

LBRAI2219 - Modélisation des systèmes biologiques

Modèle APSIM pour deux cultures

Maxime CORNEZ

2025-05-24

Contents

1	Résumé	1
2	Introduction	2
2.1	État de l'art	2
2.2	Importance de l'approche par modélisation	3
3	Matériel et méthodes	3
3.1	Modèles	3
3.2	Packages	4
3.3	Données d'entrée	5
3.4	Modèles utilisés	9
4	Résultats	9
4.1	Simulation des cultures	9
4.2	Modélisation de l'évolution de la culture (bah oui)	9
4.3	Couplage entre le modèle racinaire et le modèle de culture (remplacer par couplage de 2 cultures)	9
4.4	Analyse de l'interaction entre rendements et racines (kl ?)	9
5	Collaboration	10
	Références	10

1 Résumé

Résumé du travail, reprenant les résultats principaux et les perspectives.

2 Introduction

2.1 État de l'art

L'agriculture moderne est soumise à de nombreux défis à l'heure actuelle : elle se doit de produire assez pour nourrir la population mondiale, tout en respectant au mieux l'environnement et en s'adaptant aux changements climatiques. Or, les terres disponibles pour l'agriculture ne sont pas illimitées et la pression sur les ressources naturelles est de plus en plus forte. De plus, les ressources en eau et en terre ne sont pas distribuées de manière égale sur la planète, ce qui rend la tâche encore plus complexe (Dudgeon et al. 2006). L'agriculture dépend de ces deux ressources presque autant qu'elle dépend du soleil, or avec l'augmentation de la population mondiale et les changements climatiques, la disponibilité de l'eau et des terres agricoles est mise à rude épreuve.

Aujourd'hui, si on combine les terres arables et les prairies, ces deux biomes sont les plus présents à la surface de la Terre, occupant environ 40 % de la surface terrestre. En outre, les terres agricoles sont souvent utilisées de manière intensive, avec des pratiques telles que la monoculture, l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides, et la déforestation pour créer de nouvelles terres agricoles. Ces pratiques ont des conséquences néfastes sur l'environnement, notamment la perte de biodiversité, la dégradation des sols et la pollution de l'eau (Foley et al. 2005).

La recherche agronomique s'est orientée vers des pratiques agricoles plus durables, telles que l'agroécologie, l'agriculture de conservation et la permaculture. Ces pratiques visent à réduire l'impact environnemental de l'agriculture tout en maintenant des rendements élevés. Elles reposent sur une meilleure compréhension des interactions entre les plantes, les sols et les écosystèmes, ainsi que sur l'utilisation de techniques de gestion intégrée des cultures (Bondeau et al. 2007).

Pour s'adapter aux épisodes de stress hydrique et thermique, les plantes déploient un éventail de réponses physiologiques coordonnées. D'une part, elles ferment partiellement, voire totalement, leurs stomates pour réduire les pertes d'eau, ajustent leur croissance, celle de leurs racines et celle de leur feuillage, pour limiter l'évapotranspiration et modifient l'orientation et la taille de leurs feuilles afin d'optimiser la capture de la lumière sans souffrir de surchauffe. D'autre part, elles optimisent l'efficacité de leur utilisation de l'eau par des ajustements biochimiques, comme l'accumulation d'osmolytes, et par des modifications de la composition de leur cuticule pour diminuer la perte d'eau.

Au cœur de ces stratégies, l'architecture racinaire joue un rôle décisif. Un enracinement profond permet d'accéder aux réserves hydriques des horizons profonds, tandis qu'une croissance rapide des racines favorise une exploration efficace du volume de sol. La capacité à répartir finement les racines dans les différents niveaux du sol accroît considérablement les probabilités de rencontrer des poches d'humidité. De plus, certaines plantes développent une plasticité racinaire importante, ajustant dynamiquement la ramification et l'élongation des racines selon la disponibilité locale de l'eau, et renforcent leurs interactions avec les champignons mycorhiziens pour améliorer l'absorption hydrique et minérale. Ces traits racinaires combinés forment un arsenal adaptatif essentiel pour maintenir la croissance et la productivité en conditions de déficit hydrique (Munns 2002).

Ce projet traitera plus spécifiquement de la permaculture et des intercultures, techniques visant à maximiser l'espace disponible et les ressources pour deux cultures ou plus occupant le même espace. Ces techniques sont de plus en plus populaires dans les systèmes agricoles durables, car elles permettent de diversifier les cultures, d'améliorer la santé des sols et de réduire les besoins en intrants chimiques (Brooker et al. 2015).

Le maïs (*Zea mays* L.) est l'une des céréales les plus cultivées au monde, environ 850 millions de tonnes produites par an sur approximativement 162 millions d'hectares (Yara 2018). Son métabolisme en C lui garantit une photosynthèse très efficace et une bonne tolérance aux fortes températures. Toutefois, il reste fortement dépendant de l'eau, en particulier durant la floraison et la pollinisation, lorsque le stress hydrique peut provoquer des pertes de rendement importantes. Son réseau racinaire dense et profond, pouvant aller jusqu'à 1m80, lui permet une captation efficace de l'eau et des nutriments (Barnabás, Jäger, and Fehér 2008).

Il serait intéressant d’optimiser ces surfaces de culture en alliant les plants de maïs avec d’autres plantes pouvant bénéficier de cet espace. La sélection des bonnes variétés de plante entrainera un symbiose, améliorant le rendement globale de production et permettant ainsi une meilleure valorisation de l’eau et des ressources. Les cultures le plus souvent associées au maïs sont souvent des espèces de petite taille, profitant de l’ombrage apporté par les feuilles du maïs ou de la structure de sa tige (Brooker et al. 2015; Dong et al. 2022; Nassary, Bajjukya, and Ndakidemi 2020; Zhang and Li 2003). On retrouve par exemple :

- des légumineuses comme les haricots (*Phaseolus vulgaris*) : ils fixent l’azote atmosphérique dans le sol, améliorant ainsi la fertilité du sol et réduisant le besoin en engrais azotés pour le maïs et se servent des tiges de maïs comme support pour leurs tiges (Mudare et al. 2022).
- des courges (*Cucurbita pepo*) : elles ont de grandes feuilles qui fournissent de l’ombre au sol, réduisant l’évaporation de l’eau et maintenant une température du sol plus fraîche, ce qui est bénéfique pour le maïs. Elles aident également à contrôler les mauvaises herbes en couvrant le sol (Cryan et al. 2025).
- des salades (*Lactuca sativa*) : elles ont une croissance rapide et peuvent être récoltées avant que le maïs ne devienne trop grand, permettant ainsi une utilisation efficace de l’espace. Elles protègent le sol et exploitent la strate inférieure (Brennan 2013).

2.2 Importance de l’approche par modélisation

Comme l’a dit Samuel P. Huntington “Nous avons besoin de modèles explicites ou implicites pour pouvoir ordonner et généraliser la réalité, comprendre les relations causales entre les phénomènes, anticiper et, si nous avons de la chance, prédire les développements futurs, distinguer l’essentiel de l’accessoire et nous indiquer les chemins à suivre pour atteindre nos objectifs”. Un modèle n’est jamais une parfaite représentation de la réalité, mais il permet de simplifier et d’organiser les connaissances pour mieux comprendre les systèmes complexes. En agronomie, la modélisation est un outil essentiel pour simuler le comportement des cultures et des systèmes agricoles, en tenant compte des interactions entre les plantes, le sol et l’environnement, sans devoir nécessairement passer par une étape expérimentale longue et coûteuse (Tremblay and Wallach 2004).

Le modèle APSIM (pour Agricultural Production Systems sIMulator) est un modèle de simulation de culture qui permet de simuler la croissance des cultures, la dynamique du sol et les interactions entre les plantes et l’environnement. Il a été développé en 1995 par une équipe multiuniversitaire et est encore utilisé et amélioré à ce jour. APSIM est un modèle modulaire, ce qui signifie qu’il peut être adapté à différents systèmes agricoles et à différentes conditions environnementales. Il est capable de simuler la croissance des cultures en tenant compte des facteurs climatiques, hydriques et nutritionnels, ainsi que des interactions entre les plantes et le sol (McCown et al. 1996; Keating et al. 2003).

3 Matériel et méthodes

3.1 Modèles

L’étude repose sur une modélisation d’APSIM en combinant deux cultures (maïs et autre) en interculture. Le modèle APSIM est utilisé pour simuler la croissance des cultures, la dynamique du sol et les interactions entre les plantes et l’environnement.

- **APSIM mono** : Ce modèle a pour but de simuler la production de biomasse chez le maïs en prenant en compte à la fois les contraintes hydriques et lumineuses. Il s’appuie d’une part sur les équations de Monteith, qui relient la croissance à la quantité de rayonnement intercepté, et d’autre part sur le concept d’efficacité de transpiration, qui traduit la conversion de l’eau prélevée en biomasse sous stress hydrique. Ensemble, ces deux approches permettent de quantifier l’impact combiné de la lumière et

de la disponibilité en eau sur le développement de la culture. (**draye?**; Hammer 2009)

La version présentée ici a été légèrement remise en forme par Alice Falzon et moi-même afin d'en améliorer l'ergonomie et la facilité d'utilisation.

- **APSIM duo** : Ce modèle est une extension du modèle mono, qui permet de simuler la production de biomasse pour deux cultures en interculture. Il prend en compte les interactions entre les deux cultures pour l'eau et la profondeur des racines. Le modèle est capable de simuler la croissance des deux cultures en tenant compte des facteurs climatiques et hydriques, ainsi que des interactions entre les plantes et le sol. Le modèle inclut un "arbitre" déterminant quelle culture recevra prioritairement l'eau en cas de déficit hydrique, cet arbitre est inclu directement dans la fonction du modèle. Par simplicité, l'hypothèse que les deux cultures n'ont pas d'interactions au niveau de la lumière a été faite, ce qui signifie que la lumière est répartie entre les deux cultures selon la disponibilité. La conversion de APSIM mono vers duo a représenté la plus grande partie de ce projet.

Le plan de modélisation est structuré comme suit :

1. Obtention des paramètres de cultures pour chaque culture désirée. Puis des paramètres du sol et de l'expansion foliaire
2. Obtention des paramètres météo, soit via un jeu de données généré artificiellement, soit via un jeu de données réelles obtenu via Open-Meteo (**open-meteo____nodate?**) ; sélection de la source via le switch installé dans le code.
3. Fixation des densités de culture.
4. Simulation de la production de biomasse avec APSIM.
 1. Pour le maïs seul avec Apsim mono.
 2. En combinant le maïs avec une autre culture avec Apsim duo.
5. Analyse et comparaison des résultats.

3.2 Packages

- **Importation et manipulation de données**

- *readxl* : permet de lire directement des fichiers Excel (.xls, .xlsx) en important les feuilles de calcul sous forme de data frames.
- *dplyr* et *tidyr* : offrent un ensemble de fonctions (p. ex. *filter()*, *select()*, *mutate()*) pour nettoyer, transformer et reformater les données de façon claire et fluide.

- **Visualisation**

- *ggplot2* : propose un système de grammaire graphique puissant pour créer des graphiques élégants et personnalisables (histogrammes, nuages de points, séries temporelles, etc.) à partir de de data frames.

- **Accès et traitement de données web**

- *httr* : facilite les requêtes HTTP (GET, POST, authentification) pour interagir avec des API ou récupérer des ressources distantes.
- *jsonlite* : convertit des fichiers JSON en objets R (et inversement), ce qui rend l'exploitation des réponses d'API et le stockage des données JSON plus accessibles.

```
# Packages requis
library(readxl)
library(dplyr)
library(tidyr)
library(ggplot2)
library(jsonlite)
library(httr)
```

3.3 Données d'entrée

3.3.1 Paramètres des cultures

Dans la mesure du possible, les paramètres ont été extraits de la littérature. Lorsque certaines données faisaient défaut, des extrapolations ont été réalisées à partir des connaissances acquises au cours de ma formation, dans un but de différenciation de l'espèce par rapport au maïs. Seules les données relatives au maïs peuvent être considérées comme pleinement fiables, puisqu'elles proviennent d'un exercice pratique donné par le professeur Draye Rouphael and Colla (2005).

```
mais <- list(
  RUE           = 1.6,    # Radiation Use Efficiency [g/MJ]
  TEc           = 9,      # Coefficient d'efficience de la transpiration [Pa]
  VPR           = 20,     # Vitesse production de racines [mm/jour]
  CroissPotLAI  = 0.1,    # Croissance potentielle du LAI
  k             = 0.45,   # Coefficient d'extinction de la lumière
  LAI_initial   = 1.5,
  Biomasse_initiale = 45
)

sorgho <- list(
  RUE           = 1.25,   # Radiation Use Efficiency [g/MJ]
  TEc           = 9,      # Coefficient d'efficience de la transpiration [Pa]
  VPR           = 20,     # Vitesse production de racines [mm/jour]
  CroissPotLAI  = 0.1,    # Croissance potentielle du LAI
  k             = 0.45,   # Coefficient d'extinction de la lumière
  LAI_initial   = 1.5,
  Biomasse_initiale = 45
)

haricot <- list(
  RUE           = 1.78,   # Radiation Use Efficiency [g/MJ]
  TEc           = 4.9,    # Coefficient d'efficience de la transpiration [Pa]
  VPR           = 13.5,   # Vitesse production de racines [mm/jour]
  CroissPotLAI  = 0.1,    # Croissance potentielle du LAI
  k             = 0.6,    # Coefficient d'extinction de la lumière
  LAI_initial   = 1.0,
  Biomasse_initiale = 20
)

courge <- list(
  RUE           = 4.1,    # Radiation Use Efficiency [g/MJ]
  TEc           = 2.9,    # Coefficient d'efficience de la transpiration [Pa]
  VPR           = 15,     # Vitesse production de racines [mm/jour]
```

```

  CroissPotLAI      = 0.12, # Croissance potentielle du LAI
  k                 = 0.72, # Coefficient d'extinction de la lumière
  LAI_initial       = 0.8,
  Biomasse_initiale = 35
)

salade <- list(
  RUE              = 1.2, # Radiation Use Efficiency [g/MJ]
  TEc              = 3,   # Coefficient d'efficience de la transpiration [Pa]
  VPR              = 8,   # Vitesse production de racines [mm/jour]
  CroissPotLAI     = 0.15, # Croissance potentielle du LAI
  k                = 0.5, # Coefficient d'extinction de la lumière
  LAI_initial       = 0.6,
  Biomasse_initiale = 15
)

```

3.3.2 Paramètres du sol

Paramètres générés artificiellement pour avoir un sol d' 1m d'épaisseur contenant un minimum de 40mm d'eau et un maximum de 100mm d'eau.

L'hypothèse que le kl est une valeur propre au sol a été posée pour simplifier les calculs. En réalité, le kl est variable selon de nombreux critères propres au sol et aux plantes occupant le sol.

```

soil_params <- data.frame(
  Horizon      = c(1, 2, 3),
  Epaisseur    = c(300, 300, 400), # mm
  li           = c(40, 40, 40),    # Limite inférieure d'eau
  ls           = c(100, 100, 100), # Limite supérieure d'eau
  es           = c(100, 100, 100), # Eau disponible dans sol (= sw)
  es_h         = c(40, 30, 30),    # Eau disponible dans sol par horizon ; es_h1+es_h2+es_h3 = es
  kl           = c(0.06, 0.05, 0.05) # Taux d'extraction [mm/jour]
)

```

3.3.3 Expansion foliaire

```

# Culture 1
expansion_foliaire <- data.frame(
  OD = c(0.5, 1.5, 4), # Offre sur demande
  CEF = c(0, 1, 1) # Coefficient d'expansion foliaire
)

# Culture 2
expansion_foliaire2 <- data.frame(
  OD = c(0.4, 1.0, 3.5), # Offre sur demande
  CEF = c(0, 0.8, 1) # Coefficient d'expansion foliaire
)

```

3.3.4 Paramètres météo

```
# Données météo réelles
lat <- 50.666265; lon <- 4.622322 # Localisation de la zone d'étude : 50.666265 ; 4.622322 = bâtiment
start_date <- "2024-06-01"; end_date <- "2024-06-30" # Période de simulation
res <- GET("https://archive-api.open-meteo.com/v1/archive", # Obtention des données de la station météo
  query = list(latitude = lat, longitude = lon,
    start_date = start_date, end_date = end_date,
    daily = "temperature_2m_max,temperature_2m_min,shortwave_radiation_sum",
    timezone = "Europe/Brussels"))
meteo_data <- fromJSON(content(res, "text"))$daily # Importation du fichier de données JSON

meteo_df <- as.data.frame(meteo_data) %>%
  rename(Date = time, Tmax = temperature_2m_max,
    Tmin = temperature_2m_min, Radiation = shortwave_radiation_sum) %>%

  mutate(Jours = 1:n(), # fonctions pour calculer vdp
    svpTmax = 6.1078 * exp(17.269 * Tmax / (237.3 + Tmax)) * 0.10,
    svpTmin = 6.1078 * exp(17.269 * Tmin / (237.3 + Tmin)) * 0.10,
    VPDcalc = 0.75 * (svpTmax - svpTmin) * 10)

# Génération de données artificielles

facteur_externe <- data.frame(
  # Durée de la simulation (jours)
  Jours = 30:60,

  # Radiation (MJ/m2)
  Radiation = c(
    27, 27, 14, 24, 23, 21,
    23, 25, 17, 14, 26, 26,
    10, 26, 30, 27, 27, 29,
    27, 26, 25, 23, 14, 25,
    22, 20, 22, 24, 28, 25, 25
  ),

  # Tmax (°C)
  Tmax = c(
    32.3, 31.0, 26.6, 26.0, 26.6, 29.5,
    30.8, 32.5, 32.3, 25.2, 27.8, 28.2,
    27.3, 28.6, 28.6, 28.3, 27.6, 31.0,
    35.0, 34.3, 31.2, 32.7, 29.9, 30.8,
    31.2, 28.4, 27.7, 31.4, 33.0, 33.2, 32.7
  ),

  # Tmin (°C)
  Tmin = c(
    16.4, 15.8, 15.6, 10.0, 11.7, 13.0,
    16.5, 13.8, 16.7, 16.7, 15.8, 12.8,
    17.3, 11.3, 13.7, 13.4, 13.7, 12.2,
    14.7, 20.4, 15.5, 17.9, 18.4, 16.0,
    16.1, 18.0, 14.9, 16.0, 16.2, 17.2, 18.3
  ),
```

```

# VPDobs (hPa)
VPDobs = c(
  19, 17, 16, 14, 12, 15,
  18, 19, 23, 21, 15, 14,
  20, 16, 17, 17, 15, 15,
  16, 17, 18, 21, 22, 17,
  18, 20, 18, 19, 19, 20, 21
)
)

# Fonction pour calculer saturated vapour pressure (SVP)
svp <- function(T) { # satured vapour pressure [kPa]
  6.1078 * exp(17.269 * T / (237.3 + T)) * 0.10
}

# Application à Tmax
facteur_externes$svpTmax <- svp(facteur_externes$Tmax) # pression saturante à Tmax

# Application à Tmin
facteur_externes$svpTmin <- svp(facteur_externes$Tmin) # pression saturante à Tmin

VPDfrac <- 0.75 # par défaut on prend 0.75

# Fonction pour calculer VPDcalc
calc_VPDcalc <- function(svpTmax, svpTmin, VPDfrac) {
  VPDfrac * (svpTmax - svpTmin)*10
}

# Ajout de la colonne VPDcalc
facteur_externes$VPDcalc <- calc_VPDcalc(
  svpTmax = facteur_externes$svpTmax,
  svpTmin = facteur_externes$svpTmin,
  VPDfrac = VPDfrac
)

#####
# Choix de la source de données : "reel" ou "artificiel" (switch)
#####
data_source <- "artificiel" # mettre "artificiel" si on veut le jeu généré

if (data_source == "reel") {
  facteur_externes <- meteo_df %>%
    select(Jours, Radiation, Tmax, Tmin, VPDcalc)
} else if (data_source == "artificiel") {
  facteur_externes <- facteur_externes %>%
    select(Jours, Radiation, Tmax, Tmin, VPDcalc)
} else {
  stop("data_source doit être 'reel' ou 'artificiel'")
}

```


3.3.5 Densité des deux cultures

```
Densite1 <- 0.5 # Densité de la culture 1  
Densite2 <- 1-Densite1 # Densité de la culture 2
```

3.4 Modèles utilisés

Importation des deux modèles utilisés.

```
source("apsim_mono.R") # Apsim monoculture  
source("apsim_duo.R") # Apsim double culture
```

4 Résultats

4.1 Simulation des cultures

```
resultat_mais <- simulate(facteur_externe, soil_params, mais, expansion_foliaire) # simulation maïs seu  
resultats_mais_haricot <- simulate_two(facteur_externe, soil_params, mais, haricot, expansion_foliaire,  
resultats_mais_courge <- simulate_two(facteur_externe, soil_params, mais, courge, expansion_foliaire, e  
resultats_mais_salade <- simulate_two(facteur_externe, soil_params, mais, salade, expansion_foliaire, e
```

4.2 Modélisation de l'évolution de la culture (bah oui)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

4.3 Couplage entre le modèle racinaire et le modèle de culture (remplacer par couplage de 2 cultures)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

4.4 Analyse de l'interaction entre rendements et racines (kl ?)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

5 Collaboration

Lors de ce projet j'ai eu l'occasion de collaborer avec plusieurs collègues autant pour améliorer mon projet que pour les aider avec le leur.

Je tiens à remercier tout particulièrement Alice Falzon avec qui j'ai travaillé à l'élaboration du modèle APSIM_2025, qui est la base de ce projet, elle m'a aussi fourni le code pour obtenir les données météo réelles via Open-Meteo et pour ses retours concernant mon rapport.

En retour j'ai pu l'aider à améliorer quelques points de son modèle et j'ai aussi relu son rapport.

Nous avons partagé notre code avec le reste de la classe, mais je ne saurais dire précisément qui l'a utilisé.

Je remercie aussi Ismael Peeters pour son aide sur la théorie lié au kl.

J'ai pu aidé Emile Davio et Zoé Saintrain sur des points relatifs à la théorie et au code d'APSIM.

Références

- Barnabás, Beáta, Katalin Jäger, and Attila Fehér. 2008. "The Effect of Drought and Heat Stress on Reproductive Processes in Cereals." *Plant, Cell & Environment* 31 (1): 11–38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x>.
- Bondeau, Alberte, Pascal C. Smith, Sönke Zaehle, Sibyll Schaphoff, Wolfgang Lucht, Wolfgang Cramer, Dieter Gerten, et al. 2007. "Modelling the Role of Agriculture for the 20th Century Global Terrestrial Carbon Balance." *Global Change Biology* 13 (3): 679–706. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x>.
- Brennan, Eric B. 2013. "Agronomic Aspects of Strip Intercropping Lettuce with Alyssum for Biological Control of Aphids." *Biological Control* 65 (3): 302–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.03.017>.
- Brooker, Rob W., Alison E. Bennett, Wen-Feng Cong, Tim J. Daniell, Timothy S. George, Paul D. Hallett, Cathy Hawes, et al. 2015. "Improving Intercropping: A Synthesis of Research in Agronomy, Plant Physiology and Ecology." *New Phytologist* 206 (1): 107–17. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>.
- Cryan, Ty, Olivia Musselman, Aaron W. Baumgardner, Sadie Osborn, Caroline J. Beuscher, Caitlin Stehn, Ariane Burt, et al. 2025. "Yield, Growth, and Labor Demands of Growing Maize, Beans, and Squash in Monoculture Versus the Three Sisters." *PLANTS, PEOPLE, PLANET* 7 (1): 204–14. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10576>.
- Dong, Qiqi, Xinhua Zhao, Dongying Zhou, Zhenhua Liu, Xiaolong Shi, Yang Yuan, Peiyan Jia, et al. 2022. "Maize and Peanut Intercropping Improves the Nitrogen Accumulation and Yield Per Plant of Maize by Promoting the Secretion of Flavonoids and Abundance of Bradyrhizobium in Rhizosphere." *Frontiers in Plant Science* 13 (August). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.957336>.
- Draye, Xavier. n.d. "Practical Notes."
- Dudgeon, David, Angela H. Arthington, Mark O. Gessner, Zen-Ichiro Kawabata, Duncan J. Knowler, Christian Lévêque, Robert J. Naiman, et al. 2006. "Freshwater Biodiversity: Importance, Threats, Status and Conservation Challenges." *Biological Reviews* 81 (2): 163–82. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>.
- Foley, Jonathan A., Ruth DeFries, Gregory P. Asner, Carol Barford, Gordon Bonan, Stephen R. Carpenter, F. Stuart Chapin, et al. 2005. "Global Consequences of Land Use." *Science* 309 (5734): 570–74. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Ghavidel, Raheleh, Ghorban Asadi, Mohammad Naseri, Pour Yazdi, Reza Ghorbani, and Surur Khorramdel. 2016. "Evaluation of Radiation Use Efficiency of Common Bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) Cultivars as Affected by Plant Density Under Mashhad Climatic Conditions." *J. BioSci. Biotechnol.* 5 (2): 145–50.
- Hammer, G. 2009. "Computer Session: Yield Prediction, Simulation of the Genotype X Environment Interaction with an Excel Version of APSIM."
- Keating, B. A, P. S Carberry, G. L Hammer, M. E Probert, M. J Robertson, D Holzworth, N. I Huth, et al. 2003. "An Overview of APSIM, a Model Designed for Farming Systems Simulation." *European*

- Journal of Agronomy*, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications, 18 (3): 267–88. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9).
- Lin, Kuan-Hung, Meng-Yuan Huang, Wen-Dar Huang, Ming-Huang Hsu, Zhi-Wei Yang, and Chi-Ming Yang. 2013. “The Effects of Red, Blue, and White Light-Emitting Diodes on the Growth, Development, and Edible Quality of Hydroponically Grown Lettuce (*Lactuca Sativa* L. Var. *Capitata*).” *Scientia Horticulturae* 150 (February): 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002>.
- McCown, R. L., G. L. Hammer, J. N. G. Hargreaves, D. P. Holzworth, and D. M. Freebairn. 1996. “APSIM: A Novel Software System for Model Development, Model Testing and Simulation in Agricultural Systems Research.” *Agricultural Systems* 50 (3): 255–71. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V).
- Mudare, Shingirai, Jasper Kanomanyanga, Xiaoqiang Jiao, Stanford Mabasa, Jay Ram Lamichhane, Jingying Jing, and Wen-Feng Cong. 2022. “Yield and Fertilizer Benefits of Maize/Grain Legume Intercropping in China and Africa: A Meta-Analysis.” *Agronomy for Sustainable Development* 42 (5): 81. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00816-1>.
- Munns, R. 2002. “Comparative Physiology of Salt and Water Stress.” *Plant, Cell & Environment* 25 (2): 239–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>.
- Nassary, Eliakira Kisetu, Frederick Baijukya, and Patrick Alois Ndakidemi. 2020. “Productivity of Intercropping with Maize and Common Bean over Five Cropping Seasons on Smallholder Farms of Tanzania.” *European Journal of Agronomy* 113 (February): 125964. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125964>.
- Ogindo, H. O., and S. Walker. 2004. “The Determination of Transpiration Efficiency Coefficient for Common Bean.” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Water, Science, Technology and Policy Convergence and Action by All (A Meeting Point for Action leading to Sustainable Development), 29 (15): 1083–89. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.09.025>.
- Rouphael, Youssef, and Giuseppe Colla. 2005. “Radiation and Water Use Efficiencies of Greenhouse Zucchini Squash in Relation to Different Climate Parameters.” *European Journal of Agronomy* 23 (2): 183–94. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.10.003>.
- Tremblay, Marie, and Daniel Wallach. 2004. “Comparison of Parameter Estimation Methods for Crop Models.” *Agronomie* 24 (6-7): 351–65. <https://doi.org/10.1051/agro:2004033>.
- Yara, France. 2018. “Panorama de La Culture Du Maïs.” *Yara France*. <https://www.yara.fr/fertilisation/solutions-pour-cultures/mais/panorama-culture-mais/>.
- Zhang, Fusuo, and Long Li. 2003. “Using Competitive and Facilitative Interactions in Intercropping Systems Enhances Crop Productivity and Nutrient-Use Efficiency.” *Plant and Soil* 248 (1): 305–12. <https://doi.org/10.1023/A:1022352229863>.