



Production agricole en milieu fermé, artificialisé et isolé

Jean DUNGLAS

Membre de l'Académie d'agriculture de France.

Manuscrit révisé le 31 mai 2018 - Publié le 14 juin 2018

Résumé : Depuis la naissance de l'agriculture, les parcelles ont été progressivement de mieux en mieux protégées, et les techniques de plus en plus artificialisées. À l'heure actuelle plus d'un tiers de la surface des terres émergées sert à produire nourriture et matières premières. Pour éviter de réduire encore les surfaces occupées par les écosystèmes naturels, il faut inventer des nouveaux moyens pour fournir aux populations une alimentation abondante et variée.

Une des solutions envisageables consiste à édifier des "fermes verticales", dans lesquelles les végétaux sont cultivés dans des bâtiments se développant en hauteur, à l'intérieur ou sur la périphérie des villes. Le concept a été étudié en profondeur et abondamment diffusé par le Pr. Dickson Despommier de l'Université de Columbia.

Les plantes cultivées y sont protégées contre le mauvais temps, les parasites, les adventices, les maladies et les prédateurs. De nouvelles technologies permettent d'augmenter les rendements et les productions : hydroponique, aéroponique, éclairage optimisé, naturel ou artificiel, irrigation et fertilisation automatisées, recyclage de l'eau, atmosphère contrôlée, maintenance robotisée. Les produits étant vendus et consommés très vite après la récolte, leur altération et la quantité de déchets sont très réduits. La pollution externe est très diminuée.

Le concept soulève des oppositions surtout économiques. Les coûts d'investissement et de fonctionnement annoncés sont-ils crédibles ?

À l'heure actuelle, il n'existe pas encore de tours "fermes verticales" correspondant complètement au projet de Despommier. Néanmoins, de nombreuses serres verticales intégrant une partie importante de ses caractéristiques sont en fonctionnement. Elles fournissent à des prix acceptés par les consommateurs des légumes et fruits de grande qualité organoleptique en Asie et en Amérique du Nord.

Il apparaît évident que le concept mériterait d'être beaucoup plus étudié en profondeur, en Europe et spécialement en France.

Mots clés : Aéroponique, Agriculture artificialisée, Agriculture urbaine, Ferme verticale, Horticulture chez soi, Hydroponique, Serre verticale.

Abstract : *Since the beginning of agriculture, fields are been more and more protected and cultivation techniques more and more artificialized. Today, more of one third of the land area are committed to feed the population of the world. To avoid further reducing of the natural ecosystems surface, novel ways for obtaining an abundant and diversified food supply are necessary.*

One solution involves the construction of vertical farming in which food would be grown in tall buildings or greenhouses within or around cities. The concept has been widely studied and circulated by Pr Dickson Despommier at Columbia University.

Crops would be protected against bad weather, pests, weeds, diseases and predators. New technologies allow largely increased yields and crop production : hydroponics, aeroponics, artificial and optimized lighting, automated fertigation, water recycling, monitored atmosphere robotic handling. Spoilage would be reduced, crops being sold and consumed shortly after harvest. External pollution is also reduced.

Opponents question economic problems : Are the construction and operation calculated costs credible ?

Today, there is still no complete Despommier's tower.

Nevertheless, many "vertical farms" taking over part of the basic concept operate and provide high quality vegetable and fruits in urban zones especially in Asia and North America.

The concept is worth studying in Europe, especially in France.

Key words : *Aeroponics, Artificialized agriculture, Greenhouses, Hydroponics, In house production, Urban agriculture, Vertical farming, Vertical garden.*

Le but de ce cet article n'est ni scientifique, ni économique, bien que le sujet étudié englobe nombre de progrès récents en biologie, écologie générale, physique environnementale, ingénierie et robotique, économie de l'aménagement du territoire et de l'urbanisme. Il part de l'existence d'une technique de production développée à partir d'un modèle différent de l'agriculture classique qui semble progresser assez rapidement et qui a atteint, dans diverses zones de la planète, une réalité économique indéniable. Il en examine les divers aspects et contraintes, avantages et inconvénients pour en esquisser le potentiel d'avenir. L'étude approfondie de ce type de production, des techniques utilisées et des implications socioéconomiques qui en résultent apparait comme une nécessité incontournable.

1 Une longue tendance historique

À l'aube du néolithique, les premiers agriculteurs ont voulu protéger leurs semis, plantations et récoltes des attaques extérieures, en clôturant physiquement et, probablement aussi, par un gardiennage vigilant. Ils ont cherché à procéder de même avec l'élevage sédentaire qui a été rapidement associé à la production de graines, légumes et fruits. Parallèlement, l'écologie des premiers champs a commencé à être contrôlée par l'arrachage des adventices (Mazoyer M. et Roudart L. 2002), (Ferault C. et Le Chatelier D. 2012).

L'artificialisation des zones cultivées a fortement progressé au cours des quatrième et troisième millénaires avant J.C. La mise en culture de territoires, trop secs ou trop humides a été réalisée à Sumer en Mésopotamie dans la zone marécageuse où le Tigre et l'Euphrate aboutissent dans le golfe Arabo-Persique. Assainis par des systèmes de fossés puis dessalés par des arrosages massifs, les champs, délimités et fermés par des levées de terre, étaient irrigués par des réseaux de canaux durant les périodes sèches. L'importance du système, a été à l'origine d'un développement remarquable des structures sociales et gouvernementales.

L'agriculture égyptienne, liée aux crues du Nil, s'est caractérisée par le cloisonnement des parcelles, la plantation d'arbres fruitiers, l'introduction de la vigne, du papyrus et du lin.

À l'époque de Rome, les progrès furent lents et rares. Au début, de nombreuses zones du Latium étaient déjà drainées par des fossés et les champs délimités par des bornes. La petite exploitation de polyculture dominait et le jardin potager jouxtant l'habitation était devenu la règle. Sous la République, les latifundia se substituèrent progressivement à la petite paysannerie. Sous l'Empire, la culture des céréales régressa en Italie, au bénéfice des importations. Certaines grandes propriétés furent partagées et louées à des petits paysans.

Au début du Moyen Âge il n'y eut pratiquement pas de progrès. Les meilleures terres, appartenant au seigneur, étaient exploitées par des serfs et des paysans pauvres. L'usage des autres terres était ouvert à tous. L'assolement était biennal, avec un an de jachères où le bétail allait paître. Il y avait peu de prairies et les parcelles n'étaient pas clôturées.

Le jardin potager était proche de l'habitation. Au XII^{ème} siècle, l'invention du collier d'épaule et du ferrage permirent l'utilisation de races d'animaux lourds mieux adaptés au travail du sol et aux charrois.

En même temps, apparurent les premières charrues en fer beaucoup plus efficaces et permettant l'exploitation d'une tranche de terre bien plus épaisse. L'assolement devint triennal avec un an de jachère, ce qui améliora le rendement global. L'intensification de l'élevage fournit une fumure organique plus abondante. Malheureusement, la peste noire qui a ravagé l'Europe et le bassin méditerranéen au XIV^{ème} siècle, entraîna une grave crise et conduisit beaucoup de seigneurs à vendre une partie de leurs terres ce qui amena l'apparition du métayage et du fermage. La petite propriété paysanne commença à se développer et les clôtures devinrent progressivement la règle.

Jusqu'au XVIII^{ème} siècle, les aléas météorologiques et les crises sociales et politiques furent la cause de disettes récurrentes. Il y eut néanmoins quelques progrès. Le passage à l'assolement quadriennal avec le remplacement des jachères par des cultures fourragères, en particulier

celle des légumineuses, augmenta le rendement des terres et favorisa l'élevage ce qui augmenta la production de fumier. La disponibilité de nouvelles espèces végétales en provenance d'autres continents (pomme de terre, maïs) apporta des opportunités remarquables, regardées avec méfiance par les paysans et les consommateurs. L'agriculture péri-urbaine se développa avec le maraîchage pour fournir des légumes "du jour" et l'élevage pour avoir, en continu et sans transport, produits laitiers frais et viande. L'agriculture continuait à s'éloigner progressivement des espaces naturels.

En France, avec la Révolution, la vente des biens saisis à la noblesse et au clergé bouleversa la propriété foncière en multipliant le nombre de paysans propriétaires.

En Europe, les progrès de la Science et de la technologie du machinisme puis, à la fin du XIX^{ème} siècle, l'apparition du moteur à combustion interne, changèrent complètement les techniques agricoles et permirent de lutter plus efficacement contre les maladies et parasites, tout en augmentant les rendements et la productivité. Parallèlement les nouvelles méthodes de drainage, la création de réserves d'eau et de systèmes d'irrigation plus économes en eau amenèrent un accroissement des surfaces cultivées, l'augmentation de la production et l'amélioration de la qualité. Ces progrès ont diffusé sur tous les continents et ont profité à tous les types d'agriculture. Ils s'amplifièrent au XX^{ème} siècle, avec la production industrielle des engrais, les produits phytosanitaires et la mise au point accélérée de nouvelles variétés plus productives et plus robustes.

En dépit de nombreuses résistances sociétales engendrées par une distanciation croissante entre l'agriculture moderne et une certaine idée d'une "nature" complètement idéalisée, cette agriculture permit de nourrir une population 4 à 5 fois plus nombreuse qu'à la fin du XIX^{ème} siècle. De fait, les cas de famine qui se manifestent encore résultent beaucoup plus de conflits et de problèmes de gouvernance que de déficits de production à l'échelle mondiale.

Cela étant, à l'heure actuelle, plus d'un tiers de la surface des terres émergées non glacées, hors haute montagne sert à produire de la nourriture ou des matières premières soit 30 à 40% selon Foley et al. (2011) et Hooke et al. (2012), Cette proportion tend naturellement à s'accroître malgré l'augmentation de la productivité.

L'artificialisation s'étend encore avec le développement accéléré d'une robotique agricole intégrée à un machinisme élaboré et efficace apportant à nouveau d'importants progrès en matière de productivité et de qualité des produits. Les progrès de l'hydraulique agricole offrent une autre illustration de l'artificialisation de l'agrosystème mondial. En 2012, il y avait environ 324 millions d'hectares (ha) équipés pour l'irrigation dont 275 millions réellement irrigués. La Chine est le pays le plus équipé avec 70 millions d'ha, suivi de près par l'Inde. Les terres irriguées couvrent 20% de la Surface Agricole Utile (SAU) mondiale et produisent 40% de l'alimentation.

Le drainage est le complément indispensable à l'irrigation des zones sèches à nappe salée en profondeur. L'assèchement des zones humides a quasiment disparu ce qui a permis de sauvegarder les richesses écologiques qu'elles recèlent.

Dans ce cadre général d'évolution, les serres représentent un type de technologie très spécialisée, lié à un savoir-faire récent et qui était encore, il y a peu de temps, une spécialité européenne. Leur développement est actuellement très rapide, surtout en Asie.

Les premières "orangeries", serres froides et même serres chaudes sont apparues au XVII^{ème} siècle essentiellement pour protéger et conserver diverses espèces exotiques. Leur construction a été rendue possible par les progrès de la sidérurgie, de la ferronnerie et de la production des plaques de verre. L'usage de plus en plus large de l'acier et de la fonte dans le bâtiment et les progrès en verrerie ont amené la construction au XIX^{ème} siècle d'édifices en verre de grande ampleur. Un siècle plus tard, l'utilisation de différents types de plastiques transparents, beaucoup moins coûteux et bien moins fragiles, a permis d'en multiplier les surfaces et d'en offrir l'usage à de petits exploitants (Allain Y.-M., 2010).

Les serres peuvent être ouvertes, partiellement fermées ou complètement fermées. Ces dernières donnent la possibilité d'une gestion globale du climat et de l'environnement interne, température, hygrométrie, composition et qualité de l'air (teneur en CO₂), gestion de l'eau (éventuellement avec recyclage), gestion de la lumière. Les sols peuvent être naturels mais, de plus en plus, on utilise des sols artificiels abiotiques, l'hydroponique et l'aéroponique (Vitre A. 2003). En milieu complètement fermé, et moyennant un choix judicieux et une désinfection des semences on peut éviter la multiplication des parasites et bon nombre de maladies.

Les serres souterraines creusées dans le sol apparaissent comme une évolution nouvelle intéressante. Seul le toit transparent affleure à la surface. L'isolation thermique est excellente et diminue le coût de la climatisation. En zone froide, la paroi transparente est perpendiculaire à la direction du rayonnement solaire au solstice d'hiver. Une circulation d'eau peut capter (comme dans un chauffe-eau solaire) l'énergie thermique du rayonnement solaire et cette eau chaude peut être mise en réserve et servir plus tard pour la climatisation.

Le fait d'être peu en relief et facile à protéger, rend ce type de serre moins sensible aux tempêtes, orages et grêles.

D'après T. Boulard, il y avait, en 2003, plus d'1 million d'ha de serres dans le monde dont 74% en Extrême Orient, essentiellement en Chine et 17% en Europe. À la même date, la France n'en possédait qu'un peu moins de 8 000 ha (Boulard T. 2012).

Depuis l'aube du néolithique, les agriculteurs n'ont cessé d'œuvrer en vue de protéger leurs champs et leurs productions des voleurs, des parasites et des prédateurs. Ils ont peu à peu appris à en éliminer l'eau en excès et à y réaliser les arrosages nécessaires. Ils ont travaillé à les protéger des vents violents par des haies et plantations ainsi que du froid par des paillages. Ils ont sélectionné les espèces et variétés les plus productives et les plus robustes. L'agriculture s'est ainsi éloignée progressivement des écosystèmes naturels, élevant des barrières physiques et chimiques, maîtrisant peu à peu l'environnement, contrôlant les flux, améliorant et favorisant certaines espèces.

Mais ces progrès ont modifié très sensiblement les écosystèmes naturels, la biodiversité, les paysages en y imprimant profondément l'empreinte humaine.

2 Séparer les agrosystèmes de la biosphère et minimiser leur empreinte sur le terrain *ou* le paradigme de Dickson Despommier

Classiquement les serres se conçoivent comme des constructions horizontales visant à optimiser la réception du rayonnement solaire. Pour révolutionnaire qu'elle apparaisse, l'idée de cultiver des végétaux sur ou dans des bâtiments verticaux est ancienne, certains auteurs la faisant remonter aux célèbres "jardins suspendus" de Babylone.

Le "Vertical Farming" a été évoqué dès le début du XX^{ème} siècle aux Etats-Unis. Le concept a été repris de nombreuses fois. Durant les décennies 1950/60, la méthode de culture hydroponique, a été beaucoup étudiée et développée ; un bâtiment abritant plusieurs étages de ce type de culture aurait été édifié en Arménie à cette époque (J. Sholto Douglas 1951). Lors de l'Exposition internationale de Vienne en 1964, on a pu voir les images d'une serre verticale à l'Ecole d'Horticulture de Langelnois. L'idée a été reprise de nombreuses fois depuis lors.

Dickson Despommier est un spécialiste de l'écologie scientifique, professeur (Environmental health and microbiology) à l'Université de Columbia (New York City). Il a modernisé le concept et a établi les principes de base et les éléments fondamentaux d'un système de production horticole, installé dans un bâtiment comprenant de nombreux étages abritant à chaque niveau des cultures hydroponiques légumières et fruitières (Despommier D., 2010).

Le modèle de Despommier intègre les progrès les plus récents en matière de contrôle de l'atmosphère, de l'eau et des flux nutritifs, de la lumière, de la croissance des végétaux, de leur qualité, de la surveillance des maladies et parasites éventuels.

Automatisation et robotisation réduisent les interventions humaines de surveillance, entretien et manutention.

La philosophie de cette industrialisation de l'agriculture rappelle l'élevage des volailles en batterie avec l'avantage que les productions végétales, en milieu hautement artificiel, sont beaucoup plus faciles à gérer qu'une production d'oiseaux, ne serait-ce qu'au plan sanitaire. Les propositions de Despommier ont fait l'objet d'importants développements en particulier d'architectes de l'Université de Columbia et de l'École d'architecture de l'Université de Waterloo à Cambridge Ontario (Alter L. 2009). Elles ont également engendré de nombreuses polémiques

En bon spécialiste de l'écologie, Despommier s'inquiète de l'ampleur des superficies nécessaires à l'agriculture classique, et de l'augmentation rapidement croissante des surfaces artificialisées. L'espace disponible pour les écosystèmes terrestres préexistants se rétrécit constamment ce qui influe directement sur de nombreux équilibres, en particulier sur leur aptitude à fournir diverses aménités (comme le recyclage des déchets), souvent très mal connues du public. L'influence sur la biodiversité est tout aussi négative. Cette consommation de surface ne peut que se poursuivre à moyen terme, la production agricole devant impérativement augmenter pour répondre à l'accroissement de la population. A cela s'ajoutent les effets "collatéraux" sur l'environnement (pollution des eaux, uniformisation des paysages, etc.) de la croissance de la production agricole. Toutefois, cette crainte pourtant très majoritaire, n'est pas systématiquement partagée (Desrochers et al. 2012).

En tant que microbiologiste, Despommier sait bien qu'il est difficile de maîtriser les systèmes de productions utilisant des micro-organismes, ouverts sur l'extérieur, et qu'il vaut beaucoup mieux utiliser des bioréacteurs fermés dont on contrôle toutes les conditions de fonctionnement.

Il a très vite compris qu'en industrialisant le plus grand nombre possible de productions végétales, en les isolant au maximum de la biosphère terrestre, il était possible de réduire sensiblement les besoins en surface, d'augmenter les rendements, de se prémunir des aléas et accidents climatiques, de beaucoup mieux maîtriser nombre de maladies et parasites donc de réduire la consommation de produits phytosanitaires tout en améliorant la qualité des produits.

Avantage supplémentaire, en intégrant ces "serres verticales" dans la périphérie urbaine, on gagne en frais de transport et de conservation. Finalement, tout cela forme un corps de doctrine très cohérent propre à entraîner et même enthousiasmer de nombreux esprits, ce qui a amené un bouillonnement d'idées et de propositions, en particulier aux États-Unis et en Asie. Ces réflexions ont engendré une sorte de bulle conceptuelle (Alter L. 2009), qui contraste avec un scepticisme assez marqué en Europe, et surtout en France, où l'agriculture traditionnelle reste le modèle socio-économique, très majoritairement accepté.

3 Le fonctionnement d'une d'un système de culture artificialisé isolé

Il s'agit de gérer au mieux et de façon coordonnée les différents facteurs de production, à savoir, la température, la composition et la qualité de l'air, l'eau et les éléments nutritifs, la lumière, enfin les transports. La production de micro-algues et l'ajout éventuel d'une production aquacole sont également à considérer.

3.1 Gestion de la température

La température doit être maintenue autour de l'optimum correspondant à l'espèce végétale cultivée. Si besoin est, elle peut être modulée suivant le cycle diurne et le cycle végétatif. Il faut évidemment essayer de minimiser le coût en énergie en utilisant au mieux les conditions extérieures en particulier l'ensoleillement. La température est homogénéisée par circulation forcée ou par convection naturelle. Classiquement, le rayonnement solaire est contrôlé par des rideaux ou des toiles d'ombrage. En zone froide on peut chauffer au moyen de chaudières, mais c'est une méthode coûteuse qui consomme des combustibles fossiles. En zone chaude on a souvent employé, dans le passé, une circulation d'air sur des paillasons imprégnés d'eau. Dans une serre moderne, la climatisation est obtenue à meilleur compte au moyen d'un bon système de circulation et en utilisant des pompes à chaleur (air/air ou air/eau), d'autant que les différentiels des températures interne/externe restent le plus souvent modérés. Ce type de climatisation se prête particulièrement bien à un contrôle généralisé par ordinateur.

3.2 Gestion de l'air

Il s'agit d'abord de sa composition et ensuite de sa qualité.

La teneur en humidité est aisément maintenue à l'optimum désiré par des humidificateurs et une bonne circulation.

La teneur en CO₂ est un élément crucial. Les serristes savent depuis longtemps qu'il est intéressant d'en augmenter le taux pour accroître les rendements. Pour les plantes maraîchères les teneurs optimales varient de 1 000 à 1 500 ppm (400 dans l'atmosphère).

Il est intéressant de rappeler un record ; des jacinthes d'eau cultivées sous 10 000 ppm de CO₂ ont produit 200 tonnes de matière sèche/ha/an, mais cette plante, dangereusement invasive, n'est plus considérée comme intéressante pour l'alimentation du bétail.

Parallèlement, les plantes réagissent différemment au taux de CO₂ suivant le type de leur métabolisme photosynthétique. Les plantes en C₃ y sont très sensibles, celles en C₄, comme le maïs, très peu, (voir ci-après le paragraphe lumière). D'autre part, il faut être attentif au développement des végétaux, car l'enrichissement en CO₂ peut en modifier la phénologie.

Trois points sont importants. L'optimum de concentration dépend d'abord de l'éclairement : s'il est insuffisant, l'enrichissement ne sert à rien. Teneur en CO₂ et intensité de l'éclairement sont liés ; plus on éclaire, plus l'enrichissement est efficace. Par ailleurs, pour les espèces cultivées habituellement, il n'y a aucun intérêt à enrichir en CO₂ la nuit.

Enfin, Il faut surveiller en continu ce taux car, en local complètement fermé, sans apport, celui-ci peut descendre très vite ; or, on sait qu'à partir de 200 ppm, la plupart des végétaux commencent à souffrir, la limite létale se situant aux alentours de 100 ppm. La surveillance en continu se fait assez simplement par un analyseur à infrarouge et le contrôle s'opère automatiquement par ordinateur. Il y a intérêt à utiliser du CO₂ très propre. L'utilisation des gaz de combustion d'une chaudière à gaz naturel peut être intéressante énergétiquement, mais les gaz de combustion doivent être débarrassés de substances nocives éventuelles.

Qualité de l'air. L'air extérieur peut contenir des polluants variés : gazeux (oxydes d'azote, ozone...), chimiques (produits phytosanitaires venant de cultures voisines), biologiques (pollens étrangers, spores de bactéries et de champignons, parasites et œufs de parasites).

La stérilisation éventuelle de l'air de la serre ou venant de l'extérieur est un problème dont la solution n'est pas forcément simple.

Quel que soit le type de fonctionnement (ouvert, fermé, mixte) l'air doit être filtré et contrôlé à intervalles réguliers. Diverses cultures ont des pollens allergisants ; il y a alors nécessité de filtrer à certaines époques.

3.3 Gestion de l'eau

En culture hydroponique ou aéroponique, la gestion de l'eau nécessite un appareillage de circulation et de contrôle important. Le recyclage de l'eau est la règle, tant de l'eau liquide que de celle résultant de la condensation de l'humidité de l'air.

L'eau a d'abord son rôle biologique direct fondamental. Elle est, d'autre part, le véhicule des éléments nécessaires à l'alimentation des plantes. Elle peut également servir de fluide caloporteur pour la régulation de la température et la mise en réserve de chaleur.

Les besoins en eau varient suivant les espèces cultivées et le moment du cycle végétatif. Chaque bloc de culture doit donc avoir un système d'alimentation indépendant. C'est un pro-

blème bien connu et résolu des serres classiques. Les éléments minéraux nécessaires sont apportés sous forme de sels solubles, les concentrations étant assurées par des pompes doseuses.

Si l'on fonctionne en recyclage complet, il faut un dispositif indépendant pour chaque bloc avec un contrôle en continu des concentrations.

Ce point est crucial car une erreur de dosage ou une anomalie excessive de fonctionnement peuvent avoir des effets catastrophiques sur l'état de santé des végétaux.

Ce genre de fonctionnement utilise des technologies connues et éprouvées. Toutefois, des difficultés apparaissent lorsqu'on superpose, dans un très grand bâtiment un nombre important de blocs de culture avec des cycles et des types de besoins différents, chacun en circuit fermé. Le contrôle informatique général des cycles, besoins et pannes peut devenir rapidement très complexe. En serre verticale à étages multiples il peut être intéressant d'avoir un réservoir d'eau au sommet et des réservoirs secondaires par étage ou groupe d'étages abritant un même type de culture, le recyclage se faisant à ce niveau. En serre verticale de grande hauteur, il faut des pompes élévatoires en nombre suffisant et un supplément de consommation énergétique plus ou moins important est à prévoir.

Il y a forcément communication avec l'extérieur pour compenser les quantités d'eau exportées par les récoltes, les pertes ainsi que les eaux de lavage et d'évacuation des déchets de tous types.

3.4 Gestion de la lumière

La plupart des serres actuelles fonctionnent à la lumière solaire directe. La gestion de l'éclairage, quand elle est désirée, se fait classiquement par des rideaux réglables. Cependant il est de plus en plus question d'utiliser des éclairages artificiels, soit pour allonger la durée du jour, soit pour des installations à des latitudes élevées, ou des serres souterraines soit pour l'adapter au mieux aux végétaux cultivés, en intensité, répartition et longueurs d'onde. Il existe, en effet, deux types de chlorophylles (a et b) dont les bandes d'absorption (dans le bleu-violet et le rouge) sont nettement décalées ; la chlorophylle b est plutôt celle des plantes de pénombre.

L'équilibre d'utilisation de la lumière résulte de la présence de deux photosystèmes qui fonctionnent à des niveaux d'énergie différents et en série. Les 2 types de chlorophylles sont liés aux deux photosystèmes.

La chlorophylle b élargit le spectre global d'absorption et compense l'inefficacité d'absorption dans la partie verte du spectre (cas d'une feuille qui se trouve sous une autre feuille). C'est donc surtout une adaptation chromatique (Cerovic's Zoran G. 2012 & 2018)

Par ailleurs, il y a 2 types de photosynthèses, dites en C3 et en C4 (Farineau J. et Morot-Gaudry JF. 2017). La photosynthèse C4 utilise mieux le CO₂ à sa concentration dans l'atmosphère et est peu sensible à l'augmentation de sa teneur. Les plantes en C4 les plus connues sont le maïs, la canne à sucre et le sorgho. Parallèlement, divers végétaux possèdent des pigments (carotène, flavonoïdes, anthocyanes) jouant le rôle de filtre dans les feuilles. Il existe ainsi pour chaque espèce, un optimum de longueurs d'onde. Cette question est actuellement approfondie par une équipe de chercheurs du CNRS du centre d'Orsay.

Un point important est le rôle des UV dans la qualité organoleptique des fruits et légumes. Une certaine dose d'UV est nécessaire pour produire les polyphénols et les antioxydants qui donnent du goût, donc de la qualité aux végétaux produits.



Fig 1 Eclairage par LED de bacs de cultures de légumes
Origine site Philips Eindhoven « The optimal growing formula"
http://www.lighting.philips.com/content/dam/b2b-li/en_AA/Expe-

Les moyens d'éclairage actuels, utilisant les LED, donnent la possibilité d'adapter l'éclairage à cet optimum, ce qui permet d'augmenter très sensiblement le rendement de la lumière émise.



Fig 2 Coupe de principe d'une unité de culture de ferme verticale AeroFarm
(Origine image extraite du site AeroFarm)

Les LED ont, par ailleurs, un rendement en lumen/watt électrique largement supérieur aux moyens d'éclairage classique. Là encore, la gestion de la lumière ne peut se concevoir que par un contrôle, généralisé, fiable et donc complètement informatisé.

3.5 Gestion des déplacements

Une production intensive nécessite des déplacements humains et matériels importants de divers types : opérateurs, semences ou plants, matériaux pour sol de culture artificiel, engrais (nutriments minéraux des végétaux), récoltes, matériels divers, pièces détachées, éventuellement produits phytosanitaires, etc. Si la serre est organisée comme un atelier industriel avec chaîne de montage automatisée, ce sont les bacs de culture qui se déplacent à différents postes correspondant à l'environnement adapté à la période correspondante du cycle de culture. Si les bacs sont fixes, ce sont les paramètres d'environnements locaux qui doivent changer avec le niveau de croissance et de développement des végétaux concernés. Les techniques permettant ces fonctionnements existent déjà depuis des années dans l'industrie et dans des serres de moyenne dimension. Leur adaptation à des serres verticales de 20 à 30 étages ne sera pas forcément simple et nécessitera une réflexion approfondie. Si la serre est horizontale, l'organisation est simplifiée.

3.6 Cas particulier des micro-algues

Il s'agit de végétaux, déjà cultivées à l'air libre, dans des bassins remplis d'une solution nutritive, en Europe (en France en particulier) comme dans le reste du monde. Elles sont également cultivées en photo-bioréacteur, ce qui donne des produits non pollués par des apports extérieurs, surtout vendues comme suppléments alimentaires. Les plus cultivées sont les spirulines et les chlorelles.

Les spirulines regroupent plusieurs espèces ; le plus souvent *Arthrospira platensis* et *Arthrospira maxima*. Ce sont des cyanophycées multicellulaires filamenteuses microscopiques qui vivent surtout dans les eaux tropicales.

A noter que le genre *Spirulina*, assez éloigné d'*Arthrospira*, a une valeur alimentaire beaucoup moins bonne et est peu utilisé.

Les chlorelles sont des micro-algues d'eau douce monocellulaires de la famille des Chlorellaceae et du genre *Chlorella*. Il en existe plusieurs dizaines d'espèces courantes.

En milieu artificiel isolé (photo-bioréacteur) leur culture présente beaucoup d'avantages. Ces algues n'étant pas sensibles au cycle jour/nuit, on peut les éclairer 24h/24 à l'intensité optimale, sous hautes teneurs en CO₂. Le rendement en est alors très fortement augmenté. Elles présentent une valeur alimentaire très élevée due, en particulier, à leur richesse en protéines contenant une bonne proportion d'acides aminés essentiels.

Malgré cet avantage, elles n'ont pas, jusqu'à présent, été utilisées comme aliment de base (sauf à titre expérimental), mais comme simple complément. Il est clair que la production des micro-algues s'inscrit très bien dans le concept "vertical farming", néanmoins, leur vente et leur consommation comme aliment courant ne sont pas encore devenues une réalité.

Certaines micro-algues peuvent produire massivement des lipides lorsqu'on les soumet à des conditions particulières d'alimentation (par exemple carence en azote) ou à un fort éclairage. Les débouchés sont industriels ou alimentaires (Lorne D. 2011).

3.7 Ajout possible d'un sous-système aquacole (Quilleré et al. 1993, 1995)

Divers concepteurs préconisent d'associer une production aquacole aux serres, ce qui permet de valoriser les déchets végétaux et d'utiliser au mieux l'eau des systèmes hydroponiques et aéroponiques. L'association des deux techniques est parfois appelée aquaponique.

Le poisson le plus souvent élevé est le tilapia (plusieurs espèces de la famille des Cichlidae), sorte de carpe d'eau douce des régions chaudes, très facile à nourrir et à élever.

4 Coûts, économie et aspects écologiques

Despommier justifie l'intérêt économique et écologique du concept par les considérations suivantes :

1. économie de surface,
2. productivité par unité de surface considérablement augmentée,
3. proximité des consommateurs, absence ou très forte réduction des dépenses de conservation et de conditionnement,
4. produits plus sains par absence de parasites toxiques et absence de traitement par produits phytosanitaires, éventuellement label de qualité particulier, malgré une alimentation minérale chimique directe,
5. réduction des frais de transport ; mais cet aspect reste discuté (Desrochers et al. 2012),

Ces quatre premiers arguments sont chiffrables ; les suivants sont plus difficiles, sinon impossibles à évaluer économiquement :

6. absence de pollution des sols et eaux,
7. autonomie de la zone urbaine,
8. prise de conscience des consommateurs des conditions de production et évolution progressive vers une agriculture "urbaine" durable.

4.1 Peut-on évaluer l'impact écologique de ce type de production ?

L'extrême variété des circonstances locales, des types de réalisation et des voies de commercialisation rendent totalement vaines n'importe quelle tentative sérieuse de quantification globale précise de l'impact écologique de ce nouveau type de production. Aucun auteur ne semble s'y être vraiment encore attaqué. Les argumentations développées, qu'on peut trouver dans diverses publications, restent ou très ponctuelles ou bien floues, imprécises forcément très générales et assez souvent marquées de prises de position à dominante idéologiques. La comparaison entre une "usine à légumes" installée dans des locaux industriels anciens existants, en centre-ville, donc déjà reliés aux réseaux urbains (eau, électricité, informatique, transport, etc.), et la construction d'une tour dédiée, entièrement neuve, construite sur un terrain acheté en périphérie urbaine, associée ou non à des logements, n'a, de fait, guère de sens.

L'**empreinte écologique**, définie comme la surface nécessaire pour produire la même quantité de légumes qu'un maraîchage classique est relativement aisée à calculer au cas par cas. Dans le cas des tours décrites ci-après, le gain peut-être considérable.

L'**empreinte carbone** définie comme la mesure de la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) émise par combustion d'énergies fossiles par la construction et le fonctionnement de l'installation est beaucoup plus difficile à évaluer. La part relevant de la consommation en énergie, en fonctionnement courant, dépend à la fois de la structure technique de l'installation et du "mix" énergétique local. Il est difficile de tirer des conclusions de la comparaison d'une serre verticale

construite au Canada en zone froide avec de l'électricité bon marché, d'origine hydraulique, et d'une installation à Singapour, en zone chaude, avec de l'électricité venant de générateurs diesel consommant du fioul.

En France, l'importance du facteur consommation d'électricité est très souvent mise en avant comme étant un facteur potentiellement limitant. A première vue il est clair, en effet, qu'utiliser un éclairage artificiel pour faire pousser des végétaux alors que l'agriculture classique utilise directement le rayonnement solaire gratuit peut sembler aberrant.

En réalité, tout dépend des choix techniques. Si l'on veut optimiser le facteur éclairage (spectre, rythme diurne/nocturne, intensité optimale en fonction de la teneur en CO₂...), l'éclairage artificiel devient intéressant.

De toute façon, la consommation électrique des autres postes, climatisation, circulation de l'eau et des produits, locaux annexes, automatismes et robots, finit par devenir dominante par rapport à l'éclairage et en relativise l'importance.

Au final, il apparaît clairement que, pour les concepteurs, les aspects écologiques essentiels sont les gains en surface (l'empreinte écologique dans sa définition basique), l'isolement par rapport aux maladies et aux parasites (absence de produits phytosanitaires), avantage relativement aisé à évaluer, la réduction de la pollution externe par les eaux et, enfin, la réduction des contraintes de transport et de conservation elle-même largement dépendante des circonstances locales.

Toutefois, au bout du compte, c'est essentiellement le prix de revient du Kg de légume produit qui guide la conception de l'installation, les considérations écologiques constituant un fort argument publicitaire. On constate finalement que la réussite des sites existants vient pour beaucoup du fait que les prix pratiqués diffèrent peu de ceux de ceux des productions issues de l'agriculture classique.

4.2 Économie des projets

Despommier et ses concepteurs ont évalué, au début des années 2 000, l'investissement d'une serre verticale d'une quarantaine d'étages à une valeur supérieure à 100 millions \$ (valeur 2005) pour une installation présentant l'équivalent d'une surface totale de mise en culture de l'ordre de 60 ha. Insistons une fois de plus que ce type de calcul est très difficile à mener avec exactitude.

Il s'agit en effet de prototypes, utilisant certes des technologies connues mais qu'il faut rassembler, coordonner et faire fonctionner dans des conditions nouvelles. Dans tous les cas la dépendance au prix du foncier local est énorme. Il n'est pas étonnant que, dans ces conditions, les coûts finaux puissent être deux à trois fois plus élevés que l'évaluation initiale toujours trop basse.

Cela étant, la plupart des auteurs s'accordent à dire qu'il est peu probable que les coûts supplémentaires liés à l'éclairage, la climatisation et l'énergie nécessaire aux diverses circulations soient compensés par l'absence de frais de transport. Sur ce dernier point, Les économies à en attendre seraient, d'après Pierre Desrochers de l'Université de Toronto (Desrochers P. et al. 2012), peu importantes.

Des évaluations récentes, sensiblement plus détaillées et précises, ont été faites. L'une des plus intéressantes est celle de Chiranian Banergee et Lucie Adenauer de l'Institut pour l'économie de l'alimentation et des ressources, Université de Bonn (Banergie et al. 2014).

Il s'agit d'un projet de serre verticale de section carrée de 44 m de côté, haute de 167 m, à 37 niveaux dont 25 réservés à la production végétale, 3 à l'aquaculture, 1 pour la préparation des bacs de culture, des semences et des plants, 1 pour le conditionnement des produits, 1 pour la commercialisation, 2 pour le traitement des déchets en sous-sol (ces déchets pouvant être transformés en compost et vendus).

Tous les perfectionnements cités plus haut, en matière d'éclairage, de recyclage des eaux, de climatisation et d'automatisation sont prévus.

Les serres produiraient 3 500 tonnes par an de légumes et de fruits (pommes de terre, carottes, pois, choux, épinards, salades, tomates, fraises) et l'aquaculture 140 tonnes de filets de tilapias.

Cultures	Rendement en ferme verticale (T/ha)	Rendement au champ (T/ha)	Coefficient d'accroissement dû à la technique	Coefficient d'accroissement dû à la technique et à l'empilement
Carottes	58	30	1,9	347
Radis	23	15	1,5	829
Pommes de terre	150	28	5,4	552
Tomates	155	45	3,4	548
Poivrons	133	30	4,4	704
Fraises	69	30	2,3	368
Pois	9	6	1,5	283
Choux	67	50	1,3	215
Laitues	37	25	1,5	709
Epinards	22	12	1,8	820
Moyenne	71	28	2,5	516

Tableau des rendements à l'hectare estimés de la ferme verticale comparés à ceux de l'agriculture traditionnelle

Tableau extrait de l'étude de Banerjee C. et Adenauer L. (2014) et traduit par l'auteur

Les énormes accroissements de rendement par ha sont essentiellement dus à l'empilement des étages de culture, le bâtiment n'occupant, finalement, au sol que 0,25 ha. Les effets des techniques nouvelles sont beaucoup plus modestes.

Le coût de la construction et de l'équipement est évalué à 202 millions €. Toutefois il dépend du coût du foncier (emplacement envisagé pour le cas étudié, la banlieue de Berlin).

Le coût de fonctionnement annuel serait d'environ 8 millions €, dont 2 pour le personnel et 5,4 pour l'énergie. À noter que le prix de l'électricité est sensiblement plus élevé en Allemagne que dans d'autres pays européens, en particulier en France.

Dans ces conditions, les prix de revient par kg de biomasse végétale et animale se situeraient entre 3,50 et 6 € suivant les hypothèses de déroulement de la production ce qui paraît relativement élevé par rapport aux prix du marché. Les auteurs estiment toutefois que les prix de vente

qui en résulteraient pourraient être compétitifs, surtout si les produits bénéficient d'une préférence de la part des consommateurs (fraîcheur, vision directe de la production, absence de pollution, etc.). Mais ce genre de projection des coûts, toujours basés sur des séries d'hypothèses, a le mérite de fixer au moins les ordres de grandeur. Néanmoins il aboutit forcément à des résultats qui restent imprécis et largement discutables.

Dans la réalité, il apparaît peu probable qu'une installation de ce genre, avec tous ses perfectionnements, soit construite intégralement du premier coup, sauf pour une éventuelle opération de prestige. Compte tenu de la nouveauté et des mises au point progressives nécessaires, les risques d'un échec technique et financier seraient bien trop élevés, ce qui porterait un préjudice très grave à la validité et l'intérêt du concept.

Il est clair que, pour démarrer, il est beaucoup plus facile d'édifier des installations moins impressionnantes et moins complexes dans des bâtiments existants, par exemple sur des friches industrielles urbaines ou périurbaines, là où les terrains ne sont pas trop chers. Et c'est, effectivement, ce que l'on peut observer dans la réalité.

5 Quelques exemples de réalisations

L'idée elle-même a eu un succès intellectuel considérable et a donné lieu à un nombre important de projets dans le monde entier. Toutefois, les réalisations existantes sont encore, à l'heure actuelle, toutes plus ou moins partielles par rapport aux concepts de base.

Elles commencent, néanmoins, à être assez nombreuses. Il s'agit surtout de dispositifs à étagères multiples, pouvant être relativement hauts, supportant des bacs de culture aéroponiques ou à sols artificiels, à éclairage en général naturel, avec des alimentations en eau et en nutriments automatisées. Plantation, surveillance et récoltes sont encore, le plus souvent faites à la main. Le tout est, presque toujours, installé dans une structure robuste capable de résister aux fortes intempéries, au niveau du sol ou sur le toit d'un immeuble existant, en milieu urbain ou périurbain.

Il s'agit donc, dans la majorité des cas, de serres classiques améliorées, utilisant la technique aéroponique mais encore peu robotisées. Quelques-unes de ces réalisations sont rappelées ci-après, la liste fournie étant, bien évidemment, loin d'être exhaustive.

Au Japon, à Kameoka (près de Kyoto), la société Spread exploite déjà une serre horizontale de 4 400 m² utilisant des étagères à 4 niveaux, les principes précédents d'éclairage et d'arrosage, très robotisée, et produisant 21 000 têtes de laitue par jour, vendues dans les zones avoisinantes. Elle projetait pour 2017 une autre installation, toujours près de Kyoto, encore plus automatisée, pour produire 30 000 têtes de laitue par jour (Fay J. 2014).

À Singapour, la société Skygreen a mis en place depuis 2012, une serre, utilisant des étagères, hautes de 9 m et comportant 12 niveaux, montés sur des supports mobiles pour optimiser la lumière solaire. La production couvrirait 7% de la consommation de salades de la ville à un prix comparable à celui des produits importés (Figure 3. Krishnamurty R. 2014).

A Orlando, en Floride, Green Sky Growers a construit une serre verticale expérimentale associée à un système d'élevage aquacole (aquaponique). Les techniques utilisées sont intéressantes car originales. L'éclairage est solaire et la climatisation obtenue essentiellement par réglage des circulations.



Fig. 3 Élément de la ferme verticale de Singapour
(Origine inhabitat.com Lori Zimmer oct 2012)

Dans le New Jersey, à Newark, Aerofarm vient de mettre en route une importante ferme périurbaine, s'étendant sur 7 000 m², qui peut produire 500 tonnes par an de différentes variétés de salades et légumes. L'extension est horizontale et les "racks" comportent 12 niveaux. L'éclairage, totalement artificiel, est adapté au végétal cultivé (Figure 4. Liberatore S. 2016).



Fig. 4 le système de ferme verticale d'Aerofarm
(Origine "vertical farming at Aerofarm Newark NJ. "aerofarm-vertical-newark.html")

Le concept commence à s'industrialiser. La société Verticrop fournit des systèmes verticaux de rayonnages standardisés dont le module unitaire comporte deux fois 12 étagères supportant les bacs de culture avec leur alimentation en eau automatisée, le tout pouvant être installé dans n'importe quelle serre présentant des dimensions suffisantes.



Fig. 5 Unité de culture Aerofarm avec son éclairage

(Origine "vertical farming at Aerofarm Newark NJ. "aerofarm-vertical-newark.html")

Il est intéressant d'indiquer que la société Aérofarm propose, de son côté, des mini-modules verticaux totalement automatisés, de dimension très réduite, permettant de cultiver des légumes feuillus verts presque partout chez soi (Figure 5).

A Vancouver fonctionne, depuis 2012, une petite serre de 560 m² à développement horizontal, utilisant des étagères sur convoyeurs, à 12 niveaux, supportant des bacs de culture produisant des légumes verts toute l'année.

A Berlin, un hypermarché Metro a installé dans son magasin une serre verticale hydroponique et à éclairage artificiel de la société Infarm. Les clients viennent choisir eux-mêmes, la salade, le légume ou la plante aromatique produits sur place (Figure 6).

En France, ces idées n'ont pas encore vraiment débouché et elles ne semblent pas avoir soulevé beaucoup d'enthousiasme.

Une petite installation expérimentale, la "ferme urbaine lyonnaise" a été édifée à l'INSA de Lyon (avec la collaboration de l'INRA d'Angers) et inaugurée le 21 octobre 2016. Il s'agit d'une unité standard de 1 000 m² au sol avec un système de culture sur trois étages représentant l'équivalent de 2 200 m² de surface agricole utile.



Fig.6 L'unité de production verticale Infarm installée dans le magasin Metro de Berlin
(Origine BFM Business « Un supermarché fait pousser des fines herbes au rayon frais »)

La production serait de 11 tonnes par semaine de légumes verts haut de gamme et de végétaux pour compositions pharmaceutiques. Le coût de l'investissement serait de l'ordre de 5 millions €.

Il faut également citer un ambitieux projet imaginé par le cabinet SOA Architectes, (SOA architectes, 2005) en réponse à un concours d'architecture lancé par Cimebéton (Lafarge). Il s'agit de la "Tour Vivante", qui est un concept associant une ferme verticale urbaine à un ensemble de bureaux, de logements et de locaux commerciaux à construire à Rennes (Figure 7).



Fig.7 Projet de la Tour Vivante à Rennes conçu par SOA Architecte
(Origine site SOA Architecte La Tour Vivante)

Le bâtiment est une tour à noyau dur en béton, de 130 m de haut, comportant 30 étages, avec une emprise au sol relativement modeste de 28m x 48m. Il produit une partie de son énergie par des capteurs solaires en façade et 2 éoliennes au sommet (point qui mériterait d'être discuté compte tenu du coût du très important renforcement structural nécessité par la présence des éoliennes). La partie agricole, installée au sommet, consiste en 7 000 m² de serres devant produire par an, en hors sol avec éclairage artificiel nocturne, 63 T de tomates, 9,3 T de fraises et 37 000 pieds de salades. En dessous, on trouve 130 appartements couvrant 11 000 m² et occupant les 15 premiers étages ; les autres étages abritent 8 500 m² de bureaux. A la base, un centre commercial ; en sous-sol, quatre étages de parking. L'investissement était évalué à environ 100 M d'€ ce qui paraît extrêmement optimiste.

Bien que Dickson Depommier ait été associé à la conception, on reste toujours assez loin du concept de base puisque l'essentiel du bâtiment abrite des logements, des bureaux et des locaux commerciaux. Ce parti a néanmoins ceci de remarquable qu'il envisage de faire supporter à l'investisseur urbain l'essentiel du coût de la partie serres. Malheureusement, il s'agit d'un projet qui ne sera probablement jamais réalisé. Sur le terrain qui lui était réservé, est, en effet, envisagé un autre projet d'immeuble de bureaux, la tour Féval.

Au plan de la recherche, l'INRA vient d'inaugurer, à Dijon, une plateforme (dévolue au phénotypage haut débit) de 240 m² de serres automatisées et robotisées en vue de sélectionner des semences de plantes mieux adaptées à la chaleur et au manque d'eau. L'automatisation et la robotisation ne sont pas, ici, destinées à améliorer les conditions de production mais visent à sécuriser et accélérer les processus de recherche. Il existe à Montpellier un laboratoire de l'INRA dédié au génotypage qui utilise déjà de tels automates. Ces installations sortent, pour l'essentiel, de l'axe de notre réflexion.

6 En conclusion : une idée séduisante, apparemment encore trop futuriste, mais qui commence progressivement à entrer dans la réalité

Depuis le début du néolithique, les paysans ont cherché à protéger leurs cultures contre les attaques extérieures en façonnant l'environnement de leur champs au moyen de techniques disponibles : clôtures, irrigation, drainage, élimination des végétaux et animaux parasites, travail et fumure des sols, etc.

L'intensification de l'agriculture et l'extension des surfaces qu'elle occupe conduisent maintenant, à l'inverse, à protéger le milieu extérieur des influences éventuellement néfastes de nombre de pratiques culturelles.

L'idée consistant à isoler complètement l'agrosystème et d'en maîtriser totalement l'environnement interne est l'aboutissement naturel de cette évolution, dont est issu le concept de "vertical farming" de Despommier.

Les techniques pour y parvenir sont maintenant disponibles. Les conditions climatiques, sociales et économiques de divers pays amènent tout naturellement les décideurs locaux à y trouver la solution à certains de leurs problèmes. Par ailleurs, le concept répond à un désir affirmé de voir les villes grandes et moins grandes intégrer des éléments de la production de leur alimentation. Pour diverses raisons sociologiques et idéologiques, l'agriculture urbaine, pourvu qu'elle apparaisse "durable", fait maintenant partie d'un courant de pensée important. Cependant, il n'existe pas encore de réalisation correspondant complètement aux critères du modèle de Despommier.

Les prix souvent exagérément élevés du foncier urbain dans les grandes métropoles, le coût de construction non moins élevé de tours de grande hauteur, la relative complexité de l'intégration

de techniques, certes connues, mais jamais réunies dans un ensemble cohérent, explique, au moins partiellement, les hésitations des investisseurs. L'étude allemande (Figure 6) des coûts de la production montre qu'ils restent élevés (au moins dans les conditions européennes) et, quitte à construire en hauteur, il est plus rentable et beaucoup plus sûr, pour les promoteurs, d'y faire des appartements et des bureaux comme à Rennes.

Les avantages en termes d'économie de transport, de conservation et de fraîcheur associés à l'enthousiasme de consommateurs asiatiques en matière de nouveautés ont néanmoins permis d'avancer. On assiste maintenant à la construction, dans les friches industrielles de grandes villes à forte densité de population, de serres modernes aéroponiques, à un seul niveau mais équipées de "racks" très hauts à étagères multiples, très automatisées avec un recyclage plus ou moins complet de l'eau, et qui commencent à fonctionner en éclairage artificiel. Ces serres ont un succès commercial indiscutable et semblent rentables.

Profitant de l'engouement actuel pour "l'autonomie écologique", plusieurs fabricants d'équipements lancent sur le marché des modules de production de petite taille permettant à n'importe qui de produire, dans une maison individuelle, salades, radis, tomates, etc.

Tout cela va dans le même sens. Il semble bien, d'ailleurs, que les promoteurs du "vertical farming" urbain aient peut-être sous-estimé l'argument de la qualité, de la fraîcheur et du goût. Salades, tomates, ou fraises des meilleures variétés, produites sur place, parfaitement propres, au bon état de maturation, n'ayant subi ni transport, ni passage en entrepôt frigorifique, peuvent effectivement avoir des qualités organoleptiques très supérieures aux produits commerciaux classiques et entraîner l'adhésion des consommateurs.

L'avenir de ces "usines à salades", descendantes directe des maraîchers périurbains (Waterford D., 2015) est probablement assuré, au moins dans les zones où le maraîchage classique est insuffisant et où leur nouveauté séduit les consommateurs. Leur évolution en "tour de Despomier" dépendra de facteurs économiques locaux comme le prix du foncier et de la disponibilité de friches industrielles. Il est très probable que quelques-unes de ces tours seront édifiées pour des raisons économiques ou de prestige, et peut-être aussi dans des régions à climat difficile. Parallèlement, des serres verticales souterraines pourraient se révéler intéressantes dans des zones très froides, très chaudes ou soumises à de forts aléas climatiques.

Le "vertical farming" peut-il aller au-delà de la production de légumes, de quelques fruits et de plantes aromatiques et pharmaceutiques ? La vigne, plante grimpante, aurait donné de bons résultats. La pomme de terre (primeur) est certainement un candidat intéressant. Qu'en est-il des légumineuses, comme le soja ou les lentilles ? Le blé, le maïs, peuvent-ils être cultivés, en sol artificiel ? Pour ces plantes, l'argument de la fraîcheur et du goût ne joue plus et cela n'aurait, pour l'instant, aucun intérêt économique. À l'évidence, le "vertical farming" ne saurait remplacer, dans les conditions actuelles, les grandes cultures.

Gardons à l'esprit que certains détracteurs y voient une étape supplémentaire vers une industrialisation, redoutée, de l'agriculture et une menace pour un type de société s'éloignant de plus en plus de la nature. Ces craintes peuvent paraître exagérées car il ne s'agit, finalement, que d'une modernisation du maraîchage périurbain qui ressuscite sous une forme socialement intéressante. Quoiqu'il en soit, il mériterait, à notre avis, d'être étudié de façon approfondie dans notre pays et, en particulier, d'être examiné avec attention par notre Académie. Il s'avère, en effet, très utile dans de nombreuses zones fortement urbanisées et, sous des formes plus ou moins simplifiées, il commence à être vraiment mis en œuvre dans un nombre croissant de pays

qui disposent pourtant de surfaces agricoles importantes. Partout dans le monde, les études se poursuivent, les réalisations se multiplient.

Les voies de recherche sont nombreuses. Au-delà des espèces courantes du potager, quelles sont les autres plantes potentiellement utilisables ? Comment envisager la fabrication en grande série des équipements ainsi que la création de logiciels d'intégration et de gestion, comment perfectionner l'automatisation et la robotisation, etc. ?

La ferme verticale n'est certainement pas le remède universel aux problèmes de l'alimentation urbaine et aux effets négatifs de l'agriculture classique. C'est simplement une voie de progrès dont nous ne devrions pas laisser le monopole à nos concurrents.

Références

Allain Y.-M. (2010). Une histoire des serres. Quae ed. (Versailles), 140 p.

Alter L. (2009). Harvest Green: Vertical Farm by Romses Architects wins Competition. <https://www.treehugger.com/sustainable-product-design/harvest-green-vertical-farm-by-romses-architects-wins-competition.html>

Banerjee C., Adenaue L. (2014). The Economics of Vertical Farming, Macrothink Institute. Journal of Agricultural Studies 2:40-60.

Boulard T. (2012). Maîtrise du climat des serres, INRA-TEAPEA, SophiaAntipolis, <https://fr.slideshare.net/greensmile/prsentation-thierry-boulard-partie-1>.

Cerovic's Zoran G. (2012 à 2018) diverses contributions scientifiques, université de Paris-Saclay.

Despommier D., (2010), The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century, 320 p. (Mac Millan) .

Desrochers P., Shimzu H. (2012), The Locavore's Dilemma: In Praise of the 10,000-mile Diet, Hachette U.K., 288 p.

Fay J. (2014). Why are Fujitsu and Toshiba growing lettuce in semiconductor plants. http://www.theregister.co.uk/2014/05/22/fujitsu_grows_lettuce_in_chip_factory/

Farineau J., Morot-Gaudry J.F. (2017). La photosynthèse : processus physiques, moléculaires et physiologiques. Ed. QUAE, 452pp.

Ferault C., Le Chatelier D. (2012). Une histoire des agricultures. Campagnes et Compagnies ed., 184 p.

Foley J.A. et al. (2011). Solutions for a cultivated planet. Nature 478:337-342.

Hix J. (1974). The Glass House. M.I.T. Press, Cambridge, MA, 208 p.

Hook R. LeB., Martin-Duque J.F., Pedraza J. (2012). Land Transformation by Human A Review, Geological Society of America To Day 22;4-10.

Krishnamurthy R. (2014). Vertical Farming Singapore' s Solution to Feed the Local Urban Population. Permaculture Research Institute. Accessed 2 February 2017. <http://permaculturenews.org/2014/07/25/vertical-farming-singapores-solution-feed-local-urban-population/>

Liberatore S. (2016). New York to get the world's biggest vertical farm Giant 70 000 square foot lettuce factory will produce 2 million pounds of food a year. <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3629690/New-York-world-s-biggest-vertical-farm-Giant-70-000-sq-lettuce-factory-produce-2-MIL-LION-pounds-food-year.html>

Lorne D. (2011). Des Biocarburants à partir des micro-algues, IFP Energies nouvelles. <http://ifpenergies-nouvelles.fr/Espace-Decouverte/Tous-les-Zooms/Des-biocarburants-a-partir-de-microalgues>.

Mazoyer M., Roudart L. (2002). Histoire des Agricultures du Monde. Du néolithique à la crise contemporaine, Points histoire, éd. du Seuil,

Quillere I., Marie D., Roux L., Gosse F., Morot-Gaudry J.F. (1993). An artificial productive, Ecosystems and Environment, 47, 13 ecosystem based on a fish/bacteria/plant association. J. Design and Management. Agriculture, Ecosystems and Environment 47:19-30.

Quillere I., Roux L., Marie D., Roux Y., Gosse F., Morot-Gaudry J.F. (1995). An artificial productive ecosystem based on a fish/bacteria/plant association. 2 Performance. Agriculture, Ecosystems and Environment 53:19-30.

SOA architecte (2005). La Tour Vivante. http://www.ateliersoa.fr/verticalfarm_fr/pages/images/press_urban_farm.pdf

Sholto Douglas J. (1951). Hydroponics The Bengal System, Oxford University Press, 147 p.

Taub, D. (2010). Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants. Nature Education Knowledge 3:21. <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/effects-of-rising-atmospheric-concentrations-of-carbon-13254108>

Vitré A. (2003). Fondements théorique du Hors sol, Doc V 3.1 HRS 12 Ind A. [https://www.agrireseau.net/legumesdeserre/Documents/FONDEMENTS THEORIQUES DU HORS SOL.pdf](https://www.agrireseau.net/legumesdeserre/Documents/FONDEMENTS_THEORIQUES_DU_HORS_SOL.pdf)

Waterford D. (2015). 21st Century Homestead: Urban Agriculture, Lulu ed., 226 pp.