttelette basale ; puis, en 5, le stérigmate seul après catapultage dont l'instantanéité n'a pas permis la photographie (d'après WEBSTER & WEBER (2007)).

Annexe : Quelques calculs en appui explicatif des observations concernant l'éjection des ascospores

aspect cinématique : estimation de l'accélération d'éjection des spores dans 'l'asque-canon'

Juste un tout petit peu de calcul pour qui veut se convaincre que la théorie soutient et surtout explique bien les étonnantes évaluations expérimentales concernant la démentielle accélération subie par les ascospores, au long de leur mini-parcours dans leur asque-canon. Soit :

- l : longueur moyenne parcourue dans l'asque, disons $0.1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$;
- t : temps courant ;
- T : durée de lancement dans le canon ;
- γ : accélération subie par les spores dans l'asque ;
- v : vitesse courante ; v_e : vitesse de sortie (requis) au débouché de l'asque, soit 35 m/s constaté (et donc sans doute requis par la sélection naturelle) dans le cas cité.

On a : $v(t) = \gamma t$

$$\text{et } l = \int v(t) dt = \int \gamma t dt$$

[l'intégration sur t allant de 0 à T] soit :

$$l = \frac{1}{2} \gamma T^2 \quad \text{① (classique !!)}$$

D'autre part :

$$v_e = \int (\partial v / \partial t) dt = \int \gamma dt$$

[intégration sur t de 0 à T] soit :

$$v_e = \gamma T, \text{ d'où } T = v_e / \gamma \quad \text{② (toujours bien classique)}$$

Éliminant T , inconnu, entre ① et ②, il vient :

$$\gamma = \frac{1}{2} (v_e)^2 / l$$

D'où, compte tenu de v_e observé = 35 m/s et $l = 10^{-4} \text{ m}$:

$\gamma = \frac{1}{2} (35)^2 / 10^{-4} =$ environ 6 millions m/s^2 soit environ 600 000 'g' ('g' étant l'accélération de la pesanteur soit environ 10 m/s^2)

On est bien dans les ordres de grandeur annoncés de 500 000 'g'

Soumises à 600 000 'g', les ascospores supportent (un bref instant) une poussée correspondant à 600 000 fois leur poids, ce qui ne les incommode nullement pour les raisons qu'on a dites (et qui montrent que le monde familier n'a plus du tout cours quand on change à ce point d'échelle).

A propos d'instant, celui passé à circuler dans l'asque-canon, se chiffre à :

$$T = v_e / \gamma = 35 / 6\,000\,000 = 6 \mu\text{s} \text{ (6 microsecondes)}$$

Six petits millièmes de seconde pour monter à 125 km/h départ arrêté : record mieux que battu : écrasé !

aspect dynamique : estimation de la pression à l'origine de l'éjection des spores

Pour finir avec le 'canon' des Ascomycètes, encore un petit bout de calcul élémentaire concernant la vigueur – au demeurant toute relative – du « piston » responsable de cette fantastique accélération balistique (qui laisse loin derrière la fameuse 'Columbiad' du célèbre « Voyage vers la Lune » de Jules Verne).

Soit à estimer la pression moyenne P exercée à l'arrière du train des 8 ascospores au long de leur trajet d'éjection ' l ' dans l'asque-canon (trajet qu'on a déjà estimé à : $l = 100 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ m}$).

On procédera, par commodité, par le biais de l'énergie mise en jeu.

L'énergie motrice est le produit de la force $P.S$ (où S est la section du train, c'est-à-dire le calibre, que nous évaluerons en gros à $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} = 100 \mu\text{m}^2 = 10^{-10} \text{ m}^2$).

L'énergie fournie correspondante est :

$$\varepsilon = P.S.l \text{ soit } \varepsilon = P.10^{-10}.10^{-4} = 10^{-14}.P \text{ (en Joules)}$$

Cette énergie, communiquée aux huit spores de l'asque, leur permet d'acquérir une vitesse de sortie v_e de 35 m/s . Chaque spore ayant une masse m d'environ 10^{-12} kg , il vient :

$$\varepsilon = 8(\frac{1}{2} m v_e^2) = 4 m v_e^2 \text{ soit } \varepsilon = 4.10^{-12}.35^2 = 5.10^{-9} \text{ Joule.}$$

Il vient donc pour P ($=\varepsilon/10^{-14}$: cf. plus haut) :

$$P = 5.10^{-9} / 10^{-14} \text{ c'est-à-dire } P = 5.10^5 \text{ Pa} = 0,5 \text{ MPa (Pa : Pascal) ;}$$

disons de l'ordre du MPa, c'est-à-dire de la dizaine d'atmosphères (1 atmosphère = $1 \text{ kgf} / \text{cm}^2 = 0,1 \text{ MPa}$).

Ces résultats de calcul sont bien conformes aux quelques mesures directes de pression de turgescence réalisées dans les asques de différentes espèces : $0,3 \text{ MPa}$ (= 3 atmosphères) chez *Ascobolus immersus* (FISCHER *et al.*, 2004) ; $1,54 \text{ MPa}$ (= 15 atmosphères chez *Gibberella zeae* (TRAIL *et al.*, 2005) ; ainsi que des valeurs encore un peu plus élevées quand les asques sont en environnement aqueux (INGOLD, 1939, 1966).

On notera que de telles pressions, obtenues par apport osmotique de liquide, sont d'un ordre de grandeur courant et n'atteignent même pas les niveaux de pressions osmotiques qui peuvent à l'occasion se rencontrer au sein des hyphes : point même n'est besoin des quelque 70 atmosphères de pression relatives plus haut....

La 'performance pression' dans « l'asque-canon » n'a donc finalement rien que de très banal dans le monde fongique !

Bibliographie

- BÉGUINOT J. 2008. Menues réflexions à propos de la reconstitution de l'histoire évolutive des champignons. *La Lettre de la Société Mycologique de France* 11: 3-8.
- BÉGUINOT J. 2009. Une Balade philosophico-naturaliste dans l'intimité de la vie des Champignons. Édité par l'auteur, Le Creusot.
- BULLER A.H.R. 1922. *Researches on Fungi* 2. Longmans, Green & Co, London, 492 p.
- COLINVAUX P. 1982. *Les manèges de la vie, cycles et ruses de la nature*. Éd. du Seuil, Paris, 251 p.
- D'ARCY THOMPSON W. 1917. *On growth and Form*. Cambridge University Press - *Forme et Croissance*. Éd. du Seuil, Paris, 336 p.
- DURRIEU G. 1993. *Ecologie des Champignons*. Éd Masson, Paris, 207 p.
- FISCHER M., COX J., DAVIS D.J., WAGNER A., TAYLOR R., HUERTA A.J. & MONEY N.P. 2004. **New information on the mechanism of forcible ascospore discharge from *Ascobolus immersus***. *Fungal genetics and Biology* 41: 698-707.
- INGOLD C.T. 1939. *Spore discharge in Land Plants*. The Clarendon Press, Oxford, 178 p.
- INGOLD C.T. 1966. Aspects of spores liberation : violent discharge. In : MADELIN, M.F. (ed.) *The Fungus Spore*. Butterworths, London: 113-132.
- TRAIL F., GAFFOOR I. & VOGEL S. 2005. Ejection mechanisms and trajectory of the ascospores of *Gibberella zeae* (anamorph *Fusarium graminearum*). *Fungal Genetics and Biology* 42: 528-533.
- WEBSTER J. & WEBER R. 2007. *Introduction to Fungi*. Cambridge University Press, Cambridge, 841 p.



Jean BÉGUINOT

Disposition régulière et verticalité respectée pour les lamelles porteuses des basides sporifères (ici chez *Mucidula mucida*, frêquent sur le bois des hêtres sénescents).