

SYNTHÈSE

SYNTHÈSE DES ARTICLES SCIENTIFIQUES SUR LA HAUSSE DES TEMPÉRATURES DANS LES SUBSTRATS EN AGRICULTURE



INTRODUCTION

En 2022, le Réseau Mixte Technologique Agricultures Urbaines (RMT AU : <https://rmt-agricultures-urbaines.fr/>) a interrogé plus de 20 fermes urbaines professionnelles en France sur leurs problématiques techniques. Lors des épisodes caniculaires de plus en plus fréquents, les cultures maraîchères souffrent de l'augmentation en température de l'air et du sol. La fiche de synthèse scientifique suivante propose donc :

- 1/ Une synthèse de 9 articles scientifiques de l'impact sur les végétaux de la hausse des températures des substrats
- 2/ 8 solutions pratiques pour les agriculteurs urbains

Comme le montre la Figure 1, une plante se procure de l'eau et les minéraux par ses racines. Ceux-ci remontent via la sève xylémienne dans les parties aériennes qu'ils alimentent. Dans le même temps, la photosynthèse qui se déroule dans les feuilles assure une fixation du carbone atmosphérique (CO_2) et permet la croissance du végétal. En temps de canicule, la plante subit un triple stress : un excès de chaleur, de lumière, et une réduction de l'eau disponible. D'une part, les racines ne captent plus d'eau, du fait du déficit hydrique dans le sol, ni de minéraux, dont l'absorption est conjointe à celle de l'eau. D'autre part, les feuilles transpirent beaucoup plus d'eau qu'il

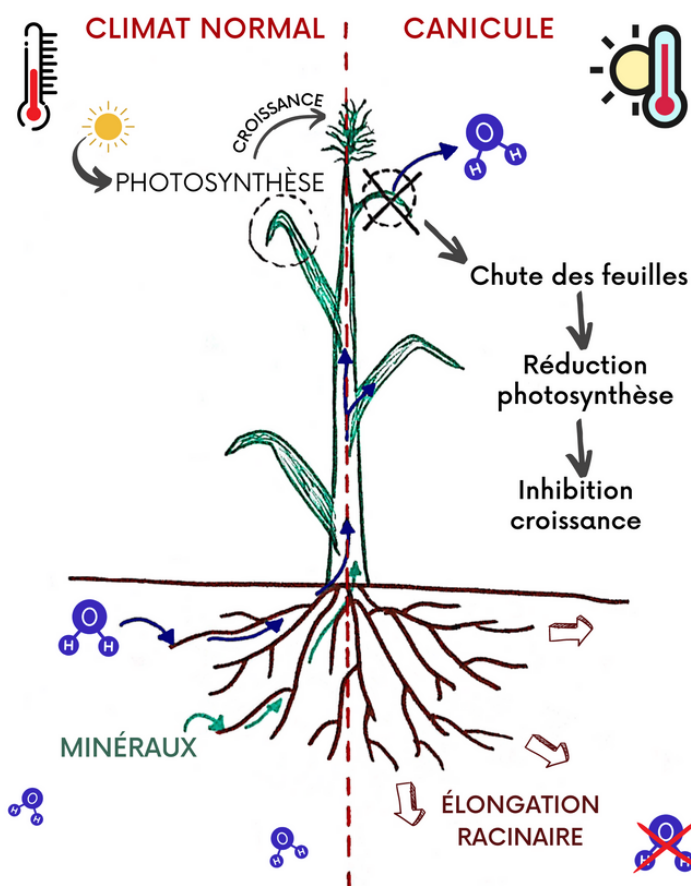


Figure 1 : Schéma du fonctionnement physiologique d'une plante en climat normal et en période de forte chaleur

n'en rentre dans les racines. A long terme, la plante se voit contrainte de réduire sa surface foliaire pour limiter les pertes en eau. Cela conduit à la chute des feuilles et in fine à une réduction de sa croissance. Parallèlement, la surface racinaire augmente pour trouver et capter l'eau du sol (Sakr, 2022).

Cependant, en période de canicule, les stress cités précédemment sont bien plus longs que ce que ne peuvent tolérer les végétaux. La température des substrats de culture et la durée excessive de cet échauffement modifient la capacité de la plante à réagir aux stress qu'elle subit. Il y a production de molécules nommées les ROS (Reactive Oxygen Species = espèces réactives de l'oxygène) qui sont des formes particulières de l'atome d'oxygène et qui sont impliquées dans la réponse au stress dû à la chaleur. Cependant, ces molécules sont toxiques à forte dose pour la plante et, en cas de canicule, leur production excède les capacités du système de détoxification, ce qui cause des dégâts cellulaires irréversibles (Sakr, 2022).

I) Synthèse des études sur la hausse des températures dans les substrats

Les études existantes traitant de l'élévation de la température dans les substrats couvrent une large gamme de genres et d'espèces végétales. Si elles détaillent souvent les réactions du métabolisme physiologique* et les adaptations des parties aériennes aux températures sub-optimales**, elles sont souvent avares de détails sur les adaptations des racines à ces températures. Néanmoins, sur les trente dernières années, on trouve 9 travaux de recherche qui couvrent plantes ligneuses, espèces maraîchères, arbustes ou encore plantes aromatiques.

En 1995, des chercheurs nord-américains s'intéressent aux myrtilliers (*Vaccinium corymbosum* et *Vaccinium virgatum*) et en particulier à l'influence de la température de leur substrat sur la croissance des parties

* Métabolisme physiologique : Ensemble des réactions chimiques qui se déroulent à l'intérieur de chaque cellule d'un être vivant.

** Température sub-optimale : température soit trop basse, soit trop élevée, et qui n'est pas la plus favorable pour le développement physiologique des végétaux.

racinaires et aériennes. En testant trois températures de sol, ils démontrent que la température optimale de croissance est autour des 16°C (Figure 2). De plus, il y a une réponse linéaire négative de la croissance à la température du substrat : plus le sol s'échauffe et moins la croissance (racinaire comme aérienne) est rapide. Ils concluent sur la nécessité de préférer des espèces plus tolérantes à la chaleur (ici, la myrtille arbustive) et d'abaisser la température du sol en été, notamment par la technique du paillage du sol (Spiers, 1995).

Variable	New growth (dry wt in g)			Root length (cm)
	Shoot	Root	Total plant	
Temperature (°C)				
16	4.8	15.2	20.0	22.8
27	3.2	9.7	12.9	20.4
38	1.5	7.3	8.8	14.7

Figure 2 : Influence de la température du substrat sur la croissance des myrtilliers (Spiers, 1995)

En 1997, une étude belge portée sur les fraisiers (*Fragaria x ananassa* 'Elsanta') compare leurs performances agronomiques en fonction de la température de leur substrat. Sur les cinq températures racinaires testées, variant de 6°C à 20°C, c'est autour de 16°C que les plants ont les meilleures performances : la taille des fruits et les rendements y sont maximaux. Au-delà de cet optimum, la croissance est plus précoce mais la surface foliaire, la masse fraîche foliaire, le rendement et la taille des fruits diminuent (Lieten, 1997). Entre ces deux études, on note la température de 16°C qui semble être un optimum pour diverses espèces végétales, bien que les températures critiques soient différentes.

De la même manière, en 2007, une étude sur les courges et une autre sur deux érables et le haricot examinent le comportement de ces végétaux quand ils sont exposés à des températures sub-optimales. Parmi les six espèces de cucurbitacées testées, les chercheurs ont pu déterminer des groupes en fonction de leur tolérance à la chaleur ou au froid. Cet article a pu mettre en avant le rôle de la machinerie antioxydante de la racine, responsable de l'élimination des ROS, dans le processus de tolérance aux températures élevées (Zhang et al., 2007). Pour l'expérimentation sur érables et haricot, la méthode est différente car les chercheurs utilisent des cultures en pots et ils ne s'intéressent pas à la physiologie moléculaire,

mais les résultats restent dans le même esprit que ce qui a pu être vu dans les trois premiers articles : des températures racinaires trop élevées conduisent à une diminution de la croissance des plantes. Ils s'intéressent toutefois au rôle de la couleur du contenant sur la température racinaire, point qui sera adressé par la suite (Markham *et al.*, 2011).

En 2017, un dernier article s'intéresse à l'isolation de bâtiments et relate l'importance du choix des espèces végétales lors de la création de toitures végétalisées. Les végétaux n'ont pas la même capacité à conduire la chaleur au sein d'un substrat donc un choix éclairé de la palette végétale pour une toiture permettrait une meilleure isolation du bâtiment sous-jacent. Indirectement, cette étude définit quelques espèces végétales d'intérêt pour les agriculteurs urbains (sauge notamment) capables de refroidir leur substrat par l'évacuation de la chaleur (Vaz Monteiro *et al.*, 2017).

II) Les stratégies opérationnelles pour les agriculteurs urbains lors d'épisodes caniculaires

Plusieurs techniques peuvent être mises en place pour protéger les plantes et les substrats en cas de très fortes chaleurs estivales.

- **Sélection d'espèces ou de variétés résistantes à la chaleur** : certaines variétés tolèrent voire sont avantagées par des conditions climatiques extrêmes. Une étude de 2006 examine l'accumulation de réserves dans les grains de pollen de différents cultivars de tomates et en a déduit que les cultivars tolérants à la chaleur (Exemple : *Lycopersicon esculentum* Mill. 'Hazera 3018' et 'Hazera 3042') accumulent plus de réserves en conditions de sécheresse. En résulte de plus fort taux de germination du pollen et de nouaison (Firon *et al.*, 2006).

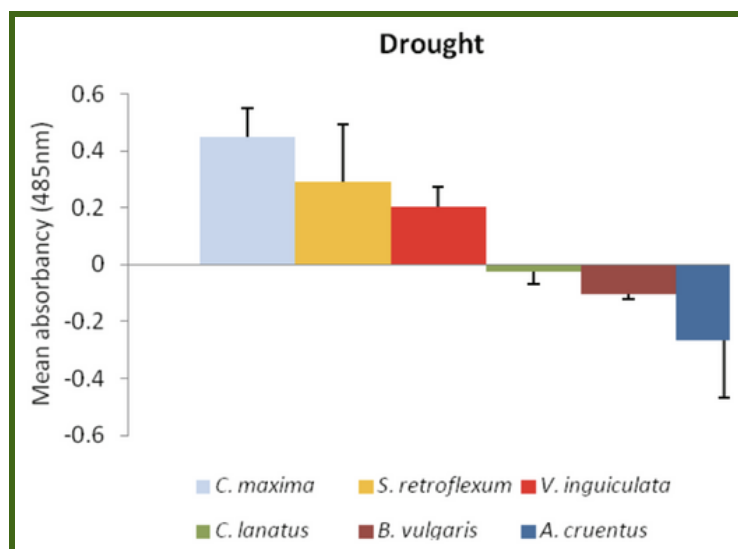


Figure 3 : Des tests sur 6 espèces de légumes feuilles africains montrent que 3 d'entre elles (*Cucurbita maxima* - le potiron - *Solanum retroflexum* et *Vigna unguiculata* - le niébé) sont tolérantes à la sécheresse. (Source : Oelofse *et al.*, 2012)



- **Association culturale** : combiner des plantes sensibles à la chaleur mais intéressantes agronomiquement avec des plantes qui ont des bonnes capacités de refroidissement du substrat et de l'air. Vaz Monteiro *et al.* (2017), lors de leur projet de recherche sur les toitures végétalisées, concluent que certaines espèces végétales (en particulier avec des feuilles de couleurs claires) comme la sauge (phot 1) et l'épiaire de byzance (photo 2) permettent un flux de chaleur dans le substrat plus important donc une isolation de celui-ci. De plus, la sauge est une plante aromatique qui peut également être utilisée en agriculture urbaine.



Photo 1 (haut) et 2 (bas) : Sage (*Salvia officinalis* 'Berggarten') et Epiaire de Byzance (*Stachys byzantina*)

- **Modifier le substrat pour qu'il retienne moins la chaleur** : notamment, la boue brûlée (= burnt sludge) conduit moins la chaleur grâce à sa

forte porosité. Elle permet donc de réduire les échanges thermiques, en plus d'accumuler de l'eau pour les plantes. Inversement, le sable conduit bien la chaleur et peut plus facilement conduire à des dégâts sur les systèmes racinaires (Lin *et al.*, 2011).

- **Technique du paillage (= mulching)** : Spiers *et al.* (1995), travaillant sur des myrtilliers au Mississippi, notent qu'en effectuant une tonte des inter-rangs sans ramassage du gazon, on peut abaisser la température du sol de 6°C sur 15 cm en plein été. De plus, un paillage permet de réduire la croissance des adventices, de maintenir une humidité du sol uniforme et de réduire l'érosion des sols. Le paillage utilisé peut aussi enrichir le substrat en minéraux et en matière organique.



Photo 3 : Exemple d'un paillage de paille autour d'un chou chinois (Albert, 2021)

- **Couleur des contenants en production hors-sol** : les contenants de couleur foncée (noir, brun) contribuent à l'augmentation de température du substrat au niveau des racines et accélèrent les dégâts racinaires. Inversement, un contenant blanc permet de réduire d'en moyenne 6°C cette température donc de préserver les racines (Markham *et al.*, 2011).

- **Changer le contenant pour un autre qui conserve moins la chaleur** : les pots en fibres ont un effet de refroidissement du substrat et du système racinaire en période chaude. En plus, ils permettent l'évaporation d'eau par les côtés, donc d'accentuer le refroidissement des racines. En outre, la technique du pot-dans-un-pot (photo 4) protège le substrat des fortes températures et permet une forte augmentation de la masse racinaire (Mathers, 2003).



Photo 4 : Technique du pot-dans-un-pot (Hull, 2021)

- **Voiles d'ombrage** : ils réduisent les radiations nettes qui arrivent sur le végétal et le sol, augmentent l'humidité autour des parties aériennes et en réduisent l'évapotranspiration. Tout cela contribue à abaisser l'humidité de l'air et du sol et donc à réduire le stress subi par les plantes (El-Naby *et al.*, 2020). Ils sont vitaux pour les jeunes arbres dont la base est très sensible à la chaleur et qu'il faut ombrager pour limiter leur risque de mortalité.

- **Traitement préventif (qualifié de "priming") en arrosant les plantes avec un mélange eau-éthanol (5 à 20 mM d'éthanol sur trois jours)** : testé sur l'arabette des dames, le riz et le blé, ce traitement acclimater les végétaux à la sécheresse en retardant les effets causés par la perte d'eau. Les plantes traitées préalablement à l'éthanol sont mieux "armées" pour déclencher les mécanismes de résistance au stress de sécheresse et sont plus résilientes lors de l'arrosage (pluie ou eau d'irrigation) qui succède à la période de chaleur (Bashir *et al.*, 2022).



Photo 5 : Le traitement à l'éthanol ne modifie pas la croissance normale des plantes (à gauche) mais leur permet de survivre à une sécheresse (à droite) (Bashir *et al.*, 2022).

CONCLUSION

Tableau des températures limites des substrats pour la croissance (C) et la germination (G) de diverses espèces végétales

Espèce		Température minimale	Température optimale	Température maximale
Ail (Pothour, 2017) (Albert, 2022)	G	0°C	18°C - 30°C	35°C
	C	-	13°C - 24°C	-
Asperge (Pothour, 2017) (Espiritu, 2022)	G	10°C	24°C - 30°C	35°C
	C	10°C	24°C - 30°C	30°C
Aubergine (Pothour, 2017) (Childress, 2017)	G	16°C	24°C - 30°C	35°C
	C	18°C	24°C - 32°C	-
Betterave (Pothour, 2017) (WCS, 2021)	G	5°C	18°C - 30°C	35°C
	C	-	10°C - 26°C	-
Brocoli (Pothour, 2017) (Yara, 2019)	G	5°C	16°C - 30°C	35°C
	C	4°C	16°C - 18°C	35°C
Carotte (Pothour, 2017) (Alina, 2023)	G	5°C	18°C - 30°C	35°C
	C	-2°C	10°C - 27°C	-
Chou (Pothour, 2017) (Yara, 2019)	G	5°C	16°C - 30°C	35°C
	C	7°C	15°C - 18°C	27°C
Chou-fleur (Pothour, 2017)	G	5°C	18°C - 30°C	35°C
Citrouille (Pothour, 2017)	G	16°C	30°C - 35°C	41°C
Concombre (Pothour, 2017) (Doubrava <i>et al.</i> , 2023)	G	16°C	18°C - 35°C	41°C
	C	10°C	25°C - 35°C	-
Epinard (Pothour, 2017) (GardenFocused, 2015)	G	0°C	18°C - 24°C	24°C
	C	10°C	15°C	22°C
Fraise (Fragaria x ananassa 'Elsanta') (Lieten, 1997)	C	-	16°C	20°C
Haricot vert (Pothour, 2017)	G	16°C	24°C - 30°C	35°C

Tableau des températures limites des substrats pour la croissance (C) et la germination (G) de diverses espèces végétales

Espèce		Température minimale	Température optimale	Température maximale
Laitue (Pothour, 2017) (Dawling, 2021)	G	0°C	16°C - 24°C	30°C
	C	4,5°C	15°C - 18°C	-
Melon (Pothour, 2017) (Schuh <i>et al.</i> , 2022)	G	16°C	24°C - 30°C	41°C
	C	18°C	21°C - 32°C	-
Navet (Pothour, 2017) (Albert, 2023)	G	5°C	16°C - 35°C	41°C
	C	5°C	16°C	-
Oignon (Pothour, 2017) (Albert, 2023)	G	0°C	18°C - 30°C	35°C
	C	13°C	13°C - 24°C	-
Panais (Pothour, 2017) (Albert, 2022)	G	0°C	18°C - 24°C	30°C
	C	-	10°C - 21°C	-
Pastèque (Pothour, 2017) (Orzolek <i>et al.</i> , 2005)	G	16°C	24°C - 35°C	41°C
	C	16°C	24°C - 32°C	-
Poireau (Pothour, 2017) (Albert, 2022)	G	0°C	18°C - 30°C	35°C
	C	18°C	21°C - 24°C	-
Pois (Pothour, 2017) (Cornell University, 2006)	G	5°C	18°C - 24°C	30°C
	C	5°C	24°C	30°C
Poivron (Pothour, 2017) (Schuh, 2022)	G	16°C	18°C - 24°C	35°C
	C	16°C	21°C	32°C
Pomme de terre (Yara, 2017)	C	10°C	15°C - 20°C	35°C
Radis (Pothour, 2017) (Albert, 2023)	G	5°C	18°C - 30°C	35°C
	C	-	10°C - 24°C	-
Tomates (Pothour, 2017) (Teasdale <i>et al.</i> , 1995)	G	10°C	18°C - 30°C	35°C
	C	-	20°C - 30°C	-
Jeunes arbres (Helgerson, 1989)	C	-	-	52°C

BIBLIOGRAPHIE

ALBERT, S. « Mulch : hot weather vegetable garden protection ». *Harvest to Table*, 2021.
https://harvesttotable.com/mulch_hot_weather_vegetable_ga/

BASHIR, K., TODAKA, D., RASHEED, S., MATSUI, A., AHMAD, Z., SAKO, K., UTSUMI, Y., et al. « Ethanol-mediated novel survival strategy against drought stress in plants ». *Plant and Cell Physiology* 63, no 9, pages 1181-1192, septembre 2022.
<https://doi.org/10.1093/pcp/pcac114>

EL-NABY, S., ESMAIL, A., BAIEA, M., AMIN, O., MOHAMED, A. « Mitigation of heat stress effects by using shade net on Washington navel orange trees grown in Al-Nubaria region, Egypt ». *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus* 19, no 3, pages 15-24, avril 2020.
<https://doi.org/10.24326/asphc.2020.3.2>

FIRON, N., SHAKED, R., PEET, M., PHARR, D., ZAMSKI, E., ROSENFELD, K., ALTHAN, L., PRESSMAN, E. « Pollen grains of heat tolerant tomato cultivars retain higher carbohydrate concentration under heat stress conditions ». *Scientia Horticulturae* 109, no 3, pages 212-217, juillet 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.03.007>

HELGERSON, O. « Heat damage in tree seedlings and its prevention ». *New Forests* 3, no 4, pages 333-58, décembre 1989.
<https://doi.org/10.1007/BF00030044>

HULL, S. « A low-water-use method for dry months ». *Santa Cruz Sentinel*, 2021._
<https://www.santacruzsentinel.com/2021/04/01/sharon-hull-this-week-in-the-garden-a-low-water-use-method-for-dry-months/>

LIETEN, F. « The effect of substrate temperature on strawberry performance on peat bags ». *Acta Horticulturae*, no 450, page 501-504, juillet 1997. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.450.63>

LIN, Y., LIN, H. « Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries ». *Building and Environment* 46, no 2, pages 345-355, février 2011. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.027>

MATHERS, H. « Summary of temperature stress issues in nursery containers and current methods of protection ». *HortTechnology* 13, no 4, pages 617-624, janvier 2003.
<https://doi.org/10.21273/HORTTECH.13.4.0617>

MARKHAM, J., BREMER, D., BOYER, C., SCHROEDER, K. « Effect of container color on substrate temperatures and growth of red maple and redbud ». *HortScience* 46, no 5, pages 721-726, mai 2011. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.5.721>

OELOFSE, A., VAN AVERBEKE, W. « Nutritional value and water use of African leafy vegetables for improved livelihoods. ». *Centre for Nutrition, University of Pretoria, Centre of Organic and Smallholder Agriculture, Department of Crop Sciences and Tshwane University of Technology*, rapport n° 535/12, septembre 2012.
<https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT%20535-12.pdf#page=94>

SAKR, S. « Physiologie de la nutrition et du stress », [notes fournies dans le cours pour les 3ème année], Institut Agro Rennes-Angers, Angers, Mars 2022.

SPIERS, J. « Substrate temperatures influence root and shoot growth of southern highbush and rabbiteye blueberries ». *HortScience* 30, no 5, pages 1029-1030, 1995.
<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.5.1029>

VAZ MONTEIRO, M., BLANUŠA, T., VERHOEF, A., RICHARDSON, M., HADLEY, P., CAMERON, R. « Functional green roofs: importance of plant choice in maximising summertime environmental cooling and substrate insulation potential ». *Energy and Buildings* 141, page 56-68, avril 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.011>

ZHANG, Y., ZHANG, Y., ZHOU, Y., YU, J. « Adaptation of cucurbit species to changes in substrate temperature: root growth, antioxidants, and peroxidation ». *Journal of Plant Biology* 50, no 5, page 527-532, octobre 2007.
<https://doi.org/10.1007/BF03030705>

BIBLIOGRAPHIE - TABLEAU

- ALBERT, S. « How to plant, grow, and harvest garlic ». *Harvest to Table*, juin 2022._
https://harvesttotable.com/how_to_grow_garlic/
- ALBERT, S. « How to plant, grow, and harvest leeks ». *Harvest to Table*, septembre 2022._
https://harvesttotable.com/how_to_grow_leek/
- ALBERT, S. « How to plant, grow, and harvest turnips ». *Harvest to Table*, avril 2023._
https://harvesttotable.com/how_to_grow_turnips/
- ALBERT, S. « Parsnips seed starting tips ». *Harvest to Table*, avril 2022._
<https://harvesttotable.com/parsnips-seed-starting-tips/>
- ALBERT, S. « Planting onion seeds and sets ». *Harvest to Table*, avril 2023.
<https://harvesttotable.com/onion-seed-starting-tips/>
- ALBERT, S.. « Radish seed starting tips ». *Harvest to Table*, mars 2023._
<https://harvesttotable.com/radish-seed-starting-tips/>
- ALINA. « How cold can carrots tolerate for growing? Carrots temperature tolerance - Beginner's guide to farming and growing your own food », *Farming Thing*, février 2023._
<https://farmingthing.com/cold-carrots-tolerate-growing-temperature-tolerance/>
- CHILDRESS, C. « Quick guide to summer veggie soil & temp preferences! » *Green Bean Connection* (blog), 2017._
<https://greenbeanconnection.wordpress.com/2017/04/13/quick-guide-to-summer-veggie-soil-temp-preferences/>
- CORNELL UNIVERSITY. « Growing guide - Peas ». *Cornell University - Home Gardening*, 2006._
<http://www.gardening.cornell.edu/homegardening/scene9697.html>
- DAWLING, P. « Soil temperatures for lettuce germination ». *Sustainable Market Farming*, février 2021._
<https://www.sustainablemarketfarming.com/tag/soil-temperatures-for-lettuce-germination/>
- DOUBRAVA, N., DUFAULT, R. « Cucumber ». *Home & Garden Information Center | Clemson University, South Carolina*, janvier 2023. <https://hgic.clemson.edu/factsheet/cucumber/>
- ESPIRITU, K. « How to grow asparagus in abundance ». *Epic Gardening* (blog), 2022.
<https://www.epicgardening.com/how-to-grow-asparagus/>
- GARDENFOCUSED. « Expert advice on how, where and when to grow Spinach ». *GardenFocused*, 2015._
<https://www.gardenfocused.co.uk/vegetable/spinach.php>
- MASABNI, J. « Easy Gardening Series - Green Beans ». *Texas AgriLife Extension Service*, EHT-057, mai 2014. <https://aggie-horticulture.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/10/2013/09/EHT-057.pdf>
- ORZOLEK, M., LAMONT, W., KIME, L., BOGASH, S., HARPER, J. « Watermelon production ». *PennState Extension*, 2005.
<https://extension.psu.edu/watermelon-production>
- POTHOOR, G. « Soil temperature conditions for vegetable seed germination ». *University of California Agriculture and Natural Resources*, Garden Notes n°154, 2017.
<https://sacmg.ucanr.edu/files/164220.pdf>
- SCHUH, M. « Growing peppers in home gardens ». *University of Minnesota Extension*, 2022._
<https://extension.umn.edu/vegetables/growing-peppers>
- SCHUH, M., FOORD, K., MACKENZIE, J. « Growing melons in the home garden ». *University of Minnesota Extension*, 2022.
<https://extension.umn.edu/fruit/growing-melons-home-garden>
- TEASDALE, J., ABDUL-BAKI, A. « Soil temperature and tomato growth associated with black polyethylene and hairy vetch mulches ». *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120, no 5, pages 848-853, septembre 1995.
<https://doi.org/10.21273/JASHS.120.5.848>
- WCS. « How to Grow Beets ». *West Coast Seeds*, mars 2021._
<https://www.westcoastseeds.com/blogs/wcs-academy/grow-beets>
- YARA. « Agronomic Principles in Vegetable Brassica Production ». *Yara United Kingdom*, novembre 2019._
<https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/vegetable-brassicas/agronomic-principles-in-vegetable-brassica-production/>
- YARA. « Potato agronomic principles ». *Yara United Kingdom*, décembre 2017._
<https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/potato/potato-agronomic-principles/>