



**HAL**  
open science

## Production céréalière, archéodémographie et climat en Gaule à l'âge du Fer : les nouvelles perspectives de la modélisation multi-agents

Nicolas Bernigaud, Alberte Bondeau, Joël Guiot, Loup Bernard, Delphine Isoardi, Eneko Hiriart, Frédérique Bertoncello, Marie-Jeanne Ouriachi

### ► To cite this version:

Nicolas Bernigaud, Alberte Bondeau, Joël Guiot, Loup Bernard, Delphine Isoardi, et al.. Production céréalière, archéodémographie et climat en Gaule à l'âge du Fer : les nouvelles perspectives de la modélisation multi-agents. *Matières premières en Europe au 1er Millénaire av. n. è. Exploitation, transformation, diffusion*, Actes du 45e colloque de l'AFEAF, 2021, Gijon, Espagne. pp.435-453. hal-04221977

**HAL Id: hal-04221977**

**<https://hal.science/hal-04221977>**

Submitted on 28 Sep 2023

**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.

# Production céréalière, archéodémographie et climat en Gaule à l'âge du Fer : les nouvelles perspectives de la modélisation multi-agents

Nicolas Bernigaud, Alberte Bondeau, Joël Guiot, Loup Bernard, Delphine Isoardi, Eneko Hiriart, Frédérique Bertonecello, Marie-Jeanne Ouriachi

## Introduction

Durant ces dernières décennies, les études paléoclimatiques ont révélé un important réchauffement climatique qui s'est produit en Europe occidentale durant le Second âge du Fer, après une période froide (*Iron Age Cold Epoch*) qui aurait débuté vers 900 av. n. è., à la fin de l'âge du Bronze. Globalement, les proxies continentaux et océaniques s'accordent à mettre en évidence vers le milieu du III<sup>e</sup> s. av. n. è. la mise en place d'un climat plus chaud et humide qualifié « d'Optimum Climatique Romain » (ou *Roman Warm Period*) (McCormick *et al.* 2012).

Quel impact ce changement climatique a-t-il eu en Gaule sur les sociétés de la fin de l'âge du Fer ? Des enquêtes archéologiques régionales suggèrent que cette augmentation des températures aurait eu un effet bénéfique sur la démographie des populations gauloises, qui semble amorcer dès le III<sup>e</sup> s. av. n. è. le début d'une nouvelle phase d'essor, après un étiage du peuplement atteint vers 400 av. n. è. (Malrain *et al.* 2013). Si une récente étude a mis en évidence le rôle de ce réchauffement dans une récurrence accrue d'années de bonnes récoltes en Gaule septentrionale dès le début du III<sup>e</sup> s. av. n. è. (Petit *et al.* 2019), la complexité des interactions entre climat, production céréalière et démographie nous amène aujourd'hui à réexaminer cette question à l'aide des systèmes multi-agents (SMA).

Dans le domaine de l'archéologie – et plus largement dans celui des Sciences humaines et de l'environnement – le développement de la modélisation multi-agents est désormais considéré comme un nouvel enjeu pour l'étude de l'évolution des sociétés anciennes (Wurzer *et al.* 2015 ; Romanowska *et al.* 2019, Lake 2020 ; Romanowska *et al.* 2021). Les SMA offrent en effet la possibilité de modéliser des systèmes socio-environnementaux complexes et leurs interactions. Leur fonctionnement repose sur la programmation d'agents physiques ou biologiques qui interagissent entre eux et avec leur environnement, provoquant ainsi à plus ou moins long terme des phénomènes qualifiés d'« émergents ». Ils sont donc particulièrement adaptés à l'étude de la trajectoire des sociétés anciennes, souvent rythmée par des phases de croissance et de décroissance socio-économique

et démographique dont on cherche aujourd'hui à mieux comprendre les causalités endogènes et exogènes.

Dans le sillage des travaux pionniers menés aux États-Unis dès les années 1990 (Kohler et Gummerman 2000 ; Axtell *et al.* 2002), l'utilisation des SMA se développe en Europe depuis quelques années autour de l'étude des sociétés aux périodes anciennes, du Néolithique à la période romaine (Bocquet Appel *et al.* 2014 ; Bertonecello *et al.* 2018 ; Joyce 2019a ; Joyce 2019b). Pour l'âge du Fer en particulier, de premiers modèles ont notamment été élaborés en Tchéquie pour déterminer les causes de l'essor et le déclin des sociétés celtiques en prenant en compte des paramètres relatifs à l'agriculture et à la démographie (Machálek *et al.* 2012 ; Cimler *et al.* 2012 ; Olševičová *et al.* 2013 ; Danielisová, Hajnalová 2014 ; Danielisová *et al.* 2015 ; Olševičová, Danielisová 2015).

## Présentation et fonctionnement du modèle multi-agents FER-AGRI

Développé sous NETLOGO 6.0.4, FER-AGRI a pour fonction de simuler l'impact des variations climatiques sur la production céréalière et la démographie des populations de l'âge du Fer dans le sud de la Gaule entre le VI<sup>e</sup> s. et le I<sup>er</sup> s. av. n. è. Les simulations peuvent être réalisées à un pas de temps annuel sur une durée maximale de six siècles.

Ce modèle multi-agents apparaît particulièrement novateur par sa capacité à calculer des rendements potentiels en céréales en reproduisant le fonctionnement du modèle agro-écosystémique Lund-Potsdam-Jena-managed-Land (LPJmL), à partir de valeurs paléoclimatiques de températures et de précipitations recréées pour la période considérée.

Conçu par des agronomes, LPJmL permet de simuler le cycle du carbone et de l'eau ainsi que les rendements potentiels des principales plantes cultivées dans le monde en fonction de plusieurs paramètres (taux de CO<sub>2</sub>, texture/porosité des sols, climat, topographie) (Bondeau *et al.* 2007 ; Fader *et al.* 2015). Initialement développé pour étudier l'impact des changements climatiques actuels sur l'agriculture, le paramétrage de LPJmL a

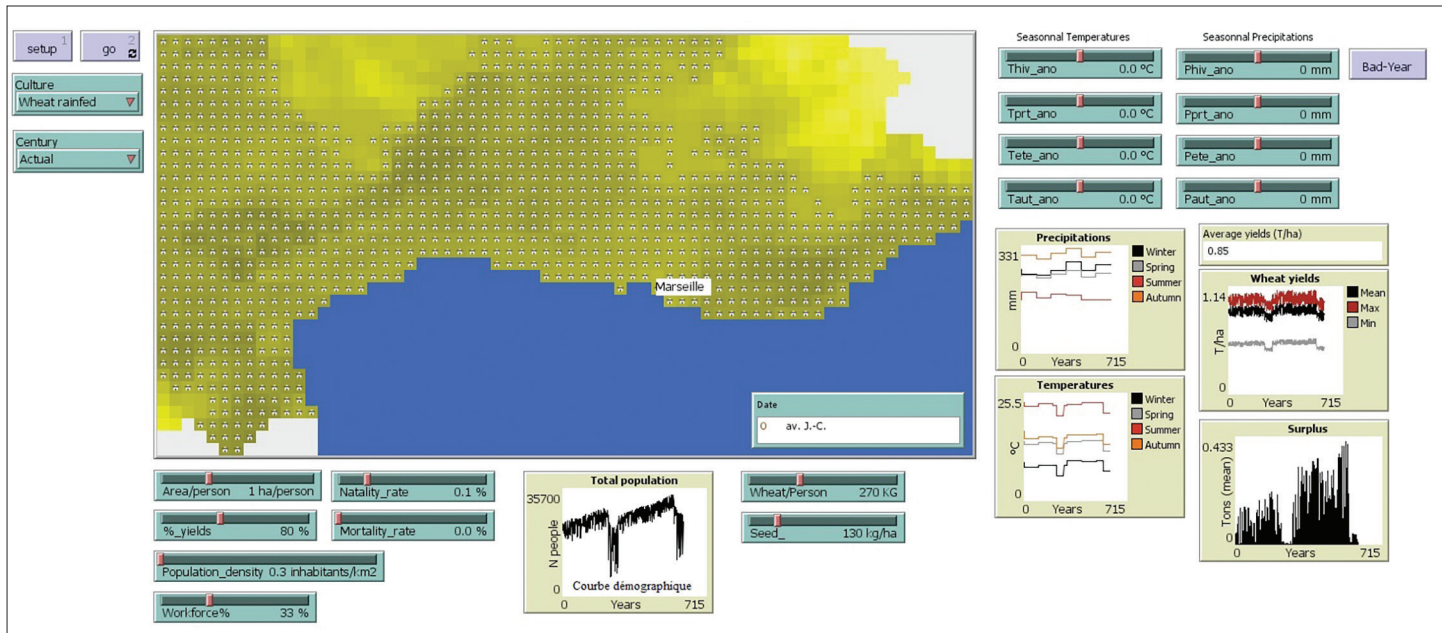


Fig. 1. Présentation de l'interface du modèle FER-AGRI (NETLOGO) (N. Bernigaud/UMR 7330).

récemment été modifié pour pouvoir étudier le passé avec des données paléoclimatiques. Les paramètres du fichier permettant de modéliser les rendements céréaliers (fichier *Crop Fonctionnal Type* « *Wheat* ») ont en effet été adaptés pour ajuster les rendements qui pouvaient être obtenus durant la Protohistoire avec les techniques agricoles utilisées à cette période (Contreras *et al.* 2018 ; Contreras *et al.* 2019).

L'interface du modèle FER-AGRI (fig. 1) se compose d'une carte du sud de la Gaule et de plusieurs curseurs et graphiques qui servent à régler les paramètres et à contrôler l'évolution de différentes valeurs lors des simulations. La carte est formée d'un ensemble de cellules carrées représentant chacune une surface de 64 km<sup>2</sup> (8 x 8 km). Nous avons ici gardé la résolution d'origine des données climatiques du modèle ALADIN<sup>1</sup> utilisé. Le dégradé jaune de couleur retranscrit la valeur des rendements potentiels en céréales (plus la couleur est foncée, plus la valeur est élevée). Les principaux paramètres réglables au moyen des curseurs sont les températures et précipitations saisonnières (*Seasonnal Temperatures* ; *Seasonnal Precipitations*), la densité initiale de population en 600 av. n. è. (*Population\_density*), le taux de natalité (*Natality\_rate*), le taux de mortalité (*Mortality\_rate*), le pourcentage de main-d'œuvre agricole au sein de la population (*Workforce %*).

Les graphiques permettent de suivre à un pas de temps annuel sur la durée des six siècles de la simulation l'évolution des précipitations (*Precipitations*) et des températures (*Temperatures*) saisonnières, les rendements céréaliers (*Wheat yields*), la moyenne des surplus dégagés par les exploitations (*Surplus*) et la démographie des populations (*Total population*).

## Dynamique de fonctionnement du modèle

### Initialisation

Lors de la phase d'initialisation du modèle, chacune des cellules du modèle génère un habitat/exploitation qui regroupe un nombre de personnes variable, calculé en fonction d'une densité initiale de peuplement (DIP) choisie par l'utilisateur dans une fourchette de valeurs comprise entre 0,3 et 5,5 habitants par km<sup>2</sup>. Chaque exploitation comprend ainsi en début de simulation entre 19 et 352 habitants (que l'on peut considérer regroupés dans des habitats agglomérés ou plusieurs unités d'exploitations éparpillées à l'intérieur de la cellule).

### Apparition/disparition des habita(n)ts, augmentation/diminution démographique

Ce nombre d'habitants croît ensuite annuellement dans chaque cellule en fonction d'un taux d'accroissement annuel (TAA) choisi entre 0,2 ‰ et 5 ‰ par an.

Dans chaque cellule, les habitants virtuels (regroupés au sein des exploitations) réalisent chaque année une récolte de céréales (RAC) dont le tonnage est calculé par le modèle en fonction des différents paramètres détaillés un peu plus loin (climat, quantité de main-d'œuvre agricole, superficie cultivée par individu, quantité de semences utilisées, etc.).

Lorsque à un temps *t* de la simulation la récolte annuelle et les stocks céréaliers deviennent insuffisants (à cause du climat) pour nourrir tous les habitants d'une cellule, ceux-ci disparaissent. Un nouvel habitat est toutefois à nouveau généré dans une cellule

1 <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article125>

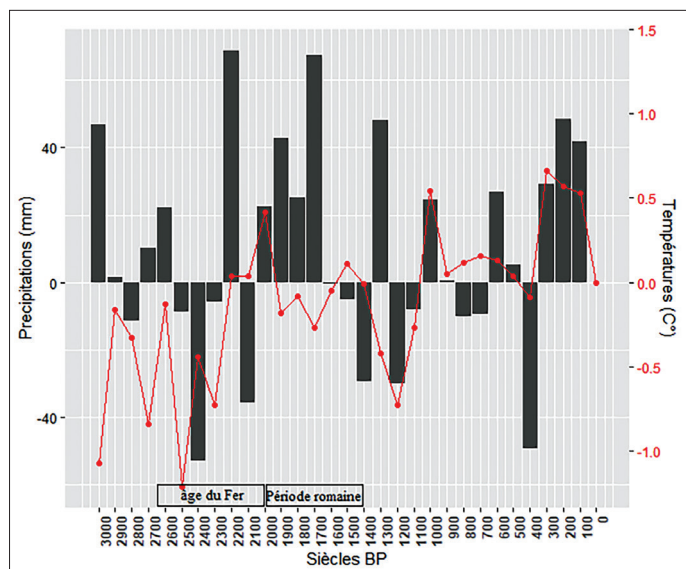


Fig. 2. Graphique de l'évolution des moyennes de températures et de précipitations durant les 3 derniers millénaires dans le sud de la France (données extraites de Guiot, Kaniewski 2015) (N. Bernigaud/UMR 7330).

devenue vacante dès que les rendements céréaliers potentiels (RCP) repassent au-dessus du seuil (variable en fonction des paramètres choisis) permettant d'alimenter tous leurs habitants.

Dans ce modèle, chaque cellule doit être autosuffisante pour permettre aux habita(n)ts de se maintenir. Ceux-ci n'ont pas la possibilité d'importer depuis d'autres exploitations des céréales (bien qu'en réalité l'échange ou le commerce des céréales à plus ou moins longue distance était possible durant l'âge du Fer).

L'apparition/disparition des habitants en fonction des variations climatiques permet d'infléchir positivement ou négativement la courbe démographique globale générée par le modèle (Graphique *Total population* sur l'interface, fig. 1). On peut considérer que les habitants qui apparaissent soudainement dans une cellule sont des immigrants et que ceux qui en disparaissent tout aussi rapidement émigrent en dehors de l'aire géographique considérée (sud de la Gaule), ou bien qu'ils meurent de faim. Dans notre modèle, la démographie est donc régulée par un taux d'accroissement naturel (résultant de la différence entre un taux de natalité et de mortalité), mais aussi par des phénomènes migratoires.

### Atteinte de la capacité de charge (CC)

La courbe démographique peut marquer un palier lorsque la capacité de charge ou capacité porteuse (*carrying capacity*) est atteinte, c'est-à-dire quand la totalité des terres labourables potentielle est exploitée. Nous avons fixé ce maximum de terres céréalières à la moitié de la superficie représentée par chaque cellule (soit 32 km<sup>2</sup>), en postulant que le système d'assolement utilisé pendant l'âge du Fer était biennal (Thouvenot, Gransar 2000). Il s'agit vraiment ici d'un grand maximum car en réalité, seule une partie des terres représentées par les cellules se prêtait à la céréaliculture.

## Description des paramètres utilisés en entrée du modèle

Les valeurs des paramètres démographiques, agricoles et climatiques utilisés en entrée de FER-AGRI sont modifiables pour tester différentes hypothèses sur l'impact des changements climatiques sur les sociétés protohistoriques. Ces valeurs peuvent être choisies dans des intervalles pour lesquels nous avons défini des minimas et des maximas d'après des travaux archéologiques et paléontologiques (cités plus bas).

### Données paléoclimatiques

Nous avons produit les données paléoclimatiques utilisées en entrée du modèle à partir d'une modélisation actuelle du climat de la France (ALADIN) modifiée avec des valeurs d'anomalies extraites d'une reconstruction paléoclimatique réalisée à une résolution de 5° de latitude et longitude pour l'Europe d'après des données palynologiques (fig. 2) (Guiot, Kaniewski 2015). Les valeurs d'anomalies mensuelles (positives ou négatives) de cette reconstruction ont été interpolées à la résolution plus fine du modèle ALADIN (8 km) auquel elles ont été additionnées sous R (technique d'algèbre de carte, package *raster*). Nous avons ainsi obtenu des reconstructions mensuelles de moyenne des températures et de cumul des précipitations pour chacun des six siècles de la séquence considérée (soit un total de 144 fichiers) (fig. 3).

Si le modèle est programmé pour faire changer à chaque siècle le climat d'après ces reconstructions, l'utilisateur de FER-AGRI a toutefois la possibilité de créer en cours de simulation des forçages climatiques en abaissant ou en augmentant les valeurs de températures et de précipitations saisonnières au moyen des huit curseurs (en haut à droite de l'interface, fig. 1).

### Taux d'accroissement démographique annuel (TAA) (0,2-5 ‰)

Pour les taux d'accroissement démographiques, nous avons retenu une fourchette de valeurs comprises entre 0,2‰ et 5‰ par an d'après divers chiffres avancés dans des études menées à l'échelle mondiale pour les populations agricoles préindustrielles (fig. 4). Pour la Gaule, les indicateurs archéodémographiques établis d'après le décompte du nombre de maisons sur les oppida provençales ont permis d'avancer le chiffre de 4,8 ‰ (Isoardi 2008) qui apparaît donc dans cet intervalle comme une valeur assez haute.

### Densité Initiale de Peuplement (DIP) (0,3-5,5 hab./km<sup>2</sup>)

Pour lancer les simulations avec FER-AGRI, il est nécessaire de sélectionner pour le temps zéro (600 av. n. è.) une densité initiale de peuplement (DIP) (homogène dans cette première version du modèle) à l'échelle du sud de la Gaule. Les valeurs retenues se trouvent dans une fourchette établie d'après des chiffres avancés dans quelques études archéologiques réalisées en Europe. D'après Zimmerman *et al.* 2009, les densités de peuplement dans les campagnes sont estimées pour l'âge du Fer en Europe centrale

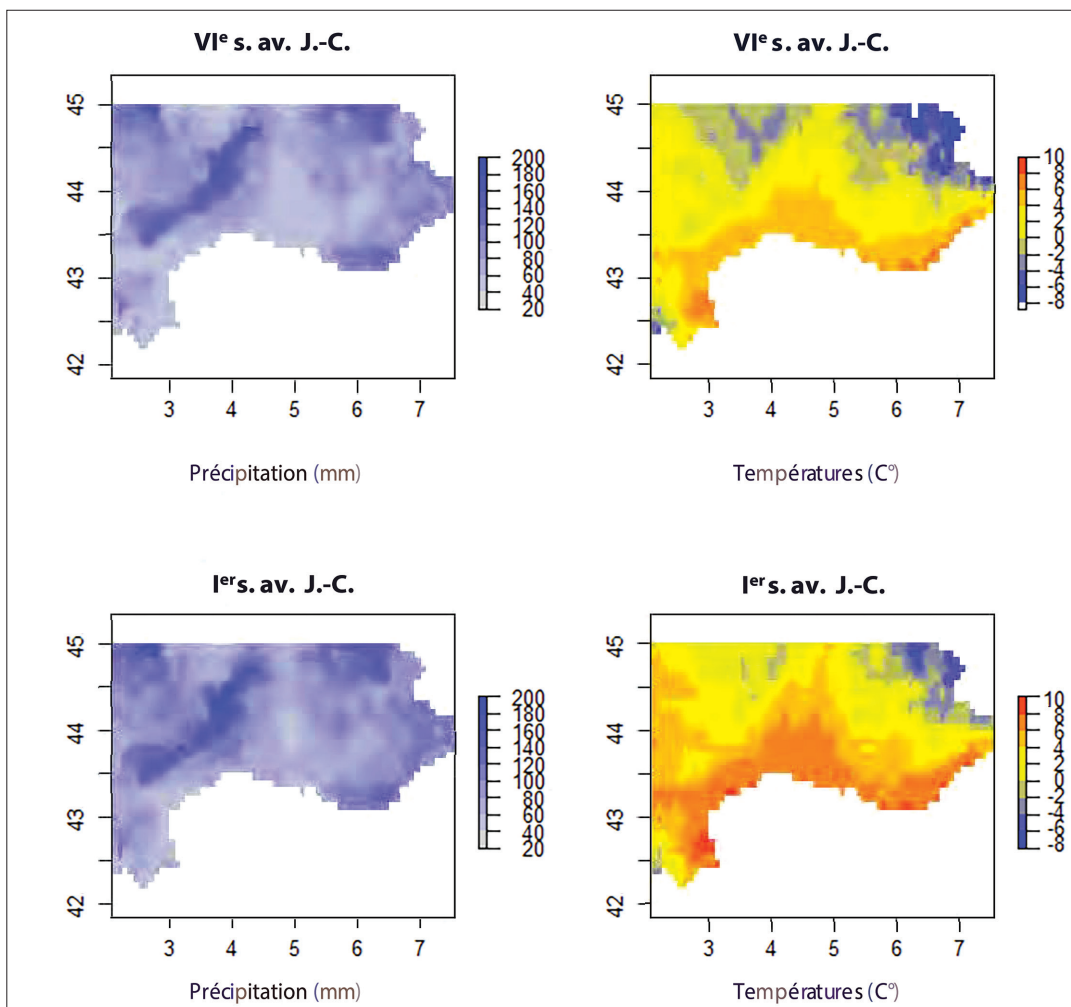


Fig. 3. Exemples de reconstruction de cumul des précipitations et des moyennes des températures du mois de janvier dans le sud de la Gaule au VI<sup>e</sup> siècle av. n. è. (2500 BP) et au I<sup>er</sup> siècle av. n. è. (2000 BP) (N. Bernigaud/UMR 7330).

Localisation	Période	Taux d'accroissement (‰)	Références bibliographiques
Macédoine centrale	4000-1200 BC	0,2 ‰	Renfrew 1972
	Néolithique	1 ‰	Hassan 1973
Grèce (Cyclades)	Période Égéenne	1,1 ‰	Renfrew 1972
Irak (région du Bas Diyala)	Protohistoire	1,5 ‰	cité dans Djindjian 1991 (d'après Adams 1965)
Europe	Néolithique	1-2 ‰	Bocquet-Appel 2010
Provence	Âge du Fer	4,8 ‰	Isoardi 2008
		5 ‰	Masset 1987
Algérie	Épipaléolithique		Biraben 1969
Tchéquie	Âge du Fer	20 ‰	Olševičová <i>et al.</i> 2013

Fig. 4. Tableau d'exemples de taux d'accroissements démographiques envisagés aux périodes anciennes (adapté d'après Isoardi 2008 et sensiblement complété).

Densité (habitants/km <sup>2</sup> )	Localisation	Période	Référence bibliographique
1,2-2,3	Europe Centrale	Âge du Fer	Zimmermann <i>et al.</i> 2009
0,3	GAR Upland	600-250 BC	
1,4	GAR Upland	700-475 BC	
5,5	<i>Altsiedellandschaft</i>	700-250 BC	

Fig. 5. Exemples de densités de peuplement envisagées pour la Protohistoire.

entre 1,2 et 2,3 habitants/km<sup>2</sup>. Quelques chiffres hypothétiques glanés par ailleurs dans la littérature archéologique permettent toutefois de retenir un intervalle plus large compris entre 0,3 et 5,5 habitants/km<sup>2</sup> (fig. 5).

### Proportion de main-d'œuvre agricole/population (Workforce)

La superficie des terres cultivées dans le modèle FER-AGRI est proportionnelle à la quantité de main-d'œuvre disponible pour les labours. Dans de récents travaux de modélisation, il a été considéré qu'au sein des populations de l'âge du Fer et de la période romaine, les labours ne pouvaient être réalisés que par les hommes âgés entre 15 et 49 ans (Machálek *et al.* 2012 ; Joyce 2019a). Si ce postulat – qui exclut les femmes de la catégorie des travailleurs – peut être contesté, la totalité des individus d'un groupe humain n'était pas mobilisable pour effectuer les gros travaux agricoles. C'était notamment le cas des enfants en bas-âge ainsi que des personnes handicapées et âgées. Une partie d'entre eux pouvait cependant être mis à contribution pour des tâches nécessitant moins de force physique (semences, récoltes, glanage,...). Une distinction a été établie entre les individus ayant assez de force physique pour réaliser les gros travaux agricoles (*hard workforce*), ceux qui ne pouvaient effectuer que les menus travaux (*weak workforce*) et enfin ceux qui ne participaient pas du tout aux activités agricoles (*non workers*) (Olševičová, Danielisová 2015).

Pour l'âge du Fer, la proportion de main-d'œuvre mobilisable pour les labours était certainement variable selon les périodes, les régions, les formes d'organisations sociales et la conjoncture historique (période de paix/guerre). En admettant qu'au sein d'une famille théorique de 6 personnes (2 enfants ; 2 adultes ; 2 personnes âgées), seuls les adultes d'âge moyen avaient la condition physique pour réaliser les labours, la *hard workforce* peut donc être estimée, tout au mieux, à 1/3 des individus. Ce ratio pouvait être plus élevé si des adolescents et des seniors aidaient à la

tâche. Il semble toutefois difficile qu'il ait pu excéder les 2/3. Quoi qu'il en soit, pour pouvoir tester des hypothèses avec différents ratios nous avons créé dans le modèle la variable *workforce%* qui permet de faire varier la proportion de main-d'œuvre au sein de la population totale entre 0 et 100 %.

### Superficie cultivée/individu (SCI) (1-3 ha)

La superficie de terrain qui pouvait être annuellement labourée et cultivée par un seul travailleur agricole dépendait notamment de l'outillage utilisé (houe/araire), de l'objectif cultural (autosubsistance/commerce) mais aussi de la texture des sols. Les sols meubles étaient en effet plus faciles à cultiver que les terrains argileux. Nous estimons dans ce modèle qu'un homme réalisant des labours à bras au moyen d'une houe devait pouvoir cultiver annuellement de 1 à 2 hectares au maximum. Avec l'utilisation d'un araire, on peut cependant rapporter la capacité d'un homme à effectuer des labours à environ 3 ha (Joyce 2019a). Dans FER-AGRI, le curseur *Area/Person* permet donc de faire varier la superficie cultivée annuellement par individu entre 1 et 3 ha.

### Ratio annuel de céréales consommées/personne (RCC) (200-450 kg/an)

Dans FER-AGRI nous postulons que l'alimentation des populations de l'âge du Fer reposait à 70 % sur la consommation de céréales qui constituait donc la base de l'alimentation. Nous avons programmé le modèle pour faire varier grâce à un curseur (*Wheat/Person*) la consommation moyenne par individu. Ce ratio dépendait de la nature plus ou moins nutritive de l'espèce cultivée (orge, blé, millet,...), mais aussi du régime alimentaire, variable selon l'âge et l'activité physique. D'après les chiffres avancés par les sources antiques et diverses études, cette consommation en céréales était comprise entre un minimum de 200 kg/an et plus de 400 kg/an par personne (fig. 6). Au II<sup>e</sup> s. av. n. è., l'agronome latin Caton (*De Re Rustica*, LVI) préconisait par exemple de nourrir le personnel d'une exploitation rurale

Consommation annuelle/individu	Céréale (espèce)	Période	Référence bibliographique
230-274 kg/an (3 modius/mois) ± 243 kg/an (personnel d'exploitation)			Clark 1963
(350 l/an) 259-287 kg/an	Blé froment	II <sup>e</sup> s. av. n. è.	Caton, <i>De Re Rustica</i> , LVI
(± 1557/an/famille) ± 259 kg/an	Blé	Grèce antique	Jardé 1925
(± 1708 kg/an/famille) ± 284 kg/an	Blé vêtu mondé	Période romaine	Ouzoulias 2006, 177
(± 1879 kg/an/famille) ± 313 kg/an	Blé nu		
(± 2067 kg/an/famille) ± 344 kg/an	Orge vêtu mondé		
(± 2225 kg/an/famille) ± 370 kg/an	Orge vêtu		
± 330 kg/an (travailleurs agricoles)	Blé	II <sup>e</sup> s. av. n. è.	Caton, <i>De Re Rustica</i> , LVI ; André 1981
393-427 kg/an (soldats)	Blé	Période romaine	Le Roux 2011

Fig. 6. Tableau d'exemples de quantité annuelle de céréales consommée durant l'Antiquité.

Datation	Auteur ; réf. biblio	Chiffres cités	Poids céréales semées (kg)/ha
I <sup>er</sup> siècle av. n. è.	Varron, <i>De Agricultura</i> , I, 44.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blé : 5 modius/jugère (135 kg/ha)</li> <li>• Orge : 10 modius/jugère (218 kg/ha)</li> <li>• Froment : 10 modius/jugère ( ?)</li> </ul>	135-218 kg/ha
I <sup>er</sup> siècle de n. è.	Columelle, <i>De Re Rustica</i> , II, 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blé : 4-5 modius/jugère (108-135 kg/ha)</li> <li>• Adoréum (blés vêtus) : 9-10 modius/jugère (137-159 kg/ha)</li> </ul>	108-135 kg/ha
I <sup>er</sup> siècle de n. è.	Pline, <i>Histoire Naturelle</i> , XVIII, 55. Ouzoulias 2006, 178.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blé ou Siligo : 4-6 modius/jugère (108-162 kg/ha)</li> <li>• Far ou Semen : 10 modius/jugère (152 kg/ha)</li> <li>• Orge : 6 modius/jugère (131 kg/ha)</li> </ul>	108-162 kg/ha
	Comet 1992 ; Zech-Matterne 2001.		150 kg/ha

Fig. 7. Tableau d'exemples de quantités de semences utilisées d'après les auteurs latins. Valeur retenue pour le modius romain = 8,67 litres ; masse volumique/densité du froment = 0,78kg/litre ; 1 jugère = 0,25 ha.

Nature des céréales	Période	Intervalle	Référence biblio.
Blé	Antiquité grecque	800-1200 l/ha 480-720 kg/ha	Jardé 1925
Orge		1600-2000 l/ha 960-1200kg/ha	
Amidonnié et épeautre	Âge du Fer	2500-3700 kg/ha	Reynolds 1981 ; Barker 1985
Amidonnié	Âge du Fer	1460-1900 kg/ha	Reynolds 1992
Épeautre		1350-1700 kg/ha	
Céréales indet.	Âge du Fer	500-3000 kg/ha	Danielisová, Hajnalová 2014
		800-3200 kg/ha	Olševičová, Danielisová 2015
Céréales indet.	Avant mécanisation	250-2000 kg/ha	Halstead 2014
Céréales indet.	Période romaine	800-1200 kg/ha	Joyce 2019b
Blé et orge	Europe médiévale	± 500 kg/ha	Titow 1972 ; Barker 1985
Blé	Période romaine (GB)	± 600 kg/ha	Bowen 1961

Fig. 8. Tableau d'exemples de valeurs de rendements céréaliers d'après différents auteurs.

(régisseur, surveillant, berger,...) à raison de 3 *modius* de blé par mois ( $\pm$  243 kg/individu/an) et les travailleurs agricoles entre 4 *modius* mensuels en hiver puis 4 *modius* ½ en été ( $\pm$  330 kg/individu/an), lors des travaux des champs. La quantité de céréales consommée était en effet plus élevée pour ceux qui fournissaient des efforts physiques importants. À la période romaine, les soldats recevaient par exemple annuellement entre 393 kg et 427 kg de blé (Le Roux 2011). On peut toutefois raisonnablement estimer que la quantité moyenne pour une personne adulte se situait plus couramment durant l'âge du Fer dans une fourchette comprise entre 250 et 350 kg/an, selon les besoins et l'espèce de céréale consommée.

### Ratio de semences utilisées (RSU) (108-218 kg/ha)

Dans le modèle, la quantité de semences utilisée pour emblaver les champs (en tonnes/hectare) peut être modifiée ( curseur *Seed\_* sur l'interface). Cette quantité était variable selon l'espèce de céréale cultivée, la nature pédologique des sols et les techniques de semis employées (à la volée, en ligne ou en poquets). Faute de disposer d'estimations quantitatives pour l'âge du Fer en Gaule, nous avons mobilisé les données chiffrées livrées par les agronomes latins (Caton, Varron, Columelle, Pline) en Italie entre le II<sup>e</sup> s. av. n. è. et le I<sup>er</sup> s. de n. è. (voir détails en fig. 7). Pour les blés nus (froment, etc.), ces chiffres varient entre 4 et 6 *modius*

par jugère (soit 108-162 kg/ha) selon la nature plus ou moins naturellement fertile du sol. Les volumes semés étaient plus élevés pour l'orge (de 6 à 10 *modius*/jugère) et les blés vêtus/adoréum (épeautre, amidonnier, engrain) (9-10 *modius*/jugère).

D'une manière générale, les différents calculs que nous avons réalisés pour convertir des unités de volumes en unités de poids au moyen de la masse volumique propre à chaque espèce nous permettent d'établir une fourchette comprise entre 108 kg/ha et 218 kg/ha.

### Variables calculées par le modèle

#### Rendements potentiels en céréales (RPC)

La question des rendements céréaliers atteints en Europe pendant la Protohistoire est encore aujourd'hui débattue. On estime qu'ils pouvaient varier géographiquement et chronologiquement dans une très large fourchette comprise 200 kg/ha et plus de 2000 kg/ha (fig. 8), selon les techniques agricoles utilisées (nature de l'outillage, avec/sans fumure, avec/sans assolements,...), les espèces de céréales cultivées (orge, blé, engrain, millet, amidonnier, etc...) et la diversité des conditions environnementales (pédologie, relief, hydrographie,...) et climatiques (Halstead 2014).

Les expérimentations ethnoarchéologiques menées à partir des années 1970 en Angleterre à la *Butser Ancient Farm* ont permis d'obtenir avec des techniques agricoles de la fin de l'âge du Fer des rendements moyens compris dans une fourchette de 1460-1900 kg/ha pour le blé amidonnier et 1350-1700 kg/ha pour l'épeautre (Reynolds 1981 ; Reynolds 1992). Ces rendements sont toutefois apparus particulièrement élevés. Certains auteurs ont en effet observé qu'ils étaient supérieurs à ceux obtenus durant les périodes historiques (Barker 1985). On estime en effet que les rendements céréaliers étaient en moyenne de 500 kg/ha en Europe à la période médiévale (Titow 1972) et de 600 kg/ha à la période romaine (Bowen 1961).

Pour calculer les rendements potentiels en céréales, FER-AGRI reproduit de manière simplifiée le fonctionnement plus complexe de LPJmL grâce à un émulateur que nous avons programmé sous NETLOGO. Pour chaque cellule, cet émulateur simule des rendements céréaliers potentiels à partir des moyennes de températures et de précipitations créées pour chaque siècle de la séquence chronologique considérée. Une fois importées dans le modèle, ces valeurs mensuelles sont moyennées par saison par l'émulateur qui calcule ensuite les valeurs de rendements potentiels en céréales. Ce calcul repose sur une équation obtenue par une régression des valeurs de rendements produits par la version originale de LPJmL sur celles des températures et de précipitations saisonnières :

**Rendements potentiels en céréales (T/ha) =**  $0,3452 + 0,033 * Thiv + 0,0072 * Tprt + 0,0467 * Tete - 0,0523 * Taut + 0,0016 * Pprt + 1e-04 * Pete - 4e-04 * Paut$

Dans cette équation, les coefficients assignés aux différentes variables saisonnières n'ont pas la même valeur (fig. 9). Les rendements céréaliers apparaissent plus sensibles aux variations de températures qu'à celles des précipitations. Les températures estivales ont la plus grande influence (rang 1) alors que les précipitations hivernales n'en exercent aucune (rang 7). Il est à noter que l'augmentation des températures et des précipitations automnales, pourvues de coefficients négatifs, sont dans cette formule défavorables aux rendements céréaliers.

Pour obtenir des fluctuations annuelles de rendement potentiels, le modèle fait varier de  $\pm 20\%$  aléatoirement à

Nature variable	Code variable	Coefficient	Rang
<b>Températures</b>			
Hivernales	Thiv	0,0072	3
Printanières	Tprt	0,0467	2
Estivales	Tete	0,0523	1
Automnales	Taut	-0,0016	5
<b>Précipitations</b>			
Précipitations printanières	Pprint	0,0016	5
Précipitations estivales	Pete	0,001	6
Précipitations automnales	Paut	-0,004	4
Précipitations hivernales	Phiv	0	7

Fig. 9. Tableau des coefficients et noms des variables climatiques saisonnières de l'équation permettant de produire la valeur des rendements potentiels en céréales.

chaque pas de temps les moyennes centennales calculées par l'émulateur de LPJmL.

Dans notre modèle, les rendements céréaliers retournés par défaut par l'émulateur LPJmL sont en moyenne de 1 000 kg/ha. Cette moyenne peut toutefois être modifiée par l'utilisateur au moyen d'un curseur (*%\_Yields*) qui permet d'augmenter ou d'abaisser ces rendements. Il est ainsi possible de réaliser des simulations avec les moyennes les plus basses et plus hautes de l'intervalle retenu.

### *Superficie cultivée annuellement (SCA)*

La SCA croît dans chaque cellule proportionnellement à la population. Elle est calculée par le modèle pour chaque année en hectares par la multiplication de la quantité variable de main-d'œuvre agricole disponible (*Workforce*) par la superficie de terre que pouvait cultiver chaque année un seul individu (1-3 ha) (SCI).

### *Récolte annuelle (RA)*

Cette variable est calculée en tonnes par hectares en multipliant la superficie cultivée annuellement (SCA) par les rendements potentiels en céréales (RPC).

### **Consommation annuelle de céréales (CAC)**

La quantité de céréales nécessaire à l'alimentation de la totalité des habitants d'une cellule est calculée en multipliant leur nombre par la ration annuelle individuelle (200-450kg/an) (RCC). Si la récolte annuelle est insuffisante, les habitants peuvent être nourris avec les stocks de céréales (S).

### *Quantité annuelle de semences (QAS)*

Une partie de la récolte annuelle est réservée pour réensemencer les champs l'année suivante. La QAS est calculée en multipliant la quantité de semences nécessaire pour emblaver 1 hectare (RSU) par la superficie cultivée annuellement (SCA).

### *Surplus annuel de céréales (SAC)*

Le SAC est calculé en tonnes par le modèle en soustrayant la quantité de céréales consommée par les exploitants (CAC) et les semences réservées pour l'année suivante (QAS) à la récolte annuelle (RA).

### *Stocks (S)*

Les différents types de structures de stockage de céréales mis au jour par l'archéologie sur les sites de l'âge du Fer (greniers sur poteaux, silos, *dolia*,...) attestent de la capacité des populations protohistoriques à constituer des réserves de grain plus ou moins importantes pendant plusieurs années (Gransar 2000 ; Defressigne 2012 ; Bossard 2019 ; Prats *et al.* 2020).

Les stocks annuels de céréales de chaque exploitation sont calculés à chaque pas de temps de la simulation par l'addition



des surplus (SAC) des 3 dernières années. Les exploitations sont ainsi en mesure de faire front à une ou plusieurs années de mauvaise récolte.

## Premiers résultats

En faisant varier les valeurs des différents paramètres pris en compte dans les intervalles que nous avons définis, le modèle FER-AGRI offre un très grand nombre de combinaisons possibles. Cet outil exploratoire offre la possibilité de tester une multitude de scénarios concernant l'impact du climat sur l'agriculture et la démographie en fonction des techniques agricoles employées. En attendant de réaliser une analyse de sensibilité (*Sensitivity analysis*) permettant d'évaluer exhaustivement les performances du modèle (Kanters 2021), nous présenterons ici les résultats d'une douzaine de simulations.

### Rendements céréaliers seuils pour la subsistance

Nous avons utilisé FER-AGRI pour rechercher les seuils de rendements céréaliers en dessous desquels les populations de l'âge du Fer ne pouvaient assurer leur propre subsistance. Nous avons ainsi testé différentes valeurs du paramètre « superficie cultivée/individu » (SCI) auquel le modèle apparaît particulièrement sensible (nous avons retenu pour les autres paramètres des valeurs fixes) (fig. 10).

Les résultats obtenus par différentes simulations mettent en évidence que plus la superficie annuellement labourable par travailleur agricole (SCI) est élevée, plus le seuil des rendements céréaliers nécessaire à la subsistance est bas. Pour 1 ha/travailleur/an, la moyenne des rendements doit être supérieure à environ 800 kg/ha pour permettre la subsistance et l'essor démographique des populations. Avec 2 ha/travailleur/an, ce seuil s'abaisse à  $\pm 430$  kg/ha puis à  $\pm 250$  kg/ha pour 1 ha (fig. 10).

Dans notre modèle, les populations cultivant seulement à bras (maximum de 2ha/individu/an) ne peuvent donc se maintenir dans les zones où les rendements potentiels en céréales sont inférieurs à  $\pm 430$  kg/ha. Celles-ci sont cependant exploitables si l'on utilise l'araire jusqu'au seuil de  $\pm 250$  kg/ha,

N°	Variables	S1	S2	S3
1	Rendements en céréales (valeurs seuils)	$\pm 800$ kg/ha	$\pm 430$ kg/ha	$\pm 250$ kg/ha
2	Taux d'accroissement naturel	0,5 %/an		
3	Densité initiale de population	5,5 hab./km <sup>2</sup>		
4	Superficie exploitée/individu (ha/an)	1 ha/an	2 ha/an	3 ha/an
5	Consommation en céréales/habitant	270 kg/an		
6	Main-d'œuvre ( <i>Workforce</i> )	33 %		
7	Quantité de semence utilisée	130 kg/ha		

Fig. 10. Tableau des valeurs retenues pour les paramètres des simulations S1, S2 et S3.

en-dessous duquel les populations ne peuvent plus assurer leur subsistance avec un régime à dominante céréalière (sauf si elles ont la possibilité d'importer des céréales, ce qui n'est pas pris en compte dans cette première version du modèle).

### Densité initiale de population, taux d'accroissement naturel

Si dans le modèle les changements climatiques permettent de faire fluctuer la démographie, celle-ci reste principalement régie par le taux d'accroissement annuel (TAA) et de la densité initiale de population (DIP) fixée lors de la phase d'initialisation. Les simulations lancées avec différentes valeurs comprises dans les intervalles prédéfinis produisent des courbes démographiques de formes variées (fig. 11-12). La forme exponentielle des courbes est naturellement d'autant plus incurvée que la valeur du taux d'accroissement annuel (TAA) choisie est élevée. Les simulations réalisées avec les valeurs maximales de taux d'accroissement annuel (TAA = 0,5 %) et de densité initiale de peuplement (DIP = 5,5 habitants/km<sup>2</sup>) permettent toutefois d'obtenir une courbe de forme sigmoïdale (fig. 11, S9). Avec de tels réglages, on parvient donc à atteindre au cours du I<sup>er</sup> siècle av. n. è. environ un plafond démographique indiquant que la capacité porteuse a été atteinte.

### Sensibilité de la démographie et de la production céréalière aux changements climatiques

D'après la formule utilisée dans le modèle pour l'émulation de LPJmL, les rendements céréaliers potentiels augmentent/diminuent en fonction de la hausse/baisse des températures et des précipitations. La diminution des rendements entraîne la disparition des populations dans les zones où leurs valeurs passent en-dessous d'un seuil ne permettant plus de nourrir les habitants. Inversement, leur augmentation permet la colonisation des zones où ils repassent au-dessus de ces seuils. Cette extension/rétractation des zones de peuplement en fonction du climat, qui permet d'infléchir positivement ou négativement les courbes démographiques, s'effectue notamment dans les zones d'altitude les plus froides (Alpes, Massif Central).

Les effets des variations climatiques sur les courbes des surplus et de la démographie sont d'autant plus nets que les valeurs assignées à différents paramètres du modèle placent la production céréalière à un niveau proche du seuil de subsistance. Cet impact apparaît le plus fort quand les taux d'accroissement annuels (TAA) sont faibles et que les valeurs choisies pour les paramètres régissant la productivité agricole se situent dans la partie inférieure des intervalles retenus. Dans le cas d'un système agricole mobilisant exclusivement les labours à bras (superficie exploitée par travailleur entre 1-2 ha/an), les effets du climat apparaissent par exemple les plus flagrants quand la moyenne des rendements céréaliers est placée vers environ 0,9 tonnes/an (S1). Avec une utilisation de l'araire ( $\pm 3$  ha/travailleur/an), ils sont les plus accentués avec des rendements céréaliers beaucoup plus bas, aux alentours de 0,3 tonnes/an (fig. 13-14).

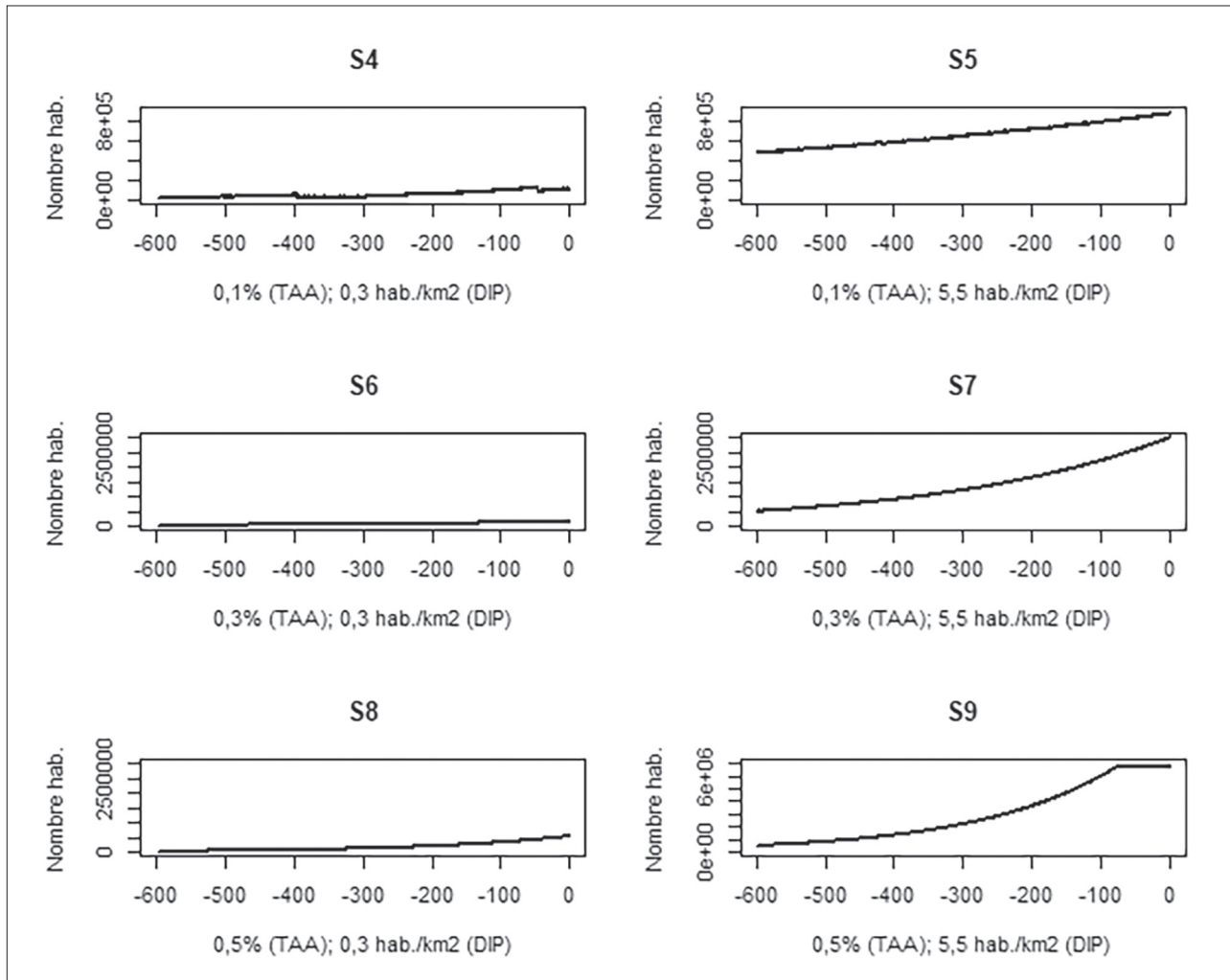


Fig. 11. Graphiques des courbes démographiques obtenues dans FER-AGRI avec différents taux d'accroissement naturel (0,1 % ; 0,2 % ; 0,3 %) et des valeurs extrêmes de densité initiale de population (0,3 hab./km<sup>2</sup> ; 5,5 hab./km<sup>2</sup>) (pour les réglages retenus, voir le tableau ci-dessous).

	Variables	S4	S5	S6	S7	S8	S9
1	Moyenne des rendements céréaliers (Tonnes/hectare)	± 1000 kg/ha					
2	Taux d'accroissement annuel (TAA) (Pourcentage)	0,1 %		0,3 %		0,5 %	
3	Densité Initiale de Population (DIP) (habitants/km <sup>2</sup> )	0,3 hab./km <sup>2</sup>	5,5 hab./km <sup>2</sup>	0,3 hab./km <sup>2</sup>	5,5 hab./km <sup>2</sup>	0,3 hab./km <sup>2</sup>	5,5 hab./km <sup>2</sup>
4	Main-d'œuvre agricole ( <i>Workforce</i> ) (pourcentage de la population globale)	33 % population					
5	Superficie annuelle cultivée/individu (SCI) (hectares)	2 ha					
6	Ratio annuel de céréales consommées/individu (RCC) (Kilogrammes)	270 kg/an					
7	Ratio annuel de semences utilisées (Kilogrammes/hectare)	130 kg/ha					

Fig. 12. Tableau des valeurs retenues pour les paramètres de FER-AGRI dans les simulations dont les résultats sont présentés dans la figure précédente

Avec ces réglages, les variations climatiques se répercutent sur les rendements céréaliers, mais plus encore sur les surplus qui croissent homothétiquement aux populations. On observe notamment deux pics de valeurs atteints au III<sup>e</sup> et I<sup>er</sup> siècle av. n. è. (que séparent une baisse notable au II<sup>e</sup> siècle av. n. è.) en raison de l'augmentation des températures et des précipitations qui se conjuguent ici à la croissance démographique (fig. 13).

En revanche on observera que les courbes démographiques obtenues par les simulations ne présentent pas d'inflexions brusques indiquant un effet majeur des changements climatiques sur les populations, même lorsque le niveau de production céréalier se trouve vers le seuil de la subsistance. Si l'impact du climat sur la démographie peut sembler ici modéré, on rappellera toutefois que les données de températures et de précipitations

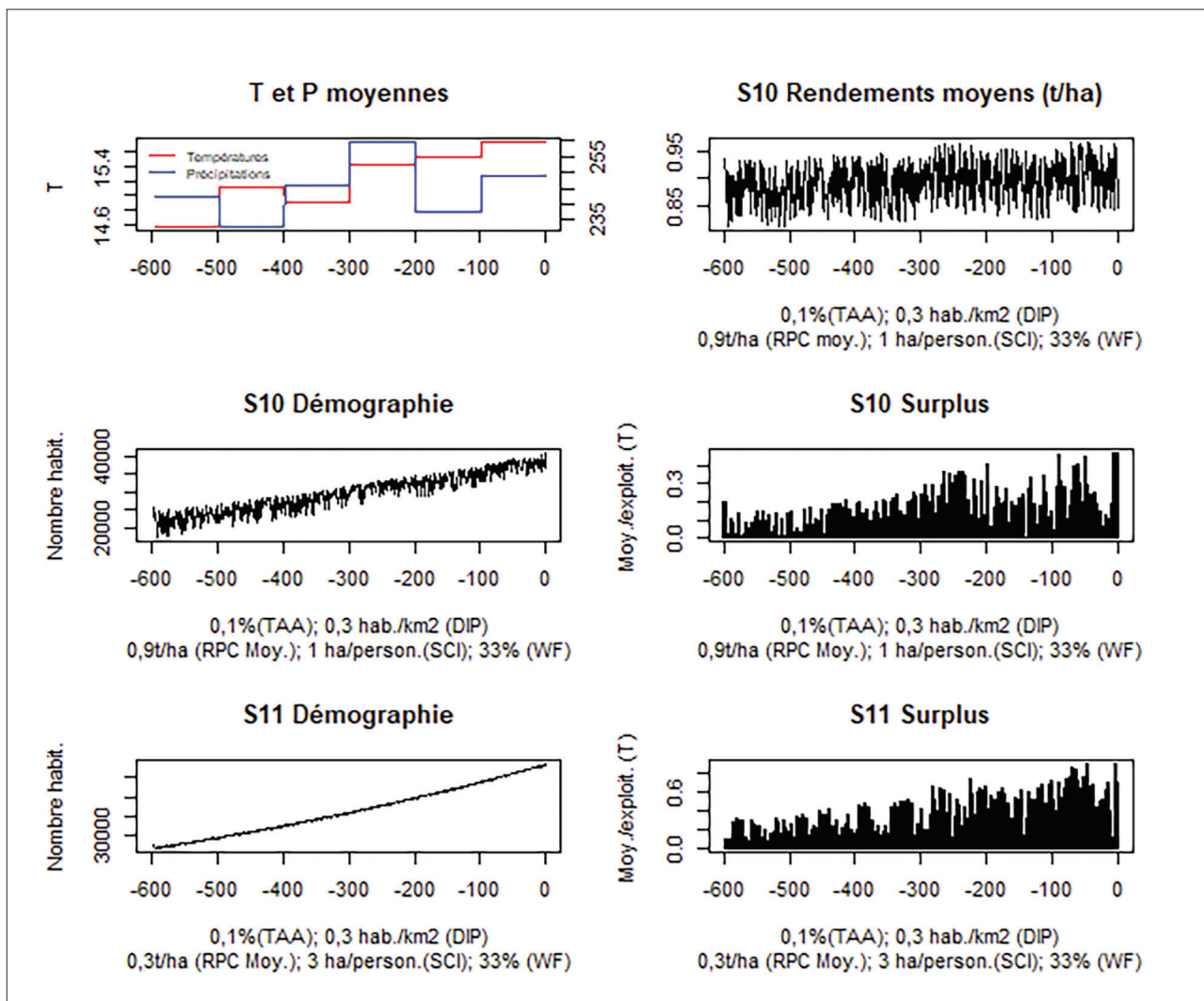


Fig. 13. Courbes démographiques et moyenne des surplus céréaliers dégagés par exploitations du modèle en fonction de différentes valeurs sélectionnées dans les paramètres. Réglages pour un système agricole avec exclusivement labours à bras (S10) et labours à l’araire (S11) (pour les valeurs retenues pour les autres paramètres, voir tableau en Fig. 14.).

	Variables	S7 (labours à bras)	S8 (labours à l’araire)
1	Rendements potentiels en céréales (RPC) (Tonnes/hectare)	± 0,9 T/ha	± 0,3 T/ha
2	Taux d’accroissement annuel (TAA) (Pourcentage)	0,1 %	
3	Densité Initiale de Peuplement (DIP) (habitants/km <sup>2</sup> )	0,3 hab./km <sup>2</sup>	
4	Main-d’œuvre agricole ( <i>Workforce</i> ) (pourcentage sur la population totale)	33 % population	
5	Superficie annuelle cultivée/individu (SCI) (hectares/an)	1 ha/an	3 ha/an
6	Ratio annuel de céréales consommées par individu (RCC) (Kilogrammes)	270 kg/an	
7	Ratio annuel de semences utilisé (RSU) (Kilogrammes/hectare)	130kg/ha	

Fig. 14. Tableau des valeurs retenues pour les paramètres de FER-AGRI pour les simulations présentées en Figure 13.

utilisées en entrée du modèle sont des moyennes centennales qui peuvent lisser d’importantes fluctuations climatiques plus courtes.

Pour percevoir l’impact de ces potentielles variations, nous avons simulé des forçages climatiques d’une durée de quelques décennies au moyen de l’émulateur de LPJmL. La Figure 15 présente par exemple les résultats obtenus en simulant deux périodes de refroidissement d’un demi-siècle (375-325 av. n. è. ; 50-0 av. n. è.), perçues par la dendroclimatologie en Gaule du nord

(Büntgen *et al.* 2011). En abaissant dans le modèle la moyenne des températures annuelles de 2,5°C, les résultats indiquent un fort impact négatif, non seulement sur les surplus, mais aussi sur les courbes démographiques qui présentent alors des creux bien marqués (fig. 15). Si l’on se fie à ces résultats, de courtes et fortes périodes de refroidissement auraient donc pu générer pendant l’âge du Fer de brusques chutes démographiques, à condition toutefois que le niveau de production céréalière se soit alors trouvé aux alentours du seuil de subsistance.

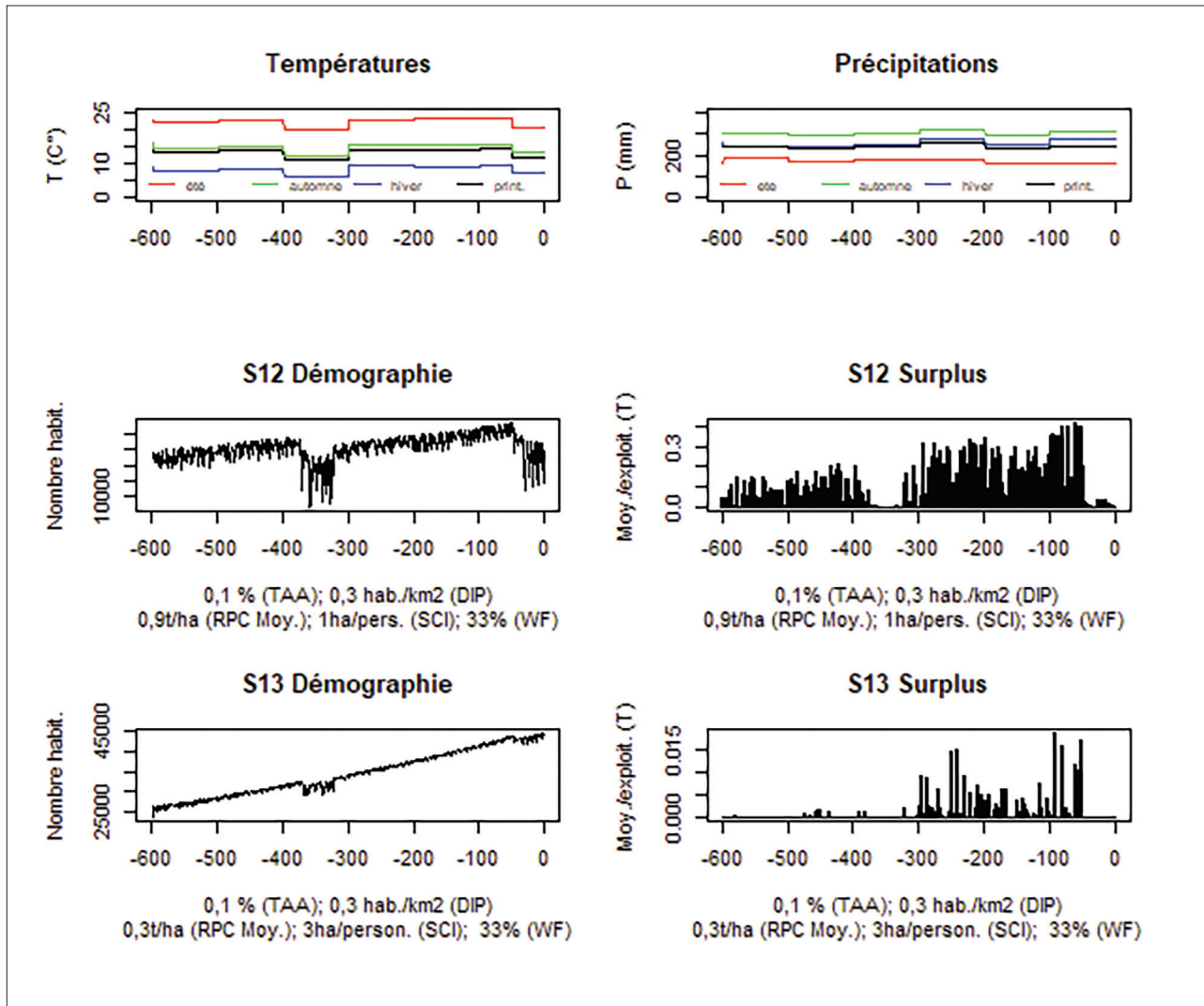


Fig. 15. Graphiques représentant les effets d'une chute des températures de 2,5 °C entre 375-325 av. n. è. et 50-0 av. n. è. sur la démographie et les surplus céréalières (pour le réglage des paramètres des simulations S12 et S13, mêmes réglages que S10 et S11 en Figure 14).

## Discussion

### Quels impacts des variations climatiques sur la démographie en Gaule ?

L'impact des variations climatiques sur les dynamiques d'occupation du sol a été récemment évoqué pour le nord de la Gaule où un synchronisme entre les fluctuations de températures et l'intensité de l'occupation du sol a en effet été remarqué (fig. 16) (Malrain *et al.* 2013). Un index établi par ailleurs à partir des données dendroclimatologiques (Petit *et al.* 2019) permet d'envisager des récurrences d'années de mauvaises récoltes durant les périodes les plus froides de l'âge du Fer, aux IV<sup>e</sup> et I<sup>er</sup> siècle av. n. è. (fig. 17), qui coïncident par ailleurs avec les phases de dépeuplement perçues par le dénombrement régional des occupations archéologiques (fig. 16).

Les résultats obtenus avec le modèle multi-agents FER-AGRI, à l'échelle du sud de la Gaule, conforteraient l'hypothèse d'un

potentiel impact négatif des périodes de refroidissement sur la production céréalière et la démographie, a contrario favorisée par le réchauffement des températures. Pour autant le modèle, qui reproduit le fonctionnement du modèle agro-écosystémique LPJmL, met en évidence que si les températures jouent un rôle prépondérant, l'augmentation des précipitations est aussi déterminante dans ces résultats. Le pic des rendements potentiels en blé indiqué par la modélisation LPJmL au III<sup>e</sup> siècle av. n. è. s'explique par une augmentation conjointe des températures et des précipitations qui apparaît dans la reconstruction paléoclimatique que nous avons utilisée.

Si l'on tente de reproduire les courbes « archéodémographiques » issues des données archéologiques avec les sorties démographiques de FER-AGRI, on peut obtenir par exemple une courbe de forme similaire à celle produite pour le sud-est de la Gaule avec un taux d'accroissement annuel de 0,5 % et en simulant un refroidissement climatique entre 375 et 325 av. n. è. (fig. 18). Ce résultat ne suffit pas à prouver qu'un refroidissement climatique est bien la cause de cette apparente déprise du peuplement au IV<sup>e</sup> siècle av. n. è. en Gaule, qui pourrait s'expliquer

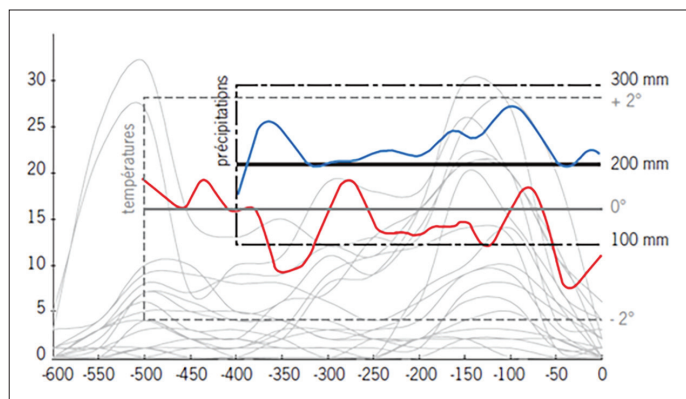


Fig. 16. Graphique des courbes de fluctuations des températures (en rouge) et des précipitations (en bleu) superposées aux courbes archéodémographiques (en gris) pour différentes régions du nord de la Gaule (d'après Malrain *et al.* 2013).

par d'autres facteurs. Il tend toutefois à prouver qu'un forçage climatique aurait eu la capacité de causer une dépopulation abrupte, si toutefois le niveau de productivité céréalière s'était alors trouvé vers un seuil de subsistance.

### Quels effets de « l'Optimum Climatique Romain » sur la démographie ?

L'augmentation bien marquée des rendements céréaliers potentiels au III<sup>e</sup> siècle av. n. è., mis en évidence par la modélisation agroécossystémique, pourrait indiquer un effet très positif du début de « l'Optimum Climatique Romain » sur la productivité agricole. Due à une augmentation des températures mais aussi de la pluviosité, cette hausse des surplus céréalières simulée par le modèle s'accorde avec les résultats de l'index des bonnes et mauvaises années de récolte établi pour le nord de la Gaule, qui mettent en évidence un III<sup>e</sup> siècle av. n. è. particulièrement favorable à la culture du blé (Petit *et al.* 2019) (fig. 17).

On envisage depuis peu que le III<sup>e</sup> siècle av. n. è. pourrait marquer en Gaule le début de cette nouvelle dynamique socio-économique, dont les effets sont toutefois plus clairement perceptibles au siècle suivant (Marion 2016 ; Hiriart 2019). Le II<sup>e</sup> siècle av. n. è. se caractérise en effet par un développement patent des échanges monétarisés, l'essor des agglomérations (ouvertes ou fortifiées de oppida) ainsi que l'intensification de l'occupation du sol, clairement mise en évidence par les enquêtes archéologiques régionales. Si d'après les données dendroclimatologique de Gaule septentrionale, les caractéristiques du climat du III<sup>e</sup> siècle av. n. è. semblaient jusqu'alors peu déterminantes (Marion 2016), les résultats de notre modèle -qui intègre un autre type de données paléoclimatiques- permettent de reconsidérer désormais l'importance du facteur climatique dans l'amorce de cette dynamique socio-économique.

Une augmentation significative de la production agricole et des surplus céréalières au III<sup>e</sup> siècle av. n. è., sous l'effet combiné d'un rehaussement des températures et des précipitations, aurait non seulement permis de nourrir une population extra-agricole plus importante, mais aussi de développer le commerce des

céréales. Au-delà de l'impact directement positif sur l'agriculture, « l'Optimum Climatique Romain » aurait donc pu stimuler le développement de l'artisanat et du commerce. Après un IV<sup>e</sup> siècle av. n. è. globalement défavorable à la céréaliculture d'un point de vue climatique, le début de cet optimum a sans doute pu contribuer à donner en Gaule une impulsion décisive à la nouvelle dynamique d'essor socio-économique et démographique amorcée au milieu du Second âge du Fer.

Si le modèle FER-AGRI met en évidence un effet potentiellement bien marqué sur les surplus agricoles (fig. 15), les effets sur la démographie apparaissent plus modérés. Nous pensons toutefois que ces effets restent encore sous-estimés par le modèle qui ne prend pas encore en compte les relations sociétés-environnement dans toute leur complexité. L'amélioration des conditions de subsistance due à une hausse de la productivité céréalière devait certainement rétroagir positivement sur l'augmentation du taux d'accroissement annuel, qui est dans cette première version du modèle un paramètre indépendant des autres facteurs.

### Quel(s) modèle(s) démographique(s) pour les populations de l'âge du Fer ?

Différents modèles démographiques ont été pris en considération pour étudier la démographie des populations de l'âge du Fer (Isoardi 2008, d'après Djindjian 1991 ; Dupâquier 2001 ; Pumain, Saint-Julien 2001). Dans le modèle démographique de Verhulst, la croissance démographique est vouée à rencontrer un seuil maximal en raison des limitations imposées dans la production agricole par la performance des systèmes agricoles et des ressources du milieu (système peuplant 1). Dans le modèle malthusien, la croissance des populations est limitée par des facteurs internes ou externes qui imposent une forme d'autorégulation ou mènent à la dissolution du système (systémolyse). Enfin, d'après le modèle « boserupien », qui prend le contrepied de celui de Malthus (Boserup 1965), la croissance démographique est un moteur d'innovation et de progrès, qui permet aux sociétés de surmonter et de dépasser les limitations de la production agricole liées aux ressources du milieu et à la performance des systèmes agricoles (système peuplant 2) (fig. 19).

Cette première version de FER-AGRI permet notamment de tester la validité d'un modèle de croissance logistique « verhulstien » par sa capacité à rencontrer une capacité de charge qui entraîne un plafonnement démographique. D'après les courbes archéodémographiques établies d'après les enquêtes archéologiques régionales menées en Gaule, on ne repère pas de plateaux suggérant clairement que la démographie des populations de l'âge du Fer ait pu atteindre un tel plafond. Le décompte régional des occupations archéologiques esquisse pendant le I<sup>er</sup> âge du Fer une croissance arrêtée vers 500 av. n. è. puis une déprise durant le IV<sup>e</sup> siècle av. n. è., avant une nouvelle intensification de l'occupation du sol perceptible au milieu du Second âge du Fer dans toute la Gaule (fig. 16 et 18d). Il n'apparaît donc pas que la démographie des populations de l'âge du Fer ait pu plafonner en Gaule en raison d'une limitation de la production céréalière imposée par la performance des

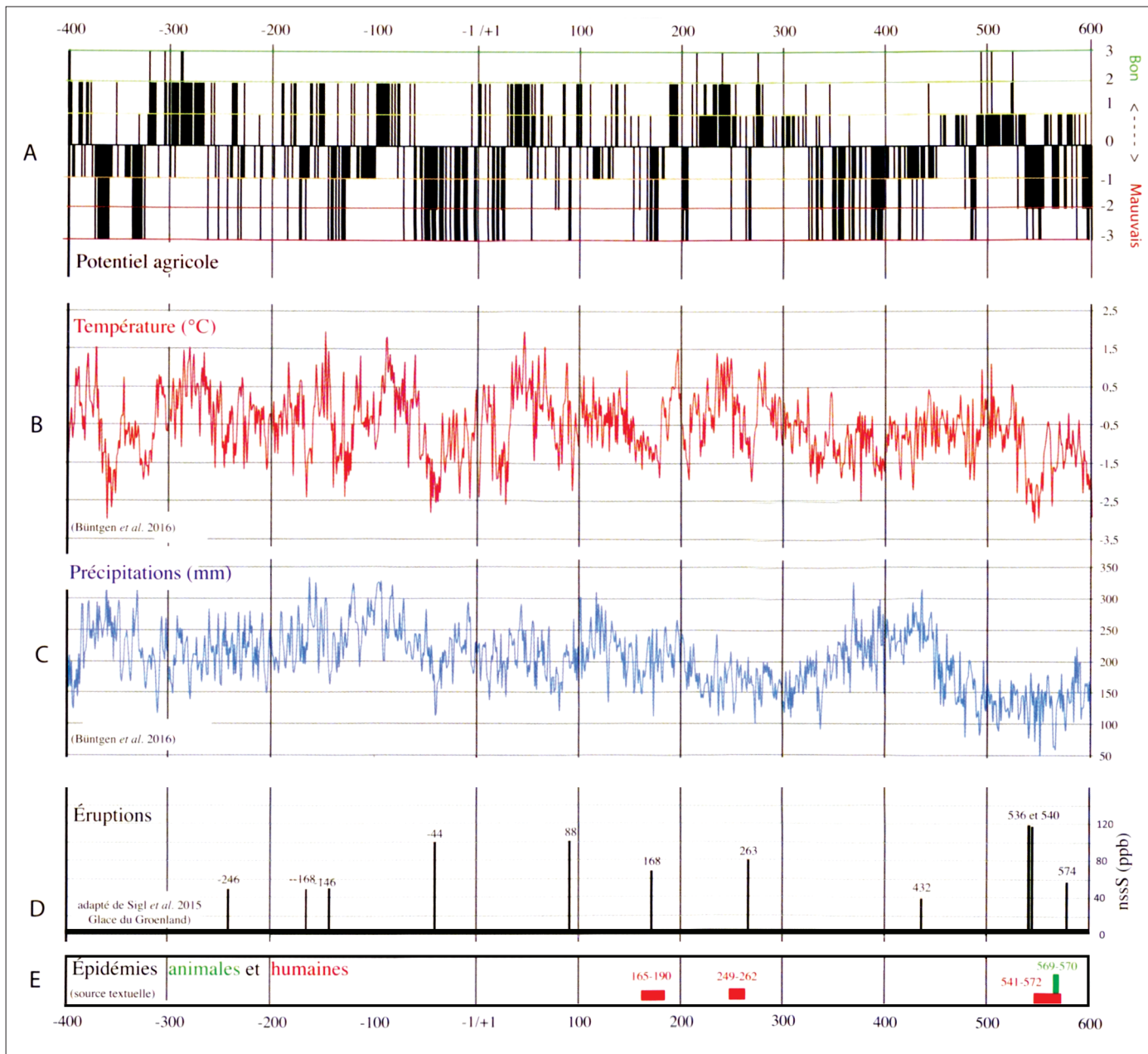


Fig. 17. Graphique présentant l'index des bonnes et mauvaises récoltes annuelles en blé annuel et valeurs moyennes annuelles de températures et précipitations dans le nord de la Gaule (d'après Petit *et al.* 2019)

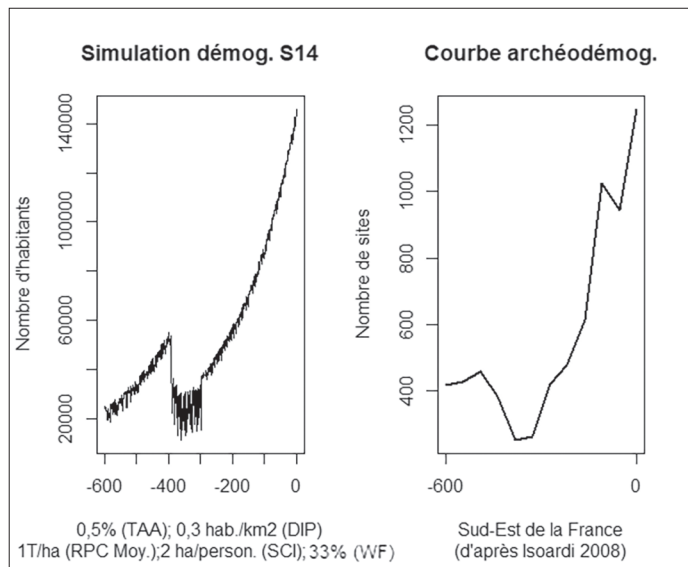


Fig. 18. Graphique présentant les résultats d'une simulation avec un coup de froid au IV<sup>e</sup> siècle av. n. è. (en haut) comparés à des courbes d'évolution de peuplement d'après les données archéologiques dans le sud-est de la Gaule (en bas).

systèmes agricoles et des ressources en terres cultivables. Si l'on se fie à ces courbes établies d'après les données archéologiques, le modèle de croissance logistique ne semble pas opérant.

De manière contrefactuelle, les courbes démographiques de forme sigmoïdale produites par FER-AGRI indiquent toutefois que la capacité de charge aurait pu être atteinte avec un taux d'accroissement annuel de 0,5 % par an et une densité de population initiale fixée en 600 av. n. è. à 5,5 habitants/km<sup>2</sup> (fig. 11 f). Bien qu'ils puissent être jugés élevés, ces chiffres restent contenus dans les intervalles de valeur que nous avons retenus. Ces résultats nous amènent donc à penser que la démographie des populations de l'âge du Fer aurait peut-être pu atteindre en Gaule méridionale la capacité porteuse (le maximum de production en fonction des terres exploitables), si la croissance amorcée vers 600 av. n. è. n'avait pas été stoppée vers 500 av. n. è. Alors que les raisons de cette apparente déprise sont encore discutées, le modèle tend à démontrer qu'un refroidissement climatique de quelques décennies aurait eu la capacité de causer un tel infléchissement démographique, à condition toutefois que

la productivité agricole se soit alors trouvée à un niveau proche du seuil de subsistance.

### Quelles perspectives de développement pour le modèle ?

Si FER-AGRI permet de prendre en compte le modèle de croissance logistique « verhulstien », il est en revanche moins adapté -dans cette première version- au modèle malthusien. La production agricole y augmente en effet de manière géométrique, de pair avec la démographie qui ne peut être freinée par des facteurs internes ou externes. Les taux de mortalité et de natalité y restent indépendants des fluctuations du climat qui rétroagissaient pourtant certainement sur la démographie par l'amélioration ou la dégradation des conditions de subsistance. Des relations d'interdépendance entre ces variables pourraient donc encore être établies et programmées. Des scénarios « boserupiens » restent aussi à explorer de manière plus approfondie. L'implémentation d'un module d'Intelligence Artificielle de type

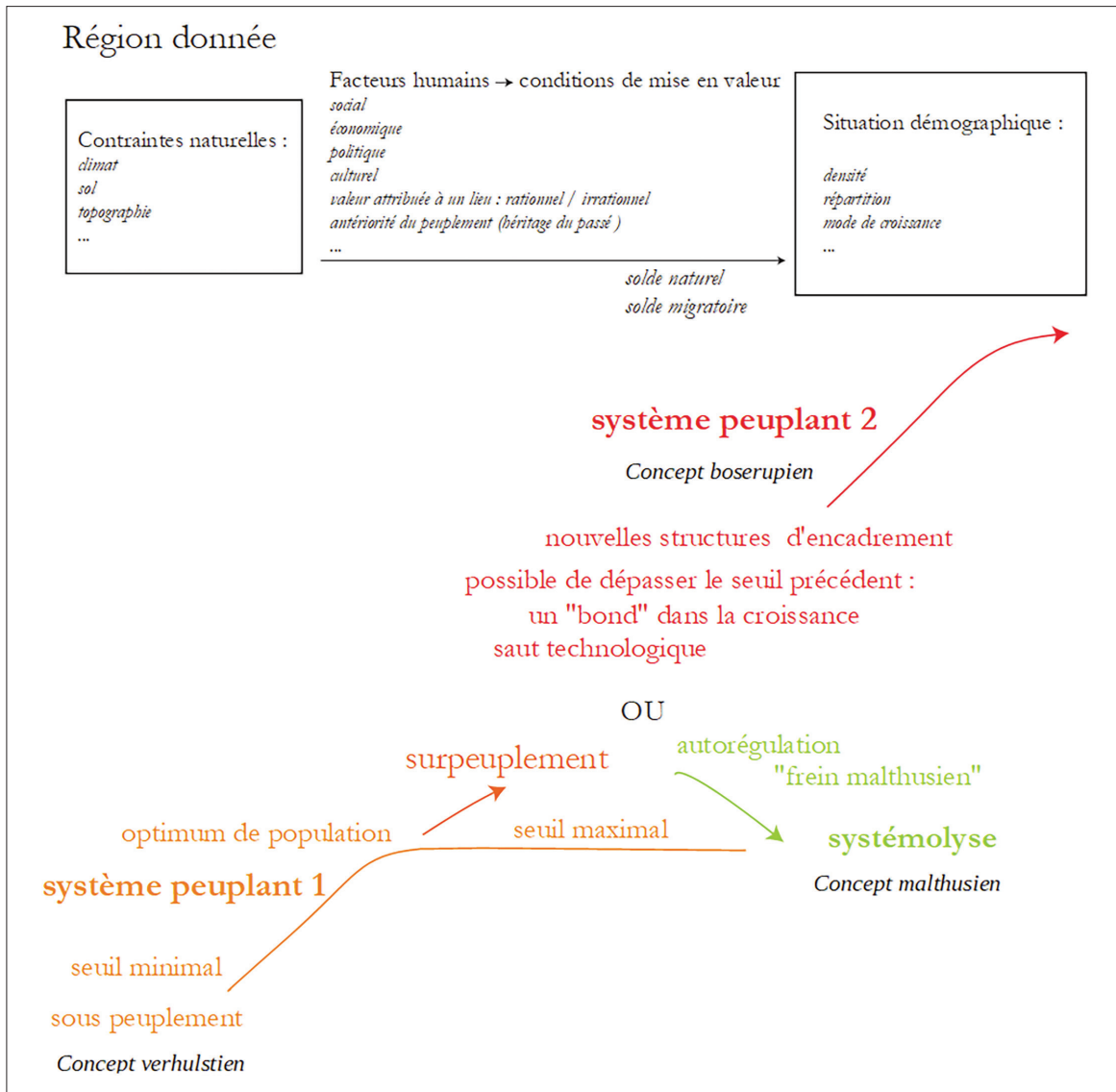


Fig. 19. Différentes hypothèses envisagées pour les dynamiques démographiques de l'âge du Fer (d'après D. Isoardi, inédit). Illustration produite à partir des concepts développés dans Landry 2020 (1934) ; Sauvy 1952 et 1966 ; Boserup 1974 ; Derruau 1971 ; Bideau 1983 ; Bley, Boëtsch 1999 ; Baudelle 2000 ; Pumain, Saint-Julien 2001 ; Girard 1982.

*belief-desire-intention* (BDI), pourrait par exemple amener les populations (virtuelles) à prendre des décisions pour développer des stratégies d'adaptation face à une situation critique (pénurie de terre, excédent de population, etc.).

En outre, on rappellera que les habitats/exploitations programmés dans FER-AGRI sont indépendants les uns des autres, sans possibilité d'interactions. En cas de déficit de la production locale, une exploitation n'a donc pas la possibilité d'importer des céréales depuis un autre centre de production. L'existence d'un commerce céréalier dès l'âge du Fer est pourtant envisagée dans le sud de la Gaule depuis plusieurs décennies (Garcia 1987). Il sera possible d'enrichir à l'avenir la programmation du modèle multi-agents pour que les habitats localisés à proximité d'une voie fluviale ou d'un itinéraire terrestre reconnu pour l'âge du Fer puissent importer des céréales en cas de déficit de la production locale, depuis un autre centre de production dégageant des surplus. Cette nouvelle fonctionnalité aurait pour conséquence assurée de réduire la vulnérabilité des populations aux aléas climatiques simulés par le modèle.

D'autres perspectives possibles de développement concernent encore les rendements potentiels des céréales. Le fichier « *Crop Functional Type Wheat* » utilisé dans le modèle LPJmL pour les « céréales tempérées » regroupe et moyenne les caractéristiques du blé froment, de l'orge du seigle et de l'avoine (Bondeau *et al.* 2007). Il serait toutefois possible de modéliser individuellement les caractéristiques phénologiques de chacune des principales espèces et variétés de céréales cultivées pendant l'âge du Fer (orge, amidonnier, engrain, millet, etc.). Celles-ci ne produisaient pas des rendements identiques et pouvaient aussi réagir très différemment aux changements climatiques. La simulation des rendements potentiels pour chacun de ces différents types de céréales pourrait donc venir nuancer les résultats du modèle.

## Conclusion

Par leur capacité à modéliser des systèmes complexes, les systèmes multi-agents offrent désormais la possibilité de tester de multiples hypothèses sur les dynamiques croisées d'évolution des sociétés et de l'environnement. Conçu pour étudier l'impact des changements climatiques sur l'agriculture et la démographie pendant l'âge du Fer en Gaule méridionale, le modèle FER-AGRI -très novateur par l'intégration du modèle agro-écossystémique LPJmL- fonctionne avec un nombre relativement limité de paramètres agricoles, démographiques et climatiques pour lesquels nous avons testé différentes valeurs à partir de données chiffrées livrées par des travaux historiques, archéologiques et paléthnographiques.

Les premiers résultats obtenus avec ce modèle appuient l'hypothèse d'un impact potentiellement marqué des changements climatiques qui se sont produits pendant l'âge du

Fer sur la démographie. Si de courtes périodes de froids secs sont susceptibles d'avoir entraîné des chutes démographiques (plus ou moins prononcées selon les hypothèses envisagées) par le biais d'une baisse des rendements céréaliers, un réchauffement climatique accompagné d'une hausse des précipitations (« Optimum Climatique Romain ») pourrait avoir eu vers le milieu du III<sup>e</sup> s. av. n. è. un effet particulièrement favorable sur la démographie et le développement économique des sociétés gauloises.

D'une manière plus générale, les multiples hypothèses qui peuvent être explorées grâce aux SMA se prêtent à une approche contrefactuelle qui ouvre à de nouveaux questionnements. Quelle aurait pu être par exemple la trajectoire des sociétés de l'âge du Fer en Gaule si une importante déprise n'avait pas interrompu au V<sup>e</sup> siècle av. n. è. la phase de croissance démographique amorcée aux alentours de 600 av. n. è. ? Les résultats des simulations que nous avons réalisées suggèrent que les sociétés auraient pu atteindre un plafond démographique. L'intégration d'un plus grand nombre de paramètres en interactions devrait permettre à l'avenir de prendre en compte plus de complexité et d'explorer de nouveaux scénarios favorables au renouvellement des problématiques de recherche.

## Remerciements

Les recherches présentées dans cet article ont été menées dans le cadre du projet pluridisciplinaire RDMed (*Resilience and Adaptation to Droughts and Extreme Climate Events in the Mediterranean: Lessons Learnt from Past on a 1.5°C or more Warmer World*) qui a bénéficié d'une aide du gouvernement français au titre du programme investissement d'avenir, "initiative d'excellence" d'Aix Marseille Université A\*Midex.

Les auteurs tiennent à remercier les autres participants de ce projet avec lesquels des échanges réguliers ont permis de faire progresser les discussions pluridisciplinaires et les réflexions sur la question de l'adaptation des sociétés anciennes au changement climatique durant ces trois derniers millénaires : Philippe Leveau (Centre Camille Jullian, Aix-en-Provence), Alan Kirman (EHESS, Paris), Sylvain Olivier (Université de Nîmes), Cees Passchier (Université de Mayence, Allemagne), Gül Sürmelihiindi (Université de Mayence, Allemagne), Daniel Contreras (Université de Floride, États-Unis). Nous exprimons aussi notre reconnaissance à Luis Valdès dont les remarques et les suggestions ont permis d'orienter les questions posées au modèle. Nous voulons enfin remercier Clara Filet et Alessandro Peinetti qui ont accepté d'être les relecteurs de cet article. Leurs corrections attentives et leurs remarques constructives sur le fonctionnement du modèle ouvrent de nouvelles pistes pour son développement à venir.

La modélisation de l'ensemble de la région au niveau de l'occupation archéologique (sites d'habitat, nécropoles villes et villae est disponible sur ArkeoGIS ([arkeogis.org](http://arkeogis.org)) et Bernard 2018).



## Bibliographie

- Adams 1965. Adams R. McC., *Land behind Baghdad: A history of Settlement on the Diyala Plains*. Chicago et Londres.
- Axtell *et al.* 2002. Axtell R. L., Epstein J. M., Dean J. S., Gumerman G. J., Swedlund A. C., Harburger J., Chakravarty S., Hammond R., Parker J., Parker M., Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *PNAS*, 99, 7275-7279.
- Barker 1985. Barker G., *Prehistoric farming in Europe*. Cambridge.
- Baudelle 2000. Baudelle G., *Géographie du peuplement*. Paris.
- Bernard 2018. Bernard, L. ArkeoGIS. In *Proceedings of the session n°III of the XVIII<sup>e</sup> UISPP congress, Paris, June 2018 Session III-Construire des référentiels partagés : Webmapping et archéologie*. OpenScience, [en ligne] <https://www.openscience.fr/ArkeoGIS-1210>.
- Bertoncello *et al.* 2018. Bertoncello F., Ouriachi M.-J., Da Costa Pereira C., Tettamanzi A., Purdue L., Contreras D., Fox D., Hanaki N., Ajroud R., Lefebvre J., Modelling complex systems in Archaeology: general issues and first insights from the ModelAnSet project. In Argentina M., Barland S., Reynaud-Bouret P., Cauneau F., Guillouzic K., Kuhl U., Passot T., Planchon F. dir., *Proceedings of the Complex Systems, Academy of Excellence*, 145-154.
- Bideau 1983. Bideau A., Les mécanismes autorégulateurs des populations traditionnelles. *Annales ESC*, 38, 5, 1040-1057.
- Biraben 1969. Biraben J.-N., Durée de la vie dans la population de Columnata (épipaléolithique oranais). *Population*, 3, 487-500.
- Bley, Boëtsch 1999. Bley D., Boëtsch G., *L'anthropologie démographique*. Paris.
- Bocquet-Appel *et al.* 2014. Bocquet-Appel J.-P., Dubouloz J., Moussa R., Berger J.-F., Tresset A., Ortu E., Vigne J.-D., Bendrey R., Bréhard S., Schwartz D., Salavert A., Sanchez-Goñi M. F., Ertlen D., Gauvry Y., Davtian G., Vander Linden M., Lenneis E., Noiret L., Guillaumont A., O'Connor M., Multi-agent Modelling of the LBK Neolithic, a Study in Progress. In Whittle A., Bickle P. dir., *Early Farmers, The view from Archaeology and Science*, 53-69.
- Bocquet-Appel 2010. Bocquet-Appel J.-P., la transition démographique agricole au Néolithique. In Demoule J.-P. dir., *La révolution néolithique dans le monde*, 301-317.
- Bondeau *et al.* 2007. Bondeau A., Smith P.-C., Zaehle Z., Schaphoff S., Lucht W., Cramer W., Gerten D., Lotze-Campen E., Müller C., Reichstein M., Smith B., Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 13, 679-706.
- Boserup 1965. Boserup E., *The Conditions of agricultural growth, The Economics of Agrarian Change Under Population Pressure*. London.
- Boserup 1974. Boserup E., Environnement, population et technologie dans les sociétés primitives. *Annales ESC*, 3, 538-552.
- Bossard 2019. Bossard S., Évolution du stockage agricole dans la moitié septentrionale de la France à l'âge du Fer (VI<sup>e</sup> – I<sup>er</sup> s. av. n. è.). In Martin S. dir., *Rural Granaries in Northern Gaul (Sixth Century BCE – Fourth Century CE)*, 51-72.
- Bowen 1961. Bowen H. C., *Ancients Fields. A Tentative Analysis of Vanishing Earthworks and Landscapes*. London.
- Büntgen *et al.* 2011. Büntgen U., Tegel W., Nicolussi K., McCormick M., Frank D., Trouet V., Kaplan J.O., Herzig F., Heussner K.U., Wanner H., Luterbacher J., Esper J., 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility. *Science*, 331 – 6017, 578-582.
- Cimler *et al.* 2012. Cimler R., Olševičová K., Machálek T., Danielisová A., Agent-based Model of Agricultural Practices in Late Iron Age. In Inuiguchi M., Kusunoki Y., Seki M. dir., *Proceedings of the 15th Czech-Japan seminar on data analysis and decision making under uncertainty*. Osaka, 166-171.
- Clark 1963. Clark C., Agricultural productivity in relation to population. In Wolstenholme G. dir., *Man and his future*. Londres, 23-35.
- Comet 1992. Comet G., *Le paysan et son outil. Essai d'histoire technique des céréales (France VIII<sup>e</sup> – XV<sup>e</sup> s.)*. Rome.
- Contreras *et al.* 2018. Contreras D., Hiriart E., Bondeau A., Kirman A., Guiot J., Bernard L., Suarez R., Van der Leeuw S. Regional paleoclimates and local consequences: Integrating GIS analysis of diachronic settlement patterns and process-based agroecosystem modeling of potential agricultural productivity in Provence (France). *Plos One*, 13, 1-27.
- Contreras *et al.* 2019. Contreras D. A., Bondeau A., Guiot J., Kirman A., Hiriart E., Bernard L., Suarez R., Fader M., From Paleoclimate Variables to Prehistoric Agriculture: Using a process-based agroecosystem model to simulate the impacts of Holocene climate change on potential agricultural productivity in Provence, France. *Quaternary International*, 501 – B, 303-316.
- Danielisová et Hajnalová 2014. Danielisová A., Hajnalová M., Oppida and agricultural production – state of the art and prospects. Case study from Staré Hradisko oppidum (Czech Republic). In Hornung S. dir., *Produktion- Distribution - Ökonomie. Siedlungs- und Wirtschaftsmuster der Latènezeit, Akten des internationalen Kolloquiums in Otzenhausen, 28.-30. Oktober 2011*. Bonn, 407-428. (Universitätsforschungen zurprähistorischen Archäologie, 258).
- Danielisová *et al.* 2015. Danielisová A., Olševičová K., Cimler R., Machálek T., Understanding the Iron Age economy: sustainability of agricultural practices under stable population growth. In Wurzer G., Kowarik K., Reschreiter H., dir., *Agent-based Modeling and Simulation in Archaeology*. Berlin, 183-216.
- Deffressigne 2012. Deffressigne S., Évolution du stockage au sein d'un terroir entre le IX<sup>e</sup> et le II<sup>e</sup> s. avant notre ère. Greniers, silos et vases entre Toul et Nancy. *Archéopages*, 34(07), 28-37.
- Derruau 1971. Derruau M., *Nouveau précis de géographie humaine*. Paris.
- Djindjian 1991. Djindjian F., *Méthodes pour l'archéologie*. Paris.
- Dupâquier 2001. Dupâquier M., *Démographie*. Paris.
- Fader *et al.* 2015. Fader M., von Bloh W., Shi S., Bondeau A., Cramer W., Modelling Mediterranean agro-ecosystems by including agricultural trees in the LPJmL model. *Geosci. Model Dev.*, 8, 3545-3561.
- Garcia 1987. Garcia D., Observations sur la production et le commerce des céréales en Languedoc méditerranéen durant l'Age du Fer : les formes de stockage des grains. *Revue Archéologique de Narbonnaise*, 20, 43-98.
- Girard 1982. Girard A., Adolphe Landry et la démographie. *Revue française de sociologie*, 23-1, 111-126
- Gransar 2000. Gransar F., Le stockage alimentaire sur les établissements ruraux de l'âge du Fer en France septentrionale : complémentarité des structures et tendances évolutives. In Marion S., Blanquaert G. dir., *Les installations agricoles de l'âge du Fer en France septentrionale*, Paris, 277-297 (Études d'Histoire et d'Archéologie 6).
- Guiot et Kaniewski 2015. Guiot J., Kaniewski D., The Mediterranean Basin and Southern Europe in a warmer world: what can we learn from the past? *Frontiers in Earth Science, Frontiers Media*, 3.
- Halstead 2014. Halstead P., *Two oxen ahead, Pre-Mechanized Farming in the Mediterranean*. Oxford.
- Hassan 1973. Hassan F. A., On mechanisms of population growth during the Neolithic. *Current anthropology*, 14-5, 535-542.

- Hiriart 2019. Hiriart E., Les débuts de la monétarisation des échanges en Europe celtique (III<sup>e</sup> siècle-début du II<sup>e</sup> siècle avant notre ère). *Archéopages*, HS 5, 56-63.
- Isoardi 2008. Isoardi D., *Les populations protohistoriques du Sud-Est de la France : essai d'approche démographique*. Mémoire de thèse, Aix-en-Provence, Université de Provence.
- Jardé 1925. Jardé M., *Les céréales dans l'Antiquité grecque, la production*. Paris.
- Joyce 2019a. Joyce J., *Farming along the Limes, using agent-based modelling to investigate possibilities for subsistence and surplus-based agricultural production in the Lower Rhine delta between 12 BCE and 270 BCE*. Mémoire de thèse, Amsterdam, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Joyce 2019b. Joyce J., Chapter 7. Modelling Agricultural Strategies in the Dutch Roman Limes via Agent-Based-Modelling (ROMFARMS). In Verhagen P., Joyce J., Groenhuijzen M. R. dir., *Finding the Limits of the Limes*, Berlin, 109-127.
- Kanters et al. 2021. Kanters H., Brughmans T., Romanowska I., Sensitivity analysis in archeological simulation: An application to the MERCURY model. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 38, 102974.
- Kohler et Gumerman 2000. Kohler T. A., Gumerman G. J., *Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*, Oxford.
- Lake 2020. Lake M., Spatial agent-based modelling. In Gillings M., Hacıgüzeller P., Lock G. dir., *Archaeological Spatial Analysis, A Methodological Guide*. Oxon et New-York, 247-272.
- Landry 2020 (1934). Landry A., *La révolution démographique, Études et essais sur les problèmes de la population*. Paris.
- Le Roux 2011. Le Roux P., *La toge et les armes, Rome entre Méditerranée et Océan*. Rennes.
- Machálek et al. 2012. Machálek T., Olševičová K., Cimler R., Modelling population dynamics for archaeological simulations. In Ramík J., Stavárek D. dir., *Proceedings of the 30th international conference mathematical methods of economics*. Karviná (School of Business Administration, Silesian University), 536-539.
- Malrain et al. 2013. Malrain F., Blancaert G., Lohro T., *L'habitat rural du second âge du Fer, rythmes de création et d'abandon au nord de la Loire*. Paris.
- Marion 2016. Marion S., Facteurs internes-facteurs externes de l'économie de la fin de l'âge du Fer : la mutation du III<sup>e</sup> s. av. n. è. à l'origine du développement économique du II<sup>e</sup> s. av. n. è. ? In Blancaert G., Malrain F. dir., *Évolutions des sociétés gauloises du Second âge du Fer, entre mutations internes et influences externes, Actes du 38<sup>e</sup> colloque AFEAF*, Amiens, 553-561 (Revue archéologique de Picardie N<sup>o</sup> spécial).
- Masset 1987. Masset C., Estimateurs paléodémographiques. In Ferembach D., dir., *L'Homme, son évolution, sa diversité. Manuel d'anthropologie physique*. Paris, 65-69.
- McCormick et al. 2012. McCormick M., Büntgen U., Cane M.A., Cook E. R., Harper K., Huybers P. J., Litt T., Manning S. W., Mayewski P. A., More A. F. M., Nicolussi K., Tegel W., Climate Change during and after the Roman Empire: Reconstructing the Past from Scientific and Historical Evidence. *Journal of Interdisciplinary History*, 43 – 2, 169-220.
- Olševičová et al. 2013. Olševičová K., Cimler R., Machálek T., Agent-Based Model of Celtic Population Growth: NetLogo and Python. In Nguyen N., Trawiński B., Katarzyna R., Jo G.S. éd., *Advanced Methods for Computational Collective Intelligence*. Berlin, Heidelberg, (Studies in Computational Intelligence 457).
- Olševičová et Danielisová 2015. Workforce allocation in self-sufficient economy in Late Iron Age. In Jedlička P. dir., *Double-blind peer-reviewed proceedings part V. of the international scientific conference Hradec Economic Days 2015 Economic Development and Management of Regions February 3rd and 4th, 2015 Hradec Králové, Czech Republic*. Hradec Králové, 78-84 (Hradec Economic Days Vol. 5(5)).
- Ouzoulias 2006. Ouzoulias P., *L'économie agraire de la Gaule, aperçus historiographiques et archéologiques*. Mémoire de thèse, Besançon, Université de Franche-Comté.
- Petit et al. 2019. Petit C., Bernigaud N., Binois A., Camizuli E., Fajon P., Fechner K., Giosa A., Parrondo B., Rossignol B., Spiesser J., Conditions environnementales de l'exploitation des espaces ruraux en Gaule du Nord. In Reddé M. dir., *Gallia Rustica 2*, 31-82.
- Prats et al. 2020. Prats G., Antolín F., Alonso N., Household storage, surplus and supra-household storage in prehistoric and protohistoric societies of the Western Mediterranean. *PLoS ONE*, 15-9, e0238237.
- Pumain et Saint-Julien 2001. Pumain D., Saint-Julien T., *Les interactions spatiales : flux et changements dans l'espace géographique*. Paris.
- Renfrew 1972. Renfrew C., *The Emergence of Civilisation: The Cyclades and the Aegean in the Third Millennium B.C*. Londres.
- Reynolds 1981. Reynolds P. J., Deadstock and livestock. In Mercer R. dir., *Farming Practice in British Prehistory*. Edinbourg, 97-122.
- Reynolds 1992. Reynolds P. J., Crop yields of the Prehistoric cereal types Emmer and Spelt: The Worst Option. In Anderson P. C. dir., *Préhistoire de l'Agriculture : Nouvelles Approches Expérimentales et Ethnographiques*. Paris, 383-393 (Monographie du CRA/CNRS 6).
- Romanowska et al. 2019. Crabtree, S. A., Harris, K., & Davies, B. (2019). Agent-based modeling for archaeologists: Part 1 of 3. *Advances in archaeological practice*, 7(2), 178-184.
- Romanowska et al. 2021. Romanowska I., Wren C. D., Crabtree S. A., [Agent-based modeling for archaeology] *Simulating the complexity of Societies*. Santa-Fe.
- Sauvy 1952. Sauvy A., *Théorie générale de la population. I. Économie et population*. Paris.
- Sauvy 1966. Sauvy A., *Théorie générale de la population. II. La vie des populations*. Paris.
- Thouvenot et Gransar 2000. Thouvenot X., Gransar F., La gestion du terroir des établissements ruraux de La Tène finale dans la vallée de l'Aisne. Un essai de modélisation: le méandre de Bucy-le-Long (Aisne). In Marion S. et Blancaert G. dir., *Les installations agricoles de l'âge du Fer en France septentrionale*. Paris, 157-167.
- Titow 1972. Titow J. Z., *Winchester Yields: A Study in Medieval Agricultural Productivity*. Cambridge - New-York.
- Wurzer et al. 2015. Wurzer G., Kowarik K., Reschreiter dir., *Agent-based Modeling and Simulation in Archaeology*. Heidelberg, New-York, Dordrecht, Londres.
- Zech-Matterne 2001. Zech-Matterne V., *Agriculture et alimentation végétale durant l'âge du Fer et l'époque gallo-romaine en France septentrionale*. Montagnac.
- Zimmermann et al. 2009. Zimmermann A., Hilpert J., Wendt K. P., Estimations of population density for selected periods between the Neolithic and AD 1800. *Hum biol.*, 81(2-3), 357-380.

## Auteurs

Nicolas Bernigaud, Chercheur postdoctoral, Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence, France ;  
Bernigaud.nico@orange.fr

Alberte Bondeau, Chargée de Recherche CNRS, Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE, CNRS, Aix Marseille Univ, Avignon Univ, IRD, UMR-7263), Aix-en-Provence, France ; alberte.bondeau.imbe.fr

Joël Guiot, Directeur de Recherche CNRS émérite, Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence, France ;  
guiot@cerge.fr

Loup Bernard, Maître de Conférence, Université de Strasbourg, Université de Haute-Alsace, CNRS, Archimède UMR 7044, Strasbourg, France ; loup.bernard@unistra.fr

Delphine Isoardi, Chargée de Recherche CNRS, Aix Marseille Univ, CNRS, CCJ, Aix-en-Provence, France ;  
Delphine.ISOARDI@univ-amu.fr

Eneko Hiriart, Chargé de Recherche CNRS, Archéosciences Bordeaux (UMR 6034), GPR Human Past, Pessac, France ;  
eneko.hiriart@u-bordeaux-montaigne.fr

Frédérique Bertoncello, Chargée de Recherche CNRS, Université Côte d'Azur, CNRS, CEPAM - UMR 7264 CNRS, Nice, France ;  
frederique.bertoncello@cepam.cnrs.fr

Marie-Jeanne Ouriachi, Maître de Conférence, Université Côte-d'Azur, CEPAM - UMR 7264 CNRS, Nice, France ;  
Marie-Jeanne.OURIACHI@univ-cotedazur.fr

## Résumé

Cet article présente le modèle multi-agents FER-AGRI (accessible et téléchargeable : <https://github.com/Bernigaud2021/FER-AGRI>) que nous avons développé pour étudier l'impact des changements climatiques sur la production céréalière et la démographie des populations en Gaule méridionale entre le VI<sup>e</sup> siècle et le I<sup>er</sup> siècle av. n. è. Ce Système Multi-Agents (SMA) simule à un pas de temps annuel sur ces six siècles la croissance démographique de populations dans le cadre d'exploitations agricoles virtuelles qui réalisent chaque année des récoltes dont le volume fluctue en fonction des rendements céréaliers. Ces rendements calculés grâce à une émulation du modèle agroécosystémique Lund-Potsdam-Jena-managed-Land (LPJmL) varient avec les fluctuations du climat reconstruites à partir de données palynologiques. Les valeurs des paramètres climatiques, agricoles et démographiques pris en compte dans ce modèle sont modifiables dans des intervalles définis d'après des données archéologiques, historiques et paléontologiques, afin de tester différents scénarios sur les interactions sociétés-climats. D'une manière générale, les premiers résultats de ce modèle confortent l'hypothèse d'un effet négatif des périodes de refroidissement climatique sur la production céréalière et la démographie, qui apparaissent à contrario favorisées par l'augmentation des températures et des précipitations. Les résultats des simulations mettent notamment en évidence une augmentation marquée de la production céréalière à partir du III<sup>e</sup> siècle av. n. è., ce qui accrédite l'idée d'un rôle important du réchauffement climatique de la fin de l'âge du Fer (ou « Optimum Climatique Romain ») dans l'essor économique-démographique de la Tène moyenne en Gaule. La sensibilité de la démographie des populations humaines aux changements climatiques apparaît toutefois plus ou moins exacerbée selon les différentes hypothèses prises en compte sur la nature et les performances des systèmes agricoles de l'âge du Fer. FER-AGRI présente de nombreuses possibilités d'évolution qui permettront de développer dans les années à venir ce premier modèle pour prendre en compte plus de complexité encore dans la restitution de la trajectoire des sociétés protohistoriques, en interaction avec leur environnement.

## Abstract

This article presents the FER-AGRI agent-based model that we developed to study the impact of climate change on cereal production and population demography in southern Gaul between the 7th century and the 1st century BC. This ABM simulates at an annual time step over these six centuries the population growth of populations in the context of virtual farms that carry out each year harvests whose volume fluctuates according to cereal yields. These yields calculated through emulation of the Lund-Potsdam-Jena-managed-Land (LPJmL) agro-ecosystem model vary with climate fluctuations reconstructed from palynological data. The values of the climatic, agricultural and demographic parameters taken into account in this model are modifiable in intervals defined according to archaeological, historical and paleontological data, in order to test different scenarios on society-climate interactions. In general, the first results of this model support the hypothesis of a negative effect of periods of climate cooling on cereal production and demography, which appear to be favoured by the increase in temperatures and precipitation. The results of the simulations highlight a marked increase in cereal production from the third century BC, which lends credence to the idea of an important role of global warming at the end of the Iron Age (or "Roman Climatic Optimum") in the economic-demographic development of the Middle Tene in Gaul. However, the sensitivity of the demography of human populations to climate change appears to be more or less exacerbated according to the different assumptions taken into account about the nature and performance of Iron Age agricultural systems. FER-AGRI presents many possibilities of evolution that will make it possible to develop in the coming years this first model to take into account even more complexity in the restitution of the trajectory of protohistoric societies, in interaction with their environment.