

Horticulture sans sol : histoire et actualité

Paul ROBIN

**Soilless horticulture:
history and event**

Key-words:

environment, history,
horticulture, nutrition,
recirculation, soilless,
technic

**Horticulture sans sol:
histoire et actualité**

Mots-clés:

environnement, histoire,
hors-sol, horticulture,
nutrition, recyclage,
technique

Summary – Soilless horticulture is a production tool using mineral solution for the plant nutrition with another substrate or support than soil. The apparition of this agrotechnic at the beginning of the twentieth century is linked with the history of the knowledge in plant mineral nutrition. The first conceptual break between plant and soil is the fact of van Helmont at the beginning of the seventeenth century. Nitre as a nutritive principle was experimented by Glauber in the middle of the same century. The questioning of Woodward in 1699 on the role of small terrestrial particles and salts would be answered firstly by de Saussure in 1804 and then by agricultural chemists during the nineteenth century. Sand culture or solution culture transfer from nutrition research laboratory to horticultural production appears in the twenties in the US with carnation, rose or tomato in a favourable scientific environment. In France in 1938, Truffaut introduces the Gericke's soilless technic. But isolated exemples and whatever the yield increase with soilless cultivation on inactive or active substrates, the professional horticulturists develop effectively this agrotechnic between 1980 and 1990 after a long time of experimentation by research and extension services between 1965 and 1985. Firstly working with recirculated nutritive solution, this development was the fact of light and practical equipments, of the automation but mainly of the leaching of used solutions. Volumes and mineral contents of these leachings has increased considerably during the fifteen past years. Since 1990, the environmental consequences of this habit raise new concerns and new needs in experimenting recirculation technics. But disinfection is a handicap for recirculation. Technical solutions would be acceptable by vegetable and ornamental horticulturists only if there are minimal plant health hazards and economically optimal solutions. Free of the physical and chemical soil limits, soilless technics must face a growing social and environmental pressure. However, adopting the soilless technics, being aware of the environmental hazards or demonstrating new acceptable solutions, the history of this agrotechnic shows firstly the links between science, application and society and secondly the weight of time in the transfer from the lab to the field.

Résumé – L'horticulture sans sol est une technique de production fondée sur l'alimentation de la plante avec une solution minérale nutritive, la plante étant disposée sur un support autre que le sol. Son apparition au début du XX^e siècle est liée à l'histoire des connaissances en nutrition minérale des plantes. La première rupture conceptuelle entre la plante et la terre date en fait du début du XVII^e siècle avec les premières expérimentations sur sable et sur eau, qui ne trouveront en fait de réponse qu'avec la chimie agricole du XIX^e siècle. Le transfert de la technique de culture sur sable avec une solution minérale, ou directement sur la solution nutritive elle-même, du laboratoire de recherche des nutritionnistes à la production horticole apparaît vers 1920-1930 aux États-Unis. Elle sera introduite en France en 1938. Mais la profession horticole française ne se l'appropriera véritablement qu'entre 1980 et 1990, après un long investissement de la recherche et du développement. Initialement conçue avec une solution nutritive recirculante, l'extension de cette agrotechnique sera favorisée par l'adoption d'installations légères et automatisées et surtout par la pratique du drainage perdu. Les conséquences de cette pratique sur l'environnement conduisent, depuis le début des années 90, les structures expérimentales des filières légumière et ornementale à rechercher des solutions techniques de recyclage de ces solutions drainées. Qu'il s'agisse de l'adoption de la technique du sans sol, de la prise de conscience de ses dérives ou de la démonstration de solutions acceptables pour surmonter les nouveaux défis, l'histoire de cette technique montre d'une part le lien étroit entre science, pratique et société, d'autre part le poids du temps dans le transfert d'une technique du laboratoire à l'exploitation.

* *Unité Ecophysiologie et horticulture, INRA, Domaine Saint-Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon cedex 9, e-mail: robin@avignon.inra.fr*

(Cet article reprend quelques éléments d'une synthèse collective de Robin, François, Letard, présentée en novembre 1996 au Colloque de Reims sur la *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes* et publiée en 1997. Il a aussi bénéficié des relectures attentives de Henri Zuang et des deux rapporteurs anonymes de la revue)

L'ADOPTION du sans sol en France, comme système de production est une donnée récente (trente ans) touchant pour l'essentiel les exploitations horticoles, maraîchères ou ornementales. Dans ce système, la plante est affranchie de son support naturel et alimentée par des dispositifs d'irrigation fertilisante. L'élaboration des connaissances touchant à la physiologie de la nutrition sur lesquelles se fonde ce type de pratique s'est déroulée sur une longue période (trois siècles). Si le développement de cette pratique a été favorisé par des facteurs convergents de natures diverses (sanitaire, économique, technique), l'état actuel de cet art conduit à des interrogations principalement environnementales du fait de la pratique du drainage perdu. Dans ce type de système, le principe du confinement des racines doit être considéré comme une vertu. Mais l'usage courant, en France, du rejet de la solution nutritive qui a percolé dans l'environnement racinaire, même s'il peut avoir des excuses liées aux difficultés inhérentes à ce confinement, n'est pas acceptable par la collectivité. Celle-ci s'apprête d'ailleurs à adopter ou à faire appliquer des contraintes réglementaires qui favoriseront la recirculation (ou le retraitement) de ces rejets. Or cette pratique de la recirculation de la solution nutritive est une donnée ancienne qui accompagne la naissance de l'expérimentation en nutrition minérale ainsi que les premières applications en production horticole. L'amélioration des outils et des pratiques de gestion de l'irrigation fertilisante est essentielle pour répondre aux exigences environnementales. Les organismes de recherche ou de développement s'y emploient. Mais le rappel historique peut aider à remettre en situation les acquis des cultures **sans sol** afin que ne soient pas portées sur un système de production des accusations qui s'adressent plus à une dérive récente de la pratique qu'au principe même d'artificialisation qui fonde cette pratique et repose sur un long cheminement d'élaboration des connaissances.

Nature et artifice

Les agrosystèmes horticoles couvrent des productions à vocations alimentaire, fruits ou légumes, et ornementale, fleurs ou plantes décoratives. Ils présentent la caractéristique commune de commercialiser auprès du consommateur essentiellement des produits frais. Mais ces agrosystèmes couvrent aussi des pratiques où apparaissent depuis l'antiquité des techniques d'artificialisation. Cet art du jardin se caractérise par la conduite individuelle du végétal mais surtout par la maîtrise de conditions de culture qui permettent des productions, précoces ou exotiques, n'étant pas seulement de stricte subsistance. Ces conditions ont amené le jardinier à accorder depuis toujours une grande attention à la préparation et à l'entretien du sol comme support nourricier, et en particulier à la fertilisation et à l'irrigation. Mais elles l'ont aussi conduit à

cultiver la plante en pot, isolée des contraintes du sol, ou en serre, afranchie des aléas climatiques. Par ailleurs, l'horticulture est le secteur qui fournit des produits grâce auxquels le consommateur retrouve ou recrée un lien idéalisé avec la Nature. C'est aussi celui où l'emprise des techniques s'est le plus développée pour permettre que s'expriment les potentialités de cette Nature. L'artificialisation du support de culture et de la nutrition dans ces filières fait apparaître, malgré la diversité des productions et des pratiques, une communauté de techniques rassemblées sous le vocable de **hors-sol**, ou **sans sol** pour reprendre la terminologie originelle, qui impose une analyse spécifique (Lemaire et Robin, 1993; Robin *et al.*, 1997). Les questions posées par ces techniques sont liées au confinement des racines et à une gestion non limitante de la fertilisation minérale à l'aide de solutions nutritives. Deux chiffres: la moyenne de la production annuelle de tomate sous serre en Europe est actuellement de 500 tonnes par hectare et seulement de 30 aux États-Unis où elle est uniquement cultivée en sol et plein air (Codron, 1993).

Plante et terre nourricière: premiers pas d'une rupture au XVII^e siècle

La pratique du sans sol repose donc sur l'isolement des racines de leur support naturel et la satisfaction des besoins hydriques et minéraux de la plante à l'aide de solutions nutritives préparées à partir de sels. Dans son *De Staticis Experimentis* (Prescott, 1947; Hewitt, 1966 et Steiner, 1985, faisant référence aux travaux de Singer, 1941), Nicolas de Cusa (1937) apparaît comme le premier expérimentateur à « reconnaître la probabilité que les plantes absorbent des constituants de cendres en relativement petites quantités à partir du sol et que ceux-ci sont transportés dans l'eau pour participer à la constitution du poids de la plante » (Hewitt, 1966). Palissy est cependant le premier en 1563 (Palissy, 1880; Russell, 1961; Steiner, 1985, se référant à Browne, 1944; Boulaine, 1992, se référant à Grandeau, 1879), à « énoncer clairement, par expérience observée, la nature minérale de l'alimentation des plantes dans le sol... » (Boulaine, 1992) affirmant que « le sel fait végéter et croître toutes semences ». Il s'agit pour Palissy du « sel du dit fumier qui se sera dissout à l'humidité » c'est-à-dire le salpêtre (Palissy, 1880). Mais les expériences de van Helmont (1652), avec sa branche de saule plantée dans un conteneur, et de Woodward (1699) avec des pieds de menthe dans des flacons d'eau, sont considérées classiquement comme les premières de la physiologie de la nutrition hydrominérale (Homès *et al.*, 1953; Russell, 1961; Hewitt, 1966; Penningsfeld et Kurzmann, 1969; Zuang *et al.*, 1984; Steiner, 1985; de Wit, 1992).

La première de ces expériences est conduite vers 1600 par le bruxellois van Helmont (Steiner, 1985, faisant référence à l'*Ortus Medicinæ* de 1652), principalement dans le cadre d'une attaque contre deux des quatre éléments d'Aristote et en particulier contre l'élément Terre. En

effet, « depuis Aristote, le monde savant était persuadé qu'une plante puise dans le sol toutes les substances pour croître et fleurir... Les goûts et les parfums différents étaient acquis en absorbant des mélanges différents de substances » (de Wit, 1992). Selon Massain (1966), « Van Helmont, ignorant tout du rôle de l'air dans la végétation et de celui des substances nutritives contenues dans l'eau, pose que la terre ne peut être un élément, mais constitue le terme d'une transformation de l'eau ». Pour effectuer sa démonstration, van Helmont cultive un jeune saule pendant 5 ans en pot. L'augmentation de poids de l'arbuste, dont le bois, les feuilles et les racines appartiennent, selon les catégories aristotéliennes, à l'élément terre, ne peut être attribuée à celui-ci qui n'a perdu aucun poids mais seulement à l'élément eau qui lui a été apporté, eau de pluie ou distillée, sachant que des solides peuvent être dissous dans l'eau de source. Selon Hewitt (1966) cette conclusion sera critiquée en 1661 par Boyle dans *The Sceptical Chymist* (Boyle, 1772). Celui-ci, après avoir « réalisé une expérience similaire avec l'espèce courge de *Cucurbita*,... répétée avec des concombres..., s'interroge sur la base de la croyance selon laquelle toute la matière végétale pourrait dériver de l'eau seulement » (Hewitt, 1966). Van Helmont se révèle donc plus comme le père de la première expérience de **rupture conceptuelle entre le végétal et le sol** que comme celui de la nutrition minérale à proprement parler. En ce sens, aidé de l'expérience et comme Bacon dans son traité *Of Proficiency and Advancement of Learning* de 1605 (Bacon, 1991), il participe à l'examen critique de la philosophie d'Aristote qu'impose l'« histoire de la technique » (Bréhier, 1993) et partage l'idée selon laquelle l'eau forme le « principe de nutrition » des plantes, le sol leur étant un ancrage (un support), à cette différence près cependant qu'il n'envisage pas, comme le philosophe anglais, que les plantes puissent tirer du sol pour leur nutrition un « jus particulier » susceptible d'appauvrir le sol (van Oss, 1975). D'ailleurs van Helmont se situe, à l'instar de Paracelse, plus dans le contexte de la théosophie hermétique des spagiristes (appellation donnée aux premiers chimistes encore imprégnés d'alchimie) qui envisage la possibilité de transmutations sous le pouvoir des « archées » (Duchesseau, 1998), que dans le contexte de la philosophie expérimentale de Bacon, héritière de la rigueur nominaliste de Guillaume d'Occam et de son « rasoir ».

Et c'est bien dans ce dernier courant, expérimentaliste et « naturaliste », que s'inscrivent les premières tentatives de Boyle à Oxford publiées en 1661 (Boyle, 1772) visant à comprendre la transmutation supputée de van Helmont. A cette occasion Boyle décrit de façon qualitative et discute les toutes premières observations de culture de plantes, en l'occurrence de la menthe et de l'origan, dans des flacons contenant uniquement de l'eau de source. L'intention de Boyle est explicite dès le titre du premier chapitre qui suit la préface introductive du *Sceptical Chymist* : « *Physiological considerations touching the experiments wont to be employed to evince, either the four peripatetick elements, or the three chymical principles of mixt bodies* ». Il s'agit bien d'argumenter contre les disciples d'Aristote,

et leurs quatre éléments terre, eau, air et feu, mais aussi contre ceux d'Hermès, et leurs trois principes sel, soufre, mercure, et pour cela d'élaborer une « philosophie corpusculaire » reprenant à son compte l'atomisme de Démocrite et « *déniant la convertibilité d'une sorte d'atome dans un autre* » (Browne, 1944, cité par Steiner, 1985). La qualité du raisonnement ne pourra cependant combler le défaut d'expérimentations (Meinel, 1988), que Boyle lui-même regrette (Boyle, 1772), et le manque de connaissances sur la nature de l'eau qui le laissera incertain. La présence d'un résidu ultime qui « *consiste de sel et de terre* » après distillation de plantes cultivées dans l'eau (Boyle, 1772) et la nécessité d'apporter à la terre, en plus de la pluie, les « *proper juices* » (« *saline or sulphureous juices of the earth... till by dung or otherwise* ») sans lesquels les plantes ne prospèrent pas (Boyle, 1666, selon Browne, 1944, cité par Steiner, 1985; Boyle, 1772) le conduisent à des interrogations plus qu'à une conclusion sur l'impossibilité d'une transmutation de l'eau en végétal. Dans le même ordre, mention doit être faite de l'opinion de Mariotte (de Wit, 1992), commune dans le monde savant, qui, à partir de ses propres « *expériences particulières et par celles que j'ai vu faire dans la laboratoire de l'Académie Royale des Sciences* » (non décrites dans le texte) à Paris, écrit en 1676 qu'« *il y a plusieurs principes grossiers et visibles des plantes comme l'eau, le soufre ou huile, le sel commun, le salpêtre, le sel volatil ou armoniac, quelques terres etc.* » (Mariotte, 1717).

La conclusion de van Helmont est plus sérieusement contestée par Woodward (1699; Russel, 1961) dans ce qui doit être considéré comme le premier article de nutrition végétale publié dans la toute jeune revue scientifique des *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Il s'agit de la première expérience d'hydroponie décrite précisément où le sol comme support est absent. Woodward y met en cause explicitement, d'une part, l'opinion de Bacon selon laquelle l'« *eau est presque tout dans tout* » et, d'autre part, la précision des pesées effectuées par van Helmont et par Boyle dont « *il confesse qu'il ne peut pas croire que cette expérience ait pu jamais être faite avec l'élégance et l'exactitude qui est requise pour faire reposer sur elle autant que ces gentilshommes l'ont fait* » (Woodward, 1699). Pour asseoir cette critique, il examine la croissance pondérale de plants de menthe mis en présence d'eaux de provenances diverses (eau de source, de pluie ou de la Tamise dans l'expérimentation de 1691, eau de canalisation de Hyde Park, seule, distillée, ou additionnée de terre, de terreau ou de nitre, dans celle de 1692) sachant que l'eau en fonction de sa clarté peut contenir plus ou moins de « *matière terrestre* » et même dissoudre du sel comme le nitre (autre dénomination du salpêtre) sans que cela se puisse voir. Il développe une longue justification de son hypothèse en la faisant reposer sur les observations qui relèvent des raisonnements de la « *philosophie corpusculaire* » ou « *atomisme* » (Meinel, 1988), philosophie développée entre autres en 1666 par Boyle dans *Origin of Forms and Qualities according to the Corpuscular Philosophy* (Boyle, 1772). Il faut souligner en outre que Woodward est médecin et professeur de physique à Gresham College à Londres où co-

habite Hooke, astronome et professeur de géométrie, qui avait observé en 1667 au microscope sur de fines lames de liège et autres fragments de végétaux des petites loges allongées qu'il baptisa « cellule » (Guyénot, 1941). A la présentation détaillée de ses protocoles et de ses résultats, Woodward associe une discussion serrée et argumentée. Une de ses conclusions, cinquième de sa discussion, est d'affirmer que « *les végétaux ne sont pas formés uniquement d'eau mais aussi d'une certaine matière terrestre particulière* » et que « *la plante est plus ou moins augmentée en proportion de la plus grande ou plus petite quantité de cette matière que contient l'eau, de tout cela nous pouvons raisonnablement inférer que cette terre, et non l'eau, est la matière qui constitue les végétaux* » (Woodward, 1699). Deux autres conclusions, la septième et la huitième, précisent que « *l'eau sert seulement de véhicule à la matière terrestre qui forment les végétaux* » et que cette « *eau n'est pas capable de réaliser cet office dans les plantes à moins d'être assistée par une certaine quantité de chaleur* » compte tenu du fait que la quantité d'eau consommée est plus importante en été qu'en hiver. Ceci étant, il « *ne peut pas souscrire à l'opinion de ces personnes instruites qui imaginent que le nitre est essentiel aux plantes* » en effet après l'addition « *d'un drachme de nitre dissous dans l'eau de canalisation de Hyde-Park, la menthe mourait en quelques jours* » (Woodward, 1699). Comme fonction, il suggère que le « *nitre et autres sels... assouplissent la terre* ». Si la qualité de ses protocoles et de ses pesées, premières du genre dans le domaine de la physiologie végétale, conforte sa conclusion principale qui s'en tient à la stricte analyse de ses propres résultats, son avis sur le nitre est éloigné de l'idée émise par Palissy depuis plus d'un siècle, ainsi que de l'opinion expérimentée de Mayow publiée en 1674 dans son *Tractatus quinque Medico-physici* sur l'abondance du nitre dans le sol au cours de l'année, celui-ci étant « *sucé par les plantes* » (Russell, 1961). De plus et surtout, ses observations sont très éloignées de celles de Glauber dont les *Opera omnia* sont publiées à Londres en 1689 (Walden, 1984). Bien que Woodward ne mentionne aucun de ces auteurs dans son article, il est vraisemblable qu'il ait eu connaissance des publications de ces « *personnes instruites* ».

La première préconisation de l'addition du salpêtre pour accroître la productivité des cultures doit être attribuée à Glauber (1656) dans son *Prosperitatis Germaniae*. Il fait « *l'hypothèse que le salpêtre obtenu à partir des déjections animales doit être contenu dans l'alimentation des animaux c'est-à-dire dans les plantes... et constitue donc le principe de végétation* » (Russell, 1961). Dans son *Tractatus de Medicina universali* de 1658, publié en français l'année suivante (Glauber, 1659), l'iatrochimiste allemand installé à Amsterdam (Walden, 1984) parle de culture sur sable arrosée d'eau de pluie dans laquelle est dissous « *le sel tiré de ces fumiers, et converty en salpêtre qui se laisse transmuier en médecine universelle* ». Si la mention de Glauber comme précurseur de la fertilisation azotée chimique est reconnue (Russell, 1961 ; Hewitt, 1966 ; van Oss, 1975 ; Boulaine, 1992), la lecture du texte de cet auteur surprend : « *Fay-toi faire certains vaisseaux de bonne et forte terre... que le fond soit percé de quelques trous... et remply jusqu'au bord du sable clair et*

maigre... Les semences étant mises dans le sable et arrosées de notre eau universelle... Il faut exposer les vaisseaux au soleil et à l'air afin que les semences puissent pousser et croître...» (Glauber, 1659). Cette description elliptique où « *il faut faire l'épreuve pour connoître si cet or potable, ou eau de vie des philosophes, est la souveraine médecine des végétaux* », est certainement tributaire de l'enthousiasme de son auteur pour ce sel auquel il attribue la vertu de sa propre guérison du typhus en 1625 (Walden, 1984). En outre, s'il est un praticien actif et prolifique, il est aussi un spagiriste reconnu comme le Paracelse de son siècle (Walden, 1984). A ce titre, et sans évoquer le mercantilisme du personnage, il est héritier, pour partie, de la tradition hermétique qui n'est pas toujours propice à une compréhension littérale et contemporaine du texte. Alors que, sur ce thème de la nutrition, la philosophie expérimentale naissante s'essaie à la pratique et au raisonnement avec Boyle, cette première affirmation empirique et hermétiste du caractère minéral de cette nutrition ne cesse d'étonner par l'actualité de sa conviction, même si elle reste imprégnée du secret et d'une certaine forme de « mystique ». S'agissant des effets du sel de salpêtre, l'acide nitrique dont ce sel est issu ne sera synthétisé qu'à la fin du XVIII^e siècle par Cavendish (Mengel, 1994), la conclusion apparaît donc plus comme une conviction que comme une démonstration: « *les fleurs et les fruits étant plutôt crus et beaucoup plus excellents que par le moyen du fumier ordinaire* ». Au delà du temps, elle peut résumer l'appréciation que les praticiens du hors-sol portent sur leurs pratiques après avoir intégré les connaissances acquises au cours des trois siècles qui suivront. La suggestion de faire recirculer la solution, « *ce vaisseau... mis dans un autre pot..., afin que si par hasard l'eau médicinale... venait à pénétrer au travers du sable elle ne se perde pas, mais qu'étant reçue elle soit remise dans le pot plein de sable...* », apparaît même comme un clin d'œil à l'actualité. Le caractère ésotérique des écrits de Glauber a conduit les historiens de la chimie, qui inaugurent cette science avec la formalisation du concept d'« élément » et de la notion de « bilan » par Lavoisier (Massain, 1966; Bensaude-Vincent et Stengers, 1995), à marginaliser les acquis techniques et expérimentaux de ce spagiriste (Walden, 1984). S'agissant de l'histoire de la physiologie de la nutrition, Glauber n'est souvent que rapidement mentionné (Hewitt, 1966; de Wit, 1992). Seule l'histoire de l'agronomie, ou plus exactement de la chimie agricole, rappelle sa contribution (Browne, 1944, cité par Steiner, 1985; Russell, 1961; van Oss, 1975; Boulaine, 1992 et 1995).

Plante et physiologie : « humus » au XVIII^e, « minéral » au XIX^e

Ces tentatives d'addition de sels à des cultures dans l'eau ne seront reproduites qu'un siècle plus tard par Duhamel du Monceau (1748 et 1758; Hewitt, 1966; Steiner, 1985) et Home (1762 selon Hewitt, 1966, et Steiner, 1985; en 1757 selon Russell, 1961), celui-ci suggérant

que plusieurs sels sont nécessaires. Ces deux auteurs resteront, cependant, comme Woodward, et faute de moyens analytiques sur la composition de la matière sèche végétale, sceptiques quant aux effets de ces sels sur la croissance des plantes. La place sera ainsi laissée pendant la deuxième moitié du siècle à la « théorie de l'humus » (Russell, 1961 ; Steiner, 1985 ; Boulaine, 1995) alors que règne la théorie de Stahl sur le « phlogistique » comme « principe combustible » contenu, par exemple, dans le charbon de bois (Massain, 1966). La question centrale qui fait débat durant cette période reste donc toujours de savoir quelle est la cause de l'augmentation de poids des végétaux au cours de leur croissance et quel est le rôle des minéraux présents dans les cendres. Cette cause ne serait-elle pas un « *magma unguinosum* » obtenu à partir de l'humus celui-ci étant considéré comme la « *nutritiva* » alors que les autres constituants du sol seraient des « *instrumentalia* » (Russell, 1961 citant les positions respectives de Kùbel en 1741 et celle de Wallerius en 1761) ? Selon Boulaine (1995), à la « *question fondamentale de Bacon... quel est le principe de végétation ?* », « *Lavoisier, à la fin de sa vie, en 1792, affirmera que c'est le problème le plus important de la fin du XVIII^e siècle* ». Lavoisier, engagé dès 1768 dans des réflexions sur les pratiques agronomiques (Boulaine, 1994 ; Cauderon, 1994), mais aussi à partir de 1772 dans la réorganisation de la production de salpêtre (Mengel, 1994), le sera indirectement l'année même de sa mort (1792) dans la polémique autour de la « théorie de l'humus » (Boulaine, 1995).

La maîtrise progressive de la manipulation des gaz, celle des mesures de volume et leur caractérisation, jointes au développement de l'analyse chimique élémentaire grâce, justement, à Lavoisier (1789) vont complètement changer la perception de la question. La mise en évidence de la production d'air « déphlogistique » ou « salubre » (oxygène) par Priestley en 1772, celle de l'effet de la lumière sur cette production par Ingen-Housz en 1779, « *l'affirmation par Senebier en 1782 que le gaz carbonique atmosphérique est un aliment pour les plantes, celui-ci devant être dissous dans l'eau* », vont conduire « *de Saussure en 1804 à considérer que l'accroissement de poids par un végétal vert doit être associé au carbone extrait du gaz carbonique atmosphérique* » (Caratini, 1971, faisant référence à Guyénot, 1941). Le même de Saussure dans ses *Recherches chimiques sur la Végétation* (1804 ; Russell, 1961 ; Hewitt, 1966 ; Steiner, 1985) analyse aussi les constituants minéraux de plantes (pin, mélèze, laurier rose, airelle, genévrier) et des sols où elles croissent selon des protocoles très élaborés (Liebig, 1844) et réalise sur *Polygonum persicaria* et *Bidens cannabina* les « premières expérimentations contrôlées sur l'absorption des minéraux par les racines avec des cultures dans l'eau » (Steiner, 1985). Ainsi le genevois résume-t-il son chapitre VIII « *de l'absorption des dissolutions par les racines des plantes* » de la manière suivante : « 1 - les racines des plantes absorbent les sels et les extraits, mais en moins grande raison que l'eau qui tient ces sels et ces extraits en dissolution ; 2 - la section des racines, leur décomposition, et, en général, la langueur de la végétation, favorisent l'introduction des sels et des extraits dans les plantes ; 3 - un végétal

n'absorbe pas en même proportion toutes les substances contenues à la fois dans une même dissolution; il en fait des sécrétions particulières; il absorbe en général, en plus grande quantité, les substances dont les solutions séparées sont moins visqueuses; 4 - lorsque l'on compare le poids de l'extrait que peut fournir le sol le plus fertile au poids de la plante sèche qui s'y est développée, on trouve qu'elle n'a pu y puiser qu'une très petite partie de sa substance.» (de Saussure, 1804).

Ce n'est qu'à partir de 1830 avec le développement de la chimie agricole et de la physiologie végétale que seront posées les bases théoriques véritables de la nutrition minérale par Sprengel (Russell, 1961), mais surtout en 1840 par Liebig (1844; Russell, 1961; Boulaïne, 1995) et en 1841 par Boussingault (Liebig, 1844; Dehérain, 1892; Russell, 1961). «*Dès 1841, Polstorff et Wiegmann cultivaient des plantes enrichies de solutions minérales*» (Chouard, 1951) pour savoir «*si les éléments inorganiques (minéraux) existent dans la plante quand ces éléments sont éliminés du milieu... et si ces éléments inorganiques sont essentiels aux plantes ou non*» (Steiner, 1985, faisant référence à Wiegmann et Polstorff, 1842). Pour effectuer leur démonstration, ils comparaient six espèces (*Vicia sativa*, *Hordeum vulgare*, *Avena sativa*, *Polygonum fagopyrum*, *Nicotiana tabacum*, *Trifolium pratense*) cultivées sur «sable pur» et sur «terre artificielle». Celle-ci était «*composée de sable quartzueux, sulfate de potasse, sel marin, sulfate de chaux (anhydre), craie lavée, carbonate de magnésie, oxyde de manganèse, oxyde de fer, hydrate d'alumine, phosphate de chaux, tourbates de potasse, de soude, d'ammoniaque, de chaux, de magnésie, de fer, d'alumine, acide tourbique insoluble*» (Liebig, 1844, décrivant l'expérience de Wiegmann et Polstorff). La composition des cendres des plantes venues dans le sable pur et dans la terre artificielle y était comparée. Avec ces différents auteurs et particulièrement avec Liebig, en 1840, la «théorie de l'humus» était définitivement condamnée et la nutrition devenait véritablement minérale (Boulaïne, 1995).

Les nombreux travaux réalisés à cette époque aboutiront aux premières formulations standardisées de Sachs en 1860 (Sachs, 1868; Homès *et al.*, 1953) et de Knop en 1861 (Hewitt, 1966) qui peuvent être considérés comme les pères fondateurs de l'«hydroculture» (Chouard, 1951; Homès *et al.*, 1953; Hewitt, 1966; Penningsfeld et Kurzmann, 1969). La définition de ces solutions s'affinera progressivement, en particulier avec l'identification des oligo-éléments. Le recensement 1860-1950 fait par Hewitt (1966) propose une analyse détaillée des différentes étapes qui ont jalonné la découverte des différents éléments, majeurs et oligo-, qui participent à cette définition des solutions.

Végétal et solution nutritive: sans sol comme agrotechnique au XX^e siècle

En 1915, une nouvelle méthode est proposée par McCall pour étudier la nutrition des plantes en culture sur sable (Hoagland et Martin, 1923). L'utilisation des solutions nutritives sur ce type de support est ra-

pidement introduite dans la pratique horticole de l'Etat de Rhode-Island : dès 1921 avec l'œillet et à partir de 1929 à la station expérimentale du New Jersey par Eaton, puis par Connors avec le rosier et par Ellis proposant le gravier comme support de culture (Eaton, 1931 ; Ellis *et al.*, 1947 ; Chouard, 1951). Mais cette méthode est aussi adoptée par la *Division of Agricultural Chemistry* du *College of Agriculture* de l'Université de Californie qui travaille depuis le début des années 1910 en « conditions contrôlées en particulier sur la composition de la solution du sol en relation avec la saison et la croissance de la culture » (Hoagland et Martin, 1923). Il s'agit pour ce groupe auquel appartient Hoagland d'étudier, entre autres, les concentrations des différents éléments nécessaires dans la solution nutritive pour une croissance optimale de l'orge en prenant en compte les vitesses d'absorption en fonction du stade de développement. Cet objectif conduit Hoagland et Martin (1923) à comparer, en conditions climatiques équivalentes, les différentes méthodes de culture avec solution nutritive sur sable ou directement sur des solutions plus ou moins diluées, fixes ou coulantes, à des cultures sur sol. Ces recherches et des travaux ultérieurs amèneront Hoagland à publier les premières mises au point scientifiques modernes en langue anglaise sur la nutrition minérale des plantes cultivées (Hoagland, 1919, 1920 et 1923 ; Hoagland et Martin, 1923 ; Arnon et Hoagland, 1940 ; Hoagland et Arnon, 1941). Parallèlement, depuis 1920, à l'*Agricultural Experiment Station* de la même Université, Gericke analyse l'effet des proportions des différents sels, de la température et de la lumière sur la croissance des racines et le tallage chez le blé cultivé directement sur solution nutritive. En 1929, Gericke introduira les termes de *soiless* et d'*hydroponic* (Gericke, 1929 ; Chouard, 1951 ; Romano-Joly, 1959 ; Hewitt, 1966). En 1936, il préconisera avec Tavernetti le « chauffage du milieu liquide de culture pour la production de la tomate » (Gericke et Tavernetti, 1936).

C'est à Ellis et Swaney en 1938 et à Gericke en 1940 (Gericke, 1940 ; Ellis *et al.*, 1947 ; Chouard, 1951, 1964), que l'on doit les premiers ouvrages de vulgarisation technique de ces cultures « industrielles ». Les applications les plus spectaculaires de ces techniques hydroponiques seront conduites par l'armée américaine pour alimenter son personnel en légumes frais sur les bases militaires installées dans des îles dépourvues de sols fertiles (Ellis *et al.*, 1947). Dès cette époque, la fertirrigation sur support inerte est conçue comme recirculante. Le nitrate y est l'anion recommandé pour ajuster la salinité de la solution nutritive nécessaire à une production optimale de qualité. Les difficultés liées à l'utilisation de l'ammonium sont déjà soulignées mais ce cation est aussi proposé à faible dose pour réduire la dérive de pH consécutive à l'absorption différentielle des anions et des cations (Arnon et Hoagland, 1940 ; Ellis *et al.*, 1947).

En France, selon Chouard (1951), la première « magnifique démonstration de la technique de Gericke » revient à Truffaut et Hampe (1938). La publication des essais de ces deux auteurs dans la revue *Jardinage* (Truf-

faut, 1938; Truffaut et Hampe, 1938; Hampe, 1938 a et b) coïncidera d'ailleurs avec un article de Chouard promouvant cette pratique dans la *Revue Horticole* (Chouard, 1938). En fait, Truffaut réalise ses premiers essais de culture dans l'eau en conditions aseptiques à partir de 1924 sur le maïs, dans le cadre de ses recherches sur la fixation de l'azote atmosphérique (Truffaut, 1938). Il se situe dans la continuation des travaux entrepris par Mazé à l'Institut Pasteur entre 1898 et 1919 sur le rôle de la microflore et des oligo-éléments dans la nutrition minérale chez cette espèce à l'aide de méthodes de culture sur solution nutritive (Mazé, 1919). Ignorée, semble-t-il, de Hoagland, cette contribution de Mazé sera reconnue par Hewitt dont la synthèse de 1966 sur l'histoire de la nutrition minérale est la plus exhaustive qui soit connue. L'écho dans « la presse » des travaux conduits par Gericke annonçant qu'« *il était possible de récolter par hectare 551 tonnes de tomates, le rendement moyen étant de 12 tonnes à l'hectare... alors qu'elle atteignait 927 tonnes quand la température du milieu de culture était maintenue entre 26,6 et 29,4 degrés* » (Truffaut, 1938), joint à la maîtrise de cette technique déjà acquise par lui-même depuis 14 ans, conduisent Truffaut à entreprendre dans ses Etablissements à Versailles, dès mai 1938, des essais en laboratoire et en serre (avec chauffage de solutions nutritives fixes comme le propose Gericke en 1936) sur la tomate principalement, mais aussi sur concombre, courge, aubergine, piment, pomme de terre etc. Quinze espèces de légumes et 13 espèces de fleurs seront ainsi essayées (Truffaut et Hampe, 1938). Des démonstrations seront présentées au public à l'exposition de l'automne 1938 de la Société nationale d'horticulture à la gare des Invalides. Hampe (1938b) donnera aussi des conseils aux amateurs, préconisant même l'utilisation d'un produit conditionné sous le nom de *Superbiogine* pour préparer simplement la solution nutritive. La même année l'École nationale d'horticulture de Versailles avec Chaminade (Chouard, 1951), suivi plus tard par Bossard et Anstett (Zuang, communication personnelle), entreprendra aussi des essais de culture hydroponique. Comme aux Etats-Unis où cette technique de culture se développe, en particulier dans les bases militaires, Truffaut suggère de « *songer à certaines contrées dont le sol infertile ne permet pas la production intensive* », il souligne même « *que quelques sacs d'engrais suffiront... et... que la culture dans l'eau réalise en fait une économie considérable de ce liquide puisqu'on évite l'infiltration dans les couches inférieures du sol et que tout passe dans la plante* » (Truffaut, 1938).

Mais c'est après la guerre, à partir de 1947 (Chouard, 1951), que des expérimentations systématiques seront réalisées à la Station d'agronomie INRA du Cap d'Antibes, et c'est en 1950 que seront conduites par Meilland, créateur de variétés de roses, en coopération avec l'INRA, les premières cultures par subirrigation recyclée en tranchées de sable pour « *s'affranchir des aléas liés aux interactions sol-variétés, accroître la densité de repiquage, favoriser la mobilité des plants, accélérer la croissance et la floraison et par voie de conséquence les cycles de multiplication, faciliter le réaménagement* »

de la surface de culture, réduire les coûts de main-d'œuvre» (Drouineau, 1961). Ces avantages sont encore, aujourd'hui, les arguments principaux qui justifient le choix de ces techniques dans la pratique horticole. *Cultures sans sol* de Chouard, édité par la Maison Rustique en 1951 et réédité en 1952 en même temps que *Cultures sans terre* de Noël, est suivi par *Cultivez sans sol ni terre !* (Romano, 1959). Cet effort de vulgarisation reste cependant modeste face aux nombreux ouvrages spécialisés publiés en anglais, 7 aux Etats-Unis, 10 en Grande-Bretagne et 2 en Afrique du Sud, ou en allemand (7) selon la recension de Romano (1959) faite jusqu'en 1957. Qu'ils soient en langue anglaise ou française, ces ouvrages de vulgarisation décrivent des dispositifs où la solution nutritive est presque toujours recyclée, ce qui n'exclut pas la nécessité de rincer régulièrement le support, ou vidanger la solution nutritive usagée. Dans le principe, Chouard décrit 5 familles de systèmes sans sol correspondant à 8 types de dispositifs dont un seul se définit à solution perdue sans autre commentaire (Chouard, 1951). Romano (1959) évoque, dans le cas particulier d'irrigation fertilisante de «cultures sur terrains stériles..., un point capital dont il n'a pas été encore question... c'est le gros inconvénient d'irriguer à solution perdue... dans le cas où le sous-sol est imperméable», mais il le souligne dans l'intérêt des «racines des plantes» plus que dans une perspective d'altération de l'environnement. En effet, l'essentiel des dispositifs décrits, ainsi que la solution proposée à ce cas particulier, exploitent le recyclage.

Il faudra attendre 1965 (Zuang) et 1966 (Blanc) pour que la question de l'«avenir» de cette technique sans sol «dans le domaine de la production horticole en France» soit relancée dans la revue professionnelle *Pépinéristes, Horticulteurs et Maraîchers*. Initialement son adoption dans la pratique horticole, en particulier légumière, sera le fait d'un petit groupe de 3 producteurs revenant d'Afrique du Nord et nouvellement installés dans le Sud-Est. L'un d'entre eux avait lu l'ouvrage de Romano (1959) et ils s'étaient lancés dans la culture du concombre, tomate et melon sur sable (Zuang, 1965; Zuang, communication personnelle). Cette initiative sera soutenue (entre 1962 et 1965) par l'INRA d'Avignon grâce aux conseils d'un généticien des légumes, Pécaud, par l'INRA d'Antibes, grâce aux expérimentations agronomiques de Drouineau et Blanc, et par l'INRA de Versailles grâce à la diffusion de petites synthèses physiologiques faites par Coïc et Costes (Wacquand, communication personnelle). Elle sera aussi encouragée par l'écho des essais menés dans les stations expérimentales de Solvay en Belgique et de Naaldwijk aux Pays-Bas (où les techniciens y croyaient mais pas la direction), mais surtout par les essais sur le choix des substrats conduits à son domicile personnel par Zuang, ingénieur régional de l'INVUFLEC à Saint-Martin de Crau, en contact avec Blanc et Coïc (Wacquand et Zuang, communications personnelles).

Le coût et l'étanchéité des installations, ainsi que la qualité du sable comme support, constituaient des obstacles à la vulgarisation de la tech-

nique. Zuang proposera en 1963 l'adoption de la pouzzolane en remplacement du sable. L'introduction des plastiques pour les réservoirs et les tranchées résoudra les problèmes d'étanchéité. Une journée sur les cultures sans sol sera organisée pour les techniciens horticoles à Hyères en juin 1964. Cet encouragement sera amplifié par une action de recherche sur les serres lancée, dès 1964, par la DGRST. La deuxième tranche de financement de 1966 permettra la construction des premières serres expérimentales à la station de l'INVUFLEC à Balandran et la mise en place en 1966-1967 des premiers essais technico-économiques de cultures légumières en production sur tourbe et pouzzolane. Ces expérimentations de l'INVUFLEC, commencées en 1963 et poursuivies pendant 15 ans, aboutiront à une journée de vulgarisation en mai 1979 accompagnée d'une synthèse des travaux réalisés sur les 12 espèces légumières étudiées (Zuang *et al.*, 1979), et suivie de stages (8 entre 79 et 84) organisés à l'intention des producteurs et des techniciens.

Ces efforts, entrepris par les organismes de développement pour trouver des supports de culture économiquement viables, remédiant aux problèmes pathologiques des cultures en sol (exemple de la fusariose de l'œillet ou du *corcky-root* de la tomate), l'avènement des plastiques et des supports facilement manipulables comme la laine de roche, la pression des maisons commerciales anglaises, néerlandaises et scandinaves et le développement des automatismes à partir de 1975, la coordination des travaux de recherche (INRA) et de développement (INVUFLEC/CTIFL) à partir de 1978, et leur vulgarisation par des ouvrages (Lesaint et Coïc, 1983; Zuang *et al.*, 1984; Blanc, 1985) et des articles dans les revues professionnelles, contribueront à l'intégration progressive par les producteurs français des techniques de culture sur substrats et à leur extension aussi bien en horticulture légumière qu'ornementale (Lemaire *et al.*, 1989; CTIFL, 1990; Letard *et al.*, 1995). La synthèse sur les *Cultures légumières sur substrats* faite en 1990 (CTIFL) dans un numéro hors série de la revue *Infos-Ctifl* donne un panorama général de cette agrotechnique : son évolution entre 1985 et 1990, son économie, sa gestion et les techniques en fonction des espèces produites (tomate, concombre, aubergine, asperge, fraiser). Cette adoption large, entre 1980 et 1990, se traduira d'ailleurs auprès du grand public par des commentaires futuristes dans un « numéro de 1985 d'une revue à grand tirage spécialisé dans le jardinage, *Rustica*, invitant ses lecteurs à cette conversion » avec le titre de couverture « *Jardinez sans terre fleurs et légumes* » (cf. Brun *et al.*, 1986). « *Cette culture hors-sol symbole du jardinage de l'avenir* » trouvera d'ailleurs une place de choix dans le *Pont vert* de la Cité des Sciences. Mais notons cependant que si l'on considère *Le bon Jardinier* comme l'encyclopédie du public amateur, son édition de 1964 (Chouard, 1964) propose déjà une section sur les « Cultures sans sol ou hydroponiques » où sont d'ailleurs brièvement évoqués « circulation et renouvellement des solutions ».

Dans les travaux de vulgarisation précédemment cités, la question de la destination de la solution nutritive qui a percolé sur les racines des

plantes n'est abordée dans le « dispositif cultural » que sous l'angle pratique ou économique. Ainsi pour Blanc en 1966 « *le ciment est jusqu'à présent le meilleur matériau lorsque la récupération de la solution est envisagée à la condition expresse que sa surface soit revêtue d'une couche de bitume isolant la solution du ciment. En solution perdue et avec un matériau relativement léger, il peut cependant être avantageusement remplacé par des plaques de fibrociment ondulées(...) recouvertes d'un enduit isolant... avec une légère pente pour faciliter le drainage* ». L'arrivée des plastiques en horticulture dans les années 70 facilitera la mise en place de dispositifs plus légers et le drainage des solutions. Mais en 1984, l'ouvrage de référence *Cultures légumières sur Substrats* (Zuang *et al.*, 1984) présentera 5 « fiches descriptives de systèmes » avec la « comparaison des coûts », dont 4 proposeront une « irrigation par percolation en solution perdue ». La cinquième fiche fait référence à la technique dite « lamelle de solution circulante et recyclée » inspirée de la technique NFT ou *Nutrient Film Technic* (Cooper, 1979). Elle évoque les avantages ainsi que les inconvénients, notamment le « risque élevé d'accident (arrêt de circulation d'eau) » et de « diffusion rapide de certaines maladies par la solution nutritive ». Les mêmes arguments seront repris dans une « analyse critique des systèmes de culture hors-sol avec et sans recyclage des solutions » par Lesaint (1985) soulignant l'importance des contrôles analytiques et concluant : « *Il sera en effet beaucoup plus facile pour un producteur de mener à bien une culture avec une solution non recyclée, surtout s'il est isolé. Les contrôles et analyses nécessaires dans les systèmes à solution recyclée, et leur interprétation, sont plus aisés et moins coûteux pour les producteurs appartenant à un groupement organisé* ». S'agissant des cultures en conteneurs, Lemaire *et al.* (1989) évoquent l'« évacuation des eaux en excès » en signalant que « *certaines pépiniéristes, dans un but d'économie, récupèrent les eaux excédentaires ainsi évacuées afin de les réutiliser pour l'irrigation. Ce procédé comporte un risque extrême au plan phytosanitaire: même après filtration, la vitesse de propagation des maladies peut être très rapide, et leur contrôle très délicat à assurer* ». Henri Zuang, artisan du développement du hors-sol pour les cultures légumières entre 1963 et 1986, considère (communication personnelle) qu'au delà des améliorations techniques, c'est bien la possibilité du drainage perdu qui a effectivement permis l'extension de cette agrotechnique. Le faible coût de l'eau et des intrants minéraux et la légèreté des nouveaux dispositifs en plastique et des nouveaux supports comme la laine de roche permettaient d'assurer l'intérêt pratique de cette technique de culture à drainage perdu d'autant qu'avec des investissements plus faibles elle accroissait considérablement la productivité et donc la rentabilité. Mais le caractère drainant de ces nouveaux supports à faibles inerties hydrique et minérale ainsi que thermique, l'hétérogénéité des nouveaux dispositifs d'irrigation fertilisante au goutte à goutte, les dérives de salinité et de température dans l'environnement des racines liées au découplage des besoins hydriques et minéraux des plantes et aux fluctuations de température, ont rapidement conduit les praticiens à augmenter considérablement les taux de drainage. C'est ainsi que « *pour la tomate, en 15 ans, les rendements ont été mul-*

tiplés par 2,5, mais également les rejets par drainage» (Jeannequin, communication personnelle). Cependant dès la synthèse de 1979, Zuang et ses collaborateurs de l'INVUFLEC évoquent la nécessité d'« annexes... pour éviter la pollution des nappes et maîtriser des eaux de drainage dans le cas des systèmes à solutions eaux perdues ou des eaux usées pour les eaux recyclées ».

Devant l'ampleur des rejets observés dans ces systèmes hors-sol, notamment en Hollande et en Suisse, les structures françaises de recherche et de développement, dont les stations expérimentales de l'INRA à Alénya et du CTIFL à Carquefou et Balandran, commenceront à se préoccuper de recirculation à partir de 1990. Les premières expérimentations permettant de faire un bilan global du fonctionnement de ces systèmes seront réalisées en 1992-1993 (cf. bibliographie dans Letard *et al.*, 1995). Ainsi, dix ans après les trois ouvrages utilisés comme référence par les techniciens et les praticiens (Lesaint et Coïc, 1983; Zuang *et al.*, 1984; Blanc, 1985), le manuel sur la *Maîtrise de l'irrigation fertilisante* édité par le CTIFL à l'usage des producteurs de « tomate sous serre et abris » (Letard *et al.*, 1995) distingue deux types de systèmes: le système ouvert auquel il consacre 2 pages en précisant la nécessité d'un dispositif de collecte du drainage et son évacuation vers l'« égout » ou une « utilisation extérieure », et le système fermé auquel il consacre 11 pages arguant que « les contraintes réglementaires liées aux exigences de l'environnement vont accélérer les réflexions sur la gestion des ressources en eau et des rejets. A court ou moyen terme, les producteurs serristes doivent envisager la réduction voire l'arrêt des rejets des effluents de solutions nutritives ».

Serre et pépinière: des professions et une technique

Actuellement, les deux agrosystèmes horticoles concernés par le hors-sol sont les structures protégées et les pépinières. Selon le dernier recensement (ONIFLHOR, 1996a), les cultures protégées, dominantes dans le Sud-Est, sont conduites dans 22 000 exploitations sur une superficie de 7 800 ha dont 64 % en légumes, 29 % en plantes en pots et fleurs coupées. Actuellement plus de 2 000 ha concernant ces productions sont cultivés sur des supports autres que le sol d'origine dont 1 200 ha sur des supports inertes exclusivement pour les fleurs coupées (15 %) et les légumes (85 %). Les espèces ainsi cultivées sont principalement la tomate (80 %) mais aussi le concombre, le poivron, l'aubergine, le melon, le fraiser, le rosier, l'œillet, le gerbera. A ces productions s'ajoutent les cultures sans substrat, directement sur la solution nutritive. Cette technique est majoritaire pour le forçage de l'endive (80 %), marginale pour la tomate (technique dite du film nutritif ou NFT) où elle représente une cinquantaine d'hectares en Bretagne, ou seulement expérimentale, au moins en France, pour la laitue, la tulipe ou la jacinthe. Ces 1 200 ha représentent 20 % des surfaces légumières cultivées en hors-sol dans le monde alors que 50 % le sont aux Pays-Bas (Morard, 1995). A côté de

ces productions de légumes et fleurs coupées, une surface équivalente est consacrée aux plantes en pots (chrysanthème, azalée, cyclamen...) et à massifs (géranium, bégonia, pensée, pétunia...) représentant 600 millions d'unités (ONIFLHOR, 1996b). La filière des pépinières concerne pour sa part 5 000 exploitations (ONIFLHOR, 1996b) qui dominent dans l'Ouest et couvrent une superficie de 14 000 ha dont 70 % sont à vocation ornementale produisant 170 millions de plants. Près de 5 000 ha de ces pépinières ornementales sont actuellement menés en conteneurs. La pratique du hors-sol concerne donc globalement 7 000 ha dans une filière potentiellement fragile du fait de la concurrence intensive des pays du Nord et du Sud de l'Europe.

Sans sol et environnement : des pratiques et une question

Au-delà de ces distinctions entre filières, les différentes pratiques du hors-sol présentent des caractéristiques communes. Le confinement des racines entraîne une diminution du pouvoir tampon du support et exige une gestion rigoureuse de l'irrigation et des éléments fertilisants susceptibles d'affecter le statut hydrique et minéral des organes impliqués dans l'élaboration de la qualité (feuilles, fleurs, fruits). La faible dimension de ces agrosystèmes et la conduite individuelle des plantes, exigeante en main-d'œuvre, encouragent donc l'automatisation de la fertirrigation elle-même exigeante en investissements et en compétences (Letard *et al.*, 1995 ; Wacquant, 1995). Dans ce contexte, le faible coût des fertilisants par rapport aux autres charges de production conduit le plus souvent les praticiens du hors-sol, comme dans les autres agrosystèmes, à ne pas en faire l'économie. Le contrôle du drainage permet de s'assurer de la satisfaction des besoins hydriques. Par ailleurs, afin d'éviter la salinisation excessive de l'environnement racinaire en situation de forte demande hydrique (cas des productions situées en régions méditerranéennes en particulier), et faute de pouvoir prévoir et gérer précisément sur un pas de temps équivalent à celui de l'eau la demande minérale, la pratique horticole tend à favoriser les taux élevés de drainage, en général de 25 à 30 %. Cette pratique est aussi favorisée par l'hétérogénéité des conditions climatiques au sein d'une parcelle ou d'une serre. Ces conditions climatiques particulières aux cultures hors-sol conduisent donc à des consommations d'eau pouvant dépasser 12 000 m³/ha dans une campagne de culture de tomate exportant 500 tonnes de fruits frais, soit la consommation d'eau annuelle d'un groupe d'habitation de 200 personnes pour une production satisfaisant la consommation moyenne en tomate d'une population de 40 000 personnes (consommation moyenne par habitant et par an en 1996 en France de 12 kg).

Cette gestion de la fertirrigation est assurée en continu avec des solutions nutritives complètes sur les supports inertes, alors que celle-ci est

le plus souvent intermittente avec des solutions simplifiées de type NPK sur les supports actifs (Lemaire *et al.*, 1989). La composition d'une solution nutritive est donc tributaire du support, de l'espèce et du stade de développement, mais aussi de la nature de l'eau disponible. Dans la pratique, l'élaboration des solutions repose sur des règles basées sur trois critères principaux (Lesaint et Coïc, 1983): le pH suivant le caractère acidophile ou neutrophile de l'espèce concernée, la conductivité qui exprime en mS/cm la salinité de la solution nutritive à moduler en fonction de la demande climatique, et l'équilibre anions/cations en fonction de l'espèce, de la variété mais surtout du stade de développement. Les équilibres NPK ou K/N, en culture ornementale, ou K/(Ca+Mg), en culture légumière, sont des critères privilégiés en fonction du stade de développement pour assurer la qualité de la plante, de la fleur ou du fruit. Quels que soient ces équilibres, le nitrate représente en général 60 à 70 % de la charge anionique nécessaire à l'ajustement de la salinité alors que l'ammonium ne représente généralement que 10 % de l'azote en cultures légumières. Ce dernier pourcentage est plus élevé, 20 à 30 %, en cultures ornementales en fonction du caractère plus ou moins acidophile des espèces. Sur ces différents critères et les exigences spécifiques, les données empiriques acquises au cours des vingt dernières années sont extrêmement abondantes dans la littérature technique (Blanc, 1985; Lemaire *et al.*, 1989; CTIFL, 1990; Letard *et al.*, 1995; Morard, 1995). En fait, ces systèmes reposent à chaque fois sur la mise en scène de deux acteurs qui sont le climat et la plante exprimant respectivement des contraintes et des besoins. Afin d'obtenir la meilleure expression des potentialités du végétal, l'horticulteur-metteur en scène dispose (outre de la serre s'il s'agit de productions protégées) de deux outils essentiels: le support, inerte ou actif, et la solution nutritive, complète ou simplifiée, ainsi que d'autres indicateurs (pour une réflexion plus détaillée sur les acteurs, les outils et les indicateurs: cf. Robin *et al.*, 1997). L'optimisation du fonctionnement de ces acteurs repose largement sur la disponibilité d'indicateurs fiables: indicateurs du milieu (rayonnement, température, humidité, vitesse du vent pour estimer l'évapotranspiration potentielle imposée par l'acteur-climat; pH, conductivité, teneur en eau du support, volume drainé pour apprécier indirectement la réactivité de l'acteur-plante), mais aussi indicateurs de la plante elle-même. Si la définition des supports et des solutions a permis le premier essor de l'horticulture sans sol, c'est bien la généralisation des indicateurs, principalement du milieu, et leur intégration dans des automatismes qui ont permis l'extension de cette agrotechnique (Letard *et al.*, 1995; Wacquant, 1995).

La multitude des plantes cultivées, des supports, des contraintes socio-économiques, des recettes, des réseaux, des outils de gestion automatique ou informatique conduit donc à une très grande diversité de mises en scène qui abondent dans la littérature technique (Lesaint et Coïc, 1983; Blanc, 1985; Zuang *et al.*, 1986; Lemaire *et al.*, 1989; CTIFL, 1990; Le-

tard *et al.*, 1995 ; Morard, 1995), dans les comptes rendus des stations expérimentales (CTIFL, 1996 ; IFHP, 1996), dans la documentation commerciale des fournisseurs. Elle conduit aussi à une multitude de comportements individuels. Cependant, qu'il s'agisse de cultures sur substrats actifs ou inertes, de légumes ou de ligneux, de serres ou d'aires à conteneurs, et que les apports d'eau et d'engrais se fassent par goutte à goutte, subirrigation ou aspersion, le principe de fertirrigation qui prédomine dans la majorité des exploitations repose sur le drainage perdu. Ce drainage maintient une perte continue qui varie entre 25 et 40 % des apports par goutte à goutte en légumes ou fleurs coupées, et entre 55 et 85 % de ces apports lorsque ceux-ci sont assurés par subirrigation ou par aspersion sur les plantes ornementales. Un tel drainage génère des rejets chargés et volumineux, de l'ordre de 1 000 à 3 000 m³/ha/an à plusieurs mS/cm en rosier ou tomate (Brun et Settenbrino, 1993 ; Jeannequin et Fabre, 1993) ou de 20 à 80 m³/1 000 plantes à des valeurs supérieures à 1 mS/cm pour une culture de bégonia par exemple (Morel *et al.*, 1992 ; Ducommun, 1996). Les conséquences sont loin d'être négligeables écologiquement et économiquement (Benoît et Ceustermans, 1995). Elles sont acceptées par les producteurs car le drainage minimise les risques d'hétérogénéité et d'accident dans la distribution, permet d'ajuster rapidement les apports à la demande, limite la transmission des pathogènes et constitue une assurance de rendement et de qualité. Elles le sont beaucoup moins par la collectivité qui devient de plus en plus vigilante sur la qualité de ses ressources en eau. Ce constat conduit par ailleurs à des interrogations sur le bien-fondé de cet agrosystème artificialisé considéré comme le fruit d'une technicisation abusive de la gestion du vivant. La réduction de ces rejets exige donc un meilleur contrôle des apports et nécessairement, à terme, leur recirculation tout en satisfaisant la demande hydrique et en maintenant la salinité, l'aération et la température des racines dans une marge acceptable pour la culture.

Un très bon réseau d'apport, un substrat performant et une bonne gestion avec une eau de qualité au départ pourraient permettre déjà de mieux ajuster les apports et de diminuer radicalement le drainage. Alors que la qualité de l'eau dépend des ressources, pluie, forages profonds, et que les progrès sur les substrats et les réseaux dépendent des fournisseurs, l'amélioration de la gestion repose principalement sur l'utilisation de capteurs ou d'indicateurs permettant soit de réagir, soit d'anticiper. Ceci étant, dans l'état actuel de l'art en culture sans sol, il n'est pas envisageable, pour le bon fonctionnement des racines, de descendre en dessous d'un drainage minimum.

Recyclage et gestion : des difficultés et une nécessité

La réponse aux difficultés évoquées précédemment réside partiellement dans le recyclage de ces solutions drainées. La pratique du *Nutrient*

Film Technique (Cooper, 1979), représentant la forme la plus élaborée de la culture hydroponique recirculante sans support solide, n'a jamais connu un développement analogue au sans sol à drainage perdu sur laine de roche, principalement à cause des risques sanitaires qu'elle comporte. Cependant, les contraintes réglementaires, décrets ou directives, nationales ou européennes, sur la qualité des rejets (Sebillotte, 1996; Décret 96-163; Arrêté 4-3-1996) amèneront les agrosystèmes horticoles artificialisés à être pris en compte (Charpentier, 1996; Wacquand, 1997b) d'autant plus facilement qu'ils se caractérisent par le confinement des supports et donc par des rejets potentiellement identifiables, taxables et maîtrisables. La définition de tels systèmes fermés et l'identification des problèmes techniques, économiques et sanitaires qui leur sont associés ont conduit depuis plusieurs années les organismes de recherche et de développement à mettre en place des dispositifs expérimentaux adaptés aux différents agrosystèmes et aux différentes filières (Bontemps *et al.*, 1992; Martinoni, 1992; Jeannequin et Fabre, 1993; Musard et Moulin, 1993; Letard et Leteinturier, 1995; Lemanceau *et al.*, 1995; Letard *et al.*, 1995; Ducommun, 1996; François, 1996; Maglione et Poncet, 1997; Mary *et al.*, 1997; Hofmann, 1997; Wacquand, 1997a). Le principe de la recirculation consiste à récupérer, éventuellement après filtration, les eaux de drainage chargées en éléments nutritifs dans des bassins. Cette eau est ensuite reprise pour être mélangée à de l'eau claire, éventuellement de pluie, et réajustée avec un appoint d'éléments nutritifs avant d'être renvoyée sur les cultures. La recirculation permet de ne plus rejeter des quantités importantes d'eau, d'azote et autres éléments fertilisants. En recyclant à 100 %, 35 % de l'eau est économisée en culture de tomate, 50 à 80 % avec des plantes en pots. Cette économie représente en moyenne 50 à 60 % des éléments fertilisants apportés, soit de l'ordre de 8 tonnes d'engrais par ha, dont 40 % en nitrate pour la tomate.

Le recyclage de ces solutions nutritives soulève cependant deux difficultés : dérive de l'équilibre minéral et risque de transmission de pathogènes. Ces difficultés sont d'autant plus importantes que les exigences hydriques de la plante ou les contraintes thermiques sur le support et la solution fertilisante sont fortes, ce qui est tout particulièrement le cas en climat méditerranéen (Wacquand, 1997b). La correction de la dérive de l'équilibre des éléments minéraux est encore difficilement envisageable automatiquement par des engrais simples faute de sondes fiables. Or cette dérive peut être à l'origine de baisses importantes de rendement ou de qualité (Nukaya *et al.*, 1991; Jeannequin, 1997; Letard, 1997a). Il est donc indispensable d'effectuer des contrôles réguliers de la composition minérale de ces solutions drainées pour pouvoir les corriger si besoin est (Hofmann, 1997). Le traitement des solutions recirculantes pour réduire les risques de transmission de pathogènes peut s'effectuer selon différentes méthodes, chaleur, ultra-violets, ozone, chlore, filtre, microflore antagoniste (Steinberg *et al.*, 1994; CTIFL, 1997; CTIFL-ONIFL-

HOR-FNPL, 1997; Letard, 1997; Rey et Déniel, 1997; Tirilly et Letard, 1997; Wacquant, 1997a; Letard et Tirilly, 1998; Mary *et al.*, 1998), mais leurs coûts et les garanties qu'elles procurent font encore l'objet de mises au point expérimentales. La culture du rosier en recyclage apparaît sans risque grave et a été adoptée par 25 producteurs du Var et des Alpes-Maritimes en 1997 et 1998, soit sur plus d'une cinquantaine d'hectares, avec les aides conjointes de l'INRA-URIH-Sophia Antipolis et des stations départementales d'expérimentation du CREAT-Nice-La-Gaude et du SCRADH-Hyères pour les suivis techniques et analytiques. Recycler à 98 % permet ainsi en moyenne une économie de 6 000 m³ d'eau et de 60 % d'engrais (Brun, communication personnelle). Cette culture fait aussi l'objet d'essais, sur 2-3 ha en production, de recyclage avec désinfection au chlore gazeux dont l'installation présente l'avantage, à la différence des autres techniques, d'être économiquement viable (Maglione et Poncet, 1997). Acceptables pour le rosier, ces risques sanitaires peuvent constituer un obstacle majeur pour le gerbera, l'œillet ou la tomate par exemple. L'évaluation de ces risques à l'aide de techniques simples de détection, d'identification et de quantification de ces pathogènes (*Fusarium*, *Phytophthora* en particulier) dans les eaux drainées et recirculées est en cours d'étude (Tirilly et Letard, 1997; Letard et Tirilly, 1998; Poncet, communication personnelle). En fait, une solution aux difficultés que soulève le recyclage intégral pourrait résider dans la mise en œuvre de méthodes de recyclage partiel rendues accessibles au plus grand nombre. Ce recyclage partiel permettrait de réaliser des économies d'eau et d'engrais, et de maintenir ces techniques horticoles dans les zones au taux de nitrate préoccupant. En 1998, 70 ha de tomate fonctionnent en Bretagne en recyclage avec un taux de recirculation de 98 % : 55 ha fonctionnent en NFT sans désinfection depuis le début du développement du sans sol vers 1980, 15 ha sur substrat ont été équipés plus récemment de recyclage avec désinfection par la chaleur, la plus répandue, mais aussi avec une installation UV et deux à l'ozone (Guillou, communication personnelle). Ces exploitations bénéficient du soutien technique des stations régionales du CTIFL-Carquefou et du CATE-St-Pol-de-Léon, ainsi que de l'Université de Brest. Un demi-hectare de production de tomate fonctionne aussi à titre expérimental chez un exploitant dans les Bouches-du-Rhône avec une recirculation munie d'une thermodésinfection (Solari, communication personnelle).

Avec la dérive minérale et les pathogènes, la gestion de l'irrigation fertilisante dans de tels dispositifs à recyclage partiel ou intégral se pose dans un contexte différent du drainage perdu, mais rejoint les interrogations de celui-ci. Pour optimiser les solutions d'apport et réduire les dérives, les informations sur le découplage entre l'absorption d'eau et celle de l'azote restent à acquérir, de même sur le découplage entre les absorptions du nitrate et des autres éléments minéraux pour lesquelles les possibilités de modélisation en pas de temps courts sont inexistantes. L'interrogation sur le rôle de la nutrition azotée ou de la salinité ou de

l'équilibre K/Ca dans la susceptibilité aux pathogènes peut aussi difficilement rester sans tentative d'analyse alors que la virulence du *Pythium* par exemple en tomate est souvent associée à un choc nutritionnel ou que le feu bactérien constitue un risque chez certaines rosacées ornementales (Lemaire *et al.*, 1989).

Jardinier et responsable : une prise de conscience

Malgré les risques et les difficultés du recyclage, mais conscients de l'impact négatif sur l'environnement et sur le public de ces dérives généralisées dans les pratiques, les responsables techniques des structures régionales et nationales des horticultures légumière et ornementale ont mis en place depuis le début de 1997 un programme prioritaire d'expérimentation-développement coordonné par le CTIFL et l'ASTREDHOR (nouvelle structure de coordination technique de la filière ornementale), et auquel participent des unités de l'INRA. Soutenu par l'ONIFLHOR, ce programme permettra de valider sur le plan technico-économique des solutions de recyclage acceptables par l'ensemble des producteurs. La filière légumière a entrepris dans le même temps, en 1997, un travail de sensibilisation des techniciens et des producteurs à travers l'organisation de 2 journées nationales sur le thème *Serres et environnement* : une pour le Nord de la France, et une pour le Sud. Cette sensibilisation, relayée par la presse professionnelle (Letard, 1997c; Rey et Déniel, 1997; Letard et Tirilly, 1998), dépassait le seul aspect des solutions nutritives et traitait aussi les autres déchets rencontrés dans les agrosystèmes protégés. Elle était fondée sur un état des lieux, des pratiques et des solutions techniques, effectué à la demande de la Fédération nationale des producteurs de légumes (FNPL) avec les soutiens, financier de l'ONIFLHOR et technique du CTIFL. Cette sensibilisation s'est concrétisée, auprès des acteurs concernés, par la diffusion de fiches techniques (CTIFL, 1997; CTIFL-ONIFLHOR-FNPL, 1997), mais aussi par la diffusion des contributions faites au cours de ces deux journées, sur l'état des lieux (Cipres et Lagrue, 1997; Letard, 1997a et b), sur la réglementation (Delouée, 1997; Laurent, 1997), sur les solutions techniques pour assurer un recyclage à risque acceptable (Jeannequin, 1997; Letard, 1997c; Tirilly, 1997).

Combien de temps faudra-t-il pour que la nécessité de maîtriser les drainages soit partagée par l'ensemble de la profession horticole utilisatrice des systèmes sans sol ? De plus en plus soumise à des cahiers des charges comportant des obligations de respect de l'environnement, la filière légumière propose maintenant, non seulement d'informer, mais aussi de former « techniciens, agents de développement, producteurs, cadres d'exploitation, enseignants ». Un stage de formation de 2 jours a ainsi été organisé par le CTIFL sur *Le recyclage des eaux de drainage en culture sous serre : installation-conduite-réglementation* en mars 1998 à Carque-

fou. Actuellement, plus de 50 hectares sans sol sur substrat sont en recyclage en rosier pour le Sud-Est ; 70 hectares sans sol, sur NFT et sur substrat, sont en recyclage en tomate en Bretagne mais aussi avec une amorce dans les Bouches-du-Rhône. Un mouvement prend forme qui répond au lointain, sinon prémonitoire, clin d'œil de l'un des pères de la nutrition minérale « *afin que si par hasard l'eau médicinale venait à pénétrer au travers du sable elle ne se perde pas, mais qu'étant reçue elle soit remise dans le pot plein de sable* » (Glauber, 1659). A l'occasion du troisième centenaire de la première publication sur la nutrition des plantes par Woodward, à l'approche du deuxième centenaire des *Recherches chimiques sur la Végétation* de Saussure, presque 80 ans après la première introduction de cette agrotechnique, 60 en France, dans la pratique horticole, aucune raison ne permet de penser que, malgré les dérives, le « sans sol » ne puisse se réconcilier avec la « Terre ».

BIBLIOGRAPHIE

ARNON (D. I.), HOAGLAND (D. R.), 1940 — Crop production in artificial culture solutions and in soils with special reference to factors influencing yields and absorption of inorganic nutrients, *Soil Science*, 50, pp. 463-483.

ARRETÉ du 4-3-1996 — *Journal Officiel de la République française* du 8 avril 1996.

BACON (F.), 1991 — *Du progrès et de la promotion des savoirs*, Paris, Gallimard, 375 p. (traduction française par M. Le Doeuff de *Of Proficiency and Advancement of Learning* de 1605).

BENOIT (F.), CEUSTERMANS (N.), 1995 — Ecological aspects of horticultural soilless growing methods, *Acta Horticulturae*, 396, pp. 11-24.

BENSAUDE-VINCENT (B.), STENGERS (I.), 1995 — *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte, 347 p.

BLANC (D.), 1966 — Les cultures sans sol, *PHM*, n° 67, pp. 3455-3459.

BLANC (D.), 1985 — *Les cultures hors-sol*, Paris, INRA, 409 p.

BONTEMPS (J.), DUCHEIN (M.-C.), JULIEN (P.), BERNABEU (M.), 1992 — Maîtrise et recyclage des effluents de fertilisation en cultures florales hors-sol. Optimisation de la culture hors-sol du rosier par recyclage de la solution nutritive, *Cahiers du CNIH*, 21, pp. 25-33.

BOULAIN (J.), 1992 — *Histoire de l'agronomie en France*, Paris, Technique et Documentation-Lavoisier, 392 p.

BOULAIN (J.), 1994 — Lavoisier, son domaine de Freschines et l'agronomie, *CR Acad. Agr. Fr.*, 80, n° 4, pp. 67-74.

BOULAIN (J.), 1995 — Quatre siècles de fertilisation. Première partie, *Etude et gestion des sols*, 2, pp. 201-208.

BOYLE (R.), 1772 — The sceptical chymist, in: *The Works of the Honourable Robert Boyle in six Volumes*, vol. 1, T. Birch, London (réédition en fac-similé, 1965, Georg Olms Verlagsbuchhandlung, Hildesheim) pp. 458-585. *The Sceptical Chemist* publié en 1661 (référence citée par Russell, 1961, Hewitt, 1966 et Steiner, 1985) est le traité le plus célèbre des œuvres de Robert Boyle. La discussion sur les observations de van Helmont est présente dans la 2^e partie du traité (pp. 494-495 de l'édition de Birch). Le troisième volume de l'édition de Birch contient la réédition d'un second traité de R. Boyle de 1666 *Origin of Forms and Qualities according to the Corpuscular Philosophy* qui, selon Steiner, 1985, se référant à Browne, 1944, fait une brève mention d'expérimentations dans l'eau avec d'autres espèces que la menthe.

BREHIER (E.), 1993 — *Histoire de la philosophie*, vol. 2, XVI^e-XVIII^e siècles, Paris, Quadrige-Presses Universitaires de France, 6^e édition, 506 p. (cf. ch. 2 «François Bacon ou la philosophie expérimentale», pp. 18-40).

BROWNE (C. A.), 1944 — *A Source Book of Agricultural Chemistry*, Waltham, Mass. (référence citée par Prescott, 1947) ou *Chronica Botanica*, vol. 8 (référence citée par Steiner, 1985).

BRUN (R.), SETTEMBRINO (A.), 1993 — Rose hors-sol sous serre : gestion de la nutrition minérale et hydrique, *PHM Revue Horticole*, 345, pp. 25-29.

BRUN (R.), CODRON (J.-M.), FRISSANT (N.), MARLE (D.), JEANNEQUIN (B.), REMY (J.), 1986 — *Les jardiniers du hors-sol. Innovation et production de tomates dans le Roussillon*, Document de travail, Alénya-Montpellier-Paris, INRA-URSAD-URES, 189 p.

CARATINI (R.), 1971 — La vie des plantes, in: *Bordas Encyclopédie*, Paris, Bordas, vol. 10, 200 p.

CAUDERON (A.), 1994 — Lavoisier et l'agronomie, *CR Acad. Agr. Fr.*, 80, n° 4, pp. 41-50.

CHARPENTIER (S.), 1996 — Impact de la fertilisation sur l'environnement, in: *La fertilisation en pépinière*, Paris, IFHP-RESHOR, 182 p.

CHOUARD (P.), 1938 — Comment pratiquer les nouvelles cultures dans l'eau : cultures sans sol en milieux synthétiques, *Revue Horticole*, 110, pp. 287-296.

CHOUARD (P.), 1951 — *Cultures sans sol*, Paris, La Maison Rustique, 200 p.

CHOUARD (P.), 1964 — Cultures sans sol ou hydroponiques, *in: Le bon Jardinier*, Paris, La Maison Rustique, pp. 414-420.

CIPRES (C.), LAGRUE (C.), 1997 — Bilan de l'étude FNPL-CTIFL « Respect de l'environnement et productions légumières », *in: Textes des conférences de la Journée « Serres et environnement »*, CTIFL-Carquefou, 26.06.97, Paris, CTIFL-ONIFLHOR-FNPL.

CODRON (J.-M.), 1993 — *Changement technique et filière tomate*, Document de travail, Séminaire Innovations et Sociétés, CIRAD-INRA-ORSTOM, 15 p.

COOPER (A.), 1979 — *The ABC of NFT*, London, Grower Books publisher, 181 p.

CTIFL, 1990 — *Cultures légumières sur substrats, Hors série Infos-Ctifl*. Paris, Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, 79 p. Ce numéro spécial rassemble 13 contributions de J. LE TEINTURIER, M. MUSARD, M. LETARD, C. WACQUANT, J. DUMOULIN, A. MICHELI, M. JAVOY, B. PELLETIER, M.-J. GOICQ, D. ADAM, C. RAYNAL-LACROIX.

CTIFL, 1996 — Catalogue des Publications, Paris, Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, 33 p.

CTIFL, 1997 — *Maîtrise minérale et sanitaire en culture sous serre. Les matériels*, Ensemble de fiches rassemblées par le CTIFL pour les Journées « Serres et environnement », CTIFL-Carquefou, 26.06.97 et CTIFL-Balandran, 18.09.97.

CTIFL-ONIFLHOR-FNPL, 1997 — Le point sur les solutions nutritives, *in: Respect de l'environnement et productions légumières*, Ensemble de fiches rassemblées pour les Journées « Serres et environnement », CTIFL-Carquefou, 26.06.97 et CTIFL-Balandran, 18.09.97.

DÉCRET n° 96-163 du 4 mars 1996 relatif aux programmes d'action à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, *Journal Officiel de la République française* du 5 mars 1996.

DEHÉRAIN (P.-P.), 1892 — *Traité de chimie agricole*. Paris, Masson, 904 p.

DELOUVÉE (R.), 1997 — Horticulture et maîtrise des pollutions de l'eau, *in: Textes des conférences de la Journée « Serres et environnement »*, CTIFL-Carquefou, 26.06.97, Paris, CTIFL-ONIFLHOR-FNPL.

DROUINEAU (G.), 1961 — La culture sans sol et la sélection, *in: Advances in Horticultural Science and Their Applications*, vol. 1, Oxford, Pergamon Press, pp. 140-143.

DUCHESNEAU (F.), 1998 — *Les modèles du vivant de Descartes à Leibniz*, Paris, Librairie philosophique J. Vrin, 402 p. Cet ouvrage contient au premier chapitre un long développement sur « la construction empirico-théorique de van Helmont », pp. 18-29.

DUCOMMUN (C.), 1996 — Le recyclage des solutions nutritives, *in*: *La fertilisation en pépinière*, Paris, IFHP-RESHOR, 182 p.

DUHAMEL DU MONCEAU (H.-L.), 1748 — Sur les plantes qu'on peut élever dans l'eau, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 272-301. Duhamel y fait aussi mention de travaux analogues publiés dans les *Mémoires de l'Académie de Berlin* ou menés par l'abbé Bonnet à Genève.

DUHAMEL DU MONCEAU (H.-L.), 1758 — *La physique des arbres*, vol 2, H.-L. Guérin et L.-F. Delatour, Paris, 432 p. (référence citée aussi par Hewitt, 1966 et Steiner, 1985). Les deux parties (volumes) de cet ouvrage seront rééditées sans modification en 1788 chez la Veuve Desaint. Les commentaires sur la nutrition des plantes sont à l'article III « *Si l'on peut trouver dans les végétaux des indices certains que quelques portions de la terre ou des engrais passent dans le corps des plantes* » (pp. 195-206) et à l'article IV « *Si toutes les plantes des différentes espèces se nourrissent d'un même suc tiré de la terre* » (pp. 207-217) du chapitre 1 « De l'économie des végétaux » au Livre cinquième de la deuxième partie (volume 2). En 1767, Duhamel publiera un article de chimie dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* « sur les sels qu'on retire des cendres des végétaux ». Duhamel sera le parrain de Lavoisier pour son entrée à l'Académie des Sciences en 1768. A côté de son œuvre de chimiste et de sa charge de fermier général, Lavoisier fut aussi agronome-exploitant (Boulaine, 1994). Héritier des thèses de Duhamel, il transférera à la fertilisation par les fumiers sur son domaine de Fréchines la notion de bilan qu'il avait introduite en chimie élémentaire (Boulaine, 1992).

EATON (F. M.), 1931 — Large scale sand culture apparatus, *Soil Science*, 31, 235 (référence citée par Hewitt, 1966).

ELLIS (C.), SWANEY (M. W.), EASTWOOD (T.), 1947 — *Soilless Growth of Plants*, New York, Reinhold Publishing Corporation, 277 p. Cette édition est la 11^e de l'ouvrage initialement publié par Ellis et Swaney en 1938.

FRANÇOIS (J.-M.), 1996 — Comparaison des coûts de différentes méthodes de fertilisation en culture hors-sol, *in*: *La fertilisation en pépinière*, Paris, IFHP-RESHOR, 182 p.

GERICKE (W. F.), 1929 — Aquaculture, a means of crop production, Physiological Section Meeting of the Botanical Society of America, Des Moines, Iowa, 1 p. (référence citée par Steiner, 1985).

GERICKE (W. F.), 1940 — *The Complete Guide to Soilless Gardening*, New York, Prentice-Hall, 285 p. (référence citée par Chouard, 1964).

GERICKE (W. F.), TAVERNETTI (J. R.), 1936 — Heating of liquid culture media for tomato production, *Agricultural Engineering*, 17, 141-142 (référence citée par Chouard, 1951 et Ellis *et al.*, 1947).

GLAUBER (J.R.), 1656 — Prosperitatis Germaniae. Pars Prima (118 p.), in: *Prosperitatis Germaniae*, Joannem Janssonium, Amstelodami. Cette édition en latin correspond à l'ouvrage publié en allemand la même année, à Amsterdam également, intitulé *Des Teuschlandts Wohlfahrt (Erster Theil), das dritte Capittel*, cité par Russell (1961). L'addition du salpêtre est préconisée au troisième chapitre «*De Vegetabilium Concentratione*» (pp. 63-118) de cette «*Pars Prima*». Il n'existe pas de traduction française de ce document réédité en latin à Prague en 1704.

GLAUBER (J.R.), 1659 — Traité de la médecine universelle ou le vray or potable (61 p.), in: *Œuvre minérale*, Thomas Jolly, Paris, (réédition en fac-similé, 1977, collection Bibliotheca Esoterica, Paris, Jobert.). L'*Œuvre minérale* comprend quatre traités de Glauber: «*Les trois Parties de l'Œuvre minérale*», «*La Teinture de l'Or*», «*Traité de la Médecine universelle*» et «*La Consolation des Navigants*», initialement publiés à Amsterdam en latin respectivement en 1646, 1651, 1658 et 1657. Chaque traité a sa propre pagination.

GRANDEAU (L.), 1879 — *Chimie et physiologie appliquées à l'agriculture et à la sylviculture*, Paris, Berger-Levrault, (référence citée par Bou-laine, 1992).

GUYENOT (E.), 1941 — *Les sciences de la vie aux XVII^e et XVIII^e siècles: l'idée d'évolution*, Paris, Albin-Michel, 462 p.

HAMPE (P.), 1938a — Les solutions nutritives pour cultures dans l'eau, *Jardinage*, 26, n° 228, pp. 23-28.

HAMPE (P.), 1938b — Cultures dans l'eau pour amateurs, *Jardinage*, 26, n° 228, pp. 29-31.

HELMONT (J.-B.) van, 1652 — *Ortus Medicinae*. Ludovicum Elzevirium, Amterodami, (référence citée par Russell, 1961 et par Steiner, 1985). La description de l'expérience est faite au chapitre intitulé «*Com-plexionum atque mistionum elementalium figmentum*» (pp. 84-90). Il faut cependant noter que la première édition de l'*Ortus medicinae*, qui rassemble l'ensemble de l'œuvre d'Helmont dont les écrits n'ont pas été publiés de son vivant, est réalisée par son fils en 1648, 4 ans après sa mort, à Amsterdam chez le même imprimeur.

HEWITT (E. J.), 1966 — *Sand and Water Culture Methods used in the Study of Plant Nutrition*, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Bucks, 547 p.

HOAGLAND (D. R.), 1919 — Relation of concentration and reaction of the nutrient medium to the growth and absorption of the plant, *J. Agric. Res.* 18, p. 73 (référence citée par Hewitt, 1966).

HOAGLAND (D. R.), 1920 — Optimum nutrient solutions for plants, *Science*, 52, p. 562.

HOAGLAND (D. R.), 1923 — The absorption of ions by plants, *Soil Science*, 16, pp. 225-246.

HOAGLAND (D. R.), MARTIN (J.-C.), 1923 — A comparison of sand and solution cultures with soils as media for plant growth, *Soil Science*, 16, pp. 367-388.

HOAGLAND (D. R.), ARNON (D. I.), 1941 — Physiological aspects of availability of nutrients for plant growth, *Soil Science*, 51, pp. 431-444.

HOFMANN (M.), 1997 — Les systèmes RECYVAR: recyclage des solutions de drainage en cultures hors-sol à partir d'une station simple, *Bulletin d'information de l'horticulture et de la pépinière méditerranéennes*, n° 26, pp. 1-3.

HOME (F.), 1762 — *The Principles of Agriculture and Vegetation*, 3^e édition, Millar, London, Kincaid and Bell, Edinburgh (référence citée par Hewitt, 1966).

HOMES (M.V.), ANSIAUX (J.R.), VAN SCHOOR (G.), 1953 — *L'Aquiculture*, Ministère des Colonies, Direction de l'Agriculture, Bruxelles, 151 p.

IFHP, 1996 — *Catalogue des publications: IFHP, ONIFLHOR, Stations régionales du RESHOR, Familles professionnelles, Paysage, commerce et production, CFCE, Qualipaysage*, Paris, Institut français de l'horticulture et du paysage, 56 p.

JEANNEQUIN (B.), 1997 — La gestion des rejets liquides. Solutions pour la culture en sol et hors-sol, in: *Textes des conférences de la Journée « La serre en accord avec l'environnement »*, CTIFL-Balandran, 18.09.97, Paris, CTIFL-ONIFLHOR-FNPL.

JEANNEQUIN (B.), FABRE (R.), 1993 — Procédé de culture hors-sol à circuit fermé. Etudes et perspectives, *PHM Revue Horticole*, n° 338, pp. 21-26.

LAURENT (A.), 1997 — La gestion des rejets liquides. Les aspects réglementaires, in: *Textes des conférences de la Journée « La serre en accord avec l'environnement »*, CTIFL-Balandran, 18.09.97, Paris, CTIFL-ONIFLHOR-FNPL.

LAVOISIER (A.-L.), 1789 — *Traité élémentaire de chimie*, Paris, Cuchet, tomes I et II, 362 p. (réédition en fac-similé, 1992, Paris, Editions Jacques Gabay).

LEMAIRE (F.), ROBIN (P.), 1993 — Rapport sur les cultures artificialisées en horticulture légumière et ornementale, Document de travail, Département d'Agronomie, INRA, 14 p.

LEMAIRE (F.), DARTIGUES (A.), RIVIERE (L.-M.), CHARPENTIER (S.), 1989 — *Cultures en pots et conteneurs. Principes agronomiques et applications*, Paris-Limoges, INRA-PHM, Revue Horticole, 184 p.

LEMANCEAU (P.), LETARD (M.), STEINBERG (C.), 1995 — Qualité biologique de la solution nutritive, *PHM, Revue Horticole*, n° 363, pp. 24-29.

LESAINTE (C.), 1985 — Analyse critique des systèmes de culture hors sol avec et sans recyclage des solutions. Conséquences au niveau des contrôles analytiques, *in: Les cultures hors-sol*, Paris, D. BLANC (éd.), INRA, 409 p.

LESAINTE (C.), COIC (Y.), 1983 — *Cultures hydroponiques*. Paris, Flammarion-La Maison Rustique, 119 p.

LETARD (M.), 1997a — Maîtrise de la conduite des cultures, cas du recyclage des solutions nutritives. Aspects irrigation-nutrition, maîtrise minérale, *in: Textes des conférences de la Journée « Serres et environnement »*, CTIFL-Carquefou, 26.06.97, Paris, CTIFL-ONIFLHOR-FNPL.

LETARD (M.), 1997b — La gestion des rejets liquides. Etat des lieux, conclusions de l'étude FNPL-CTIFL, *in: Textes des conférences de la Journée « La serre en accord avec l'environnement »*, Ctifl-Balandran, 18.09.97, Paris, CTIFL-ONIFLHOR-FNPL.

LETARD (M.), 1997c — Solution nutritive: recycler pour ne pas jeter, *Fruits et Légumes*, n° 156, pp. 44-45.

LETARD (M.), LE TEINTURIER (J.), 1995 — Recyclage des effluents de solution nutritive en culture hors-sol sous serre, *Infos-Ctifl*, n° 111, pp. 29-31.

LETARD (M.), TIRILLY (Y.), 1998 — Les solutions de désinfection, *Fruits et Légumes*, n° 159, pp. 73-75.

LETARD (M.), ERARD (P.), JEANNEQUIN (B.), 1995 — *Maîtrise de l'irrigation fertilisante. Tomate sous serre et abris en sol et hors-sol*, Paris, CTIFL, 220 p.

LIEBIG (J.), 1844 — *Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture*, Paris, Fortin, Masson et Cie., 544 p. (trad. par C. Gerhardt). La première édition en allemand date de 1840 et a été traduite en anglais la même année à Londres où elle a déclenché un coup de tonnerre selon Russell (1961) et en français en 1841. Cette deuxième édition est augmentée considérablement et en particulier dans la première partie d'un chapitre XVI intitulé « Documents » (pp. 333-355) où Liebig rapporte de façon détaillée les expériences et les résultats de ses prédécesseurs sur les analyses minérales de cendres de végétaux (Berthier, Frésenius, Hertwig, Thon) ainsi que celles de Saussure de 1804 sur la composition minérale de différents sols et plantes ligneuses qui y poussent, celles de Boussingault de 1841 publiées dans *Ann. Chim. Phys.* (III,

1, 208) sur les bilans élémentaires (C, H, N, O, matière minérale) des importations de fumier et des exportations par espèce dans 4 assolements différents de 5 ans, et celles de Wiegmann et Polstorf de 1841 qui comparent la composition minérale des cendres de six espèces d'intérêt agronomique cultivées parallèlement sur « sable pur » et dans la « terre artificielle ».

MAGLIONE (P.), PONCET (C.), 1997 — Recyclage et désinfection par le chlore gazeux des solutions de drainage, *Vie agricole*, supplément au n° 962, pp. 2-3 et pp. 11-12.

MARIOTTE (E.), 1717 — *Œuvres*, vol. I, P. Vander Aa, Leide, 320 p. Parmi les « Essais de physique » du premier des deux volumes de ces *Œuvres*, un « Premier essai : de la végétation de plantes » (pp. 119-147) correspond à une lettre écrite à Monsieur Lantin sur « le sujet des plantes » édité à Paris en 1676 où Mariotte traite dans une première partie des « éléments ou principes des plantes » (pp. 121-127).

MARTINONI (A.), 1992 — Le système de recyclage à risque calculé : une nouvelle méthode pour gérer la culture hors-sol en circuit fermé, *Revue suisse de viticulture, d'arboriculture et d'horticulture*, 24, pp. 359-364.

MARY (L.), LE SANN (H.), TANGUY (J.-L.), 1997 — Le recyclage des eaux de drainage en pépinière hors-sol, Document interne, CATE, Saint Pol de Léon, 10 p.

MASSAIN (R.), 1966 — *Chimie et chimistes*, Paris, Magnard, 392 p.

MAZE (P.), 1919 — Recherche d'une solution purement minérale capable d'assurer l'évolution complète du maïs cultivé à l'abri des microbes, *Annales de l'Institut Pasteur*, 33, pp. 139-173. Plusieurs articles de Mazé, cités en partie par Hewitt (1966), seront publiés dans ces *Annales* ainsi que dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* entre 1898 et 1915, sur les formes d'azote nitrique ou ammoniacale assimilées par les plantes (*CRAS*, 1898, vol. 127 ; *AIP*, 1900, vol. 14) et sur les influences respectives des éléments de la solution minérale et la détermination des éléments minéraux rares nécessaires au développement du maïs (5 mémoires *in*: *AIP*, 1913, vol. 25 et 27, 1914, vol. 28 et *CRAS*, 1915, vol. 160). Ils constituent, avec les travaux de Bertrand et Javillier, réalisés aussi à l'Institut Pasteur, une des plus importantes contributions françaises aux travaux sur la nutrition minérale au début du XX^e siècle.

MEINEL (C.), 1988 — Early seventeenth-century atomism. Theory, epistemology, and the insufficiency of experiment, *Isis*, 79, pp. 68-103.

MENGEL (K.), 1994 — Lavoisier, le salpêtre et l'azote, *CR Acad. Agr. Fr.*, 80, n° 4, pp. 59-66.

MORARD (P.), 1995 — *Les cultures végétales hors-sol*, Agen, Publications Agricoles, 303 p.

MOREL (P.), GRANGER (J.), LAURY (J.-C.), CHAIGNEAU (S.), 1992 — Etude de la fertilisation du Begonia en subirrigation, *in: La fertilisation des plantes en pot. Comptes rendus d'essais 1990-1995*, Angers, IFHP, 186 p.

MUSARD (M.), 1990 — Qualité de la tomate de serre – conduite de l'alimentation hydrominérale en culture sur substrat, *Hors série Infos-Ctifl*, pp. 21-26.

MUSARD (M.), MOULIN (P.), 1993 — Culture maraîchère sur substrat. Le recyclage des solutions de drainage, *Infos-Ctifl*, 91, pp. 34-38.

NICOLAS DE CUSA, 1937 — *De Staticis experimentis*, Nouvelle édition en latin de l'ouvrage de 1450 publiée par L. Baur à Leipzig (référence citée par Prescott, 1947).

NUKAYA, VOOGT (W.), SONNEVELD (C.), 1991 — Effects of NO_3^- , SO_4^- and Cl^- ratios on tomatoes grown in recirculating system, *Acta Horticulturae*, 294, pp. 297-304.

ONIFLHOR, 1996a — *Chiffres-clés 1995. Fruits et légumes frais et transformés*, Paris, Office national interprofessionnel des fruits, des légumes et de l'horticulture, 149 p.

ONIFLHOR, 1996b — *Chiffres-clés 1995. Filière horticole*, Paris, Office national interprofessionnel des fruits, des légumes et de l'horticulture, 51 p.

OSS (J.-F.) van, 1975 — Fertility and Fertilizers, *in: Materials and technology (A systematic encyclopedia of the technology of materials used in industry and commerce, including foodstuffs and fuels. Based upon a work originally devised by the late Dr. J.-F. van Oss)* vol. 7, *Vegetable food products and luxuries*, Londres, Longman, et Amsterdam, J. H. de Bussy, pp. 1-14.

PALISSY (B.), 1880 — *Œuvres*, publiées d'après les textes originaux avec une notice historique et bibliographique et une table analytique par Anatole France, Paris, 499 p. (réédition en fac-similé en 1969, Genève, Slatkine Reprints). Cette édition de 1880 comporte les deux principaux ouvrages de Palissy : d'une part *Recepte véritable* imprimée en 1563 à La Rochelle et qui fait mention, dans un dialogue, d'observations sur les fumiers, le salpêtre et la croissance des plantes (pp. 26-35), d'autre part *Discours admirables de la nature des eaux et fontaines tant naturelles qu'artificielles, des métaux, des sel et salines...* publiés en 1580 à Paris sous la forme d'un dialogue entre « Théorique » et « Pratique » et qui contient au chapitre « Des sels divers » (pp. 294-306) l'extrait (pp. 298-299) cité par Boulaine (1992) en se référant à Grandeau (1879). Cette citation n'est donc pas de 1563 comme indiquée dans le texte de Boulaine mais de 1580. Cette correction n'enlève rien au fait que dès 1563 dans sa *Recepte véritable* Palissy suggère déjà de façon convaincante à partir de l'examen au champ des pilotes de fumiers lessivés par les pluies, que le salpêtre de ces fumiers est essentiel à la croissance des plantes. Un bref extrait de la

Recepte véritable est repris par Steiner (1985), faisant référence à une traduction qu'en fait Browne (1944).

PENNINGSFELD (P.), KURZMANN (P.), 1969 — *Cultures sans sol ou hydroponiques et sur tourbe*, Paris, La Maison Rustique, 219 p.

PRESCOTT (J. A.), 1947 — Nicolas of Cusa and van Helmont's experiments, *Aust. J. Sc.*, 10, p. 86.

REY (P.), DENIEL (F.), 1997 — Désinfection des solutions nutritives, *Culture légumière*, 42, pp. 33-36.

ROBIN (P.), FRANÇOIS (J.-M.), LEMAIRE (F.), LETARD (M.), 1997 — Gestion de l'azote dans les systèmes horticoles artificialisés, in: *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, G. LEMAIRE ET B. NICOLARDOT (eds.), INRA-Editions, Les Colloques n° 83, pp. 217-231.

ROMANO-JOLY (M.), 1959 — *Cultivez sans sol ni terre!* Paris, Les Editions Francex, 232 p.

RUSSELL (E. W.), 1961 — *Soil Conditions and Plant Growth*, London, Longmans, 690 p. Cette édition complétée et corrigée par E. W. Russell est la 9^e de l'ouvrage publié en première édition en 1912 par E. J. Russell et réédité 6 fois par cet auteur.

SACHS (J.), 1868 — *Physiologie végétale, Recherches sur les conditions d'existence des plantes et sur le jeu de leurs organes*, Paris, Masson, 543 p.

SAUSSURE (T.) de, 1804 — *Recherches chimiques sur la végétation*, Paris, Veuve Nyon, 336 p. (cité aussi par Russell, 1961). Le chapitre 2 traite de l'« influence du gaz acide carbonique sur la végétation » (pp. 25-59), le chapitre 3 de l'« influence du gaz oxygène sur les plantes développées » (pp. 60-161), le chapitre 5 « du terreau végétal » (pp. 162-193), le chapitre 7 « de la fixation et de la décomposition de l'eau par les végétaux » (pp. 217-237), le chapitre 8 « de l'absorption des dissolutions par les racines des plantes » (pp. 240-271). Ce dernier est constitué de 5 paragraphes: « §1 L'eau et les gaz sont des aliments insuffisants pour opérer l'entier développement des végétaux, §2 Les plantes absorbent-elles en même raison que l'eau, les substances qui sont en dissolution dans ce fluide?, §3 Les plantes absorbent-elles, dans un liquide contenant plusieurs substances en dissolution, certaines substances préférablement à d'autres?, §4 Considérations sur les substances salines ou minérales qui entrent dans la composition des végétaux, §5 Application des observations à la recherche de la quantité d'aliments que la substance seule du terreau fournit aux racines des végétaux ». Le chapitre 9 concerne les « observations sur les cendres des végétaux ».

SEBILLOTTE (J.), 1996 — *La qualité de l'eau: quels problèmes et quelles connaissances pour agir?* Document de travail, Paris, Ministère de l'Agriculture, 14 p.

SINGER (C.), 1941 — *A Short History of Science to the Nineteenth Century*, London, Oxford University Press, 171 p. (référence citée par Prescott, 1947 et par Hewitt, 1966).

STEINBERG (C.), MOULIN (F.), GAILLARD (P.), 1994 — Disinfection of drain water in greenhouses using a wet condensation heater, *agronomie*, 14, pp. 627-635.

STEINER (A. A.), 1985 — The history of mineral plant nutrition till about 1860 as source of the origin of soilless culture methods, *Soilless Culture*, 1, pp. 7-24.

TIRILLY (Y.), 1997 — Maîtrise de la conduite des cultures, cas du recyclage des solutions nutritives. Aspect sanitaire, in: *Textes des conférences de la Journée « Serres et environnement »*, CTIFL-Carquefou, 26.06.97, Paris, CTIFL-ONIFLHOR-FNPL.

TIRILLY (Y.), LETARD (M.), 1997 — Maîtrise sanitaire des solutions nutritives en cultures sans sol, *Infos-Ctifl*, n° 132, pp. 34-39.

TRUFFAUT (G.), 1938 — Le passé, le présent et l'avenir des cultures dans l'eau, *Jardinage*, 26, n° 228, pp. 5-17.

TRUFFAUT (G.), HAMPE (P.), 1938 — Les cultures dans l'eau et la science, *Jardinage*, 26, n° 228, pp. 18-22.

WACQUANT (C.), 1995 — *Maîtrise de la conduite climatique. Tomate sous serre et abris*, Paris, CTIFL, 127 p.

WACQUANT (C.), 1997a — Le recyclage des eaux de drainage en culture hors-sol, *Infos-Ctifl*, n° 132, pp. 28-33.

WACQUANT (C.), 1997b — Atouts et faiblesses des cultures sous abris, in: *Textes des conférences de la Journée « La serre en accord avec l'environnement »*, CTIFL-Balandran, 18.09.97, Paris, CTIFL-ONIFLHOR-FNPL.

WALDEN (P.), 1984 — Glauber, in: *Das Buch der grossen Chemiker*. G. BUGGE (ed.), Weinheim, Verlag Chemie, pp. 151-172.

WIEGMANN (A. F.), POLSTORFF (L.), 1842 — *Über die anorganischen Bestandtheile der Pflanzen*, Braunschweig, F. Vieweg und Sohn, (référence citée par Steiner, 1985, expérience analysée par Liebig, 1844).

WIT (H.C.D.) de, 1992 — *Histoire du développement de la biologie*, vol. I, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 404 p.

WOODWARD (J.), 1699 — Thoughts and experiments on vegetation, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 21, pp. 193-227.

ZUANG (H.), 1965 — Les techniques d'alimentation des plantes, *PHM*, n° 53, pp. 2483-2486.

ZUANG (H.), THICOIPE (J.-P.), ADAM (D.), 1979 — *Cultures maraîchères sur pouzzolane, Bilan de quinze années d'essais de cultures semi-forcées et de plein air sur Pouzzolane*, Paris, INVUFLEC, 57 p.

ZUANG (H.), MUSARD (M.), DUMOULIN (J.), THICOIPE (J.-P.), LETARD (M.), VAYSSE (P.), ADAM (D.), 1984 — *Cultures légumières sur substrats. Installation et conduite*, Paris, CTIFL, 240 p. (Cet ouvrage a été complété et réédité en 1986, 275 p.).