



**HAL**  
open science

# Simulation des conséquences du changement climatique sur l'évolution des stress abiotiques et de la production de pommes de terre, à l'aide du modèle STICS

Pierre-Hadrien Mortier

## ► To cite this version:

Pierre-Hadrien Mortier. Simulation des conséquences du changement climatique sur l'évolution des stress abiotiques et de la production de pommes de terre, à l'aide du modèle STICS. *Ecologie, Environnement*. 2020. hal-03416769

**HAL Id: hal-03416769**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03416769>**

Submitted on 5 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



2019-2020

## MASTER AETPF

Agrosciences, Environnement, Territoire, Paysage, Forêt

### Parcours

#### IPE

SIMULATION DES CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE  
SUR L'EVOLUTION DES STRESS ABIOTIQUES ET DE LA PRODUCTION  
DE POMMES DE TERRE, A L'AIDE DU MODELE STICS

Pierre-Hadrien Mortier

Mémoire de Stage, soutenu à Nancy le 02/09/2020

Marie Launay, Ingénieure de Recherche à INRAE AGROCLIM

Yves Jolivet, Professeur d'Université à INRAE SILVA

INRAE, Unité AGROCLIM, Centre de recherche PACA Domaine Saint Paul, Site  
Agroparc, 228 Route de l'Aérodrome 84914 Avignon

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

1. Situation et enjeux dans le Monde
2. Les modèles de culture et le modèle STICS
3. Le projet OPERATE et les simulations sur le futur de la pomme de terre

### MATERIEL ET METHODES

1. Le modèle de cultures STICS
2. Protocole d'expérimentation in silico
  - 2.1. Choix des stratégies d'adaptation
  - 2.2. Conditions pédoclimatiques
  - 2.3. Itinéraires techniques
  - 2.4. Périodes de simulation
  - 2.5. Initialisation des simulations
3. Analyse des résultats

### RESULTATS

1. Impact du changement climatique sur les deux sites, pour les modes de conduite de référence REFO et REFi
2. Résultats des stratégies d'adaptation IRR, LAT et WIN

### DISCUSSION

1. Impact du changement climatique sur les récoltes
2. Evaluation des stratégies d'adaptation
3. Analyse approfondie des bas rendements de la stratégie WIN
4. Simulations après désactivation du paramètre de fertilisation des plants par le CO<sub>2</sub>

### RESUME FRANÇAIS-ANGLAIS

## Remerciements

Merci à Marie Launay de m'avoir pris comme stagiaire et d'avoir été si patiente avec moi.

Merci à l'unité AGROCLIM pour l'accueil, bien que le temps hors télétravail fût court.

## Introduction

### 1. Situation et enjeux dans le Monde

L'agriculture en France et dans le Monde fait aujourd'hui face à trois enjeux majeurs :

**La réduction de l'emploi des pesticides**, pilotée par le plan national de réduction des produits phytopharmaceutiques, Écophyto II, vise à réduire la dépendance aux produits phytosanitaires et à accroître la protection des populations. De nouvelles stratégies agricoles sont développées, comme la lutte intégrée contre les ravageurs, système associant différentes formes de lutte biologiques, culturales et chimiques mais en minimisant l'usage des pesticides de synthèse, tout en maintenant la viabilité économique des cultures concernées. Dans tous les cas, les stratégies devront limiter les dégâts engendrés par les bioagresseurs, expliquant 30 à 40% des pertes annuelles de production agricole à l'échelle mondiale (Oerke 2006).

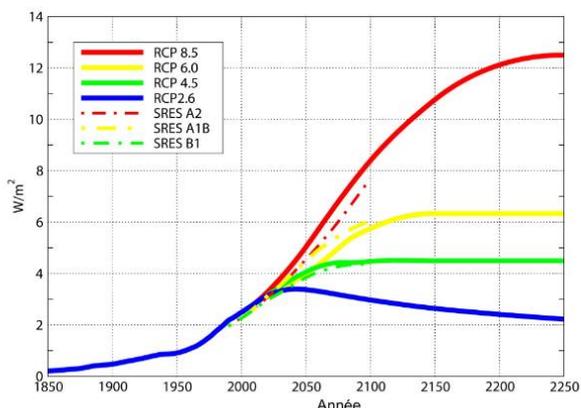
Par ailleurs, l'augmentation de la population mondiale (10 milliards de personnes d'ici 2050, source : FAO) menace **la sécurité alimentaire**<sup>1</sup>, notamment dans les régions les plus pauvres. L'Afrique sub-saharienne possède la plus forte proportion de population en insécurité alimentaire avec 26.8%, tandis que l'Asie du Sud comprend le plus grand nombre de personnes en insécurité alimentaire (FAO 2012, IPCC 2014). L'augmentation des rendements et la productivité dans ces régions sont donc requises alors même qu'elles restent en dessous de celles de nombreux pays développés (Godfray *et al.*, 2010 ; Flood., 2010).

**Le changement climatique** est enfin un troisième enjeu majeur pour l'agriculture. Le réchauffement résulte d'une augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, et en particulier du dioxyde de carbone. L'impact des modifications du climat est complexe : allongement ou raccourcissement des cycles de cultures selon les territoires et les espèces, introduction de nouvelles espèces dans les assolements (notamment dans les régions nordiques de l'hémisphère nord, ou au sud de l'hémisphère sud), augmentation ou diminution des rendements, modification de la qualité des aliments. Par exemple, le raccourcissement de la période de froid diminue la qualité nutritive des légumes pérennes et menace la vernalisation et la dormance des plantes ayant des besoins en froid (Leisner, 2020). L'élévation de température peut également avoir des conséquences contradictoires sur les plantes. Ainsi, l'augmentation de température nocturne diminue les rendements en Asie, mais elle augmente la surface arable au Nord des Etats-Unis (Brisson *et al.*, 2010). Les impacts du changement climatique en Asie et en Amérique du nord sont mitigés, mais en moyenne positifs en Amérique du Sud. L'Europe fait partie des endroits dont les rendements baissent le plus (Brisson *et al.*, 2010 ; Ray *et al.*, 2019). Dans le détail, le Sud de l'Europe centrale et l'Italie voient leurs rendements diminuer tandis que ces derniers augmentent au Royaume-Uni (Supit *et al.*, 2010). De nombreuses estimations par simulations à l'aide de modèles ont aussi été entreprises pour modéliser l'évolution des rendements. Les données climatiques futures utilisées dans les analyses prospectives sont fournies par des modèles climatiques, qui suivent des scénarios préétablis (Figure 1). Ces scénarios résultent du travail conjoint de sociologues, économistes et climatologues et représentent quatre concentrations finales en CO<sub>2</sub> atmosphérique en 2100, avec leurs trajectoires économiques propres (Synthèse. Les

---

<sup>1</sup> La FAO définit la sécurité alimentaire comme « l'accès physique, social et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive, permettant de satisfaire les besoins et préférences alimentaires pour mener une vie saine et active » (FAO, 1996)

scénarios du GIEC 2013). Les modèles agricoles utilisent ensuite les données sortantes des modèles climatiques.



**Figure 1.** Ensemble des scénarii RCP (« Representative Concentration Pathway ») développés jusqu'à aujourd'hui pour les rapports du GIEC. En ordonnée, le forçage radiatif anthropique en  $W/m^2$ . En tirets-pointillés les scénarios antérieurs à l'IPCC 2014, et en lignes continues les scénarios développés pour l'IPCC2014 (Mondon et Imbard, 2013).

Une majeure partie des simulations attribue au changement climatique une baisse de 2.5% par décennie du rendement de quatre cultures majeures (IPCC 2014). A l'échelle globale, beaucoup de travaux ont montré un fort effet négatif du changement climatique sur les rendements, notamment dans le cas du scénario d'émission de gaz à effet de serre le plus pessimiste (RCP 8.5), et pour les régions situées à de basses latitudes (Rosenzweig *et al.*, 2014 ; Challinor *et al.*, 2014). Les rendements du blé, du maïs et du riz augmentent en général pour les hautes latitudes et baissent pour les basses latitudes (Aggarwal *et al.*, 2019 ; Rosenzweig *et al.*, 2014 ; Deryng *et al.*, 2014). En Europe, il existe une disparité géographique. Le changement climatique devrait diminuer les rendements de quatre grandes cultures (betterave, blé, maïs et pomme de Terre) dans le Sud méditerranéen et augmenter ceux du nord de l'Europe. Les rendements du maïs diminueraient en moyenne de 11% dans le Sud, tandis qu'ils augmenteraient de 14% dans le Nord (Knox *et al.*, 2016). Les régions méditerranéennes et continentales de l'Europe sont les plus à risque en ce qui concerne de potentiels futures sécheresses et stress hydriques (Iglesias *et al.*, 2011).

Des adaptations comme, entre autres, l'utilisation de variétés génétiquement améliorées, de variétés à cycle plus court, ou encore l'optimisation des itinéraires agronomiques réduiraient les effets négatifs. Selon certains auteurs, ces adaptations permettraient de contrebalancer les effets du changement climatique de 7% (Rosenzweig *et al.*, 2014) jusqu'à compensation presque totale (Aggarwal *et al.*, 2019).

A l'échelle de la France, une étude prospective du climat au XXIème siècle (Ouzeau *et al.*, 2014), a montré que l'on pouvait s'attendre en 2050 à une augmentation de température moyenne entre 0.5 et 2°C en été avec un réchauffement plus élevé sur la côte méditerranéenne. A l'horizon 2100 les hausses de températures sont plus fortes entre 3.5°C et 5°C. Cette évolution s'accompagne également d'une augmentation de la fréquence et de la durée des vagues de chaleur, et des situations de sécheresse (Ouzeau *et al.*, 2014).

L'agriculture est donc face à un enjeu triple à l'échelle globale : nourrir une population croissante, en employant moins de pesticides alors que les ravageurs et maladies sont responsables de pertes notables de la production, dans un contexte de climat changeant accentuant les stress abiotiques sur de larges territoires agricoles.

## 2. Les modèles de cultures et le modèle STICS

Les modèles de cultures ont pour objectif de reproduire le fonctionnement des plantes cultivées, et sont basés sur la simplification du réel sous forme d'algorithmes. De manière générale, les modèles sont, par exemple, capables de prévoir un rendement moyen (Rötter *et al.*, 2011), mais ils ont plus de difficultés à prévoir la variabilité du rendement (Sanchez *et al.*, 2014). Ils restent des outils appropriés pour mesurer les conséquences du changement climatique, ou tester des adaptations d'itinéraires techniques au changement climatique. De nombreux modèles de cultures ont déjà été conçus, tels que SUCROS, EPIC ou encore DAISY (Morissette *et al.*, 2016). Parmi ceux-ci, le modèle STICS simule un système sol-plante-microclimat sous l'effet du climat et des itinéraires techniques sur un cycle cultural ou plusieurs cycles successifs. STICS est utilisé depuis plus d'une dizaine d'années dans des études d'impact du changement climatique (Brisson et Levrault, 2010), et plus récemment dans des études portant sur l'adaptation des systèmes agricoles au changement climatique (Brustel *et al.*, 2019), ou sur l'atténuation du changement climatique (<https://www.4p1000.org/fr>).

## 3. Le projet OPERATE et les simulations sur le futur de la pomme de terre

Le projet OPERATE (crOP disEase Response to climATE change adaptation) du métaprogramme AAFCC (Adaptation of Agriculture and Forest to Climate Change) a pour objectif d'identifier et de sélectionner les « meilleures » stratégies d'adaptation des cultures de blé, tournesol et pomme de terre face au changement climatique en France. Le travail consiste d'abord en l'inventaire de toutes les adaptations agronomiques envisagées par les différentes filières, face aux stress abiotiques majeurs qui s'annoncent dans le futur : stratégies d'évitement et de résilience. L'estimation des impacts de ces stratégies, en climat futur, sur les 3 cultures ciblées en termes de production, de préservation de l'environnement et de risque sanitaire, est réalisée à l'aide de différents modèles de cultures et modèles épidémiologiques. Enfin, l'analyse des performances de ces stratégies d'après les résultats des simulations, et à l'aide d'un arbre multicritères co-construit avec les acteurs des filières agricoles doit permettre de les hiérarchiser. Depuis le début du projet, l'inventaire des adaptations possibles a été réalisé pour les 3 cultures. Pour la pomme de terre, trois scénarios d'adaptation ont été construits. Le premier conserve les cycles de plantation actuels mais il ajoute une période d'irrigation lors de la phase critique d'élaboration du rendement, de manière à limiter les effets du stress hydrique. La phase critique correspond à l'initiation des tubercules pour les variétés dites de consommation (grenailles plus petites mais en nombre), et à la phase de grossissement des tubercules pour les variétés dites de transformation (tubercules plus gros, débouchés industriels). Il s'agit ici de préserver les rendements et les

calibres pour répondre aux exigences de stabilité des volumes et de qualité des débouchés. Un deuxième scénario envisage une culture plus résiliente sans irrigation, basée sur une variété avec un cycle très long, avec plantation précoce et récolte tardive, pour une densité de plantation plus faible que la normale. La variété pourrait ainsi tirer parti de la période qui suit la sécheresse et les fortes chaleurs, et reprendre sa croissance de septembre à fin octobre-début novembre. Enfin le troisième scénario consiste en une plantation aux environs de mi-juillet et une récolte mi-novembre avec des variétés à cycle court cultivées ainsi en contre-saison. Cette plantation de culture dérobée permettrait à l'agriculteur d'augmenter sa marge à l'hectare et à l'année.

Plusieurs études ont déjà été réalisées pour estimer quels seraient les **impacts du changement climatique** sur la production de la pomme de terre dans les décennies à venir. Quelques-unes ont été réalisées de manière expérimentale, d'autres à l'aide de simulations (« expérimentations dites « in silico » avec des modèles de cultures). Des expérimentations en OTC<sup>2</sup> et système FACE<sup>3</sup> ont ainsi montré que les rendements de pomme de terre augmentent avec la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique (Finnan *et al.*, 2005). D'autres études ont montré que l'élévation de température contrebalance l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> (Schapendonk *et al.*, 1995). A l'échelle mondiale, des études cette fois-ci réalisées à l'aide de modèles, indiquent tout d'abord des déplacements des aires de production de la pomme de terre vers le nord ou en altitude, dans des zones jusqu'alors impropres à la culture et devenant plus favorables, avec un risque de gel moindre (Raymundo *et al.*, 2018).

Des baisses de rendement sont également attendues, estimées de 6% à 32% à l'échelle globale selon que l'effet « fertilisant » du CO<sub>2</sub> sur la photosynthèse est pris en compte ou non (Hijmans *et al.*, 2003 ; Raymundo *et al.*, 2018). Des estimations à partir d'un ensemble de modèles concluent à une baisse de rendement de 4.6% par degré Celsius supplémentaire et par une hausse de 6% tous les 100 ppm de CO<sub>2</sub> supplémentaires. A l'échelle de l'Europe, les estimations indiquent des baisses de rendements en Méditerranée, une hausse pour la partie Nord-Ouest et une baisse pour la partie Est (Raymundo *et al.*, 2018 ; Supit *et al.*, 2012). Certains travaux concluent à des changements allant de +1% à -9% et insistent sur la prise en compte de l'azote comme facteur limitant afin d'obtenir des estimations fiables (Webber *et al.*, 2015).

Les **adaptations du système de culture au changement climatique** pourraient permettre de limiter les pertes en rendements (Hijmans *et al.*, 2003). Ainsi, le déplacement des dates de production et l'utilisation de variétés à cycle plus court ou au contraire plus long, permettrait de bénéficier des températures hivernales plus douces, et/ou d'éviter les périodes estivales plus sèches ou trop chaudes durant des phases de développement sensibles (Adavi *et al.*, 2015 ; Sanabria et Lhomme, 2013 ; Franke *et al.*, 2013). Dans le Nord de l'Europe, des simulations estiment à un mois l'avancement des plantations mais cette précocité pourrait entraîner une exposition des cultures au risque de gel (Pulatov *et al.*, 2015). L'amélioration génétique est une autre piste d'adaptation, les cultivars tolérants à la chaleur pourraient augmenter de 10% les rendements après 2050 dans les zones tropicales (Hijmans *et al.*, 2003),

---

<sup>2</sup> Open Top Chamber

<sup>3</sup> Free-Air Carbon dioxide Enrichment

via une meilleure régulation stomatique face aux pertes en eau et au stress thermique dans les feuilles, la production de molécules antioxydantes, un système racinaire renforcé, la capacité de maintenir la tubérisation malgré la sécheresse, et le développement selon un cycle court (George *et al.*, 2017). En Angleterre et en Irlande, les cultures ne bénéficiant que de l'eau de pluie auront à terme besoin d'irrigation (Daccache *et al.*, 2011 ; Holden et Brereton, 2006).

Si les simulations à une échelle mondiale donnent des rendements qui varient selon les régions et les latitudes, aucune estimation n'a été entreprise à l'échelle de l'hexagone jusqu'à présent, et aucune adaptation de l'itinéraire technique n'a été testée via la modélisation. L'objectif du travail présenté dans ce mémoire, est de répondre aux questions suivantes, à l'aide du modèle de culture STICS : Quels seront les impacts des stress abiotiques, causés par le changement climatique, sur la pomme de terre ? Quelles seront les performances des stratégies d'adaptation proposées à la fois en termes de production et de préservation de l'environnement ?

## **Matériel et méthodes**

### **1. Le modèle de cultures STICS**

Le modèle STICS est un modèle de culture développé depuis 1996 à l'INRA (Brisson *et al.*, 2009). Il peut être téléchargé sur demande sur le site de l'unité INRAE AGROCLIM (<https://www6.paca.inrae.fr/agroclim/>). STICS simule le fonctionnement des cultures en interaction avec leur environnement pédoclimatique et sous l'effet des pratiques culturales. Il s'agit d'un modèle mécaniste organisé en modules (Figure 2). Un premier groupe de modules simule l'évolution des parties aériennes de la plante, en particulier de la croissance en biomasse des organes aériens et de la croissance en surface des feuilles, de l'élaboration du rendement et du microclimat. Un autre simule la relation entre les racines et le sol (absorption d'eau et d'azote). Le sol est lui-même organisé en une série de couches horizontales qui possèdent chacune leurs contenus propres en azote minéral et organique et en eau. Entre ces couches s'organisent les transferts d'eau, d'azote minéral et organique. STICS est aussi un modèle généraliste et la présence de paramètres dans chacun des sous-modules permet de varier les possibilités et d'appliquer le modèle à une grande diversité de situations agronomiques. Le modèle a déjà été adapté à un grand nombre de cultures (Coucheney *et al.*, 2015). Le modèle simule des variables agricoles telles que le rendement et ses composantes (nombre de fruits, de graines, de tubercules et poids unitaire de ces organes), et des variables environnementales telles que le lessivage des nitrates, la teneur en eau du sol ou les émissions d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O). Les cultures sont représentées par une plante moyenne et le modèle peut simuler l'enchaînement de plusieurs cultures et intercultures.

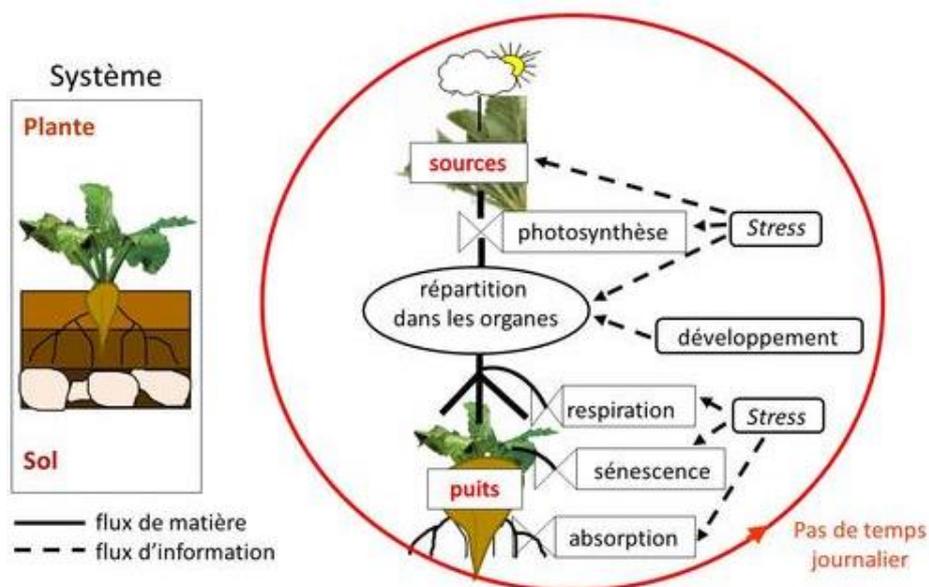


Figure 2. Description schématique du fonctionnement du modèle STICS. A droite, l'explication du fonctionnement des formalismes. Les assimilats produits par les « sources » sont utilisés par la suite par les différents organes de la plante, et ils sont enfin amenés aux organes de réserve. Les indices de stress peuvent par ailleurs diminuer la quantité d'assimilats produits, puis la quantité produite alloués aux différents organes.

Par ailleurs, STICS est capable de prendre en compte certains impacts du changement climatique : les effets du stress hydrique, des températures élevées qui limitent l'efficacité de la photosynthèse et le remplissage des organes de stockage (grains, fruits, tubercules...), et enfin l'effet de l'augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  sur la photosynthèse d'une part (effet « fertilisant ») et sur la conductance stomatique d'autre part (fermeture des stomates plus précoce). La sensibilité ou la tolérance à ces différents facteurs limitants varie entre espèces.

## 2. Protocole d'expérimentation in silico

### 2.1. Choix des stratégies d'adaptation

Les recherches auprès de la filière pomme de terre (Amato-Delavoipierre, R. & Drosne, L., 2019) ont permis d'identifier trois voies d'adaptation. La première est l'emploi de l'irrigation raisonnée pour les variétés de consommation et de transformation, l'eau étant apportée durant les phases critiques de sensibilité au stress hydrique, c'est-à-dire les phases d'initiation et de grossissement des tubercules, respectivement. Une seconde est la diminution de la densité de plantation et la prolongation du cycle cultural. La faible densité de plantation entraînerait une moindre demande et permettrait d'économiser l'eau durant la période estivale, tandis que la prolongation du cycle par l'utilisation de variétés à cycle long permettrait aux tubercules de profiter des pluies automnales à la suite des sécheresses d'été. Enfin la troisième est une culture en contre-saison qui permet d'éviter les périodes trop sèches et/ou trop chaudes. Ces trois stratégies ont été désignées respectivement IRR pour « irrigated », LAT pour « late » et Win pour « winter ».

Deux stratégies correspondant aux modes de conduite de référence ont également été fixées. La stratégie de référence appelée REF0 représente une culture non irriguée, mais avec les

mêmes paramètres de plantation et de variétés que pour IRR et LAT. La stratégie de référence irriguée appelée REFi représente une culture avec des dates de plantations et des variétés identiques à IRR et LAT, mais elle diffère de IRR par l'emploi d'une irrigation automatique. L'irrigation automatique est déclenchée par STICS lorsque l'indice de stress hydrique descend en deçà d'un seuil préalablement fixé, et calculé comme le ratio entre la transpiration réelle et la transpiration potentielle.

## 2.2. Conditions pédoclimatiques

Deux sites de simulation ont été choisis en France métropolitaine, correspondant à deux zones de production de pomme de terre, aux climats contrastés : Mons (Somme) et Bordeaux (Gironde). Les climats de ces deux sites sur 150 ans (1950 à 2100), ont été extraits pour les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 depuis la plateforme DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>), et ils sont issus des simulations sur le modèle climatique ALADIN. Les humidités relatives ont été reconstituées par F. Huard (INRAE AgroClim). A partir des simulations initiales réalisées sur 150 ans, nous avons regroupé les simulations de trois périodes représentatives du passé récent (« RP » de 1970 à 2000), du futur proche (« NF » de 2020 à 2050) et du futur lointain (« FF » de 2070 à 2100).

Trois types de sol ont été paramétrés, identiques entre les deux sites. Le sol Sc, d'une profondeur de 1.4 m, appelé « moyen », possède une réserve utile intermédiaire de 145 mm. Les sols S2 et S3 sont contrastés et possèdent respectivement une profondeur de 0.65 m et 2.15 m, et une réserve utile de 104 mm et 317 mm.

## 2.3. Itinéraires techniques

Une partie du paramétrage de l'itinéraire technique est commun à toutes les stratégies. Les variétés dites « de consommation » Agata (AGA) et Franceline (FRA), et les variétés dites « de transformation » Bintje (BIN) et Magnum (MAG) ont été paramétrées à partir d'expérimentations de terrain. L'hypothèse a été faite, d'un précédent cultural de type « céréales à pailles ». La fertilisation azotée a été fixée selon les expérimentations d'Arvalis des projets QUALTECH, CARPOSTRESS et EAUPTION+, à 220 kg d'azote par hectare sous forme d'ammonitrate le jour de la plantation. L'effeuillage n'a pas été simulé, et la maturation des tubercules déclenche la récolte lorsque leur poids sec cesse d'augmenter. La profondeur de plantation a été fixée à 15 cm afin d'imiter la plantation dans une butte.

Certains paramètres d'itinéraire technique varient au sein même des stratégies ou entre stratégies. Les dates de plantation au 3 janvier (0301), 15 janvier (1501), 1<sup>er</sup> février (0102), 15 février (1502), 1<sup>er</sup> mars (0103), 15 mars (1503) et 1<sup>er</sup> avril (0104) ont été choisies pour toutes les stratégies sauf WIN. Pour WIN, les dates ont été fixés aux 17 Juillet (1707), 1<sup>er</sup> août (0108), 15 août (1508), 1<sup>er</sup> septembre (0109), 15 septembre (1509) et 1<sup>er</sup> octobre (0110). Ces plages de dates sont des élargissements des plages de dates de plantation actuelles afin d'explorer la gamme des dates de plantation possibles dans le futur.

Les densités de plantation ont été fixées à 4.5 plants par m<sup>2</sup> pour les variétés de consommation et à 3.5 plants par m<sup>2</sup> pour les variétés de transformation, conformes à ce qui est couramment pratiqué. Dans le cas de la stratégie LAT, des densités plus faibles de 2, 2.5 et 3 plants par m<sup>2</sup> ont été paramétrées.

Concernant l'irrigation automatique pour la stratégie REFi, le seuil de déclenchement de l'irrigation a été fixé à 0.85 et il représente la valeur d'indice de stress hydrique en deçà de laquelle l'irrigation se déclenche. Les doses d'irrigation minimum et maximum ont respectivement été paramétrées à 10 mm et 40 mm afin de respecter les apports réels en France sur les cultures de pomme de terre. L'irrigation pour la stratégie IRR pour les variétés de consommation se décompose en six apports de 25 mm d'eau. Un premier apport 30 jours après le semis a été fixé afin de synchroniser cet apport avec la levée, et les autres ont été fixés à 7 jours d'intervalle. Pour les variétés de transformation, les mêmes irrigations sont apportées, mais elles ont été fixées 66 jours après le semis afin de synchroniser les apports avec la phase de grossissement des tubercules.

En raison des difficultés du modèle à correctement simuler la levée, et afin d'éviter des dates de levées simulées trop tardives, la date de levée a été forcée pour toutes les simulations, trente jours après la plantation.

#### 2.4. Périodes de simulation

Afin de permettre la comparaison des simulations entre elles, en particulier pour les sorties environnementales, au sein d'une même stratégie ou entre stratégies, les simulations ont été réalisées sur des périodes de longueurs identiques. Les simulations pour WIN se déroulent donc sur 365 jours du 15 Juillet au 14 juillet de l'année suivante, et les autres stratégies ont été simulées du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre.

#### 2.5. Initialisation des simulations

Les simulations ont démarré sur sol nu et leur teneur en eau dépend de la période. Pour les simulations autres que WIN, l'humidité du sol a été fixée comme étant égale à la capacité au champ afin de reproduire l'effet des pluies automnales et hivernales sur le sol. Pour WIN, l'humidité des deux premières et des deux dernières couches du sol ont respectivement été fixées à 50 % et 80% de la capacité au champ. Ces paramètres sont identiques à ceux utilisés pour le blé dans le cadre du projet OPERATE.

### 3. Analyse des résultats

Plusieurs axes d'analyse sont proposés :

- (i) d'une part nous cherchons à observer l'impact du changement climatique, en particulier sur le rendement, et nous comparons pour cela les résultats simulés sur les 3 périodes clés, RP, NF et FF
- (ii) d'autre part, nous cherchons à comparer les stratégies entre elles, en particulier en climat futur, selon leurs performances en termes de production, et sur leur impact environnemental. C'est pourquoi nous nous intéressons aux sorties du modèle suivante (Tableau 1):

Variable	Critère <sup>4</sup> (P ou E)	Description	Unité
mafruit	P	Biomasse des organes récoltés	t.ha <sup>-1</sup>
chargefruit	P	Nombre de tubercules récoltés	nombre.m <sup>-2</sup>
Qem_N2O	E	Quantité cumulée de protoxyde d'azote émise par le sol	kg.ha <sup>-1</sup>
Qles	E	Quantité cumulée de nitrate lessivée à la base du profil de sol	kg.ha <sup>-1</sup>
resmes	E	Quantité d'eau restante dans le sol à la récolte	mm
totir	E	Quantité d'eau apportée par irrigation	mm
Nvolat_from_plt	E	Quantité cumulée d'azote volatilisé entre le semis et la récolte	kg.ha <sup>-1</sup>
WUE	P	Efficienc e d'utilisation de l'eau	kg.ha <sup>-1</sup> .mm <sup>-1</sup>
STOCKnetC	E	Stockage de carbone estimé par le carbone organique fabriqué par photosynthèse durant le cycle cultural auquel on retranche le CO <sub>2</sub> respiré par la biomasse microbienne du sol	t.ha <sup>-1</sup>
Swfac1moy	P	Indice de stress hydrique moyen en période végétative	SU <sup>5</sup>
Swfac2moy	P	Indice de stress stomatique moyen pendant le remplissage des tubercules	SU
Inn1moy	P	Indice de nutrition azotée moyen en période végétative	SU
Inn2moy	P	Indice de nutrition azotée moyen pendant le remplissage des tubercules	SU
Etr_etm1moy	P	Ratio entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration maximale journalières	SU
Duree_cycle	P	Durée du cycle (entre semis et maturité)	jours
Nbjgel	P	Nombre de jours de gel actif sur la plante	jours

**Tableau 1.** Définitions des variables de sortie utilisées pour l'analyse des résultats. Les variables d'intérêts ont été utilisées afin de classer les résultats, et les variables illustratives ont été utilisées afin d'interpréter les résultats

Les analyses statistiques ont toutes été menées à l'aide du logiciel R sur l'interface Rstudio. Afin d'analyser les conséquences du changement climatique, les résultats ont été séparés en trois périodes distinctes de 30 ans pour ne pas introduire de biais dû à la grande variabilité climatique sur les courtes périodes de temps. Les moyennes pour chaque situation et chaque variable ont ensuite été calculées pour les trois périodes. Des analyses en composantes principales ont été effectuées avec les données des deux sites réunies pour les deux conduites de référence, et d'autres comprenant toutes les conduites ont été effectuées par la suite. Les valeurs propres cumulées des deux premières dimensions atteignant un minimum de 60 % pour toutes les analyses, les deux premières dimensions ont été retenues. Pour la séparation des variables, seules les variables possédant un coefficient de représentation supérieur à 0.3 ont été retenues. Concernant les tests de significativité, les valeurs des moyennes de toutes

<sup>4</sup> Les variables « P » ont trait à la production, tandis que les variables « E » sont liées à l'environnement.

<sup>5</sup> Sans Unité

les variables n'ont pas suivi une loi normale, et des tests non-paramétriques de Wilcoxon ont donc été effectués entre les périodes successives.

Conduite / Stratégie	Variétés	Date plantation	Densité plantation (plants/m <sup>2</sup> )	Irrigation	Nombre de situations <sup>6</sup> / site (chacune est simulée sur 150 ans de 1950 à 2100)
REFO	Consommation: Franceline, Agata	03/01, 15/01, 01/02, 15/02, 01/03, 15/03, 01/04	4.5	Non	84 situations (2 scénarii RCP x 3 sols x 2 variétés x 7 dates plantation)
	Transformation: Bintje, Magnum	Idem	3.5		84
REFi	Franceline, Agata	Idem REFO	4.5	Automatique	84
	Bintje, Magnum	Idem REFO	3.5		84
IRR	Franceline, Agata	Idem REFO	4.5	25 mm en 6 fois	84
	Bintje, Magnum	Idem REFO	3.5	25 mm en 6 fois	84
LAT	Bintje, Magnum	Idem REFO	2.0 2.5 3.0	Non	252
WIN	Franceline, Agata	15/07, 01/08, 15/08, 01/09, 15/09, 01/10	4.5	Non	72
	Bintje, Magnum	Idem	3.5		72

Tableau 2. Protocole des simulations sur le modèle STICS.

## **Résultats**

### **1. Impact du changement climatique sur les deux sites, pour les modes de conduite de référence REFO et REFi**

Evolution du rendement global (variable « mafruit ») et de sa composante nombre de tubercules (variable « chargefruit »)

Pour le site de Mons, les résultats obtenus montrent une augmentation de la moyenne des valeurs de mafruit de la période RP à la période FF pour la conduite REFO (Fig. 3A). Les tests de Wilcoxon montrent des différences significatives entre les périodes climatiques RP et NF, puis entre NF et FF. Dans le cas de REFi, les différences sont significatives entre RP et FF,

<sup>6</sup> Chaque situation correspond à un itinéraire technique donné (1 variété, une date et une densité de plantation, un protocole d'irrigation) simulé sur un sol et avec les fichiers climatiques d'un scénario RCP ; chaque situation est simulée sur 150 ans (sans prise en compte du cumul des effets climatiques), et sur 2 sites (Mons et Bordeaux). Ainsi pour REFO, sur chaque site on simule 84 situations pour les variétés de consommation en combinant 2 scénarii RCP x 3 sols x 2 variétés x 7 dates plantation.

mais pas entre NF et FF (Fig. 3B). Pour Bordeaux, les moyennes ne sont pas significativement différentes les unes des autres entre périodes, sauf entre les périodes RP et NF dans le cas de la conduite REF0. Concernant la variable chargefruit (Fig. 3C et D), les résultats montrent des écarts moins importants entre les deux sites, et ils indiquent une augmentation du nombre de tubercules dans le temps. Les valeurs pour chargefruit sont également concentrées pour une majeure partie entre 5 et 20 tubercules par m<sup>2</sup>, et une minorité de valeurs plus élevée atteint jusqu'à 80 tubercules par m<sup>2</sup>. Pour Mons, les tests statistiques indiquent, comme pour mafruit, des moyennes significativement différentes entre les périodes RP et NF, puis entre NF et FF pour la conduite REF0, mais la différence est significative uniquement entre RP et NF pour la conduite irriguée REFi. Pour Bordeaux, et dans les deux conduites les différences entre les moyennes sont significatives entre les périodes NF et FF mais elles ne sont pas significatives entre RP et NF.

Le changement climatique s'accompagne donc d'une augmentation du rendement (mafruit) pour le site de Mons, tandis que mafruit est plutôt constant pour le site de Bordeaux. La composante nombre de tubercules (chargefruit) augmente également sur les deux sites entre le passé récent (RP) et la fin du siècle (FF).

Les résultats des analyses en composante principale séparent les variables de sortie du modèle en 2 axes pour les deux conduites REF0 et REFi. Le plan principal explique au moins 60% de la variance dans le cas de la conduite REF0, et dans le cas de la conduite REFi. Le premier axe (axe 1) isole les variables environnementales (Tableau X). Pour REF0 il explique environ 50% de la variance de l'ensemble des données, et il en explique 40% pour REFi. Il relie dans les deux conduites les variables Qem\_N2O et resmes d'un côté, et Qles, resmes et STOCKnetC de l'autre. Le deuxième axe (axe 2) explique respectivement pour REF0 et REFi 30% et 25% de la variance, et représente principalement les variables de production (tableau X). Il relie en effet les variables mafruit, chargefruit et WUE pour la conduite REF0. Pour REFi, le second axe relie à ces trois dernières variables à une nouvelle variable totir, et il oppose à totir les indices de stress azoté inn2moy et hydrique swfac2moy.

Pour les deux conduites (Fig. 4A et B), la représentation des observations dans le plan principal montre une proximité entre les variables de sol (Sc, S2 et S3) et l'axe 1, et les coefficients de représentation indiquent une représentation satisfaisante opposant les sols S2 (faible réserve utile) et S3 (forte réserve utile) sur l'axe 1. La variable S2 contribue négativement à l'axe tandis que S3 y contribue positivement. Le sol S2 ayant une faible réserve utile, cela paraît cohérent qu'il soit associé à la variable représentant la quantité cumulée de nitrates lessivés en profondeur (Qles), et au stockage de CO<sub>2</sub> (STOCKnetC, d'autant plus élevé que la quantité de microfaune dans le sol susceptible d'émettre du CO<sub>2</sub> par respiration est faible). En revanche, le sol S3 avec une forte réserve utile, est associé à l'humidité du sol à la récolte (resmes) et aux émissions de N2O (Qem\_N2O) favorisées par l'humidité. Les variables relatives aux variétés, quant à elles, sont toujours proches de l'axe 2, mais les coefficients de représentation varient selon la conduite. Pour la conduite REF0, seule MAG (variété MAGNUM) est mal représentée sur l'axe 2. La variété FRA (Franceline) contribue positivement à l'axe, à grande distance du centre du plan, et elle est opposée par rapport à cet axe aux variétés BIN (Bintje) et AGA (Agata). Pour la conduite REFi, seules les variables AGA et MAG sont bien représentées.

Les deux variétés sont opposées par rapport à l'axe, et à distance l'une de l'autre, et AGA contribue négativement à l'axe tandis que MAG y contribue positivement.

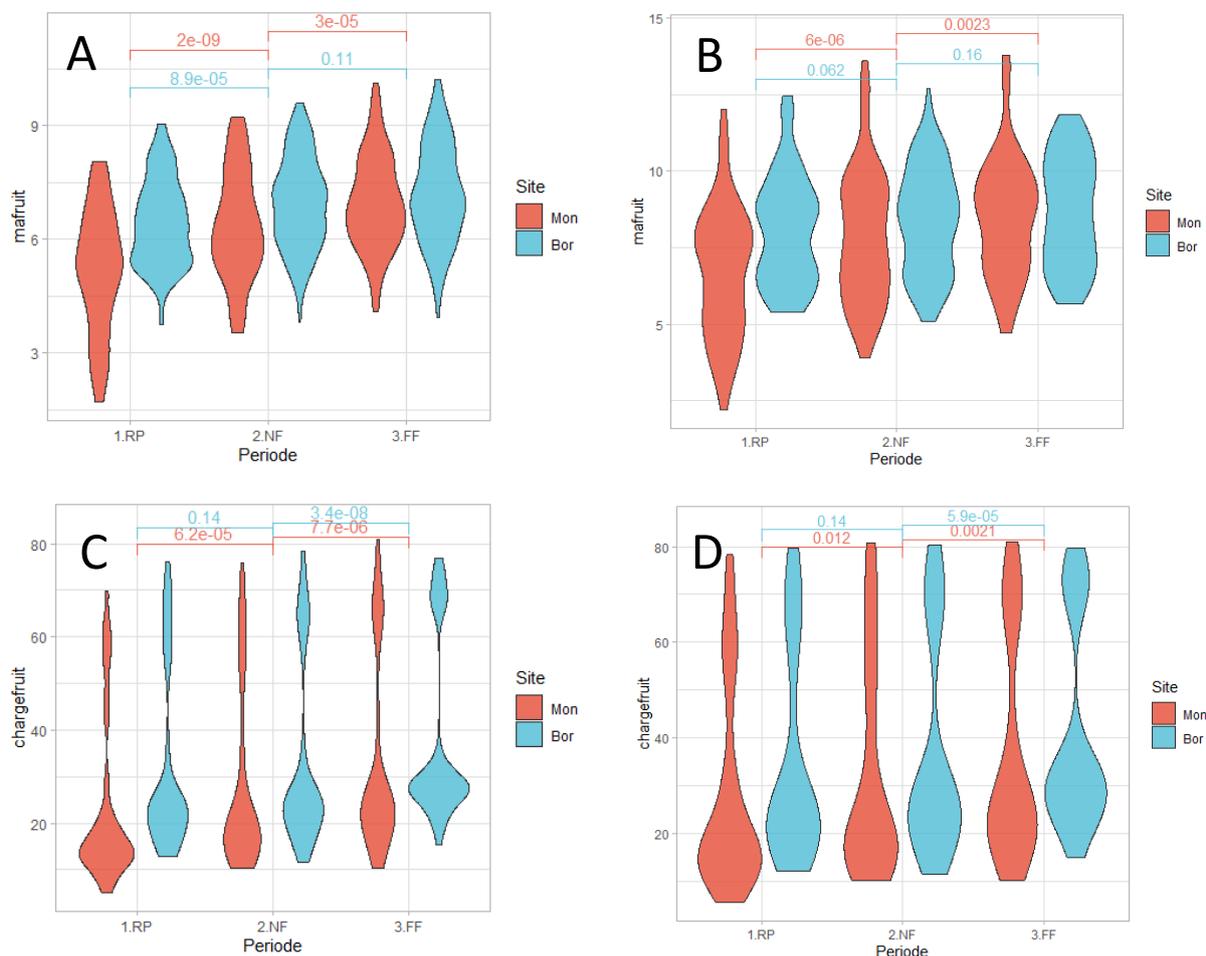
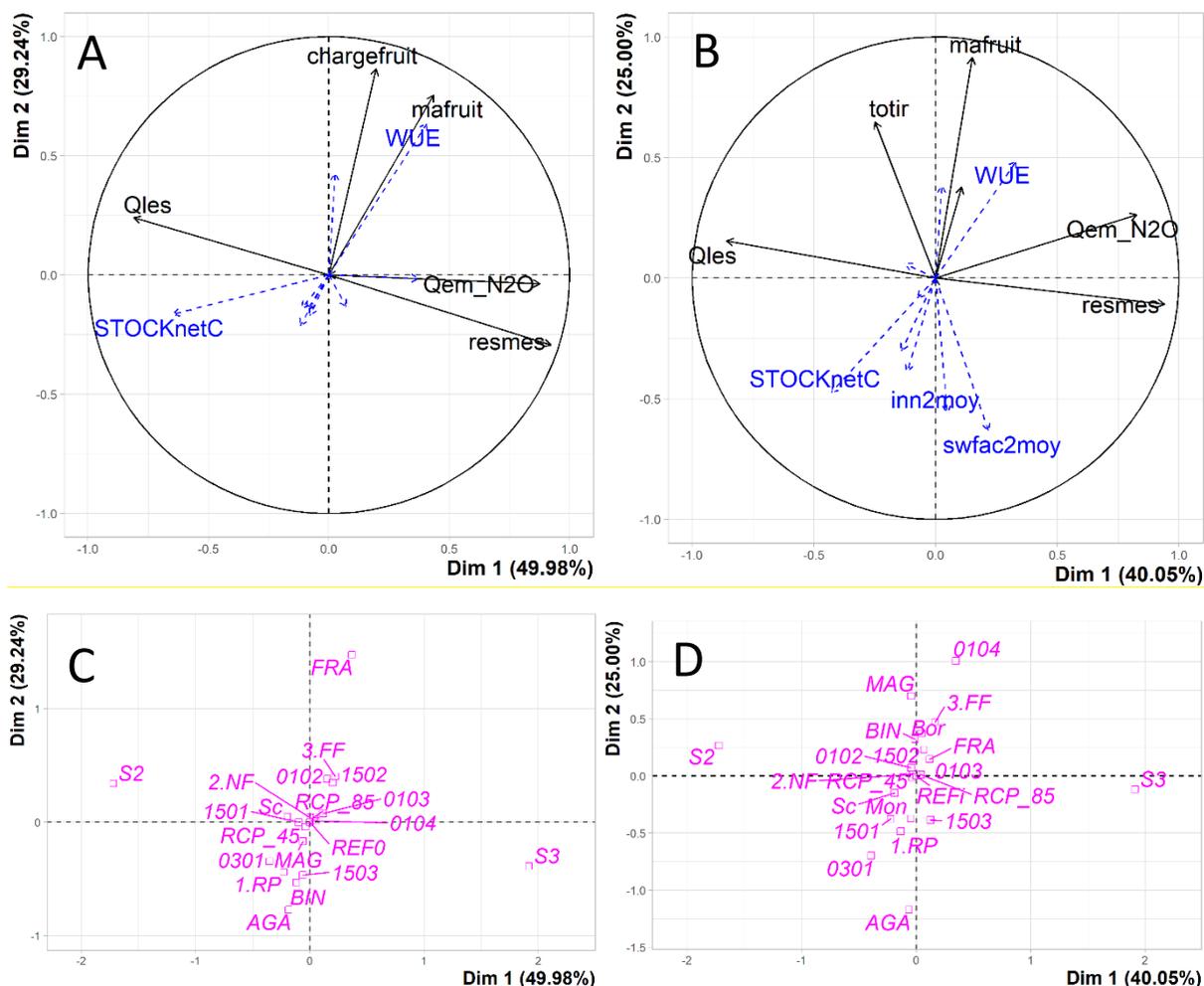


Figure 3. Distributions des valeurs des variables mafruit (t/ha) et chargefruit (nb tubercules/m<sup>2</sup>) en ordonnée en fonction de la période climatique en abscisse (RP : 1970-2000 ; NF : 2020-2050 ; FF : 2070-2100), respectivement pour les conduites REFO (A mafruit, C chargefruit) et REFi (B mafruit, D chargefruit). Les valeurs obtenues par les tests de Wilcoxon sont indiquées pour chaque site, entre périodes climatiques successives. Les points situés entre les graphes violons indiquent les moyennes pour chaque boîte, et la couleur pour chaque point va de pair avec le site correspondant.

Enfin, concernant les dates de semis, les représentations et les résultats varient grandement. Pour REFO seuls les coefficients de représentation pour l'axe 2 des dates du 0102, du 1502, et du 1503 sont satisfaisants. Les dates 0102 et 1502 contribuent positivement à l'axe tandis que la date 1503 y contribue négativement (Fig. 4A). Pour la conduite REFi (Fig. 4B), les dates sont toujours proches de l'axe 2, et seules les dates du 0102 et du 0103 sont mal représentées. Les dates du 1502 et du 0104 contribuent positivement à l'axe et les dates du 0301, du 1501 et du 1503 y contribuent négativement. Les dates du 0301 et du 0104 sont toutes les deux à grande distance de l'origine du plan principal. Les centres de gravité des scénarii RCP sont situés au centre des plans des observations, et ils sont très proches. Ils ne sont également jamais bien représentés.



**Figure 4.** Description des données en sortie de modèle par analyse en composantes principales. Les cercles de corrélations montrent une division des données en variables environnementales et de rendement, pour les conduites de référence REF0 (A) et REFi (B). Les variables principales sont représentées en noir, et les variables supplémentaires en bleu. Seuls les noms des variables dont le coefficient de représentation est supérieur à 0.3 sont visibles avec leurs vecteurs. Les graphiques d'individus montrent les associations des variables qualitatives avec les variables visibles sur les cercles de corrélations, pour REF0 (C) et REFi (D). Les contributions des axes 1 et 2 dans la variance totale des données sont visibles respectivement en abscisse et en ordonnée entre parenthèses de chaque figure.

L'analyse en composantes principales isole sur un 1<sup>er</sup> axe les variables environnementales, opposant les émissions de N<sub>2</sub>O et l'humidité dans le sol à la récolte d'une part, avec la quantité cumulée de nitrates lessivés et le stockage de CO<sub>2</sub> d'autre part. Les sols sont bien représentés sur cet axe. L'axe 2 représente les variables de production, c'est-à-dire le rendement, le nombre de tubercules par mètre carré et l'irrigation apportée. Les variétés et les dates de semis sont particulièrement bien représentées sur cet axe : les variétés Franceline et Magnum sont associées aux rendements élevés dans les conduites REF0 et REFi respectivement, ainsi que les dates de semis « intermédiaires » du mois de février, tandis que les dates de semis précoces (janvier) ou tardives (15 mars et avril) sont plutôt associées aux faibles rendements (hormis le 1<sup>er</sup> avril dans le cas de la conduite irriguée).

## 2. Résultats des stratégies d'adaptation IRR, LAT et WIN

Les trois analyses en composantes principales, réalisées pour les trois périodes climatiques RP, NF et FF, et réunissant les deux modes de conduites de référence REFO et REFi, et les trois stratégies d'adaptation IRR, LAT et WIN, ont fourni des résultats très similaires entre elles, pour les cercles de corrélation et les graphiques d'individus (Fig. Supp. 2). Les analyses pour chaque période ont séparé les données à l'identique des analyses multivariées sur REFi et REFO seules : le premier axe a isolé les variables d'intérêt environnementales resmes, Qem\_N2O et Qles et le second axe a isolé les variables d'intérêt relatives au rendement mafruit, chargefruit, ainsi que la variable totir. Les variables illustratives WUE et duree\_cycle possèdent également des coefficients de représentation satisfaisants et l'axe 2 a isolé celles-ci avec les variables du rendement pour le site de Bordeaux. Dans le cas de Mons, l'axe 1 isole en plus la variable illustrative STOCKnetC avec les variables environnementales. Les deux axes expliquent ensemble entre 60 et 65% de la variance des données pour les trois périodes.

Sur les graphiques d'individus relatifs aux stratégies d'adaptation (Fig. 5), le coefficient de représentation de la conduite REFO pour chaque période est très faible tandis que les quatre autres stratégies REFi, IRR, LAT et WIN sont bien représentées sur l'axe 2. Pour les trois périodes, les stratégies REFi et IRR contribuent positivement à l'axe, et LAT et WIN y contribuent négativement. Les centres de gravité des stratégies REFi et IRR sont à proximité l'un de l'autre et les centres de LAT et WIN le sont également, et les deux paires ainsi constituées sont à grande distance l'une de l'autre sur le plan principal. Pour Mons, la contribution de IRR par rapport à REFi à l'axe 2 est plus importante pour la période RP, mais la contribution de IRR diminue jusqu'à être moindre que celle de REFi pour la période FF. Pour Bordeaux, la contribution de REFi à l'axe 2 reste plus importante que celle de IRR à toutes les périodes, même si la différence entre les deux se réduit entre les périodes RP et FF.

Par ailleurs, les variables qualitatives relatives aux sols et aux variétés sont représentées de façon similaire à ce qui avait été obtenu pour les analyses multivariées de REFO et de REFi (Fig. Supp. 2). Seule la variété BIN n'est pas bien représentée sur l'axe 2 pour les trois périodes. La variété FRA, au contraire des variétés AGA et MAG, contribue positivement à l'axe 1 et elle est située à grande distance de celles-ci. Les coefficients de représentation et les résultats des dates de semis varient fortement (Fig. Supp. 2) mais parmi les dates bien représentées sur l'axe 2, les dates en contre saison contribuent toujours négativement à l'axe et inversement pour les dates conventionnelles de plantation, et ce, pour chaque période.

Les résultats indiquent donc une opposition selon l'axe 2 (relatif à la production) des stratégies irriguées associées aux rendements élevés et des stratégies non irriguées (LAT et WIN). L'impact du changement climatique sur le positionnement des stratégies est négligeable et la stratégie REFi dépasse en contribution IRR à la fin du siècle. Les dates de semis en contre-saison (WIN) sont également associées aux faibles rendements, tandis que la variété Franceline (FRA) est associée aux forts rendements. L'analyse ne permet pas de conclure à d'éventuelles relations entre les variables environnementales et les stratégies car ces dernières sont mal représentées sur l'axe 1.

## **Discussion**

## 1. Impact du changement climatique sur les récoltes

La pomme de terre est une culture très sensible au stress hydrique, mais elle est aussi sensible aux fortes températures (Brustel *et al.*, 2019). Le changement climatique pourrait donc avoir de graves conséquences pour la filière de la pomme de terre. Malgré ces craintes, les résultats pour les conduites de référence REF0 et REF<sub>i</sub> indiquent un effet bénéfique du

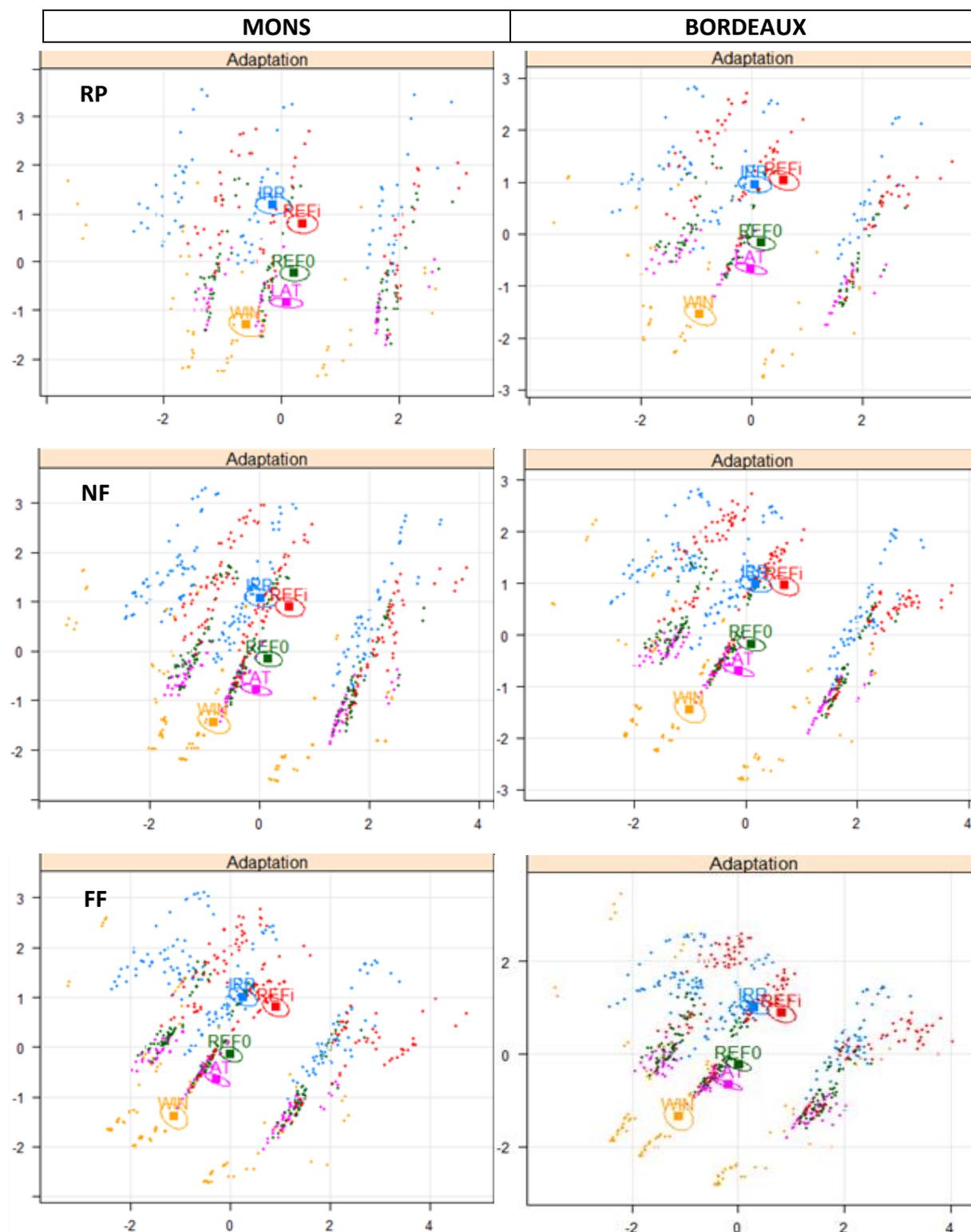


Figure 5. Graphiques d'individus issus des analyses en composantes principales pour le site de Mons (à Gauche) et Bordeaux (à droite), et pour les trois périodes RP (en haut), NF (au milieu) et FF (en bas). Ces graphiques analysent l'impact des différentes conduites, dont les trois stratégies d'adaptation au changement climatique, désignées chacune par une couleur propre. L'axe 1 est situé en abscisse et l'axe 2 en ordonnée sur chaque figure. Sur toutes les figures, les axes 1 et 2 contribuent ensemble à plus de 60% de la variance totale des données. Les points représentent les individus et les ellipses indiquent les centres de gravité des nuages de point pour chaque stratégie.

changement climatique sur le rendement Toutefois, ce sont les conduites avec irrigation (conduite de référence REFi et conduite d'adaptation IRR) qui s'avèrent de plus en plus intéressantes dans le futur comparativement aux conduites pluviales, confirmant l'intérêt de l'irrigation pour faire face aux événements plus fréquents et plus intenses de sécheresse. Par ailleurs, on a pu observer un effet bénéfique du changement climatique à court terme (dès le futur proche) sur les deux sites de Bordeaux et Mons, alors qu'à long terme (entre futur proche et futur lointain) le rendement n'augmente plus qu'à Mons. Des analyses plus approfondies pourraient permettre de voir si à Bordeaux l'effet positif du changement climatique n'est pas contrebalancé par l'effet négatif de la sécheresse en fin de siècle. Les sols Sc et S3 utilisés dans les simulations avec le modèle STICS pourraient également influencer les résultats positivement car ils possèdent des réserves utiles conséquentes, et ils pourraient ainsi rendre négligeables les périodes de sécheresse, et de stress hydrique pour les plantes. Des analyses ne comprenant que le sol S2 moins profond sont donc envisageables. Ces résultats indiquant des rendements constants ou en hausse sont concordants avec certaines études à plus grande échelle, prenant en compte la limitation en eau et en azote (Webber *et al.*, 2015, Raymundo *et al.*, 2018), ou ne prenant pas en compte ces deux limitations (Angulo *et al.*, 2013). La différence est que notre étude se limite à deux sites précis et ne porte pas à grande échelle.

Les résultats des analyses en composantes principales indiquent à chaque fois une forte corrélation entre les variables mafruit et WUE. Ce résultat découle logiquement de la dépendance de ces deux variables à la biomasse produite par photosynthèse. Pour les variables environnementales, Qles et resmes pourraient être corrélées négativement en raison d'une polarisation des deux variables selon les sols S2 et S3 (Fig. 4). Les sols S2, peu profonds et à faible réserve utile, entraîneraient des lessivages d'eau et donc de nitrates, plus facilement, la limite entraînant le lessivage étant plus rapidement atteinte dans le profil de sol. Les sols S3, profonds et à forte réserve utile, entraîneraient plus facilement un stockage plus important d'eau, et ils conduiraient ainsi à des valeurs pour resmes plus élevées. La présence d'eau dans le sol favorisant les processus de nitrification et dénitrification et donc l'émission de N<sub>2</sub>O, elle conduirait à l'isolement observé de Qem\_N2O par l'axe 1 entre les variables Qem\_N2O et resmes.

## 2. Evaluation des stratégies d'adaptation

Malgré les conséquences plutôt bénéfiques du changement climatique sur les rendements, l'analyse en composante principale indique pour chaque période et chaque site une association des stratégies LAT et WIN avec des rendements moindres. La stratégie de

référence REFi, au contraire, contribue positivement à l'axe 2 et elle est située à grande distance de LAT et WIN, montrant un net bénéfice comparée à ces dernières. Seule la stratégie IRR est associée avec des rendements élevés, mais sa contribution à l'axe 2 n'est la plus forte que dans le cas du futur proche (période NF), entre 2019 et 2050. Pour la période de fin de siècle FF, la stratégie de référence REFi devient donc supérieure pour les deux sites. La différence d'impact entre IRR et REFi diminue entre le passé récent (période RP) et le futur lointain (FF). Les résultats indiquent également une consommation en eau d'irrigation moindre pour REFi dans le cas des variétés de consommation (Fig. Supp. 3A), mais les quantités pour REFi sont supérieures pour les variétés de transformation (Fig. Supp. 3B). Dans le futur, la méthode d'irrigation raisonnée IRR est donc moins consommatrice d'eau pour les variétés de transformation (AGA et FRA), mais elle est au contraire moins performante d'un point de vue environnemental pour les variétés de consommation (BIN et MAG) (résultats des tests non paramétriques présentés dans le Tableau Supp.2). La conduite de l'irrigation raisonnée pourrait donc probablement être améliorée (en diminuant les quantités d'eau apportées) pour les variétés de consommation. Enfin, malgré ses résultats décevants en termes de production, la stratégie WIN ne doit cependant pas être écartée, en raison d'une valorisation possible de celle-ci afin de réduire les risques de contamination par le mildiou à Bordeaux (Kane, S., 2019). Ce type de culture en contre-saison pourrait également servir d'apport économique pour les agriculteurs intéressés, en tant que culture dérobée.

Les autres leviers agronomiques étudiés concernent les dates de semis et le choix variétal. Pour les variétés, la variété AGA est associée négativement avec le rendement dans les deux conduites de référence, et elle est donc la moins adaptée aux conditions futures. La variété MAG est fortement associée à un rendement positif dans la conduite irriguée, et elle est donc adaptée aux conditions futures avec irrigation. Une analyse statistique non descriptive des moyennes des rendements selon la variété pourrait permettre de passer outre les mauvaises représentations des variétés en composantes principales. Pour les dates de semis, les résultats sont très variables, et la performance ne peut être établie qu'au cas par cas.

### 3. Analyse approfondie des bas rendements de la stratégie WIN

L'analyse approfondie des résultats obtenus pour la stratégie WIN a conduit à la découverte de rendements globalement faibles, voire nuls. En décomposant le rendement (variable « mafruit ») en ses composantes « densité » (densité en nombre de plantes/m<sup>2</sup>), « p1000grain » (poids moyen des tubercules) et « chargefruit » (nombre de tubercules/m<sup>2</sup>, intégrant à la fois la densité de plantes par unité de surface et le nombre de tubercules par plante), nous avons cherché la ou les origines des bas rendements simulés. Les trois graphiques obtenus montrent tous les trois un impact partiel pour chaque variable sur les résultats de mafruit (Fig. 6A C et E).

Pour la variable densité, une analyse plus poussée a conduit à mettre en évidence l'absence de corrélation avec les deux variétés de consommation Agata et Franceline (Fig. Supp.1A), tandis qu'une corrélation a été mise en évidence sur une partie des valeurs des deux autres variétés de transformation Bintje et Magnum (Fig. 6A). En particulier, l'implication du nombre

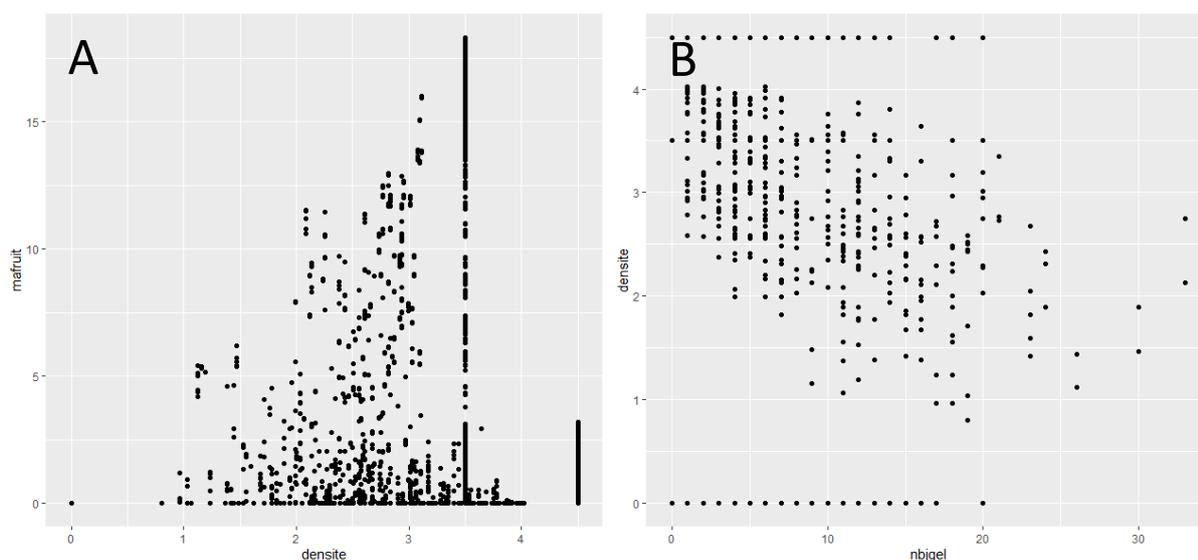
de jours de gel a été mis en évidence, avec une corrélation pour une partie des valeurs de densité (Fig. 6B).

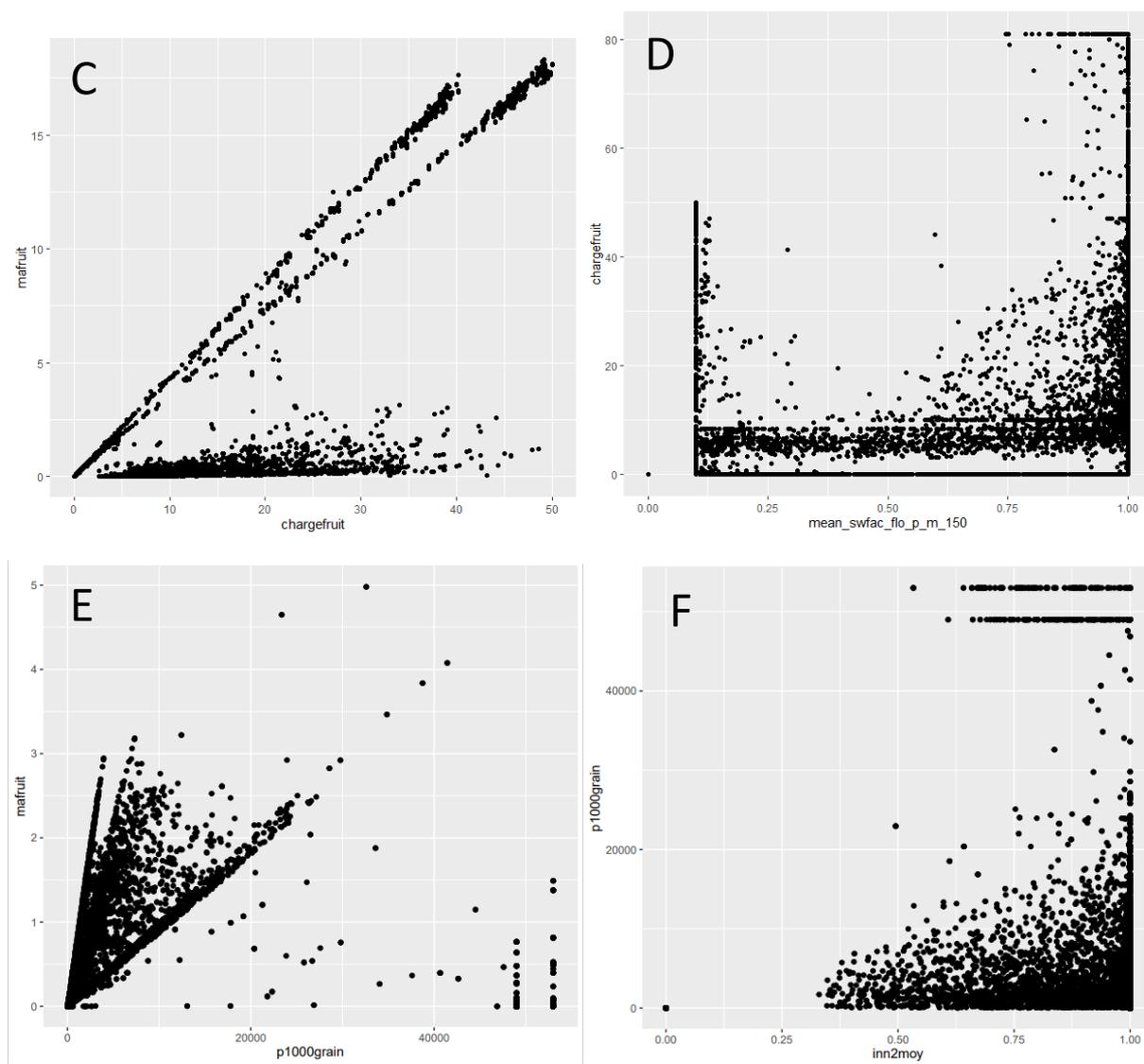
Par ailleurs, l'influence de la variable chargefruit sur les valeurs de mafruit obtenues en sortie a ensuite été examinée. Un effet du stress hydrique au moment de la floraison a été observé à travers la variable « mean\_swfac\_flo\_p\_m\_150 » et l'analyse à l'aide de graphiques a mis en évidence la présence d'une corrélation pour une partie des données entre les deux variables (Fig. 6D).

Enfin, les résultats ont montré l'influence des indices de stress azoté sur le poids des tubercules p1000grain (Fig. 6F). Les faibles valeurs des rendements obtenus avec la stratégie WIN, en comparaison des autres, ont donc pour origine de plus nombreux jours de gel en automne et en hiver, un stress hydrique plus important lors de la période critique d'initiation des tubercules, et de fortes pertes en azote des sols. Ces pertes en azote conduisent à un stress azoté conséquent qui diminue le poids des grains et par là le rendement.

#### 4. Simulations après désactivation du paramètre de fertilisation des plants par le CO<sub>2</sub>

Afin de mieux comprendre l'effet du changement climatique sur la production de pommes de terre, nous avons cherché à distinguer l'effet du réchauffement (augmentation de la température de l'air), de l'effet de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> qui a un effet « fertilisant » sur la photosynthèse. Ces deux effets propres au changement climatique sont simulés par STICS, mais il est possible de désactiver la prise en compte de la hausse en CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce qui a été effectué ici en simulant à nouveau les deux conduites de référence.



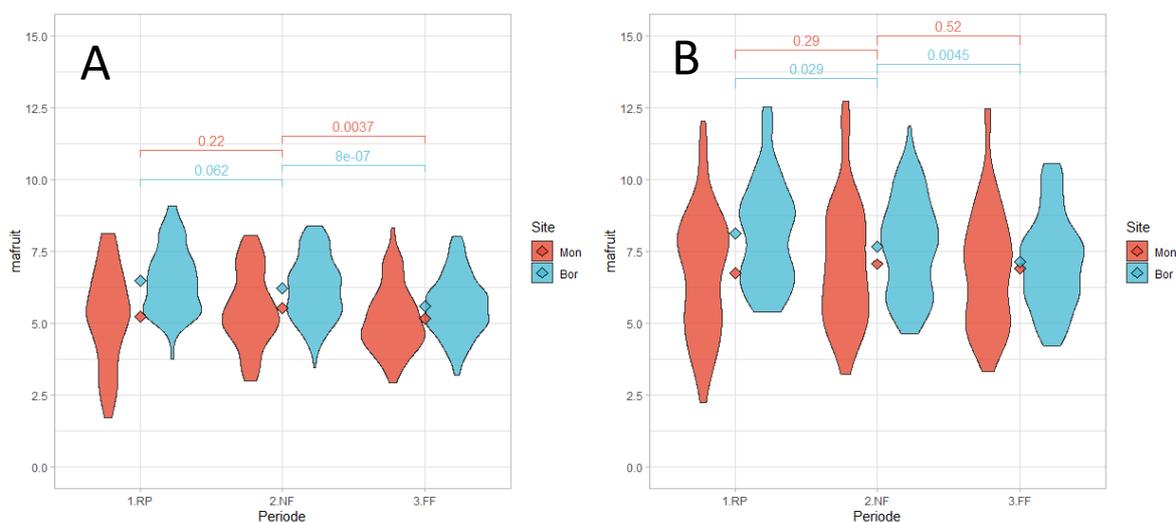


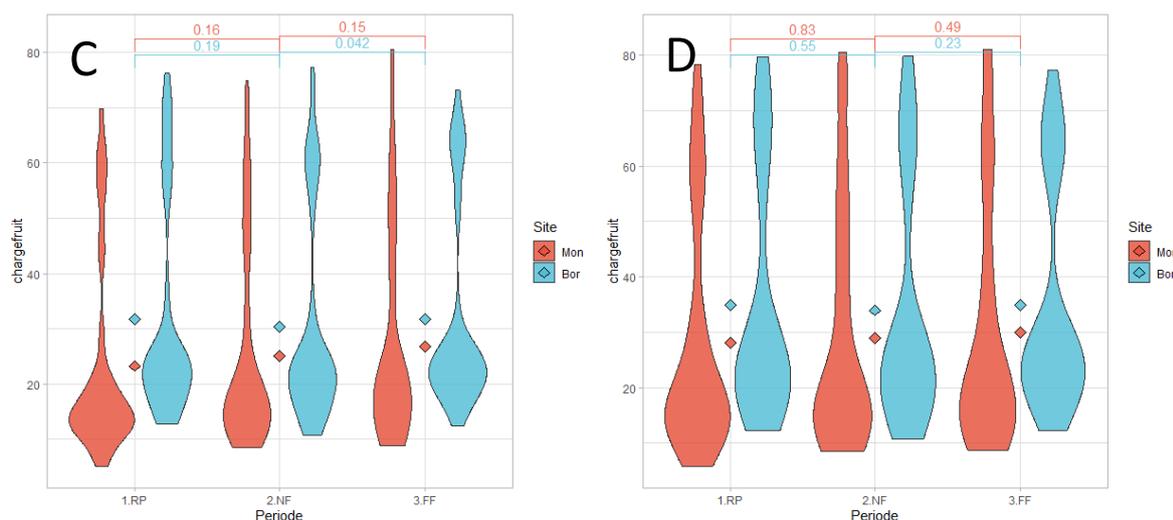
**Figure 6.** Influence de différents facteurs sur les variables composante mafruit. Des graphiques représentant mafruit en fonction de la densité (A), mafruit en fonction de chargefruit (C) et mafruit en fonction de p1000grain ont été tracés afin de déterminer l'influence de ses composantes. Puis des variables influençant ces composantes ont ensuite également été analysées graphiquement, afin de déterminer plus précisément l'origine des bas rendements : densité en fonction du nombre de jours de gel (B), chargefruit en fonction du stress hydrique pendant la période de floraison (D) et p1000grain en fonction de l'indice de stress azoté inn2moy (stress azoté moyen après le déclenchement du remplissage des tubercules) (F).

Les résultats ainsi obtenus (Fig. 7) ne montrent aucune différence significative entre les périodes pour les deux composantes du rendement mafruit et chargefruit. Seules les valeurs entre les période NF et FF pour REF0 à Bordeaux sont significativement différentes (Fig. 7B), mais dans le sens d'une baisse du rendement et non d'une hausse. Les analyses en composante principale, de leur côté, indiquent la même conclusion et elles n'associent plus la période FF avec un rendement positif, au contraire des simulations avec la fertilisation en place. Ces résultats sont cohérents avec la littérature et ils indiquent une fois de plus l'importance de la prise en compte du paramètre de fertilisation par le CO<sub>2</sub> (Raymundo *et al.*, 2018 ; Supit *et al.*, 2012). Cependant, certains processus écophysologiques pouvant avoir des

effets négatifs n'ont pas été pris en compte. C'est le cas de l'acclimatation au CO<sub>2</sub> par les plantes. Des plantes de cultures ayant grandi dans une atmosphère enrichie en CO<sub>2</sub>, ont vu leur taux maximum de carboxylation et leur taux de transport d'électrons réduits (Ainsworth et Rogers, 2007) par rapport aux plants contrôles s'étant développés avec la concentration en CO<sub>2</sub> ambiante. Cette réduction entraînerait une réduction du bénéfice de l'enrichissement en CO<sub>2</sub> sur la photosynthèse par la suite, et impacterait le rendement. La température et la hausse en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pourraient également réduire ou provoquer l'arrêt du remplissage des tubercules, selon la culture et le cultivar. D'une part, la hausse de la résistance stomatique augmente la température de la canopée et elle avance ainsi la senescence des feuilles (Magliulo *et al.*, 2003) D'autre part, des températures trop élevées ou trop basses peuvent provoquer l'arrêt du remplissage des tubercules (Ainsworth *et al.*, 2007). Ce paramètre arrêtant le remplissage est d'ailleurs bien présent dans STICS, mais il n'a pas été activé, faute de données sur le sujet.

Le changement climatique a donc pour effet d'augmenter le rendement, ou de le maintenir constant selon le modèle STICS. L'ajout d'irrigation automatique diminue la variabilité des rendements. Les sites de Bordeaux et Mons n'étant pas concernés par les plus fortes hausses de température et les plus fortes sécheresses, des simulations sur des sites plus impactés dans l'Est et le Sud de la France pourraient être entreprises. Des résultats provenant d'autres modèles climatiques pourraient également être utilisés. En effet, les simulations des différents modèles climatiques en France varient grandement dans leurs résultats, et le modèle ALADIN (ici utilisé) dans ses représentations des températures estivales est proche des valeurs élevées, comparativement au modèle WRF (Ouzeau *et al.*, 2014). L'inhibition du formalisme entraînant la fertilisation des plants par le CO<sub>2</sub> montre son importance dans la hausse et la constance des résultats des rendements. Cependant, le paramètre d'arrêt du remplissage des tubercules à partir d'une certaine température, pourrait avoir un effet négatif important. Il pourrait être pris en compte si des travaux le permettent dans de futures simulations. Enfin, certains travaux suggèrent une plus grande





**Figure 7.** Valeurs des variables mafruit (t/ha) et chargefruit (nb tubercules/m<sup>2</sup>) après désactivation du paramètre de fertilisation des plants par le CO<sub>2</sub>. Les valeurs des variables sont en ordonnée en fonction de la période climatique en abscisse (RP : 1970-2000 ; NF : 2020-2050 ; FF : 2070-2100), respectivement REFO (A) et REFi (B) pour mafruit, et REFO (C) et REFi (D) respectivement pour chargefruit. Les valeurs obtenues par les tests de Wilcoxon sont indiquées pour chaque site, entre périodes climatiques successives. Les points situés entre les graphes violons indiquent les moyennes pour chaque boîte, et la couleur pour chaque point va de pair avec le site correspondant.

précision des estimations simulées par rapport aux données observées en associant les sorties de plusieurs modèles (Fleisher *et al.*, 2017). Au-delà de la seule utilisation du modèle STICS, l'utilisation d'un ensemble de modèles pourrait donc être envisagée.

## Bibliographie

- ADAVI, Zohrab, MORADI, Rooholla, SAEIDNEJAD, Amir Hossein, TADAYON, Mahmoud Reza et MANSOURI, Hamed, 2018. Assessment of potato response to climate change and adaptation strategies. In : *Scientia Horticulturae*. janvier 2018. Vol. 228, p. 91-102. DOI [10.1016/j.scienta.2017.10.017](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.017).
- AGGARWAL, Pramod, VYAS, Shalika, THORNTON, Philip et CAMPBELL, Bruce M, 2019. How much does climate change add to the challenge of feeding the planet this century? In : *Environmental Research Letters*. 21 mars 2019. Vol. 14, n° 4, p. 043001. DOI [10.1088/1748-9326/aafa3e](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafa3e).
- AINSWORTH, Elizabeth A. et ROGERS, Alistair, 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions: Photosynthesis and stomatal conductance responses to rising [CO<sub>2</sub>]. In : *Plant, Cell & Environment*. mars 2007. Vol. 30, n° 3, p. 258-270. DOI [10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x).
- ANGULO, Carlos, RÖTTER, Reimund, LOCK, Reiner, ENDERS, Andreas, FRONZEK, Stefan et EWERT, Frank, 2013. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. mars 2013. Vol. 170, p. 32-46. DOI [10.1016/j.agrformet.2012.11.017](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.017).
- BRISSON, Nadine, GATE, Philippe, GOUACHE, David, CHARMET, Gilles, OURY, François-Xavier et HUARD, Frédéric, 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. In : *Field Crops Research*. octobre 2010. Vol. 119, n° 1, p. 201-212. DOI [10.1016/j.fcr.2010.07.012](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012).
- BRISSON, Nadine, LAUNAY, Marie, MARY, Bruno et BEAUDOIN, Nicolas, 2009. *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Quae. INRA Versailles : s.n. Update Sciences & Technologies. ISBN 978-2-7592-0169-3.
- BRISSON, Nadine et LEVRAULT, Frédéric, 2012. *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 : changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*. Angers : ADEME. ISBN 978-2-35838-278-6.
- BRUSTEL, Jean, DELAUNAY, Stella, FONTAINE, Mathilde, LAUGNER, Coralie, MASSIAS, Julien, ROBIN, Marie-Hélène et BANCAL, Marie-Odile, 2019. *Projet OPERATE- Identification des principales voies d'adaptation envisagées par les filières blé*,

*pomme de terre et tournesol pour contrer les impacts négatifs du changement climatique. Conséquences prévisibles sur la santé des cultures.* projet entreprise. S.I. INRA Toulouse.

CHALLINOR, A. J., WATSON, J., LOBELL, D. B., HOWDEN, S. M., SMITH, D. R. et CHHETRI, N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. In : *Nature Climate Change*. avril 2014. Vol. 4, n° 4, p. 287-291. DOI [10.1038/nclimate2153](https://doi.org/10.1038/nclimate2153).

COUCHENEY, Elsa, BUIS, Samuel, LAUNAY, Marie, CONSTANTIN, Julie, MARY, Bruno, GARCÍA DE CORTÁZAR-ATAURI, Iñaki, RIPOCHE, Dominique, BEAUDOIN, Nicolas, RUGET, Françoise, ANDRIANARISOA, Kasaina Sitraka, LE BAS, Christine, JUSTES, Eric et LÉONARD, Joël, 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. In : *Environmental Modelling & Software*. février 2015. Vol. 64, p. 177-190. DOI [10.1016/j.envsoft.2014.11.024](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.024).

DACCACHE, A., WEATHERHEAD, E.K., STALHAM, M.A. et KNOX, J.W., 2011. Impacts of climate change on irrigated potato production in a humid climate. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. décembre 2011. Vol. 151, n° 12, p. 1641-1653. DOI [10.1016/j.agrformet.2011.06.018](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.018).

DERYNG, Delphine, CONWAY, Declan, RAMANKUTTY, Navin, PRICE, Jeff et WARREN, Rachel, 2014. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. In : *Environmental Research Letters*. 1 mars 2014. Vol. 9, n° 3, p. 034011. DOI [10.1088/1748-9326/9/3/034011](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034011).

DOKKEN, David, [sans date]. 7 — Food Security and Food Production Systems. In : . p. 49.

FAO (éd.), 2012. *Investing in agriculture for a better future*. Rome : s.n. The state of food and agriculture, 2012. ISBN 978-92-5-107317-9.

FINNAN, J. M., DONNELLY, A., JONES, M. B. et BURKE, J. I., 2005. The Effect of Elevated Levels of Carbon Dioxide on Potato Crops: A Review. In : *Journal of Crop Improvement*. 6 juin 2005. Vol. 13, n° 1-2, p. 91-111. DOI [10.1300/J411v13n01\\_06](https://doi.org/10.1300/J411v13n01_06).

FLEISHER, David H., CONDORI, Bruno, QUIROZ, Roberto, ALVA, Ashok, ASSENG, Senthold, BARREDA, Carolina, BINDI, Marco, BOOTE, Kenneth J., FERRISE, Roberto, FRANKE, Angelinus C., GOVINDAKRISHNAN, Panamanna M., HARAHAGAZWE, Dieudonne, HOOGENBOOM, Gerrit, NARESH KUMAR, Soora, MERANTE, Paolo, NENDEL, Claas, OLESEN, Jorgen E., PARKER, Phillip S., RAES, Dirk, RAYMUNDO, Rubi, RUANE, Alex C., STOCKLE, Claudio, SUPIT, Iwan, VANUYTRECHT, Eline, WOLF, Joost et WOLI, Prem, 2017. A potato model intercomparison across varying climates and productivity levels. In : *Global Change Biology*. mars 2017. Vol. 23, n° 3, p. 1258-1281. DOI [10.1111/gcb.13411](https://doi.org/10.1111/gcb.13411).

FLOOD, Julie, 2010. The importance of plant health to food security. In : *Food Security*. septembre 2010. Vol. 2, n° 3, p. 215-231. DOI [10.1007/s12571-010-0072-5](https://doi.org/10.1007/s12571-010-0072-5).

FRANKE, A. C., HAVERKORT, A. J. et STEYN, J. M., 2013. Climate Change and Potato Production in Contrasting South African Agro-Ecosystems 2. Assessing Risks and Opportunities of Adaptation Strategies. In : *Potato Research*. mars 2013. Vol. 56, n° 1, p. 51-66. DOI [10.1007/s11540-013-9229-x](https://doi.org/10.1007/s11540-013-9229-x).

GEORGE, Timothy S., TAYLOR, Mark A., DODD, Ian C. et WHITE, Philip J., 2017. Climate Change and Consequences for Potato Production: a Review of Tolerance to Emerging Abiotic Stress. In : *Potato Research*. décembre 2017. Vol. 60, n° 3-4, p. 239-268. DOI [10.1007/s11540-018-9366-3](https://doi.org/10.1007/s11540-018-9366-3).

GODFRAY, H. C. J., BEDDINGTON, J. R., CRUTE, I. R., HADDAD, L., LAWRENCE, D., MUIR, J. F., PRETTY, J., ROBINSON, S., THOMAS, S. M. et TOULMIN, C., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. In : *Science*. 12 février 2010. Vol. 327, n° 5967, p. 812-818. DOI [10.1126/science.1185383](https://doi.org/10.1126/science.1185383).

HIJMANS, Robert J., 2003. The effect of climate change on global potato production. In : *American Journal of Potato Research*. juillet 2003. Vol. 80, n° 4, p. 271-279. DOI [10.1007/BF02855363](https://doi.org/10.1007/BF02855363).

HOLDEN, Nicholas M. et BRERETON, Anthony J., 2006. Adaptation of water and nitrogen management of spring barley and potato as a response to possible climate change in Ireland. In : *Agricultural Water Management*. avril 2006. Vol. 82, n° 3, p. 297-317. DOI [10.1016/j.agwat.2005.07.026](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.026).

IGLESIAS, Ana, QUIROGA, Sonia, MONEO, Marta et GARROTE, Luis, 2012. From climate change impacts to the development of adaptation strategies: Challenges for agriculture in Europe. In : *Climatic Change*. mai 2012. Vol. 112, n° 1, p. 143-168. DOI [10.1007/s10584-011-0344-x](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0344-x).

KANE, Serigne Magueye, 2019. *Contribution à l'étude des effets du changement climatique sur l'évolution du mildiou de la pomme de terre en France de 1950 à 2100 et proposition de voie d'adaptation*. Mémoire de fin d'études. Arvalis - Institut du Végétal Station Expérimentale de Boigneville. Université Paris-Sud.

KNOX, Jerry, DACCACHE, Andre, HESS, Tim et HARO, David, 2016. Meta-analysis of climate impacts and uncertainty on crop yields in Europe. In : *Environmental Research Letters*. 1 novembre 2016. Vol. 11, n° 11, p. 113004. DOI [10.1088/1748-9326/11/11/113004](https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/113004).

- LEISNER, Courtney P., 2020. Review: Climate change impacts on food security- focus on perennial cropping systems and nutritional value. In : *Plant Science*. avril 2020. Vol. 293, p. 110412. DOI [10.1016/j.plantsci.2020.110412](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110412).
- MAGLIULO, V, BINDI, M et RANA, G, 2003. Water use of irrigated potato (*Solanum tuberosum* L.) grown under free air carbon dioxide enrichment in central Italy. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. juillet 2003. Vol. 97, n° 1-3, p. 65-80. DOI [10.1016/S0167-8809\(03\)00135-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00135-X).
- MONDON, Sylvain et IMBARD, Maurice, 2013. Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC. In : . septembre 2013.
- MORISSETTE, René, JÉGO, Guillaume, BÉLANGER, Gilles, CAMBOURIS, Athyna N., NYIRANEZA, Judith et ZEBARTH, Bernie J., 2016. Simulating Potato Growth and Nitrogen Uptake in Eastern Canada with the STICS Model. In : *Agronomy Journal*. septembre 2016. Vol. 108, n° 5, p. 1853-1868. DOI [10.2134/agronj2016.02.0112](https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0112).
- OERKE, E.-C., 2006. Crop losses to pests. In : *The Journal of Agricultural Science*. février 2006. Vol. 144, n° 1, p. 31-43. DOI [10.1017/S0021859605005708](https://doi.org/10.1017/S0021859605005708).
- OUZEAU, G., DÉQUÉ, M., JOUINI, M., PLANTON, S., VAUTARD, R. et JOUZEL, Jean, 2014. Volume 4 : *Le climat de la France au XXIe siècle -Volume 4: Scénarios régionalisés édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer* [en ligne]. S.I. Direction générale de l'Énergie et du Climat. Disponible à l'adresse : <file:///D:/T%C3%A9nergie%20et%20du%20Climat/chargements/news-22612-onerc-climat-france.pdf>.
- PULATOV, Bakhtiyor, LINDERSON, Maj-Lena, HALL, Karin et JÖNSSON, Anna Maria, 2015. Modeling climate change impact on potato crop phenology, and risk of frost damage and heat stress in northern Europe. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. décembre 2015. Vol. 214-215, p. 281-292. DOI [10.1016/j.agrformet.2015.08.266](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.266).
- RAY, Deepak K., WEST, Paul C., CLARK, Michael, GERBER, James S., PRISHCHEPOV, Alexander V. et CHATTERJEE, Snigdhanu, 2019. Climate change has likely already affected global food production. In : JUNG, Young Hoon (éd.), *PLOS ONE*. 31 mai 2019. Vol. 14, n° 5, p. e0217148. DOI [10.1371/journal.pone.0217148](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148).
- RAYMUNDO, Rubí, ASSENG, Senthold, ROBERTSON, Richard, PETAOKOS, Athanasios, HOOGENBOOM, Gerrit, QUIROZ, Roberto, HAREAU, Guy et WOLF, Joost, 2018. Climate change impact on global potato production. In : *European Journal of Agronomy*. octobre 2018. Vol. 100, p. 87-98. DOI [10.1016/j.eja.2017.11.008](https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.008).
- ROSENZWEIG, Cynthia, ELLIOTT, Joshua, DERYNG, Delphine, RUANE, Alex C., MÜLLER, Christoph, ARNETH, Almut, BOOTE, Kenneth J., FOLBERTH, Christian, GLOTTER, Michael, KHABAROV, Nikolay, NEUMANN, Kathleen, PIONTEK, Franziska, PUGH, Thomas A. M., SCHMID, Erwin, STEHFEST, Elke, YANG, Hong et JONES, James W., 2014. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 4 mars 2014. Vol. 111, n° 9, p. 3268-3273. DOI [10.1073/pnas.1222463110](https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110).
- RÖTTER, R.P., PALOSUO, T., PIRTIOJA, N.K., DUBROVSKY, M., SALO, T., FRONZEK, S., AIKASALO, R., TRNKA, M., RISTOLAINEN, A. et CARTER, T.R., 2011. What would happen to barley production in Finland if global warming exceeded 4°C? A model-based assessment. In : *European Journal of Agronomy*. novembre 2011. Vol. 35, n° 4, p. 205-214. DOI [10.1016/j.eja.2011.06.003](https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.06.003).
- SANABRIA, J. et LHOMME, J. P., 2013. Climate change and potato cropping in the Peruvian Altiplano. In : *Theoretical and Applied Climatology*. mai 2013. Vol. 112, n° 3-4, p. 683-695. DOI [10.1007/s00704-012-0764-1](https://doi.org/10.1007/s00704-012-0764-1).
- SÁNCHEZ, Berta, RASMUSSEN, Anton et PORTER, John R, 2014. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. In : *Global Change Biology*. février 2014. Vol. 20, n° 2, p. 408-417. DOI [10.1111/gcb.12389](https://doi.org/10.1111/gcb.12389).
- SCHAPENDONK, A. H. C. M., POT, C. S. et GOUDRIAAN, J., 1995. Simulated effects of elevated carbon dioxide concentration and temperature on the productivity of potato: Interaction with Cultivar Differences for Earliness. In : HAVERKORT, A. J. et MACKERRON, D. K. L. (éd.), *Potato Ecology And modelling of crops under conditions limiting growth* [en ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands. Current Issues in Production Ecology. p. 101-113. [Consulté le 18 août 2020]. ISBN 978-94-010-4028-0. Disponible à l'adresse : [http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-0051-9\\_7](http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-0051-9_7).
- SUPIT, I., VAN DIEPEN, C.A., DE WIT, A.J.W., KABAT, P., BARUTH, B. et LUDWIG, F., 2010. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. In : *Agricultural Systems*. novembre 2010. Vol. 103, n° 9, p. 683-694. DOI [10.1016/j.agsy.2010.08.009](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.08.009).
- SUPIT, I., VAN DIEPEN, C.A., DE WIT, A.J.W., WOLF, J., KABAT, P., BARUTH, B. et LUDWIG, F., 2012. Assessing climate change effects on European crop yields using the Crop Growth Monitoring System and a weather generator. In : *Agricultural and Forest Meteorology*. octobre 2012. Vol. 164, p. 96-111. DOI [10.1016/j.agrformet.2012.05.005](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.005).
- WEBBER, Heidi, ZHAO, Gang, WOLF, Joost, BRITZ, Wolfgang, VRIES, Wim de, GAISER, Thomas, HOFFMANN, Holger et EWERT, Frank, 2015. Climate change impacts on European crop yields: Do we need to consider nitrogen limitation? In : *European Journal of Agronomy*. novembre 2015. Vol. 71, p. 123-134. DOI [10.1016/j.eja.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.002).

## Résumé Français-Anglais

Les conséquences du changement climatique sur les rendements de la pomme de terre ont déjà été estimées à l'échelle de l'Europe, mais jamais à l'échelle de la France. Des simulations à l'aide du modèle de cultures STICS et des prévisions climatiques du modèle ALADIN ont donc été effectuées pour deux sites de production en France (Nord et Sud-ouest). Les performances de différents itinéraires techniques, correspondant à des références actuelles ou des adaptations possibles, ont également été analysées. Les résultats montrent une continuité, voire une hausse des rendements dans le futur, en particulier dans le nord. Les trois stratégies d'adaptation testées n'ont pas présenté d'avantage significatif en termes de production dans le futur, par rapport à la conduite de référence irriguée. Cependant, l'adaptation mettant en œuvre une irrigation raisonnée s'est montrée plus intéressante d'un point de vue environnemental car moins consommatrice d'eau. Pour les deux variétés dites « de transformation ». Enfin, la désactivation de la fertilisation des plants par le CO<sub>2</sub> dans le modèle met en évidence l'influence primordiale de l'enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sur la photosynthèse et son impact sur les hausses de rendement prédites.

The consequences of climate change on potato yields have already been estimated on a European scale, but never on the scale of France. Simulations using the STICS crop model and the ALADIN model climate predictions were therefore carried out for two production sites in France (North and South-West). The performance of different technical itineraries, corresponding to current references or possible adaptations, were also analysed. The results show a continuity or even an increase in yields in the future, particularly in the north. The three adaptation strategies tested did not present any significant advantage in terms of production in the future, compared to the irrigated reference conduct. However, the adaptation using integrated irrigation proved to be more interesting from an environmental point of view because it consumes less water for the two so-called "processing" varieties. Finally, the deactivation of plant fertilization by CO<sub>2</sub> in the model highlights the primary influence of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on photosynthesis and its impact on the predicted yield increases.

## ANNEXES

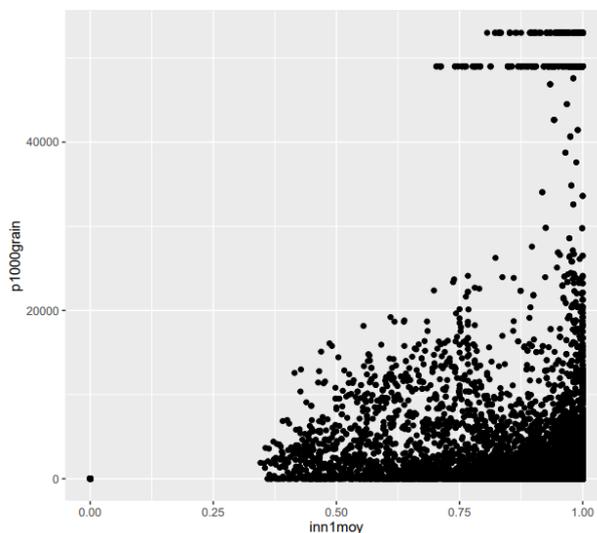
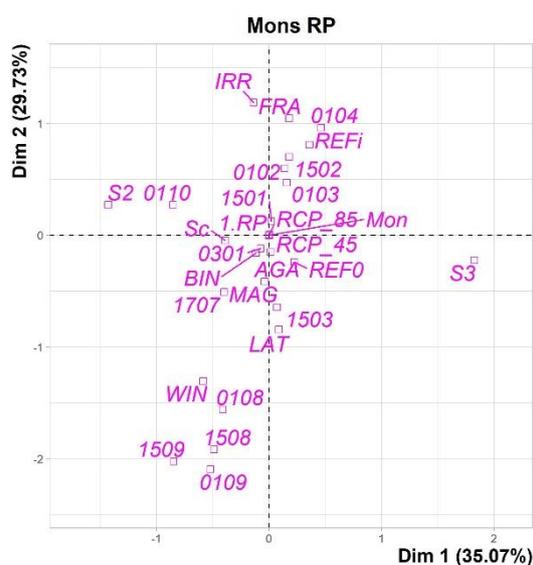
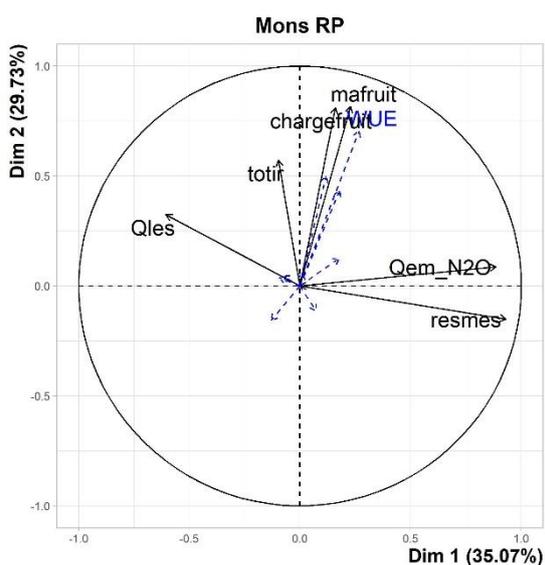
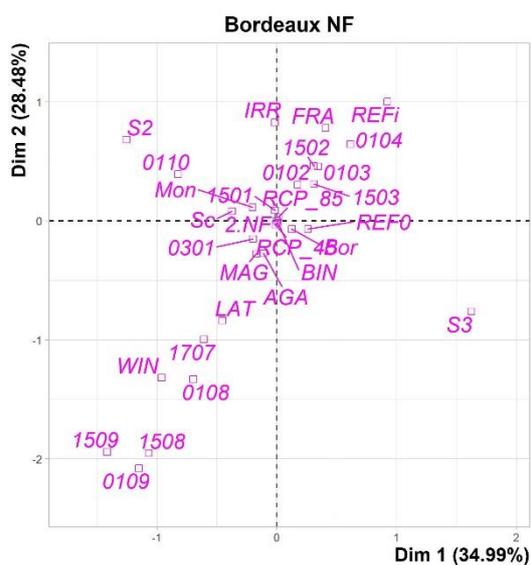
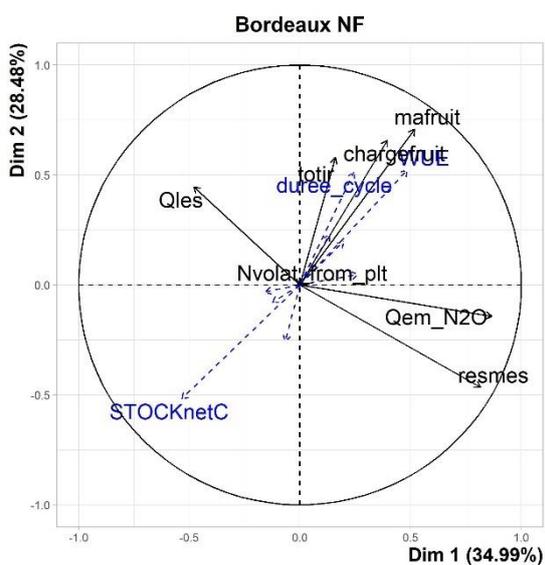
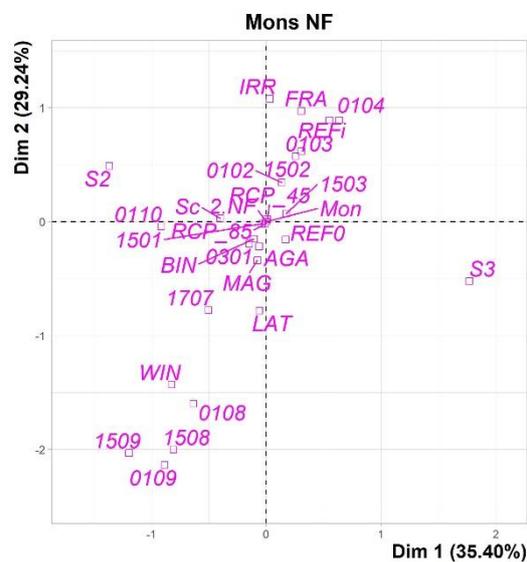
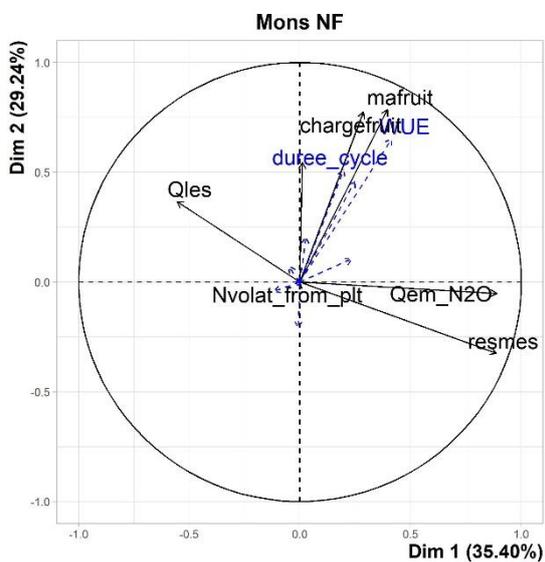
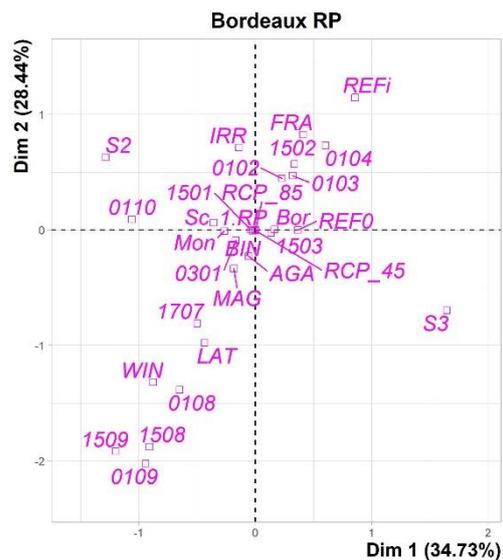
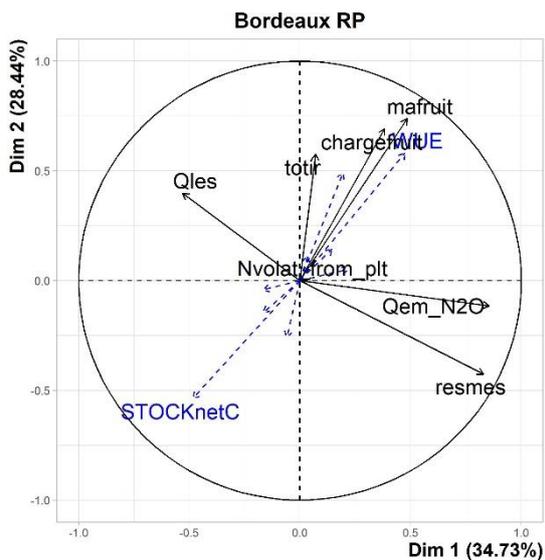
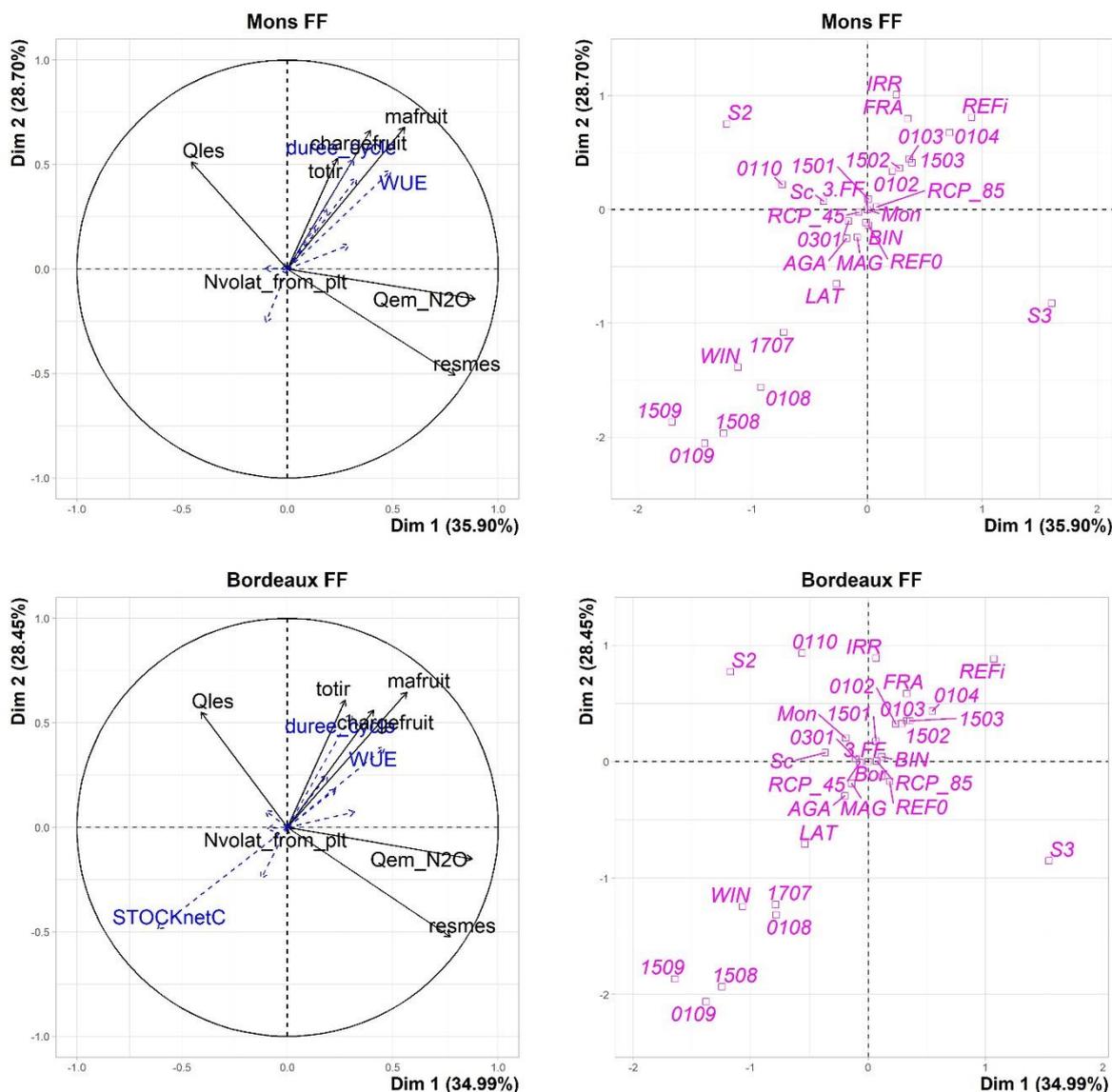


Figure Supplémentaire 1. Graphique montrant la présence d'une corrélation pour une partie des points entre les variables p1000grain en ordonnée et le stress azoté inn1moy en abscisse (stress survenant avant le démarrage du remplissage des tubercules), dans le cas de la stratégie WIN.







**Figure Supplémentaire 2.** Description des données par analyse en composantes principales, et ce pour chaque période (RP, NF et FF) en regroupant toutes les stratégies pour les sites de Mons et Bordeaux. Les cercles de corrélations montrent une division des données en variables environnementales et de rendement. Les variables principales sont représentées en noir, et les variables supplémentaires en bleu. Seuls les noms des variables dont le coefficient de représentation est supérieur à 0.3 sont visibles avec leurs vecteurs. Les graphiques d'individus montrent les associations des variables qualitatives avec les variables visibles sur les cercles de corrélations. Les contributions des axes 1 et 2 dans la variance totale des données sont visibles respectivement en abscisse et en ordonnée entre parenthèses de chaque figure. Le site et la période analysés sur la figure sont indiqués par les titres au-dessus de ces mêmes figures.

Tableau Supplémentaire 2. Résultats des tests appariés de Wilcoxon entre les méthodes d'irrigation automatique REFi et non-automatique IRR. Les p. values obtenues ont été calculées d'après les quantités totales d'eau apportées par irrigation pour les deux conduites. Les tests ont été séparés entre les variétés dites de consommation (AGA et FRA), et de transformation (BIN et MAG), et ils ont été effectués pour chaque période (RP= passé récent, NF= futur proche, FF=futur lointain).

Période	Variétés de consommation	Variétés de transformation
RP	$P < 2.2 \times 10^{-16}$	$p = 1.578 \times 10^{-7}$
NF	$P < 2.2 \times 10^{-16}$	$P < 2.2 \times 10^{-16}$
FF	$P < 2.2 \times 10^{-16}$	$P < 2.2 \times 10^{-16}$

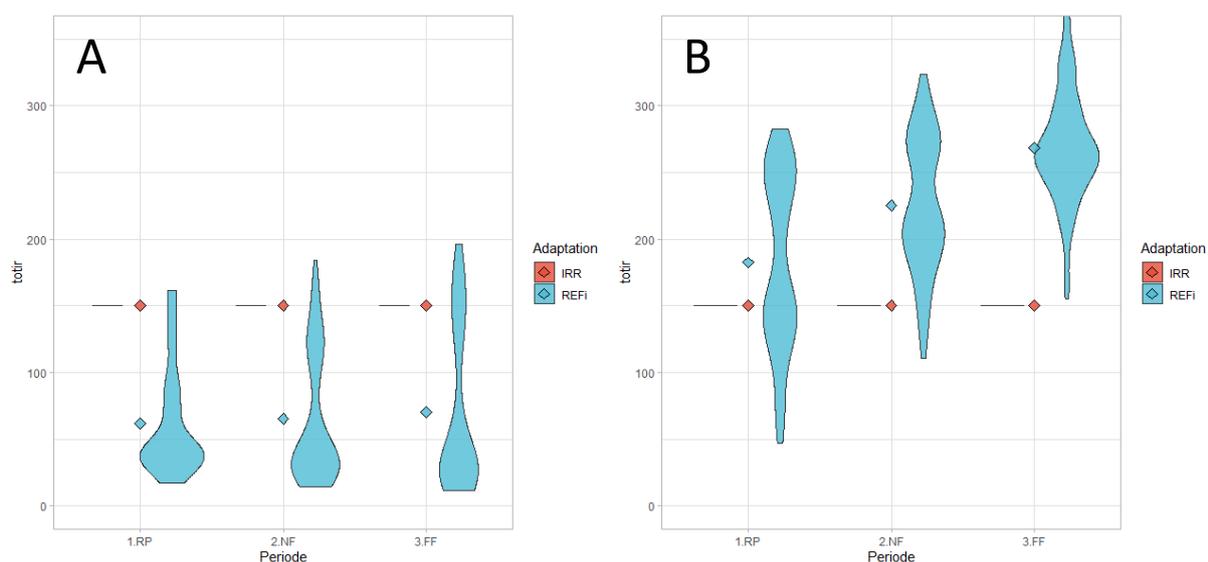


Figure Supplémentaire 3. Boîtes à moustaches violons groupées représentant les distributions des quantités totales d'irrigations apportées en ordonnée en fonction de chaque période en abscisse, et ce pour les deux conduites d'irrigation automatique REFi et non-automatique IRR. Les données ont été séparées entre les variétés de consommation (A) et les variétés de transformation (B). Les points entre les boîtes et les traits (la quantité d'eau apportée étant constante pour IRR) représentent les moyennes des valeurs de couleur correspondante, entre lesquelles ils se trouvent.

