

Le transport de l'eau dans l'arbre (1727) à (1914)

1

2

La compréhension des mécanismes du transport de l'eau du sol à l'atmosphère à travers l'arbre est à la fois un des problèmes de physiologie végétale les plus anciennement étudiés et l'un de ceux qui a suscité le plus de polémiques et qui a le plus résisté aux investigations. L'exposé ci-dessous est un parcours, parmi bien d'autres possibles, de cette longue histoire, parcours qui s'étend sur deux siècles environ, soit de 1727 à 1924. Trois étapes correspondant chacune à un auteur et à une œuvre marquante ont été choisies : Hales et sa *Végétable Staticks* (1727), Duhamel du Monceau et son traité *La Physique des arbres* (1763) puis bien plus tard, Dixon et son ouvrage principal *Transpiration and the Ascent of Sap* (1914).

Il convenait ici, dans toute la mesure du possible, de parler de Duhamel du Monceau, qui, comme on le verra, tient une place à part et très intéressante dans cette histoire de notre compréhension de la physique de la montée de la sève. Pour chacune de ces trois étapes, après une courte biographie, on examinera succinctement le contexte scientifique, le contenu de l'ouvrage principal et les principales caractéristiques du travail telles qu'on peut les apprécier aujourd'hui, la consigne étant d'insister sur les ruptures et les continuités, c'est donc à travers ces deux aspects en particulier qu'une opinion sur ces œuvres sera exprimée.

Les historiens présents le remarqueront sans doute rapidement, je ne suis pas, et je le regrette, l'un des leurs. Même si on porte de l'intérêt à cette matière, on ne s'improvise pas pour autant historien des sciences. Je leur demande donc une certaine indulgence ! Ce qui pourra les intéresser, j'espère, c'est la vision et l'analyse d'un scientifique sur un problème historique de sa discipline.

Dans les œuvres examinées, je me limiterai à ce qui concerne les mécanismes de montée de la sève. Mais, dans chacune d'entre elles, bien d'autres aspects extrêmement intéressants existent qui pourraient être discutés.



Destiné à la prêtrise, Stephen Hales (1677- 1761) est envoyé à Cambridge pour ses études. En plus de la théologie, il se consacre à la botanique, à la biologie animale, et à la construction de machines ingénieuses. Hales est en effet un inventeur né qui a publié sur un grand nombre de sujets qui vont des ventilateurs à la physiologie animale et à la chimie. Une fois pasteur, il obtient la charge perpétuelle de la cure de Teddington toute proche de Cambridge. Hales est surtout connu pour son oeuvre principale *Statical Essays* en deux parties : *Végetable Staticks* (1727) l'ouvrage analysé ci-dessous, et *Haemastaticks* (1733) où sont rapportés ses travaux sur la mesure de la pression artérielle chez les animaux.

C'est l'époque de la Révolution scientifique laquelle inaugure l'utilisation des deux bases sur lesquelles repose encore notre science : le calcul et l'expérience (*ratio-experientia*). Parmi les grands noms contemporain de Hales, il faut citer Bernoulli qui s'intéresse à la circulation du sang et publie en 1738 un ouvrage sur la force et le

mouvement des fluides, qu'il appelle l'*hydrodynamica*, Stahl et son traité du soufre (1772) dans lequel il suppose l'existence dans tous les corps d'un principe inflammatoire lourd, le fameux « phlogistique » dont l'idée sera reprise par Lavoisier vers les années 1772-1775 et bien sûr Newton (1642-1727) pour lequel Hales a une très grande admiration et qu'il connaît très bien.

Les savants se rangent souvent en de vrais partis opposés, les « cartésiens » contre les « newtoniens » les premiers mettant l'accent sur la théorie plus que sur l'expérimentation, contrairement aux seconds. Boyle (1627-1691) est un des illustres représentants de la philosophie expérimentale adoptée par la Royal Society of London. Ce sont les newtoniens qui introduisent à l'université les premiers cours de physique expérimentale au tournant du siècle.

Membre de la Royal Society of London, Hales est convaincu que c'est par « la philosophie expérimentale » que notre connaissance de la nature croîtra. Il écrit dans la préface de son livre : « *Since we are assured that the all wise Creator has observed the most exact proportions, of number, weight and measure, in the make of all things ; the most likely way therefore, to get any insight into the nature of those parts of the creation, which come within our observations, must in all reason be the number, weight and measure* ».

On l'a vu, Hales est très proche de Newton. Il lit son *Opticks*, écrit sous une forme très pédagogique qui utilise de nombreuses « questions » (*queries*). Cet ouvrage l'influencera profondément dans la rédaction de son propre livre ; maintes fois il cite des passages de l'*Opticks* de Newton et procède de la même manière que celui-ci, posant des questions auxquelles il répond par des expériences précises. Les résultats de Hales confortent les idées de Newton, qui meurt l'année où est publié *Végetable Statics*, mais non sans avoir donné son imprimatur à cet ouvrage.

Un des grands domaines de recherche est l'étude des gaz, dans laquelle Hales se montre particulièrement actif. La notion de « gaz » telle que nous la concevons n'existe pas à cette époque, non plus d'ailleurs que la distinction entre gaz, liquide et solide. Par exemple l'air est conçu comme un « fluide élastique » ; le terme « air » peut aussi vouloir dire « eau ». Pour donner une idée de la difficulté à bien comprendre Hales, voici une citation tirée de la traduction de *Végetable Statics* faite par Buffon (p. 140) : « Après avoir fait

plusieurs expériences pour prouver que l'air est tiré des végétaux non seulement par leur racines mais aussi en plusieurs endroits du tronc et des branches et après avoir vu très clairement monter cet air en grande abondance dans le temps des pleurs de la vigne, je me senti porté à faire des recherches plus particulières sur la nature de ce fluide ».

À cette même époque, l'hypothèse dominante est qu'il existe chez les plantes une circulation de la sève analogue à celle du sang chez les animaux et qui irait dans le sens ascendant à travers la partie interne du tronc ou de la tige et dans le sens descendant par la partie externe. D'une façon générale le modèle animal est extrêmement présent et l'étude du fonctionnement des plantes se fait par référence à ce modèle.

 (1727)

Ce livre de 216 pages est consacré d'une part à des expériences sur la transpiration, l'absorption et les mouvements de la sève dont il sera question ici, d'autre part à des comptes rendus d'expérience sur les « gaz ».

Le propos majeur de l'auteur est très clair : pour comprendre, il faut dénombrer, peser et mesurer. Il a appliqué ce principe sur des plantes d'une façon sans doute jamais aussi poussée avant lui et, pour ce qui concerne les « gaz », sur une très grande variété de corps de toute nature qu'il faisait chauffer et dont il recueillait « l'air » c'est-à-dire les gaz qui s'en échappaient.

Vegetable Staticks est divisé en chapitres d'importance très inégale, chacun contenant un certain nombre d'expériences numérotées (124 en tout) autour d'un sujet particulier. Il traite ainsi de la transpiration, de la poussée racinaire et du problème central de la circulation de la sève. L'auteur non seulement montre l'existence de cette dernière – les pleurs de la vigne au printemps – mais il met aussi en évidence qu'une telle « poussée » se rencontre également dans les branches et le tronc.

Le chapitre VI fait à lui seul à peu près la moitié du livre entier. Il montre à quel point l'analyse de « l'air » c'est-à-dire des gaz issus

du chauffage d'échantillons végétaux, d'animaux ou des substances les plus diverses est, pour Hales, tout à fait crucial, au moins autant que l'étude des végétaux eux-mêmes. Le dernier chapitre est consacré à la façon dont Hales comprend la croissance des plantes. Dans sa conclusion il résume sommairement les résultats de ses recherches avant d'en donner les implications pratiques.

L'ingéniosité de Hales est immense ; elle transparaît dans les dispositifs extrêmement ingénieux qu'il utilise pour ses mesures les plus diverses. Il fait très souvent des comparaisons, quelquefois surprenantes, avec les animaux. Hales démontre enfin, et c'est une de ses découvertes les plus importantes, que la théorie selon laquelle la sève circule dans les plantes comme le sang dans le corps, est fausse. La sève, en effet, ne circule pas dans un circuit fermé sous pression.

Vegetable Staticks sera traduit en plusieurs langues. C'est Buffon qui en 1735 fait paraître la traduction française, augmentée de nouvelles expériences de Hales.



La grille de lecture proposée convient bien au travail de Hales, lequel peut se caractériser par deux ruptures.

Première rupture. Il s'agit de l'utilisation systématique de la méthode expérimentale et de la quantification des résultats, surtout les pesées, mais aussi les surfaces foliaires, les dimensions des échantillons, les volumes d'eau utilisés, le recours systématique au thermomètre. Bien que Hales ne soit pas le premier à utiliser la méthode expérimentale, on ne connaît pas, dans ce domaine, de travail équivalent avant lui pour tenter de comprendre le fonctionnement des plantes. Il fait ainsi un très grand pas dans l'approche physique de la transpiration et de l'absorption.

La deuxième rupture tient au rapport « aux paradigmes » dominants et au fait que la circulation chez les végétaux est très différente de la circulation chez les animaux. L'impact des travaux de Harvey, un bon siècle auparavant, reste immense. En considérant le cœur et le réseau des vaisseaux et artères comme un système hydrodynamique

de pompes, de tuyaux et de valves et surtout en montrant que c'était le même sang qui revenait sans cesse au cœur qui donc circulait, Harley a donné un « modèle » que les botanistes ont voulu appliquer aux plantes. Il y avait une sève montante qui se transformait en sève descendante. Or Hales à travers une série d'expériences très ingénieuses a montré qu'on pouvait vraiment inverser le sens du mouvement de la sève, que celle-ci, dans les conditions normales montait, qu'elle ne descendait pas et qu'il n'y avait pas dans le bois de circulation comparable à celle du sang chez les animaux. C'est là une conclusion extrêmement novatrice et importante, qui va permettre petit à petit de ne plus voir la physiologie des plantes à travers le seul prisme animal. Pour son époque, c'est sur ce point que Hales est le plus révolutionnaire. Mais pour nous, ce n'est pas là l'essentiel. D'autres, parmi ses conclusions, paraissent plus remarquables encore, comme d'avoir montré que la transpiration est très dépendante des facteurs climatiques et proportionnelle à la surface foliaire, et surtout d'avoir confirmé une hypothèse très controversée à l'époque, à savoir que c'est bien le sol qui est le réservoir d'eau pour la plante. L'expérimentation à l'origine de cette dernière conclusion ressemble beaucoup à ce que nous appellerions un bilan hydrique d'un sol.



Henri-Louis Duhamel du Monceau (1700 -1782) est un homme du siècle des lumières, savant et ingénieur d'une activité prodigieuse et très diversifiée. Collaborateur de l'*Encyclopédie* de Diderot, il fut aussi président de l'Académie des sciences et à partir de 1742 inspecteur général de la Marine. Les deux tâches qui l'occuperont plus particulièrement sont la rénovation de la marine royale et la rédaction des six volumes de son *Traité des Bois et Forêts*.

Duhamel du Monceau connaît bien Hales avec lequel il entretient, comme avec un grand nombre d'autres savants européens, une correspondance très suivie.

Mis à part le fait qu'il est français, l'univers de Duhamel du Monceau diffère peu de celui de Hales et le décalage entre eux est d'environ une génération humaine. Les notions de physique dont se servent les auteurs restent, certes, encore singulièrement floues. Pour n'en donner qu'un exemple, voici comment Duhamel du Monceau définit la sève et la transpiration dans le glossaire des termes qui termine *La Physique des arbres* : « Sève : c'est l'humeur qui se trouve dans le corps des plantes, prise d'une façon générale, car on aperçoit qu'il y a dans les plantes différentes liqueurs, comme la lympe, le suc propre, etc. ». Membre de l'Académie des sciences, il est entouré de très prestigieux collègues comme Lavoisier, Buffon, de Jussieu, de Rouelle, de Réaumur, Guettard, ou Malesherbes.

2 3 4 5 6 A (1763)

Fort d'environ 700 pages, cet ouvrage fait partie du *Traité des forêts* dont la publication s'échelonne entre 1755 et 1767. Le livre est extrêmement riche et une petite partie seulement est consacrée à la physique de la sève et de ses mouvements. Dans ce livre en effet l'auteur consigne tout son savoir et toute son expérience en botanique, physiologie (on disait alors « économie ») végétale, arboriculture et technologie du bois. Dans chacun des articles de ses divers chapitres, il fait le point des connaissances de son époque sur un sujet très précis comme par exemple la transpiration insensible ou la transpiration sensible des plantes (la différence entre les deux étant assez subtile), les expose et les discute. Il répète lui-même parfois certaines expériences et relate le travail de Hales souvent avec plus de clarté que ce dernier ne le fait lui-même.

Nous avons affaire ici à un observateur avisé autant qu'à un expérimentateur innovant qui, par rapport à Hales, traite d'un domaine de connaissances bien plus vaste. On trouve en outre dans le caractère et la méthode de Duhamel du Monceau quelque chose d'unique et de très précieux pour nous aujourd'hui : l'essentiel des résultats obtenus par ses prédécesseurs et ses contemporains est présenté d'une façon très claire et systématique. Il est un bien meilleur vulgarisateur que Hales, par rapport à qui on reste toutefois dans la continuité.

A
(1914)

Professeur de botanique à Dublin, Henry Horatio Dixon (1869-1953) s'intéresse à la montée de la sève après un séjour chez Strasburger, à Bonn. Dixon est né et mort à Dublin où il a passé pratiquement toute son existence. Il s'est lié avec John Joly, un professeur de physique de l'université de Dublin, lequel va jouer un très grand rôle dans la mise au point par Dixon de sa théorie de la cohésion de l'ascension de la sève dans les arbres.

Il a changé de fond en comble depuis que la physique a fait son entrée dans la physiologie végétale et que le modèle animal n'est plus une référence. À propos de la montée de la sève dans les arbres en particulier, on retrouve l'opposition classique entre vitalistes et physiciens. Les premiers, comme Jamin (1860) et Godlewsky (1884) expliquent ce phénomène en supposant que les cellules des

plantes ont des propriétés particulières. Les seconds, dont l'un des plus convaincants est précisément Eduard Strasburger de Bonn, font intervenir des phénomènes physiques.

Même si globalement les explications physiques du problème de l'ascension de la sève prennent graduellement le dessus, des questions non résolues comme par exemple la tension de l'eau ou le problème des bulles dans les vaisseaux, constituent une espèce d'obstacle épistémologique à l'acceptation d'une explication purement physique de la montée de la sève. On a cependant l'impression que tout est en place pour qu'enfin une explication physique solide de la montée de la sève voie le jour, car un grand nombre de scientifiques, allemands en particulier, y travaillent.

W. A. Dixon (1914)

Dans l'introduction, Dixon donne d'emblée l'essentiel de son propos : « *an account is given of a physical explanation of the rise of water in trees* ». Puis en dix chapitres représentant 216 pages en tout, il va critiquer les explications données jusque là et montrer en quoi les expériences qu'il a faites et qu'il expose en détail, appuient sa théorie de la cohésion de l'ascension de la sève développée au chapitre IV. Il donne en particulier une explication qui reste toujours valable à deux questions fondamentales, la courbure des surfaces d'évaporation et la pression négative des vaisseaux de sève.

C'est en effet grâce à la courbure variable des surfaces d'évaporation dans les feuilles que la transpiration induit une tension de l'eau dans les éléments conducteurs. Des colonnes d'eau continues existent depuis le sol avoisinant les racines jusqu'aux feuilles. Elles tiennent par capillarité car les rayons de courbure de ces surfaces d'évaporation sont suffisamment fins pour permettre l'existence de colonnes de plus de 100 mètres de hauteur.

L'eau tirée vers le haut, est donc sous tension c'est-à-dire qu'elle est soumise à des pressions négatives importantes. C'est un état physiquement instable dans lequel peut se produire de la cavitation produisant une entrée d'air dans les vaisseaux. Mais la cohésion des molécules d'eau est suffisante pour résister à cette embolie. Dixon présente ici l'instrument qui a permis de réaliser l'expérience décisive

de l'existence de grandes tensions de la sève aux yeux de beaucoup : la chambre de pression, toujours utilisée de nos jours. Ainsi, s'explique comment, soumise à une pression de trois bars, une plante absorbe quand même l'eau dans laquelle baigne sa tige.

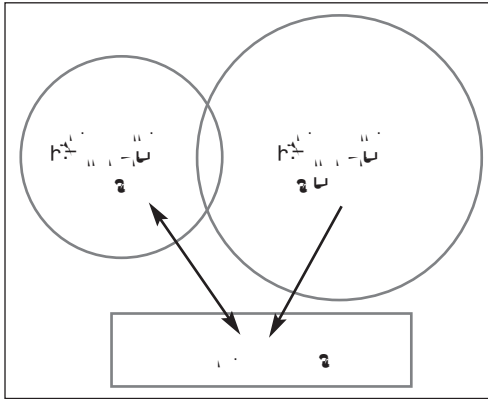


Grâce à ce livre et à des articles qui l'ont précédé, Dixon est considéré aujourd'hui comme le père de l'explication physique de la montée de la sève. On peut en discuter car c'est en effet Strasburger qui a fait bien plus qu'initier Dixon aux problèmes physiques de la montée de la sève. Son ouvrage de 1914 restera pendant des décennies un ouvrage de référence, encore que très peu lu, paradoxe assez classique.

La découverte majeure de Dixon est évidemment la chambre de pression et l'usage qu'il en fait. Cet instrument sert aujourd'hui encore à déterminer les potentiels hydriques. On est donc jusqu'ici dans une certaine continuité. En revanche depuis peu s'est produite une rupture, avec l'introduction de la notion de potentiel hydrique que Dixon ne connaissait pas. Il affirmait cependant qu'il devait bien exister des « actions vitales directes » qui permettent d'expliquer pourquoi une feuille placée en atmosphère saturée, son pétiole baignant dans de l'eau, peut néanmoins se réhydrater. Ce côté vitaliste est très peu connu. La théorie de Dixon a été oubliée pendant presque un demi-siècle avant de faire à nouveau l'objet des travaux de Milburn, Zimmermann et Tyree à partir des années 1970-1980.



La lecture d'ouvrages historiques fait bien comprendre ce fait banal que l'interprétation d'une expérience est extrêmement dépendante du cadre conceptuel qui sert à sa lecture. L'expérience demeure mais le cadre de son interprétation évolue. Il est donc important de ne pas confondre les deux (voir la figure 1 ci-après).



Dans le domaine étudié ici, il semble bien que, s'il s'en tient aux revues spécialisées dans sa discipline, le scientifique n'obtiendra pas une vraie connaissance du cadre conceptuel d'un auteur. Pour ce faire, il lui faudrait reconstituer précisément l'environnement social, institutionnel et surtout scientifique de l'auteur étudié, connaître l'homme, sa vie professionnelle, sa correspondance, toutes choses que l'historien des sciences cherche, lui, à connaître et à reconstituer.

Aussi, lorsque l'on rapporte les expériences d'un auteur comme Hales par exemple, et que l'on conclut qu'il avait déjà « compris » la poussée racinaire ou le mécanisme de la transpiration, il semble bien que l'on extrapole les comptes rendus d'expériences de façon assez imprudente, sans tenir compte de l'extrême différence des cadres conceptuels entre lui et nous. Sauf si l'auteur antérieur l'a exposé d'une façon très précise, un scientifique a le plus souvent accès à des faits expérimentaux relatés, bien plus qu'au paysage mental de l'auteur. Je dirais qu'en 20 ou 25 ans de recherche dans ce domaine je n'ai jamais rencontré un seul compte rendu qui replace un auteur ancien dans son contexte particulier et essaie d'éviter l'amalgame entre notre système d'interprétation et le sien. On ne s'improvise pas historien des sciences !

Compte tenu de ce qui précède, il ne me paraît guère souhaitable de chercher, lorsqu'on enseigne une matière scientifique, à « faire de l'histoire des sciences » si on n'y est pas préparé. En revanche, une attitude intermédiaire pourrait se révéler très utile pour l'apprenant,

qui consisterait à reprendre une expérience du passé et à la décortiquer à partir du cadre d'interprétation du présent. Plutôt que de la présenter d'emblée dans sa globalité, on comprendrait mieux une démarche scientifique en s'appuyant ainsi sur les principales étapes qui ont permis d'expliquer un phénomène.

1

1998
16-17
873
1985
4
1984, N, 241-251.
2001
(N), A.
A., 1954
395
1999
448
1914
217
1758
700

1727
A
A, A, 1727.
1961.
1735
408
1733
1999
1032
1993
18 è, 851

1 1961 à A. 1735. è