



HAL
open science

Modélisation de type multi-agents en archéologie : l'expansion des premiers agriculteurs Balkaniques : adaptation du modèle OBRESOC : manipulation et exploration des données simulées

Andrea Zanotti

► To cite this version:

Andrea Zanotti. Modélisation de type multi-agents en archéologie : l'expansion des premiers agriculteurs Balkaniques : adaptation du modèle OBRESOC : manipulation et exploration des données simulées. Archéologie et Préhistoire. École pratique des hautes études - EPHE PARIS, 2016. Français. NNT : 2016EPHE3057 . tel-02102276

HAL Id: tel-02102276

<https://theses.hal.science/tel-02102276>

Submitted on 17 Apr 2019

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.



École Pratique
des Hautes Études

Mention « Systèmes intégrés, environnement et biodiversité »

École doctorale de l'École Pratique des Hautes Études
CNRS – UPR 2147 *Dynamique de l'évolution humaine*

**Modélisation de type multi-agents en archéologie :
l'expansion des premiers agriculteurs Balkaniques.
Adaptation du modèle OBRESOC ;
manipulation et exploration des données simulées**

Par Andrea ZANOTTI

Thèse de doctorat d'Environnement et Archéologie

Sous la direction de M. Jean-Pierre BOCQUET-APPEL,
Directeur d'études

Soutenue le 18 octobre 2016

Devant un jury composé de :

M. Marc BUI, Directeur d'études, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris.

M. Jean-Paul DEMOULE, Professeur, Université Paris I (Panthéon-Sorbonne), Paris. *Rapporteur*

M. Jérôme DUBOULOZ, Chargé de recherche, CNRS, Nanterre.

M. François GILIGNY, Professeur, Université Paris I (Panthéon-Sorbonne), Paris. *Rapporteur*

M. Augustin HOLL, Professeur, Université Paris Ouest, Nanterre.

M. Jean-Pierre BOCQUET-APPEL, Directeur d'études, Ecole Pratique des Hautes Etudes, et
Directeur de Recherche, CNRS, Paris. *Directeur de thèse*

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, Jean-Pierre Bocquet-Appel, pour m'avoir donné cette extraordinaire opportunité et m'avoir guidé à travers ce long parcours. Je remercie aussi les organisateurs du projet BEAN (Bridging the European and Anatolian Neolithic ; www.beanproject.eu) qui ont rendu possible cette thèse, et qui ont contribué à ma formation à travers les excellents congrès organisés. Merci aussi à tous les étudiants de ce projet qui m'ont aidé à la réalisation de cette thèse grâce aux nombreux conseils et interactions.

Je remercie Richard Moussa et Jérôme Dubouloz, qui ont contribué à l'adaptation du modèle OBRESOC ; le premier avec son travail informatique, le deuxième avec les conseils sur l'utilisation des données géo-environnementaux et sur l'exploration des données simulées. Merci à Maxime Brami, Jean-Paul Demoule et Catherine Perlès pour les précieuses remarques archéologiques, et à Damien Ertlen pour m'avoir guidé à travers les estimations de la fertilité des sols. Je remercie Kamen Boyadzhiev, Aikaterini Kostaki et Milena Vasiljevic pour m'avoir aidé à créer la base de données archéologique.

Je tiens à remercier Tim Kohler et toute l'équipe de modélisateurs de Washington State University, en particulier Kyle Bocinsky et Stefani Crabtree, pour les intéressants échanges et les nombreuses suggestions que mon séjour dans leur laboratoire a produit.

Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à Agnès Guillaumont pour la relecture de ma thèse et les précieux conseils en phase de rédaction.

Enfin, un grand merci à ma famille et à tous les amis que j'ai rencontré à Paris, pour le grand soutien qui m'ont donné pendant ces quatre ans.

Table des matières

<i>Chapitre 1 : Introduction</i>	8
<i>Chapitre 2 : Le Contexte Archéologique Balkanique</i>	16
2.1 Le foyer domestique.....	17
2.2 Le village Néolithique	19
2.2.1 La structure du hameau	20
2.2.2 Les sites en <i>Tell</i>	26
2.3 Le système agricole.....	27
2.3.1 Une agriculture intensive.....	27
2.3.2 La cueillette	32
2.3.3 L'adaptation du système agricole depuis OBRESOC.....	33
2.4 Les animaux dans la société du Néolithique Ancien balkanique	34
2.4.1 Estimation de la composition du troupeau	35
2.4.2 Un gradient animal ?	41
2.4.3 L'espérance de vie des animaux	45
2.4.4 La chasse	49
2.5 Les sépultures et les squelettes	50
2.6 La zone de départ	53
2.7 Différences culturelles.....	57
2.8 Interactions Mésolithique/Néolithique	60
2.9 L'émergence du <i>Big Man</i>	62
<i>Chapitre 3 : Les données</i>	65
3.1 Les données archéologiques	66
3.1.1 Datations au radiocarbone	69
3.1.2 Séquences typo-chronologiques	71
3.2 Les données environnementales	78
3.2.1 La carte de <i>best patch</i>	79
3.2.2 Estimation de la fertilité des sols.....	82
3.2.3 Données météorologiques	83
<i>Chapitre 4 : Le modèle multi-agents</i>	88
4.1 Le protocole ODD.....	88

4.1.1 Objectif.....	89
4.1.2. Entités, variables d'état et échelles	91
4.1.3. Processus et ordonnancement.....	92
4.1.4 Concepts	93
4.1.5. Initialisation.....	98
4.1.6. Données d'entrée.....	98
4.1.7.Sous-modèles.....	99
4.2 Les modèles partiels intermédiaires	100
4.2.1. Le modèle économique	100
4.2.2 Le modèle démographique	102
4.3 La météorologie.....	104
4.3.1. La simulation météorologique.....	105
4.3.2 Les crises agricoles.....	109
4.4 Paramétrage	113
<i>Chapitre 5 : Ajustement et validation du modèle.....</i>	<i>121</i>
5.1 La stochasticité du modèle	124
5.2 L'analyse de sensibilité.....	125
5.3 La détermination du modèle.....	135
5.4 L'expansion géographique.....	139
5.4.1 Le nombre d'agents initiaux	139
5.4.2 La vitesse d'expansion	150
5.4.3 La densité	153
5.4.4 Autres tests de validation.....	157
5.5 Le troupeau simulé	159
5.6 Les céréales et la cueillette dans le modèle	161
<i>Chapitre 6 : Analyse des simulations.....</i>	<i>163</i>
6.1 La manipulation des <i>big data</i>	165
6.2 Les sorties démographiques du modèle.....	167
6.3 Interprétation de l'expansion géographique.....	171
6.3.1 Observation	171
6.3.2 Discussion	177
6.4 Les foyers domestiques et les maisons archéologiques.....	182
6.5 La vie des foyers domestiques.....	188
6.6 Le front pionnier.....	193
6.6.1 Ethnographie du front pionnier	194
6.6.2 Le front pionnier dans OBRESOC-BEAN.....	198

6.7 La chasse dans le modèle et au Néolithique ancien	213
6.8 La cueillette dans le modèle	216
6.9 Les crises agricoles dans OBRESOC-BEAN.....	218
<i>Chapitre 7 : Conclusion.....</i>	<i>222</i>
<i>Référence</i>	<i>228</i>
<i>Annexe A : Base de données radiocarbones.....</i>	<i>251</i>
<i>Annexe B: Simulations effectuées.....</i>	<i>289</i>
<i>Annexe C : Simulations pour l'Analyse de Sensibilité.....</i>	<i>293</i>
<i>Annexe D : Contenus du CD-Rom.....</i>	<i>300</i>

Liste des figures

Figure 2.1 : Interpolation <i>Inverse Distance Weighting</i> des 12 sites audités.....	43
Figure 2.2 : Distribution par âge au décès des ovicapridés, estimée à partir de l'éruption dentaire. <i>Source</i> : Greenfield 2005.	46
Figure 2.3 : Distribution par âge au décès des bovidés, estimée à partir de l'éruption dentaire. <i>Source</i> : Greenfield 2005.....	47
Figure 2.4 : Distribution par âge au décès des porcins, estimée à partir de l'éruption dentaire. <i>Source</i> : Greenfield 2005.....	48
Figure 2.5 : Les sites Néolithiques les plus anciens de la région selon la datation au radiocarbone : 1.Achilleion; 2.Argissa Magoula; 3.Dikili Tash; 4 Franchti; 5.Halai; 6.Hoca Çeşme; 7.Makri; 8.Mavropigi; 9.Sesklo.	56
Figure 2.6 : La zone de départ du modèle.	57
Figure 2.7 : Principales cultures (et régions culturelles) du Néolithique Ancien des Balkans.....	59
Figure 2.8 : Les sites Mésolithiques mentionnés dans le texte, et la surface de la région des Gorges du Danube. 1. Backa Palanka ; 2.Ciumesti ; 3. Cremenea ; 4. Franchthi ; 5. Glyma ; 6. Jászberény ; 7. Jásztelek ; 8. Klisoura ; 9. Maroulas ; 10. Peres ; 11. Pobiti Kamani ; 12. Sidari ; 13. The Cyclops Cave ; 14. Theopetra.	62
Figure 3.1 : Tous les sites du Néolithique Ancien de la région.....	67
Figure 3.2 : Les sites archéologiques avec au moins une date au radiocarbone.....	72
Figure 3.3 : Distribution géographique des sites archéologiques du Néolithique Ancien des Balkans selon leur périodisation typo-chronologique.....	75
Figure 3.4 : La carte de <i>best patch</i>	81
Figure 3.5 : La carte des sols, générée à partir des données du European Soil Portal. <i>Source</i> : http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/	83
Figure 3.6 : Reconstitution des précipitations saisonnières basées sur des données polliniques à Tenaghi Philippon. <i>Source</i> : Peyron et al. 2011.	84
Figure 3.7 : Reconstitution des températures du mois le plus chaud et du mois le plus froid, basées sur des données polliniques à Tenaghi Philippon. <i>Source</i> : Peyron et al. 2011.....	85
Figure 3.8 : Carte de la température moyenne en hiver, extraite de la base de données WorldClim. <i>Source</i> : http://www.worldclim.org	86
Figure 4.1 : Diagramme séquentiel de la structure du modèle.	89
Figure 4.2 : Estimation des précipitations cumulées saisonnières pour le Néolithique Ancien des Balkans.	107
Figure 4.3 : Estimation des températures moyennes saisonnières pour le Néolithique Ancien des Balkans.	107
Figure 5.1 : Analyse de sensibilité sur la moyenne.....	129
Figure 5.2 : Analyse de sensibilité sur la variance.	131
Figure 5.3 : Données archéologiques (a) et simulées (b) avec 50 couples au départ au temps = 600 ; données archéologiques (c) et simulées (d) avec 300 couples au départ au temps = 400.	141
Figure 5.4 : Expansion au temps = 200 avec 100 (a), 150 (b), 200 (c) et 250 (d) agents au départ... ..	143
Figure 5.5 : Expansion au temps = 400 avec 100 (a), 150 (b), 200 (c) et 250 (d) agents au départ... ..	144
Figure 5.6 : Expansion au temps = 600 avec 100 (a), 150 (b), 200 (c) et 250 (d) agents au départ... ..	145
Figure 5.7 : Coefficients de corrélation moyens de cinq répliques de l'analyse Procruste entre la distribution géographique des sites archéologiques et celle des hameaux-pixels simulés, à différents temps de l'expansion et selon le nombre d'agents au départ.....	149

Figure 5.8 : Régression <i>dist vs time</i> pour les sites archéologiques et les hameaux-pixel simulés.....	152
Figure 5.9 : La Thessalie Orientale, la zone choisie pour le test de densité.....	154
Figure 5.10 : Distribution des sites archéologiques trouvés (à gauche) et des hameaux-pixels simulés vivants pendant 200 ans et plus ans (à droite) en Thessalie Orientale.	156
Figure 5.11 : Fréquence de sites archéologiques et de hameaux/pixels simulés pour chaque période	158
Figure 6.1 : Nombre d'individus vivants pendant la simulation, selon le nombre d'agents au départ.	168
Figure 6.2 : Nombre de hameaux produits pendant la simulation, selon le nombre d'agents au départ	169
Figure 6.3 : Expansion des agents simulés en 6.400 BC.....	172
Figure 6.4 : Expansion des agents simulés entre 6.400 et 6.200 BC.....	174
Figure 6.5 : Expansion des agents simulés entre 6.200 et 6.000 BC.....	175
Figure 6.6 : Expansion des agents simulés entre 6.000 et 5.800 BC.....	176
Figure 6.7 : Expansion des agents simulés entre 5.800 et 5.600 BC.....	177
Figure 6.8 : Evolution démographique de deux foyers domestiques : le foyer 537 (a) et le foyer 8.656 (b).	191
Figure 6.9 : Variation au cours du temps du nombre moyen d'individus dans un échantillon de 50 foyers domestiques.	192
Figure 6.10 : Echantillon par tirage systématique de 50 supercarrés pour l'investigation du front pionnier.....	199
Figure 6.11 : Front pionnier et <i>densificateurs</i> dans le modèle.	201
Figure 6.12 : Démographie du front pionnier et des zones de densification.	206
Figure 6.13 : Ratio d'animaux sauvages dans des différentes phases d'occupations en de différents sites. <i>Source</i> : Orton 2012.....	214
Figure 6.14 : Kilocalories issus de la cueillette pendant des périodes de crise.	217
Figure 6.15 : Individus touchés par des crises météorologiques.	219
Figure 6.16 : Taille de la population dans 5 simulations différentes.....	220

Liste des tableaux

Table 2.1 : Os d'animaux trouvés, énumérés en pourcentage et en nombre de NISP (Number of Identified Specimens).....	40
Table 2.2 : Composition du troupeau estimée sur l'ensemble de tous les sites disponibles et sur les sites audités.	40
Table 2.3 : Fréquences des animaux calibrées sur l'âge moyen à l'abattage.....	48
Table 3.1 : Table typo-chronologique du Néolithique Ancien de la région balkanique.....	74
Table 3.2 : Régression de la variable <i>dummy</i> 1/0 (présence/absence) sur les sept variables géo environnementales choisies.....	80
Table 4.1 : Méthode de " <i>centrage</i> " pour les estimations météorologiques.	106
Table 4.2 : Seuils de crises à Larissa.	112
Table 4.3 : Seuils de crise pour le Néolithique Ancien des Balkans.	113
Table 4.4 : Paramètres pour la configuration d'une simulation.	113
Table 4.5 : Paramètres pour la configuration météorologique.	114
Table 4.6 : Paramètres pour la configuration du sol et de la végétation.....	115
Table 4.7 : Paramètres pour la configuration des ressources.....	116
Table 4.8 : Paramètres pour la configuration du supercarré.....	116
Table 4.9 : Paramètres pour la configuration de l'agriculture.....	117
Table 4.10 : Paramètres pour la configuration du foyer domestique.....	118
Table 4.11 : Paramètres pour la configuration du troupeau.....	120
Table 5.1 : Tests t pour les moyennes de 13 variables entre 5 simulations avec météorologie fixée et 5 simulations avec météorologie aléatoire.	125
Table 5.2 : Les paramètres testés avec l'analyse de sensibilité.....	127
Table 5.3 : La détermination du modèle.....	138
Table 5.4 : Coefficients de corrélations de l'analyse Procruste entre la distribution géographique des sites archéologiques et celle des hameaux-pixels simulés, pour quatre simulations OBRESOC-BEAN différentes.....	147
Table 5.5 : Coefficients de corrélation moyens de cinq réplifications de l'analyse Procruste entre la distribution géographique des sites archéologiques et celle des hameaux-pixels simulés, à différents temps de l'expansion.....	148
Table 5.6 : Nombre de sites archéologiques attribués à chaque période et de hameaux-pixels simulés vivants dans chaque période.....	157
Table 5.7 : Test khi-deux entre les nombre de sites archéologiques (Espéré) et celui des hameaux-pixels produits par le modèle (Observé) pour chaque période.	159
Table 6.1 : Nombre d'individus vivants en fin de simulation, selon le nombre d'agents au départ. ...	168
Table 6.2 : Nombre de hameaux totaux en fin de simulation, selon le nombre d'agents au départ. ...	169
Table 6.3 : Individus vivants, morts cumulés et envoyés cumulés dans le 25 ans de vie du front pionnier (a) et dans 25 ans de vie dans les zones de densifications (b) dans un échantillon de 50 supercarrés.....	211
Table 6.4 : Test khi-deux entre les morts sur le front pionnier et le morts parmi les <i>densificateurs</i> dans un échantillon de 50 supercarrés.	212

Chapitre 1 : Introduction

La thématique de l'expansion du système agricole depuis l'Anatolie vers les Balkans est depuis longtemps un important sujet de recherche (Özdoğan 2008). Les derniers scénarios proposés par les archéologues suggèrent qu'il s'agit d'un processus complexe, qui a eu plusieurs trajectoires différentes, plutôt que de se développer en une seule vague migratoire (Özdoğan 2012, 2011).

Trois approches principales ont été suivies par les archéologues pour reconstruire la diffusion du système agricole à travers les Balkans, basées sur i) l'analyse des similarités culturelles inter-sites avec les régions sources (Anatolie), à partir des éléments typiques qui font partie du "*paquet Néolithique*" (Özdoğan 2008) ; ii) l'analyse des traces spatio-temporelles de la diffusion de l'agriculture, représentées par exemple par : des dérivées directionnelles de la distribution de dates au radiocarbone sur une grille (Bocquet-Appel et al. 2009) ; un graphique de la distribution géographique et chronologique de ces dates (Brami 2014a) ; l'interprétation de la cohérence spatio-temporelle de ces dates (Reingruber et Thissen 2009) ; iii) l'utilisation d'équations de diffusion adaptées à des scénarios testables (Fort 2015).

L'idée du "*paquet Néolithique*", sur laquelle se base la première approche, a été suggérée par Gordon Childe (1925) et développée plus récemment par d'autres auteurs (Özdoğan 2010, 2008, Çilingiroğlu 2005) ; elle consiste en l'analyse des similarités culturelles entre les éléments qui sont typiquement trouvés dans les fouilles. Les éléments constitutifs du paquet sont les plantes cultivées, les animaux domestiqués, les outils en pierre et la céramique, ainsi que la structure architecturale des habitats et le mode de vie qu'on peut en inférer. Ce paquet n'est pas homogène dans toute la région : on parle donc de plusieurs types de paquets Néolithiques. La comparaison des similarités entre ces paquets fournit des indications sur l'origine géographique commune du Néolithique, ainsi que sa différenciation graduelle au fur et à mesure de son avance vers ouest (Özdoğan 2008).

Les approches basées sur les traces spatio-temporelles, représentées principalement par les dates au radiocarbone, donnent des indications importantes sur la direction et le timing de l'expansion. Les récents développements de cette technique de datation, et la conséquente augmentation de la fiabilité des dates obtenues grâce à elle, ont permis d'avoir un cadre

chronologique et géographique de l'expansion plus précis. Néanmoins, même si ces approches peuvent décrire la diffusion du système, elles ne sont pas explicatives de ce processus. En d'autres mots, ces techniques permettent de reconstruire l'expansion de l'agriculture seulement du point de vue de sa diffusion, mais n'expliquent rien sur les mécanismes internes qui ont déterminé et influencé cette expansion.

Le troisième approche, basé sur les équations de diffusion, est purement déterministe. Ces modèles ne prennent pas en compte la stochasticité, notamment météorologique ; ils fonctionnent avec un nombre très restreint de variables causales, au delà desquelles ce type de modélisation devient mathématiquement intraitable. Une approximation de la réalité devrait aller beaucoup plus en profondeur que ce petit nombre de variables, en permettant aux agents de réagir à des risques différents. Cette réactivité peut potentiellement modifier l'expansion du système agricole en termes de direction, vitesse, démographie et structure sociale.

Dans cette thèse, pour répondre à la question de la nature et des trajectoires de l'expansion du système agricole à travers les Balkans, dans l'espace et dans le temps, un modèle de type multi-agents a été utilisé. La raison principale de ce choix est que ce type de modélisation est globalement explicatif par nature, car il intègre les effets unidirectionnels des variables météorologiques sur le paysage, la socio-économie et la démographie, ainsi que les interactions entre ces deux dernières. Il s'agit d'une approche multidisciplinaire, dans laquelle les données archéologiques sont combinées à des inférences ethno-historiques et à des estimations géo-environnementales.

Quand on étudie la préhistoire, on ne dispose d'aucune source écrite ; toutes les déductions sont faites à partir des traces archéologiques observées dans les fouilles. Il y a pourtant de nombreux aspects de la société qui sont totalement invisibles dans les vestiges archéologiques : en particulier, les structures socioéconomiques sont difficilement détectables (Testart 2012). Grâce à des données provenant de nombreuses disciplines, le fonctionnement d'une société agricole préhistorique a été modélisé ; le comportement des individus qui en faisaient partie peut être suivi et exploré. Même si un modèle multi agents n'est pas une reproduction de la réalité, il peut suggérer de nouvelles idées et perspectives à des problématiques archéologiques qui seraient autrement inexplorables (Epstein 2006).

Grâce à leur énorme potentialité, les modèles multi-agents sont de plus en plus utilisés en archéologie (Kohler et Van der Leeuw 2007). Les récentes évolutions de cette technique

montrent comment deux écoles de modélisation coexistent : d'un côté, il y a des modèles avec un nombre relativement faible de paramètres, très stochastiques, qui nécessitent un nombre très élevé de répétitions (des exemples récents sont Carrignon et al. 2015, Gallagher et al. 2015) ; d'autres modèles, au contraire, ont un grand nombre de paramètres, sont moins stochastiques et, comme chaque exécution demande beaucoup de temps, ne sont pas répétables un grand nombre de fois (par exemple, Kohler et Varien 2012).

Le modèle objet de cette thèse a été développé au sein du programme informatique OBRESOC, qui simule l'expansion de la culture Rubanée (Bocquet-Appel et al. 2015, Bocquet-Appel et al. 2014 ; <http://www.evolhum.cnrs.fr/obresoc/>). L'acronyme indique le nom du projet: "Un observatoire rétrospectif d'une société archéologique : la trajectoire du Néolithique Rubané" ; il consiste en un modèle de type multi-agents destiné à simuler la diffusion de l'agriculture en Europe Centrale au Néolithique, pendant l'expansion, suivie par l'effondrement, de la culture Rubanée (Linarbandkeramik). OBRESOC entre dans la deuxième catégorie de modèles multi-agents, ceux qui utilisent un grand nombre de paramètres, et peut donc être considéré comme un modèle complexe. La raison de ce choix est qu'utiliser un petit nombre de paramètres pour décrire un processus comme l'expansion d'une société agricole ne serait pas suffisant : cela ne prendrait pas en compte la complexité en termes économiques et démographiques d'une société agricole, qui doit être mise en rapport avec des facteurs environnementaux et météorologiques.

L'idée d'une approche intégrée pour modéliser l'expansion d'une société préhistorique, où les données sont issues de plusieurs disciplines - archéologie, ethnographie, anthropologie, démographie, paléoclimatologie, pédologie - a donc été développée d'abord pour le modèle OBRESOC. Ce projet a été conduit par une équipe de chercheurs, spécialisés en ces différentes disciplines. Le travail de cette thèse, lui, consiste dans l'adaptation du modèle OBRESOC à une région et à un contexte historique différent : le Néolithique Ancien des Balkans. Créer un modèle d'une telle complexité aurait été impossible pour une seule personne, car des compétences avancées en plusieurs disciplines, et des capacités de programmation informatique professionnelles, étaient nécessaires. Le modèle a donc été modifié selon les exigences archéologiques de la région ; les données géo-environnementales ont été successivement adaptés, en répliquant les procédures utilisées dans OBRESOC pour les estimations météorologiques et pédologiques. Ce nouveau modèle prend le nom d'OBRESOC-BEAN ; BEAN est l'acronyme de Bridging European and Anatolian Neolithic

(<http://beanproject.eu/>), qui est le nom du projet Européen qui a financé cette thèse, destiné à explorer la Néolithisation de ces régions.

De nouvelles procédures ont été implémentées, notamment pour la manipulation des données simulées. Le modèle produit une grande quantité de données en sortie, les *big data*. L'extraction et l'analyse exhaustive d'une telle quantité de données avec des techniques conventionnelles demanderait beaucoup de temps ; pour cette raison, une approche différente à été nécessaire. Des procédures de manipulation des données, effectuées en particulier avec le langage SQL (Structured Query Language), ont permis une exploration profonde et détaillée des sorties. Les *big data* sont désormais très importantes dans beaucoup de disciplines, et sont utilisées dans de secteurs très variés. Cette thèse montre le potentiel des *big data* aussi dans le domaine archéologique : les moyens et les compétences disponibles permettent désormais de travailler avec des bases de données très vastes.

La stochasticité est un problème intrinsèque à la modélisation multi-agents historique ; il s'agit de la variation aléatoire d'un phénomène dont la loi de distribution est connue. Des critiques à cette technique se basent sur le fait que, même les simulations qui produisent des patrons réalistes, peuvent en réalité être un simple produit de cette stochasticité (McGlade 2014). Bocquet-Appel et al. (2015) ont expliqué pourquoi une modélisation multi-agents historique est cependant faisable. L'historien Fernand Braudel, dans ses *Annales de l'Ecole d'Economie, Société et Civilisation* (1958), a divisé l'histoire humaine en périodes de différentes durées, en créant ce qu'on appelle *la décomposition spectrale de l'histoire* : la *courte*, *moyenne* et *longue durée*. La *courte durée* concerne l'histoire événementielle : par exemple, la naissance d'un personnage historique important, ou une bataille militaire. Ces événements sont en effet imprévisibles, et donc non modélisables : ils ne sont pas pris en compte dans la modélisation historique. La *moyenne durée* concerne des périodes qui peuvent durer plusieurs années, par exemple des cycles économiques et démographiques. Même si ces cycles peuvent avoir une certaine tendance, la stochasticité est encore élevée ; la moyenne durée n'est pas modélisée non plus. En faisant de la modélisation multi-agents historique, on prend en compte la *longue durée*, qui correspond à la géohistoire. Cette *longue durée* concerne les structures qui permettent la survie des sociétés, au niveau des techniques et des modes de production. Ces éléments, qui peuvent être désignés par le terme marxiste d'*infrastructures*, sont fortement déterminés par les conditions biologiques et géo-environnementales. Dans ce modèle, l'expansion des premiers agriculteurs est simulée ; leur

mode de vie et leur expansion dépendent de contraintes géographiques et naturelles, et leur objectif sera toujours la survie et la recherche des zones d'optimum agricole. Pour cette raison, en simulant le comportement des premiers agriculteurs sur une durée de plusieurs siècles, la stochasticité est réduite au minimum.

Est-ce que le modèle OBRESOC-BEAN, avec les valeurs des paramètres déduites depuis des inférences ethnoarchéologiques ou issues de la littérature spécialisée, initialisé dans des régions sources identifiées archéologiquement, peuple les zones où la présence des agriculteurs colonisateurs est attestée, et dans le bon timing ? La coïncidence entre le temps de la simulation et celui des zones archéologiques, et la comparaison de la dispersion géographique des colonisateurs, représente une première validation du modèle.

L'exploration des sorties du modèle peut répondre à plusieurs questions. Quelle était la distribution spatiotemporelle de la population de colonisateurs, ainsi que leur taille, pendant cette période ? La micro spécification dans les hypothèses du modèle est-elle suffisante pour générer les phénomènes observés (Epstein 2006) ? La météorologie peut-elle avoir eu un impact qui a influencé l'expansion de l'agriculture dans les Balkans ? Dans quelle mesure les données archéologiques sont-elles reproduites par le modèle et, en cas de différences, comment peut-on les expliquer ? Le modèle nous apprend-il quelque chose de nouveau, ou nous aide à formuler des hypothèses inédites sur des éléments qui sont totalement invisibles en archéologie, comme la structure socio-économique des premiers agriculteurs ?

Cette thèse est composée de cinq parties.

La première partie est dédiée à la description du contexte archéologique balkanique, sur lequel cette modélisation a été développée. Le modèle est bâti à partir de données archéologiques qui ont permis de comprendre certains des éléments qui caractérisent la société du Néolithique Ancien : par exemple les maisons, les villages, le système agricole et les animaux. Même si les traces archéologiques ne donnent pas beaucoup d'informations sur la structure sociale et économique d'une société préhistorique, de nombreuses inférences et estimations ont été possibles, grâce aussi à l'aide de sources anthropologiques et ethnographiques. Cette partie est donc dédiée à la description de tous les éléments archéologiques qui ont eu une influence sur la modélisation, en ayant déterminé la structure du modèle, ou en étant injectés à son intérieur comme paramètres.

Par contre, de nombreux éléments de type purement culturel sont omis : par exemple poterie, outils en pierre, pratiques locales. Même si les archéologues donnent traditionnellement une grande importance à ce type de restes, ils n'ont pas été inclus dans le modèle. OBRESOC-BEAN est dédié à reproduire l'expansion des premiers agriculteurs en tant que processus économique et démographique, sans simuler aussi la transmission culturelle. Tous les éléments qui n'ont pas un impact direct sur le système agricole et sur les mécanismes d'expansion sont par conséquent omis.

Le Néolithique Ancien des Balkans n'est pas complètement homogène ; il s'agit d'un processus qui a intéressé différentes régions, où des cultures différentes se sont développées. Même si les aspects culturels ne sont pas modélisés, des différences et spécificités locales sont inévitables quand on travaille sur une région vaste et pendant plusieurs siècles. Ce qu'on recherche, lors de la modélisation multi-agents, ce sont les éléments typiques, qui sont communs à la plupart des sites fouillés ; les exceptions et les particularités ne peuvent pas être prises en compte.

Dans la deuxième partie, les données utilisées pour cette thèse sont décrites. Il y a principalement deux typologies de données : archéologiques et environnementales. Les premières sont représentées par une base de données où sont inclus tous les sites du Néolithique Ancien qui ont été publiés dans la littérature spécialisée. Les données sont géo-référenciées, pour permettre une localisation géographique immédiate des sites archéologiques. Chaque site est placé dans une séquence typo-chronologique plus ou moins précise, sur la base des données au radiocarbone ou de l'attribution culturelle. Cette base de données a été nécessaire pour formuler des hypothèses sur la distribution géographique des sites et pour l'analyse des simulations, afin de comparer le patron simulé avec la réalité observée en archéologie.

Les données environnementales ont été nécessaires pour construire l'environnement réaliste dans lequel les agents interagissent. La région des Balkans a été divisée en pixels de 1km² ; à chacun est attribuée une valeur qui représente son optimalité pour l'agriculture, déterminée par un ensemble de variables géoclimatiques, et résumée dans la carte de *best patch*. Chaque pixel a aussi une valeur de fertilité, déterminée par la composition pédologique du sol. La météorologie du Néolithique Ancien a été estimée, grâce à des reconstitutions basées sur des données polliniques.

Dans la troisième partie, le fonctionnement du modèle est décrit : qui sont les agents, quels sont leurs caractéristiques et leur comportement, en quelle séquence se déroulent les actions, comment l'environnement et la météorologie peuvent affecter les simulations. Afin d'avoir une description conforme aux standards de la modélisation, le protocole ODD est suivi (Grimm et al. 2010, 2006).

Ce chapitre est aussi dédié à développer le fonctionnement des modèles partiels intermédiaires. Le système économique et la démographie ont un rôle très important dans la simulation et ont été modélisés séparément. L'économie consiste en particulier en la production agricole, activité principale pratiquée par les agents, et nécessaire à leur survie. La démographie détermine la naissance, le mariage et la mort des individus ; elle a un impact direct sur la création de nouveaux agents et sur la colonisation de la région.

La simulation météorologique dans OBRESOC-BEAN est décrite : les événements météorologiques exceptionnels influencent la fertilité du sol et peuvent produire disettes et famines, qui sont modélisées à partir d'événements historiques réels.

Dans ce chapitre le choix des paramètres est aussi traité : dans quelles situations les paramètres originaux d'OBRESOC ont-ils été considérés adéquats pour le Néolithique Ancien des Balkans et quand, au contraire, de nouvelles estimations ont-elles été nécessaires ? Ces choix sont expliqués et argumentés.

La quatrième partie est dédiée à l'ajustement et à la validation du modèle. Le modèle peut produire un nombre très élevé de scénarios différents ; comment peut-on décider quelle est la simulation qui adhère le mieux à la réalité observée en archéologie ? Une analyse de sensibilité a été effectuée pour détecter quels sont les paramètres clés du modèle, ceux qui ont une influence majeure sur les sorties de la simulation. Les tests se sont donc concentrés sur ces paramètres, en permettant de bloquer les autres dont les effets sont marginaux.

Des problèmes liés à la pénurie de certains types de données archéologiques ont rendu complexes l'ajustement et la validation du modèle : les critères choisis sont principalement géographiques, et se basent sur la comparaison entre l'expansion simulée et celle observée en archéologie en termes géochronologiques. Cependant, d'autres éléments concernant la structure du troupeau et les céréales trouvées dans les restes peuvent aider à la détermination du modèle. Cette validation géographique fournit de premiers résultats, en permettant de voir quelles sont les valeurs des paramètres qui produisent des scénarios réalistes, et donc quelles

estimations sont probables, et au contraire quelles estimations peuvent être considérées aberrantes.

Dans la cinquième partie, après avoir identifié les simulations qui adhèrent le mieux aux données archéologiques, les données en sortie sont analysées. La différence entre ce qui est espéré (c'est-à-dire ce à quoi on s'attend, et donc ce qu'on observe en archéologie) et ce qui est observé (simulé par le modèle) peut fournir importants éléments d'analyse et de réflexion. Si cet écart est minimal le modèle a bien reproduit la réalité, et donc il a représenté une explication possible pour le processus simulé. Au contraire, un large écart entre l'espéré et l'observé ne doit pas être considéré comme quelque chose de mauvais, car il peut ouvrir de nouvelles pistes et donner des suggestions à la recherche, en invitant à explorer des éléments qui n'avaient pas été pris en compte auparavant.

Les éventuelles différences entre l'expansion géographique simulée et celle observée en archéologie peuvent donner des suggestions sur le parcours de cette expansion : où se trouvent ces différences, et comment peut-on les explorer ?

Grâce à la modélisation multi-agents, il est possible de tester et d'explorer des éléments qui autrement pourraient seulement être l'objet d'hypothèses. Cela permet de questionner des croyances archéologiques, par exemple sur la composition d'un foyer domestique ou sur le nombre de maisons présentes simultanément dans un village Néolithique.

Ce modèle permet aussi d'explorer les différences entre le front pionnier de colonisation et les zones d'ancienne occupation où la densité s'accroît. Observe-t-on des changements visibles dans la structure de la population et dans son activité économique, pendant les différentes phases de l'expansion ? Enfin, on peut observer si, et dans quelle mesure, les événements météorologiques ont eu une influence sur l'expansion.

La thèse se termine par les conclusions. Le modèle a-t-il réussi à reproduire correctement l'expansion de l'agriculture pendant le Néolithique ? Le modèle a-t-il apporté quelque chose de nouveau à l'état actuel de la recherche ? Nous faisons le point sur les résultats obtenus grâce à cette étude, en réfléchissant en même temps sur les limites et les problématiques rencontrées, avec l'objectif de fournir de nouvelles idées et perspectives à la recherche archéologique.

Chapitre 2 : Le Contexte Archéologique Balkanique

L'observation des traces trouvées en archéologie a été nécessaire pour la création de ce modèle de type multi-agents. Malgré les limites des données archéologiques, qui ne donnent pas beaucoup d'indications sur la structure sociale et sur le système économique des sociétés préhistoriques, ces informations, combinées avec des inférences issues de l'anthropologie et de l'ethnographie, ont permis des suggestions très importantes sur la vie des premiers colonisateurs de la région.

Quand on travaille à une échelle régionale vaste comme celle des Balkans, des différences locales plus ou moins marquées sont toujours présentes. Ces particularités sont de grand intérêt pour les archéologues et sont souvent l'objet d'études et de publications ; néanmoins, elles représentent des exceptions, qui ne sont pas des caractéristiques typiques du Néolithique Ancien Balkanique. Nous avons modélisé les éléments standard qui ont déterminé le mode de vie et l'expansion des premiers agriculteurs, ceux qui sont trouvés communément dans tous les sites archéologiques, dans toute la région.

Dans ce chapitre, les principaux éléments archéologiques qui caractérisent le Néolithique Balkanique, et qui ont été pris en compte pour cette modélisation, seront passés en revue. Au contraire, les vestiges de caractère purement culturel, comme les typologies de poterie ou les outils en pierre, ne seront pas traités ; ce sont des éléments qui n'ont pas de relation avec le système agricole et la démographie, ni d'influence sur le processus de colonisation de la région, et qui ne sont donc pas modélisés dans OBRESOC-BEAN. Dans ce chapitre sont décrites seules les données qui ont conduit à la formulation des inférences sur le système économique et social implémentées dans la structure du modèle, et les estimations injectées comme paramètre.

2.1 Le foyer domestique

Le premier élément qui sera traité est la maison archéologique. Le Néolithique Européen, et donc Balkanique, voit l'abandon presque total d'habitations en plein air ou sous des abris, avec l'émergence d'un patron général de maisons construites (Borić 2008). Les sites en grotte, déjà attestés pendant le Mésolithique grec, deviennent très rares pendant le Néolithique ; les quelques sites présents constituent une continuation de l'occupation précédente plutôt qu'une nouvelle colonisation (Perlès 2001). Dans les vestiges archéologiques, les sites du Néolithique sont typiquement composés par des groupes de maisons ; il n'y a pas d'évidences qui suggèrent que les premiers agriculteurs pouvaient avoir des formes d'habitation différentes.

La population de la culture Rubanée, modélisée dans le modèle originel OBRESOC, habitait dans des longues maisons composées de plusieurs pièces ; pour cette raison, les archéologues considèrent qu'elles étaient habitées par des familles élargies, où chacune des familles nucléaires occupait une pièce différente. En cas de mariage, une pièce additionnelle était ajoutée à la maison pour accueillir la nouvelle famille nucléaire (Bocquet-Appel et al. 2015). Cette structure est très différente de ce qui a été découvert en Anatolie de l'Ouest et dans les Balkans. Dans ces régions on trouve généralement des maisons de petite taille, normalement pas plus grandes que 7x7 mètres (Brami et Horejs, à paraître) et composées d'une seule pièce, même si des exceptions sont présentes. Un four était typiquement associé à la maison ; cela est plus évident en Anatolie, où le four avait son emplacement dédié, tandis qu'en Grèce les fours peuvent être situés en dehors de la maison (Souvatzi 2014, Perlès 2001). La petite taille, peu appropriée à une famille élargie, suggère l'hypothèse que ces maisons étaient plutôt occupées par des familles nucléaires (Hoffman and Smyth 2013, McIntosh 2006, Flannery 2002) : c'est-à-dire le couple de parents et leurs enfants pas mariés.

Même si existe des différences dans les matériaux et les techniques de construction, un patron fait de maisons de petite taille, généralement avec une seule pièce, caractérise tout le Néolithique Ancien de l'Anatolie Occidentale jusqu'aux Balkans. Les maisons de l'Anatolie sont faites typiquement en brique crue et pisé (Bikoulis 2013) ; dans le sud des Balkans il y a une grande variabilité, car des briques crues sont encore présents, parfois avec des fondations en pierre, mais aussi des maisons avec des poteaux en bois, qui peuvent être intégrés dans une structure en pisé (Rosenstock 2006, Perlès 2001) ; dans le nord des Balkans, les maisons en

bois deviennent plus communes, associées à la technique du torchis (Rosenstock 2006). La raison principale de ces différences semble être liée à la disponibilité des ressources locales : les briques crues sont utilisées dans les zones sèches, tandis que les maisons en bois sont communes dans des régions plus humides, où on trouve une plus grande quantité d'arbres (Rosenstock 2006, Guest-Papamanoli 1978).

Des exceptions sont présentes : par exemple à Nea Nikomedeia a été découvert un bâtiment de taille beaucoup plus grande que les autres (environ 12x14 mètres). La raison de cette différence n'est pas connue, mais Pyke et Yiouni (1996) suggèrent que ce pouvait être un bâtiment utilisé par toute la communauté. Il s'agit en tout cas d'une exception, car les autres maisons trouvées dans le site ont une taille plus petite. Un autre exemple de grande maison est la "*big house*" de Slatina, en Bulgarie (Gurova 2011).

Les maisons composées d'une seule pièce représentent la normalité, mais cela n'est pas toujours le cas. À Sesklo les traces suggèrent la présence d'une deuxième pièce ; néanmoins, Rodden (1965) fait l'hypothèse qu'elle était utilisée pour le stockage et la préparation de la nourriture. La taille de la maison reste petite, et la deuxième pièce n'implique pas la présence d'une deuxième famille comme dans les maisons du Rubané.

Des informations sur la composition et le fonctionnement du foyer domestique Néolithique peuvent être trouvées dans des sources ethnographiques ; très précieuse est l'étude de Laiou (1977) sur la société agricole en Grèce pendant l'âge byzantin. Bien que situés dans des contextes historiques différents, les structures sociales des sociétés préindustrielles peuvent ajouter des suggestions à la recherche archéologique (Ucko 1969). L'unité de base d'habitation dans la campagne grecque Byzantine est la famille nucléaire, comme dans l'hypothèse faite pour le Néolithique. L'auteur décrit le foyer domestique typique qui consiste en le couple marié et leurs enfants ; quand un des enfants se marie il y a une division des biens et la création d'un nouveau foyer domestique. Les exceptions ne manquent pas, mais la famille nucléaire semble constituer la norme. Une remarque intéressante est que la scission ne coïncide pas forcément avec la création d'une nouvelle unité économique : les terres peuvent être cultivées collectivement, et les animaux partagés entre parents et enfants ; même le four peut être commun.

Cette source ethnographique suggère aussi des éléments qui sont complètement indétectables dans les traces archéologiques, comme la structure patriarcale de la société de la Grèce rurale

byzantine, où les hommes sont presque toujours les chefs du foyer domestique. Comme le mariage coïncide normalement avec la création d'un nouveau foyer domestique et donc d'une nouvelle maison, le mariage est considéré néolocal ; néanmoins, l'auteur met en évidence la tendance de construire la nouvelle maison à côté de celle des parents du mari.

Beaucoup reste inconnu sur la maison Néolithique et sur sa fonction; notre connaissance est limitée à ce que peut être vu dans les traces archéologiques. Même en étant conscient de l'impossibilité de grouper les maisons Néolithiques dans une seule typologie car il existe plusieurs variétés et exceptions (Nanoglou 2008), l'hypothèse d'un foyer domestique occupé par une famille nucléaire semble plausible et est acceptée par la communauté archéologique.

Ce modèle multi-agents simule une expansion à travers une vaste région, qui a concerné un grand nombre d'individus et qui a duré plusieurs siècles ; il y a inévitablement des différences et particularités locales au sein de ce processus. Ce qui est important pour la modélisation est d'identifier une typologie de maison et de famille y habitant qui soit typique de la région, à partir de ce qui émerge depuis les données archéologiques. Les différences purement culturelles n'ont aucune influence sur le modèle, et peuvent être ignorées ; la même chose vaut pour les exceptions, qui sont des cas particuliers et ne sont pas représentatives du foyer domestique typique du Néolithique Ancien Balkanique.

2.2 Le village Néolithique

Le fait que des groupes de plusieurs maisons sont toujours trouvés dans les fouilles suggère que les premiers agriculteurs vivaient réunis dans des villages. La structure typique du village néolithique voit les maisons groupées, bâties à une petite distance l'une de l'autre (de 2 à 5 mètres à Nea Nikomedeia, Perlès 2001) ; les champs sont situés à l'extérieur et entourent l'habitat. La surface sur laquelle les maisons étaient bâties avait normalement une taille assez petite, qui dépasse difficilement les trois ou quatre hectares (Perlès 2001) ; il faut y ajouter les terrains cultivés que chaque foyer domestique possédait dans les alentours, à peu de distance de la maison.

Tout d'abord, une précision sur la terminologie est nécessaire. Les archéologues, dans leurs publications, associent toujours le mot *village* aux hameaux du Néolithique des Balkans. La raison est que les sites archéologiques fouillés présentent une quantité relativement élevée de maisons (estimation d'au moins 25-30 maisons simultanément occupées, cf. par 2.2.1) ; il s'agit d'un nombre suffisant pour avoir la qualification de village. Dans le modèle OBRESOC, le terme *hameau* est normalement utilisé pour décrire la forme d'habitat typique des agriculteurs Rubanés. Dans un modèle multi-agents, le comportement des agents est suivi dans des phases différentes, incluant la colonisation de régions inhabitées. Il y a des moments, notamment quand un nouveau hameau est créé, où le nombre de maisons est très limité. À ce stade il ne s'agit pas d'un village, mais plutôt un hameau : parler de village serait donc trompeur. Pour cette raison, dorénavant le terme *hameau* sera utilisé dans le contexte de la modélisation, car il est plus approprié pour indiquer aussi des situations transitoires où il y a de petits groupes de maisons. Le mot *village* sera par contre utilisé exclusivement dans le contexte archéologique des Balkans, comme le font les archéologues dans leurs publications.

2.2.1 La structure du hameau

Connaitre la structure du hameau typique Néolithique est nécessaire pour simuler son fonctionnement dans le modèle. L'absence de sites complètement fouillés pour le Néolithique Ancien de la région rend nécessaire l'utilisation d'estimations publiées par les archéologues, faites à partir de sections des sites qui sont connues.

Une première question concerne l'extension, c'est-à-dire la surface qui pouvait être occupée par un hameau. Pour le Néolithique des Balkans, les hameaux sont généralement de petite taille, et normalement ils ne dépassent pas les 3-4 hectares (Perlès 2001) ; les hameaux de six hectares sont considérés comme larges (Higham et al. 2011). Ces estimations se réfèrent à la zone de l'habitat où les maisons étaient bâties ; l'espace total comprenait aussi les terrains cultivés, qui sont estimés à 1 ou 2 hectares par maison (Bogaard 2004). En considérant que le nombre de maisons contemporaines dépassait difficilement la trentaine, même les estimations les plus larges pour un hameau Néolithique ne dépassent pas les 100 hectares (1 km²). L'unité base d'information dans le modèle OBRESOC-BEAN, le pixel, mesure exactement de 1 km² ; on suppose donc que chaque hameau simulé occupe par défaut un pixel. Cette surface, qui

comprend la partie bâtie et les terrains cultivés, est cohérente avec les données archéologiques.

Le deuxième élément nécessaire pour la modélisation est une estimation du nombre de foyers domestiques présents. Combien de maisons contemporaines y avait-il, en moyenne, dans un hameau du Néolithique Ancien ? Répondre à cette question est complexe ; une estimation robuste et fiable requiert des données de bonne qualité, comme des sites complètement fouillés et des stratigraphies claires. Ces informations ne sont pas disponibles pour les Balkans : les sites, même les plus importants, sont fouillés seulement partiellement (Andreou et al. 1996) ; cela peut conduire à des estimations approximatives et erronées.

Cette problématique n'est pas généralement traitée par les archéologues : les auteurs s'intéressent plutôt à estimer le nombre d'habitants dans un village en se basant sur sa surface en hectares (Tomkins 2008, Jacobsen 1981), sans prendre en compte la quantité de maisons présentes. Pyke et Yiouni (1996) ont affirmé que le nombre d'habitants à Nea Nikomedeia pouvait être compris entre 500 et 700 personnes, mais cette estimation est très discutable car elle implique une stricte contemporanéité d'occupation dans tout le village (Perlès 2001). D'autres auteurs ont suggéré des quantités plus limitées, par exemple entre 200 et 250 habitants (Jacobsen 1981). Halstead (1981) affirme que, dans les sites les plus étendus de la région, la population devait être comprise entre 120 et 240 habitants. Perlès (2001) trouve que la population des villages du Néolithique Ancien grec pourrait être comprise entre 100 et 300 habitants ; cette fourchette est assez large, mais elle permet de prendre en compte les différences locales, car les sites n'ont pas tous la même taille.

Théoriquement, le nombre de maisons contemporaines peut être connu à partir de l'estimation des habitants, en sachant combien de personnes habitaient en moyenne dans un foyer domestique. Une estimation généralement acceptée est de 6-7 individus pour chaque maison (Perlès 2001), comme celle faite pour Nea Nikomedeia (Pyke et Yiouni 1996). Porčić (2010) estime un ratio de 7m²/personne ; son estimation est faite pour la partie septentrionale des Balkans, mais s'adapte bien au reste de la région, où difficilement les maisons dépassent les 50 m².

Un village de 200 individus, avec 6,5 personnes en moyenne par foyer, donne un total de 30 maisons simultanément occupées. Avec l'estimation de Perlès (2001) de 100 à 300 habitants dans un village, en prenant des maison de 6,5 personnes, le nombre de maisons

contemporaines estimées va de 15 à 46. Il s'agit d'un intervalle très large, car les villages pouvaient avoir des tailles très différentes entre eux ; la valeur moyenne est encore d'une trentaine de maisons contemporaines.

Il faut préciser que les archéologues se contentent souvent d'estimations approximatives, qui sont plus que suffisantes pour leur objectifs, mais pas pour ceux des modélisateurs (Drennan et Dai 2010). Ces données doivent donc être prises avec prudence, en étant conscient qu'elles peuvent être imprécises : les hypothèses à la base de ces calculs sont en effet faibles. Tout d'abord, l'estimation du nombre d'habitants est basée seulement sur la surface des sites et sur leur hypothétique capacité d'accueil ; en outre, le nombre d'individus présents dans une maison suggéré par les archéologues pourrait être objet d'une surestimation (cf. par. 6.5).

Des approches plus statistiques ont été effectuées par Porčić et Nikolic (2014), en utilisant un modèle basé sur le calcul bayésien approché afin d'estimer les dynamiques de la population pour le site de Lepenski Vir, et par Porčić (2011) qui intègre un modèle de croissance de la population avec l'accumulation des maisons, afin de produire des estimations de la population simultanément présente dans trois villages des Balkans occupés pendant le Néolithique Finale (Gomolava, Divsotin et Uivar). Ces deux modèles sont appliqués à de contextes historiques différents du Néolithique des Balkans : Lepenski Vir se trouve dans la région des Gorges du Danube, qui n'est pas concernée par l'expansion du système agricole, et les autres trois sites font partie d'une période plus tardive que celle de cette étude. Les paramètres de ces modèles sont issus de fouilles extensives, avec des séquences de dates au radiocarbone qui permettent une reconstitution très précise des périodes d'occupation ; cependant, ces éléments ne sont pas disponibles, ou le sont d'une façon très incertaine, pour le Néolithique Ancien des Balkans. Pour cette raison, les modèles ne sont pas applicables aux sites de la région étudiée dans cette thèse.

Cependant, les résultats de ces études peuvent donner des éléments de réflexion intéressants. Le site de Gomolava a une surface de 1,84 hectares et est composé de petites maisons occupées en moyenne par 5 personnes ; cette structure est comparable à celle des villages du Néolithique Ancien, en termes de surface et de typologie des maisons. Le modèle de Porčić estime qu'il y avait environ 30 maisons contemporaines ; cette valeur est conforme aux estimations précédentes, et pourrait représenter la taille standard pour un village de ces dimensions. Il faut par contre se méfier d'autres estimations, comme celle proposée pour le village de Divostin. Ce site a une surface de 15 hectares et un nombre de maisons

contemporaines qui dépasse la centaine ; mais il fait partie de la culture di Vinça, qui se développe après le Néolithique Ancien, et qui présente des villages beaucoup plus grands que ceux de toutes les autres cultures Européennes contemporaines (Suciu 2011). Ce site n'a donc rien à voir avec le contexte archéologique du Néolithique Ancien.

Après avoir parcouru ce qui a été publié sur le sujet, une autre approche s'est avérée possible, qui consiste dans la réalisation d'une nouvelle estimation. En connaissant la surface fouillée (S_f), le nombre de maisons trouvées (M_f), et la surface totale d'un site (S_t), une estimation du nombre total de maisons (M_t) est faite de la façon suivante.

La proportion fouillée (P_f) est connue à travers la formule :

$$P_f = \frac{S_f}{S_t}$$

Cette proportion permet d'estimer les maison totales :

$$M_t = (P_f)^{-1} \times M_f$$

Qui correspond à :

$$M_t = M_f \times \frac{S_t}{S_f}$$

Le premier problème lié à cette méthode est que, tandis que le nombre de maisons fouillées et la surface fouillée sont bien connues, la surface totale est issue elle-même d'une estimation ; si cette dernière est erronée, l'estimation relative aux maisons sera fausse. Les estimations de la surface des villages peuvent changer d'un auteur à l'autre : la dispersion d'objets et d'artefacts peut conduire à une surestimation ; par ailleurs, la mensuration du diamètre des sites en *tell* (colline) a tendance à en sous-estimer la surface (Perlès 2001). En outre, cette formule est basée sur l'hypothèse que la densité des maisons était constante dans tout le site ; ce n'est pas vérifiable, car les sites sont connus seulement par des fouilles partielles.

Plus le site a été fouillé, plus l'estimation sera fiable ; inversement, des sites fouillés d'une façon limitée produiront des résultats très approximatifs. C'est pour cette raison que nous avons choisi Nea Nikomedeia, le site relativement le plus fouillé du Néolithique Ancien Grec (Perlès 2001). Il se trouve sur une colline de 24.200 mètres carrés, dont 1.690 ont été fouillés (Pyke et Yiouni 1996). Pour sa première phase d'occupation, huit bâtiments ont été trouvés.

Parmi eux, sept sont considérés comme des maisons ; le huitième, plus large, pouvait avoir une fonction collective (Pyke et Yiouni 1996). La deuxième phase d'occupation a aussi sept bâtiments, la troisième six. L'équation décrite précédemment donne une estimation de 105 maisons au total dans le village pour les deux premières phases d'occupation, 90 pour la troisième. Pyke et Yiouni (1996) ont considéré la possibilité que toutes les maisons étaient occupées simultanément, et estiment que le village pouvait atteindre 700 habitants. Néanmoins, une stricte contemporanéité dans des phases d'occupation qui peuvent durer un siècle ou plus est considérée comme peu probable (Perlès 2001). Halstead (1981) estime que seulement une proportion de 20% à 30% des maisons totales trouvées dans les fouilles pouvait être occupée simultanément. En prenant ces estimations pour bonnes, le nombre de maisons simultanées pourrait être compris entre 21 et 31 pour les deux premières périodes, et entre 18 et 27 pour la troisième ; ces valeurs sont comparables aux estimations effectuées par d'autres auteurs qui ont été décrites précédemment.

Même si plusieurs sources peuvent orienter vers une estimation de 25-30 maisons contemporaines maximales, des exceptions ne manquent pas, comme le site de Kovachevo, en Bulgarie, pour lequel des rapports de fouilles détaillés ont été publiés (Lichardus-Itten et al. 2002). Ce site est différent de Nea Nikomedeia, car il n'est pas un site en *tell* avec différentes couches d'occupation stratifiées, mais il est plat. En outre, il a une remarquable extension : sa surface totale est estimée entre 6 et 7 hectares (Higham et al. 2011) ; il est plus large que les sites de la Thessalie, qui ne dépassent pas 3 ou 4 hectares (Gallis 1994). Ce site a eu trois phases d'occupation différentes ; la première, Kovachevo I, fait partie du Néolithique Ancien et comprend en son intérieur quatre couches différentes (Ia-Id). Les phases de Kovachevo II et Kovachevo III ne sont pas traitées ici, car elles appartiennent à une période postérieure à celle qui est ici modélisée. Un total de 13 maisons font partie de la phase de Kovachevo I, mais elles sont réparties entre les quatre couches différentes : trois maisons pour la couche Ia, six pour la couche Ib, trois pour la couche Ic, et six pour la couche Id. Même si les données archéologiques sont très limitées pour reconstituer avec précision un plan de l'habitat, les périodes Ib et Id sont relativement bien définies et peuvent fournir des indications sur la structure du village. Au contraire, les périodes Ia et Ic ont des chevauchements qui rendent compliqué leur claire identification, et ne permettant pas de distinguer la structure spatiale et chronologique de l'occupation (Lichardus-Itten et al., 2002).

En considérant les périodes Ib et Id comme représentatives du village de Kovachevo, la proportion précédente est appliquée : le nombre de maisons totales cumulées présentes dans le site serait de 220. Selon l'estimation de contemporanéité d'Halstead (1981), la quantité de maisons simultanées serait comprise entre 44 et 66, un nombre plus élevé qu'à Nea Nikomedeia et que toutes les autres estimations vues jusqu'au présent. La probabilité que ce site soit objet d'une surestimation est élevée : il s'agit d'un site plat et extensif, avec une étendue supérieure à celle des autres sites trouvés dans la région (Higham et al. 2011). L'hypothèse que la densité des maisons était constante dévient moins probable ; certaines parties de la surface peuvent avoir été occupées dans un deuxième temps, comme par exemple à Sesklo, où chaque phase comporte de nouveaux bâtiments dans différentes parties de la hameau (Souvatzi 2008).

Etant donné qu'elle produit des résultats assez incertains même pour les sites archéologiques les plus exhaustivement fouillés, cette technique n'est pas applicable pour les sites qui sont connus de façon encore plus incomplète. Le résultat de Nea Nikomedeia est assez proche des estimations des autres auteurs, tandis que Kovachevo semble avoir eu plus de maisons, soit en raison d'une surestimation, soit parce qu'effectivement plus peuplé.

Pour récapituler, l'estimation du nombre de maisons présentes dans un hameau du Néolithique ancien est une problématique complexe, surtout à cause de l'absence de données exhaustives concernant les fouilles. Par conséquent, toutes les hypothèses ne se basent que sur des estimations, en donnant des résultats très incertains. A cela il faut ajouter le fait que, dans une région vaste et géographiquement différenciée, il n'est pas possible de trouver un patron général et homogène. Il y avait sans doute une grande variété de villages, avec des différences remarquables en termes de taille. Il faut aussi préciser que les villages trouvés par les archéologues sont normalement les plus grands et ceux qui ont eu une plus longue durée d'occupation, car ils sont les plus visibles (Perlès 2001) ; ceux qui n'ont pas été trouvés étaient probablement plus petits. Un hameaux typique pour le Néolithique Ancien Balkanique a été recherché pour OBRESOC-BEAN ; en explorant les travaux d'autres auteurs, et en ajoutant des analyses personnelles, nous concluons qu'un village typique pouvait atteindre environ 25 ou 30 maisons simultanées.

Le fait que les villages peuvent présenter des différences dans leur taille est prise en compte dans le modèle OBRESOC-BEAN : certains hameaux simulés, pour plusieurs raisons, peuvent garder une petite taille. Par ailleurs, d'autres hameaux peuvent atteindre le seuil

maximal de maisons, et même le dépasser grâce à la présence du *Big Man*, une personnalité influente qui réduit la tension sociale et permet au hameau de s'accroître ultérieurement (cf. par. 2.9). Cela donne un patron régional de hameaux de différentes tailles compatible avec les estimations effectuées par les archéologues.

2.2.2 Les sites en *Tell*

Les *tells* sont un élément qui est souvent associé au Néolithique des Balkans, en particulier à la Grèce (Kotsakis 1999) ; il s'agit de sites archéologiques qui ont la forme d'une colline. Cette typologie de sites prend aussi le nom de *magoula* dans les Balkans, et est connue comme *höyük* en Turquie (Rosenstock 2005). Les *tells* sont caractérisés par une stratification sur plusieurs niveaux : ils sont le produit d'une occupation continue du même site, où à chaque période le village était reconstruit au-dessus de la couche précédente. Ce type de village n'est pas le seul trouvé en Grèce, même si un grand nombre de *tells* sont présents dans la région. Une étude (Rosenstock 2006) montre que les sites plats étaient également très communs ; la raison principale de la surestimation des sites en *tell* est qu'ils sont plus visibles, et conséquemment plus faciles à trouver par les archéologues.

Un gradient géographique est identifiable pour ces sites en *tell* : ils représentent la forme d'habitat standard dans le Proche Orient, et ils sont très communs en Grèce et en République de Macédoine, même si en cohabitation avec des sites plats (Rosenstock 2006). Ils deviennent de plus en plus rares au fur et à mesure que le Néolithique avance vers le nord, jusqu'à l'Europe Centrale où il n'y a pas d'évidence d'aucun site en *tell*. Une explication pour ce gradient est liée aux matériaux de construction : la quantité de boue utilisée pour la construction des maisons semble avoir une influence directe sur l'épaisseur des couches et, donc, sur l'élévation des sites. Là où les matériaux laissent des débris qui sont difficilement éliminables, comme les briques crues, la nouvelle couche du règlement est bâtie directement au-dessus des restes de la précédente (Rosenstock 2006) ; il y a donc une augmentation de l'élévation du site, qui prend la forme d'une colline. Inversement, dans les zones où le bois est prévalent les sites restent plats, car ce matériau est sujet à une forte dégradation et est plus facile à éliminer ; la nouvelle couche sera donc moins épaisse.

Cette digression sur les *tells* était nécessaire, car il s'agit d'un sujet de grand intérêt dans l'archéologie de cette région, qui ne pouvait pas être ignoré ; néanmoins, dans OBRESOC-BEAN, la présence de sites en *tells* n'est pas prise en compte. Ce modèle simule la démographie et l'économie des premiers agriculteurs des Balkans, dans un contexte géographique réaliste ; le hameau est considéré uniquement du point de vue d'une structure sociale et d'agrégation des individus et des foyers domestiques. Le fait qu'il soit en *tell* ou plat n'est pas intégré dans la modélisation, car cela n'a pas d'influence sur l'activité des agents et sur les mécanismes qui déterminent l'expansion du système agricole.

2.3 Le système agricole

L'agriculture n'est pas simplement un objet qui est transmis, un élément purement culturel du "*paquet néolithique*" ; elle constitue la base de la Néolithisation, qui a permis la transition démographique Néolithique grâce à la sédentarité et au majeur apport calorique (Bocquet-Appel 2008a), et la conséquente expansion à l'échelle continentale. Le système agricole détermine le mode de vie du Néolithique, l'activité et le comportement des individus. Pour cette raison, plusieurs auteurs se sont dédiés à comprendre le fonctionnement du système agricole en termes de techniques, cultures, rendement. Ces études ont été de première importance pour la réalisation du modèle objet de cette thèse, où l'agriculture constitue une partie très importante du système économique modélisé.

2.3.1 Une agriculture intensive

De nombreuses évidences archéologiques et archéo-botaniques suggèrent que les premiers colonisateurs des Balkans avaient un système agricole intensif : cela signifie que les terrains cultivés étaient petits, mais l'apport de travail était important. Un terme qui a été associé à l'agriculture des premiers cultivateurs de la région est "*jardin*", depuis l'anglais *garden cultivation* (Jones 2005). Il ne faut pas penser à la signification courante de jardin, celle utilisée pour décrire un système basé sur la culture des légumes et herbacées,

traditionnellement associé à l'horticulture. Dans le cas du Néolithique, le sens du mot se réfère plutôt à l'échelle de la culture, qui dépend de la petite taille des terrains. Il s'agit donc d'un système agricole intensif, avec un haut input de travail pour chaque unité cultivée, mais sur une petite échelle. De la même façon, le terme "*élevage intensif*" peut être utilisé pour indiquer une quantité de travail élevée, mais destinée à un nombre relativement petit d'animaux, gardés habituellement dans le hameau. Ces deux techniques, combinées ensemble, caractérisent un "*système agricole intensif mixte*" (Bogaard, 2005).

L'interprétation des restes des plantes, dans l'Europe méridionale comme dans l'Europe septentrionale, suggère que les premiers agriculteurs investissaient une quantité considérable de force de travail afin de garder les terrains cultivables sur une longue durée de temps (Kreuz et al. 2005). De la même manière, l'analyse d'assemblages relatifs à la faune montre comment l'élevage intensif sur une petite échelle était la norme dans plusieurs régions d'Europe (Halstead 1989). Ce système est centré sur le pâturage dans les alentours du hameau, et l'intégration entre le stock animal et l'agriculture, avec l'utilisation de la fumure pour augmenter la productivité du sol (Bogaard et al. 2013). Cela implique un important investissement dans la terre, et donc la permanence au même endroit pour une longue période (Jones 2005).

Plusieurs études régionales (par exemple Bogaard et al. 2013, Bogaard 2004) suggèrent qu'une culture intensive, associée à un élevage intensif, était la norme pendant le Néolithique dans toute l'Europe centrale et sud-orientale. Cette homogénéité peut être surprenante si on pense aux grandes différences climatiques entre les régions, ainsi qu'à la variété des cultures et des stocks d'animaux présent aujourd'hui (Bogaard 2004). Une explication est la vitesse de la diffusion du Néolithique : dans ses phases initiales, les différents éléments du *paquet Néolithique* n'ont pas encore eu le temps de se différencier ; cela se vérifiera seulement dans une deuxième phase, comme sera vu aussi pour les animaux (cf. par. 2.4.2).

Grâce aux semences trouvées dans les vestiges archéologiques, il est possible de savoir quelles étaient les principales cultures pratiquées pendant le Néolithique, ainsi que d'avoir une estimation de leurs proportions relatives. L'espèce cultivée la plus présente est le blé, à la fois dans la typologie de *triticum monococcum* et de *dicoccum*. L'orge (*hordeum vulgare*) et la lentille (*lens culinaris*) ont aussi une remarquable diffusion. Moins communs, mais diffusés, sont le petit pois (*pisum sativum*), le lentille erviliaire (*vicia ervilia*), et la gesse (*lathyrus sativus*). En Grèce le pistache (*pistacia sp.*) et la vigne (*vitis sp.*) ont été trouvées, et en

Bulgarie était présent un autre type de blé (*triticum aestivum*). Il y a également des espèces plus rares, trouvées occasionnellement dans certains sites archéologiques ; nous n'avons mentionné ici que les espèces les plus communes et les plus diffusées.

Des données archéologiques suggèrent qu'un système agricole extensif n'était pas pratiqué au Néolithique Ancien. Il aurait aussi requis un élevage sur large échelle, où les animaux sont emmenés pâturer à grande distance du hameau ; la conséquence serait une pénurie de fumure, car les animaux se trouveraient loin des zones cultivées au moment de la déjection. Le système extensif nécessite, il est vrai, moins de fumure, mais par contre demande une zone cultivée plus large ; ces éléments sont en contradiction avec les traces qui ont été trouvées pour l'agriculture du Néolithique initial, qui montrent une utilisation de fumure sur de petits terrains cultivés (Bogaard 2004). Isaakidou (2011) exclue également la possibilité d'une agriculture extensive, à cause de l'absence de traces dans les pollens grecs d'une déforestation sur large échelle. Il n'y a aucun signal de la pratique de l'abattis-brûlis, typique de l'agriculture extensive ; cela confirme l'hypothèse qu'il s'agissait plutôt d'un système agricole sur petite échelle. De plus, la grande variété de cultures qui caractérise l'agriculture du Néolithique Ancien est associée avec la culture "à jardin" sur une petite échelle. Des assemblages archéobotaniques du nord de la Grèce (Valamoti et Kotsakis 2007, Valamoti 2004) confirment l'utilisation de fumure pour l'agriculture, ainsi que l'alimentation des troupeaux avec des céréales. En Bulgarie plusieurs évidences archéobotaniques en faveur d'une agriculture intensive se trouvent dans des analyses statistiques et écologiques des herbacées arables trouvées (Marinova 2007, 2006, 2001). En Hongrie, les informations relatives aux sites Körös sont limitées, mais elles indiquent une gestion intensive des parcelles permanentes ; la fertilité du sol était plus que suffisante pour permettre une culture de ce type (Bogaard 2004).

Des analyses basées sur des isotopes de nitrogène stable (Bogaard et al. 2013) ont démontré scientifiquement l'effet de la fumure sur les cultures. En particulier, cette étude montre que les premiers agriculteurs avaient une utilisation stratégique de cette ressource, pour en maximiser le profit. En effet, la fumure n'était pas disponible en grande abondance, étant limitée à la fois par la petite échelle - et donc la petite taille du troupeau - et par la difficulté liée à sa collecte.

L'utilisation de la fumure n'était pas toujours égale : chaque site pouvait privilégier la fertilisation d'une culture différente (Bogaard et al. 2013). Les analyses relatives à Koufouno (Grèce) montrent une fertilisation surtout du blé et des légumineuses, tandis que pour l'orge une quantité limitée, voire nulle, de fumure était utilisée. À Slatina (Serbie) la fumure était

dédiée seulement aux cultures principales (*triticum monococcum et dicoccum*). Des sites comme Karanovo (Bulgarie) montrent une distribution plus homogène de la fumure. La fumure pouvait être déposée par les animaux directement sur les terrains cultivés, ou récoltée par les agriculteurs et distribuée ensuite sur les terrains. Pendant l'hiver, les animaux étaient gardés près du village (Bogaard 2004).

Selon des estimations, un système de culture intensif requiert environ 30 tonnes de fumure par hectare chaque année (Bogaard 2004, Alcock et al. 1994). Chaque bovin produit environ 12 tonnes de fumure par année (Rowley-Conwy 1985) ; il faut en outre ajouter la production des chèvres et moutons, car l'utilisation des déjections de ces animaux comme fumure est signalée par des sources ethnographiques et agronomiques (Kreuter 2005, Boyazoglu et Morand-Fehr 2001, Halstead 1987). Même si la production des chèvres et moutons est inférieure à celle des bovins, le fait que ces animaux étaient présents en grand nombre dans cette région peut donner un apport important à la production de fumure. Bogaard (2004) affirme que chaque foyer domestique pouvait cultiver 1 ou 2 hectares : avec la fumure des bovins complétée par la production des ovicapridés, un troupeau de taille modeste peut produire la quantité de fumure nécessaire pour cultiver d'une façon intensive des parcelles de cette taille. Un petit troupeau composé de peu de caprins, bovins et porcins est donc suffisant pour conserver un haut niveau de fertilité sur un espace limité. L'importance des ovicapridés est confirmée dans des sources ethnographiques, non seulement pour la contribution de fumure déjà mentionnée, mais aussi parce qu'ils pouvaient être utilisés pour l'enlèvement des mauvaises pousses, qui avaient tendance à ne pas s'ouvrir, en facilitant par conséquent la reproduction de celles qui, au contraire, étaient meilleures pour l'agriculture (Burns 2003).

Une autre étude basée sur des isotopes stables de carbone et d'azote à partir de collagène d'os humains (Papathanasiou 2003) montre comment les populations du Néolithique Ancien avaient un régime basé largement sur ressources de la terre, en particulier les céréales. Même dans des zones où d'autres ressources étaient disponibles, par exemple la pêche, on constate une totale prédominance de la nourriture terrestre plutôt que celle marine (Powell 1996). La viande des animaux était exploitée, mais dans une mesure limitée (Halstead et Isaakidou 2013). Vu la petite taille des troupeaux (cf. par. 2.4), le régime devait forcément être basé surtout sur les cultures de céréales et de légumineuses ; il n'y avait pas assez d'animaux pour qu'ils constituent une forme stable de subsistance. En tout cas, les troupeaux représentaient un stock de sécurité, qui pouvait être exploité en cas de crise. En situation normale, les animaux

étaient probablement mangés seulement à l'occasion de festivités de la communauté (Halstead 2011b, 2004). Laine, peau et fourrure sont aussi utilisées, mais probablement pas d'une façon intensive (Bogaard 2004)

Il y a donc de nombreux indicateurs d'un système agricole intensif, commun à la région entière, à partir de la Grèce jusqu'à la Hongrie (Bogaard 2005) ; cette homogénéité caractérise en vérité le Néolithique Ancien d'une grande partie de l'Europe, car la même agriculture intensive est trouvée dans la culture Rubanée en Europe Centrale. Avec ce système, le rendement des cultures des céréales est élevé, grâce à l'input élevé de travail, qui consiste en des travaux qui vont au delà des semis, comme le défrichage et désherbage. Bogaard (2005) remarque comment ce système agricole s'adapte très bien aux foyers domestiques des Balkans : en effet, la quantité de travail nécessaire pour une agriculture sur cette échelle correspond à la capacité d'un foyer domestique composé par une famille nucléaire.

Pour voir en termes pratiques le fonctionnement de ce système, Jones (2005) a publié une étude ethnographique dans laquelle il analyse la culture intensive de céréales "*du vieux monde*" dans l'île grecque de Evvia. Par ce terme, l'auteur indique des cultures de céréales et légumineuses qui n'ont pas été importées à une époque récente, du même type que celles cultivées pendant le Néolithique. Les parcelles cultivées, appelées *jardins* (la définition de ce mot a déjà été donnée), consistent en des terrains très fertiles, situés près des maisons du village, ou sur les marges alluvionnaires des sources d'eau proches.

Il y a deux aspects fondamentaux dans la culture de ces parcelles. D'abord, la préparation de la terre avant le semis, suivie de l'enlèvement (dans ce cas, à la main) de toutes les herbacées qui peuvent interférer avec le sol. Les semences sont ensuite jetées dans des trous, généralement disposés en ligne. Dans certains terrains l'enlèvement des herbacées est régulier, dans d'autres partiel, et dans d'autres encore totalement absent. Le deuxième aspect est la productivité du sol, qui est accrue par l'ajout de la fumure. Cette étude a en effet montré comment les parcelles les plus fertiles étaient celles qui avaient le plus de contenu organique ; la fertilité supérieure est mise en évidence par la hauteur moyenne des cultures, ainsi que par leur densité par rapport aux autres terrains.

L'importance de cette étude est qu'elle montre comment une agriculture intensive, qui prévoit la préparation des champs, le désherbage et la fumure, même pratiqués avec des techniques rudimentaires, a un impact très fort sur la fertilité et donc sur la productivité des terrains. Une

culture à long terme sur de petits terrains, situés près du hameau, est absolument possible ; grâce à l'input de travail élevé, une petite famille peut facilement obtenir de quoi survivre. L'investissement, en termes de travail saisonnier, est important et doit être constant sur la longue période ; c'est l'équivalent d'un investissement en capital. Pour cette raison, il s'agit d'une forte incitation à rester au même endroit et à continuer à cultiver la même parcelle.

L'auteur conclut donc qu'une production agricole sur jardin importante ne nécessite pas une culture sur une large échelle, ni l'utilisation de techniques compliquées. Beaucoup d'éléments coïncident entre l'agriculture du Néolithique et l'agriculture moderne de l'île d'Evvia : les types de plantes cultivées, les techniques, et aussi la région géographique. Ce panorama ethnographique a donc montré le fonctionnement d'un système agricole intensif qui n'est pas trop différent de ce qui est inféré pour le Néolithique ancien des Balkans.

2.3.2 La cueillette

La présence de restes de plantes non domestiquées dans les assemblages des sites Néolithiques montre que la cueillette de plantes sauvages et de fruits était pratiquée à côté de l'agriculture. Perlès (2001) a publié des tables qui incluent toutes les semences et les restes de plantes retrouvés dans plusieurs sites grecs. Ce qui émerge est que le pourcentage de restes de plantes domestiquées représente toujours entre 80% et 100% des plantes totales trouvées ; cela suggère que l'agriculture avait un rôle largement plus important que la cueillette.

Il faut préciser que ces estimations peuvent parfois être biaisées, car il existe des types de plantes sauvages qui ne laissent pas de traces ; par exemple, certaines plantes à feuilles larges et certains tubercules ne sont pas retrouvables dans les vestiges. D'autre part, les fruits pouvaient être recueillis et consommés en dehors du village. Cependant, même les fruits avec de gros pépins ou avec des coques, qui sont théoriquement faciles à retrouver, sont très rarement présents. Il existe aussi des plantes sauvages qui ne sont pas consommables immédiatement, et nécessitent traitement et stockage ; si elles avaient un rôle important dans le régime alimentaire, elles seraient présentes dans une plus grande mesure. En outre, il y a une limitation climatique : tubercules et racines sont considérés inadéquats pour être une source de glucides stable dans la région Méditerranéenne (Hather 1994). De plus, dans cette

zone les plantes sauvages ont une dispersion trop élevée, une densité et un rendement faible, et sont saisonnières (Halstead 1984, 1981). Certaines espèces sauvages qui laissent des restes bien identifiables, et qui sont trouvées fréquemment dans d'autres sites Européens, sont par contre presque totalement absents dans cette région (Perlès 2001). Enfin, l'absence des restes de plantes sauvages ne peut pas être attribuée à la dégradation des vestiges archéologiques, car dans les mêmes sites d'abondantes traces de plantes domestiquées sont au contraire trouvées.

Toutes ces considérations peuvent conduire à la conclusion que la cueillette était sans doute pratiquée, mais était une activité marginale. Même si existe un risque concret de sous-estimation, les traces archéologiques montrent d'une façon qui laisse très peu de place au doute que les plantes cultivées représentaient la vaste majorité des restes de la flore, et donc que l'agriculture avait un rôle beaucoup plus important que la cueillette.

2.3.3 L'adaptation du système agricole depuis OBRESOC

Les paragraphes précédents ont montré que la région balkanique avait un système agricole homogène, basé sur des cultures intensives accompagnées d'un élevage intensif aussi, caractérisé par de petits terrains cultivés avec un important input de travail, et avec des troupeaux de taille limitée.

L'implémentation de ce système agricole dans OBRESOC-BEAN n'a pas demandé beaucoup d'adaptations à partir du modèle originel OBRESOC : en effet, les principaux éléments structuraux sont les mêmes que pour la culture Rubanée, et avaient déjà été modélisés. On se réfère notamment au système agricole intensif, qui exploite la fumure des animaux pour accroître le rendement. En outre, les céréales cultivées sont les mêmes, ainsi que les techniques, et le troupeau est composé par les mêmes espèces (cf. paragraphe 2.4). La structure du modèle agricole a donc été, pour l'essentiel, conservée inchangée.

Certains éléments nécessitent néanmoins une adaptation : les paramètres injectés dans le modèle, qui influencent certains aspects du système agricole, et qui peuvent différer entre les deux régions. Parmi eux, importante est l'estimation du rendement du système agricole du Néolithique Initial des Balkans. Cela n'est pas directement vérifiable dans l'archéologie ;

néanmoins, des estimations issues de l'ethnographie et de l'agronomie ont été publiées, sur la base du potentiel qui peut être obtenu dans la région avec les techniques connues au Néolithique Ancien. Une estimation généralement acceptée par les auteurs est de 600 kilogrammes/hectare (Wilkinson 1992 ; Whitelaw 1991 ; Davis 1991). Halstead (1981) affirme que les techniques agricoles Néolithiques pourraient permettre un rendement jusqu'à 1000 kg/ha. Néanmoins, il est improbable que les agriculteurs aient intérêt à atteindre un rendement particulièrement élevé ; ils pratiquaient une agriculture de subsistance, non une agriculture économique. Dans ces sociétés, les individus n'ont pas intérêt à produire plus que ce qu'il faut pour nourrir leur famille nucléaire, avec peut-être un petit surplus de sécurité, comme le montrent des traces de stockage (Marinova et Popova 2008). Sous l'hypothèse qu'une personne peut consommer environ 200 kilogrammes de céréales par an (Davis 1991), un terrain d'un hectare peut faire vivre 3 personnes. Étant donné qu'un foyer domestique cultive, selon les estimations, jusqu'à 2 hectares (Bogaard 2004), il y aurait assez de céréales pour nourrir six personnes, ou même plus en considérant que les enfants ont un besoin calorique inférieur. L'estimation de 600 kg/ha de rendement est considérée comme réaliste et est injectée dans le modèle comme paramètre ; les tests d'ajustement ont permis d'en vérifier la validité.

De nombreux autres paramètres, par contre, ont été maintenus constants depuis OBRESOC. Il s'agit notamment des valeurs biologiques (kilocalories produites par les animaux et les plantes, taux de croissance des plantes, reproduction et mortalité des animaux) qui ne changent pas dans les différentes régions géographiques.

Le troupeau, même si composé par les mêmes espèces, qui ont le même rôle au sein du système agricole, présente des différences dans sa taille et dans sa composition de ce qui est observé pour la culture Rubanée. Son adaptation, à partir d'estimations faites sur les vestiges relatives à la faune, est décrite dans le paragraphe suivant.

2.4 Les animaux dans la société du Néolithique Ancien balkanique

L'élevage des premières sociétés Néolithiques faisait partie d'un système agricole intensif : les troupeaux avaient une taille relativement petite et étaient utilisés en symbiose avec

l'agriculture. La présence de nombreux restes d'animaux dans les vestiges permet la formulation d'inférences sur la composition de ces troupeaux.

Les troupeaux du Néolithique ancien de la région étaient composés principalement de quatre espèces d'animaux : chèvres, moutons, bovins et porcins, comme est montré par le large nombre de squelettes trouvés dans de nombreux sites archéologiques (Orton 2012, Perlès 2001). Les chiens sont aussi présents dans plusieurs sites, mais dans une proportion très limitée (toujours <1% du total des animaux) ; pour cette raison ils sont considérés comme une espèce marginale, même si leur rôle dans les sociétés préhistoriques n'est pas encore complètement clair (Horard-Herbin et al. 2014). Les chèvres et moutons sont normalement regroupés dans la même catégorie ; cela est dû à la complexité de distinguer les os de ces deux espèces dans les restes, ainsi que pour leur rôle similaire au sein de l'activité agricole. Pour cette raison, dorénavant, les chèvres et moutons seront groupés ensemble dans la catégorie des ovicapridés. Les animaux sont modélisés dans OBRESOC-BEAN en termes de mini-troupeaux ; chaque foyer domestique en possède trois, un pour chaque espèce principale d'animaux: ovicapridés, bovidés, suidés. La taille et la composition de ces mini-troupeaux a été estimée à partir des évidences archéologiques.

2.4.1 Estimation de la composition du troupeau

Malgré l'abondance des traces matérielles, une estimation précise du ratio de chaque animal sur le total du troupeau n'est pas évidente. Greenfield (2008) a indiqué les problèmes principaux qui concernent l'analyse des restes animaux, qui peuvent être résumés dans les points suivants :

-même si le Néolithique Ancien des Balkans a été beaucoup étudié et investigué par les archéologues, la récupération systématique des restes de la faune a toujours été d'intérêt marginal. Beaucoup d'échantillons ont été fouillés, analysés et publiés d'une façon qui ne permet pas une analyse taphonomique correcte.

-une raison du biais est liée à la taille des animaux : les animaux les plus grands sont retrouvés plus facilement, car les grands os sont plus faciles à retrouver que les petits.

-un problème est lié à la classification des échantillons. Deux méthodes sont connues : par NISP (Number of Identified Specimens, *Nombre d'échantillons identifiés*), où chaque os ou fragment est compté comme une unité ; et par MNI (Minimum Number of Individuals, *nombre minimum d'individus*), où le nombre minimum d'individus qui peut être détecté dans les restes est calculé. Il y a une totale absence de données publiées avec cette dernière technique : il n'est pas possible d'obtenir un nombre suffisant d'échantillons de MNI pour les Balkans (Greenfield 2008). Le catalogage des NISP reste donc la seule option possible ; néanmoins, il peut conduire à une surestimation, où de multiples fragments du même os sont comptés plusieurs fois. En outre, souvent les auteurs ont publié des NISP sans en discuter la méthodologie d'acquisition, rendant par conséquent l'échantillon moins robuste.

-la conservation des échantillons est fréquemment non adéquate ; cela ne permet pas, aux générations suivantes, de les ré-analyser avec des techniques plus développées.

En connaissant les risques de biais dans les vestiges animaux, on se retrouve devant un problème méthodologique. Deux approches sont en effet possibles : i) utiliser les informations de tous les sites publiés, en sachant que certains pourraient être biaisés ; ii) utiliser seulement les informations qui viennent de sites mieux fouillés et bien catalogués. A priori, cette deuxième approche semble plus envisageable, étant plus robuste et cohérente. Néanmoins, cela réduirait l'échantillon à un nombre extrêmement faible de sites. Pour cette raison, les auteurs ont généralement opté pour la formulation de leurs hypothèses avec la première approche (Orton 2012, Bartosiewicz 2005, Perlès 2001), c'est-à-dire sur un vaste ensemble de sites publiés ; seul Greenfield (2008) a effectué un audit des sites.

Indépendamment de l'approche choisie, il y a des sites qui sont apparemment aberrants : ceux où la présence d'animaux sauvages dépasse celle des animaux domestiqués. Cela est incompatible avec le système agricole décrit précédemment, où la chasse est considérée comme une activité marginale ; donc, ces sites ne semblent pas représentatifs du Néolithique Ancien de la région. Parmi les sites publiés, six sites présentent cette caractéristique ; trois se trouvent dans la région des Gorges du Danube (Lepenski-Vir, Padina, Nosa). L'explication de cette anomalie est claire : ils se trouvent dans une zone où un vrai système agricole ne s'est pas développé, et par conséquent l'importance des animaux domestiqués était très marginale (cf. paragraphe 2.8). Les trois autres sites (Hajdučka Vodenica, Bukovačka et Golukot), par contre, se trouvent dans des zones où un Néolithique traditionnel, basé sur l'agriculture et l'élevage, était présent. Greenfield (2008) explique cette anomalie par la position de ces sites,

qui sont situés près des rivières principales, dans un contexte géographique similaire aux Gorges du Danube. L'auteur fait donc l'hypothèse que, d'une façon analogue, ces sites pouvaient avoir eu une occupation de chasseurs/cueilleurs déjà pendant le Mésolithique, et seraient restés liés à la chasse aussi dans la période successive. Même si cette explication est possible, il faut remarquer que ces trois sites ont un échantillon de NISP extrêmement limité, qui consiste en quelque dizaines d'exemplaires à Hajdučka Vodenica et Bukovačka, et seulement un petit peu plus à Golukot. Un biais dû au mauvais échantillonnage ne peut pas être exclu, et ces sites sont conséquemment rejetés.

Tous les autres sites sont considérés acceptables. Orton (2012) affirme que, dans ce contexte spécifique, une approche auditée n'est pas optimale, car elle serait basée sur un échantillon trop limité de sites, et donc non représentatif ; il faudrait essayer d'inclure le plus grand nombre de sites possible. En même temps, la présence de sites fouillés marginalement, avec une quantité d'os limitée, pourrait conduire à une erreur en observant les ratios de chaque animal dans chaque site ; moins d'os sont présents dans un site, plus élevé sera le possible biais dans ces ratios. Pour cette raison, tous les échantillons trouvés dans tous les sites sont agrégés, en travaillant en termes de MNI absolu dans la région, et non sur les ratios. De cette manière, les sites où moins d'échantillons ont été trouvés auront aussi un poids inférieur sur le total, tandis que les sites avec plus d'exemplaires influenceront davantage le total.

Dans la table 2.1 sont montrées les données sur les animaux utilisées dans cette thèse. Les fréquences d'animaux sont adaptés afin d'inclure seulement les trois espèces principales, en excluant les chiens et les animaux sauvages. Les sites en rouge sont exclus car non représentatifs du Néolithique Ancien Balkanique (animaux chassés largement supérieurs aux animaux domestiques) ; ceux en gras respectent les critères d'audit décrits ensuite (page 41). Il y a 36 éléments au total, qui représentent en vérité 56 sites ; les données relatives à la culture Körös en Hongrie ont été publiés d'une façon agrégée, et ce n'est donc pas possible de savoir à quel site se réfère quelle information. Dans la table 2.2 est montré la fréquence des espèces, calculé à la fois sur les données agrégées totales et auditées.

Site	Fréquence Bovins (%)	Fréquence Caprins(%)	Fréquence Porcins(%)	NISP Totaux	NISP Bovins	NISP Caprins	NISP Porcins
Otzaki (EN2+3)	30,976	51,852	17,172	297	92	154	51
Podrmos 1,2,3 (EN2+3)	32,159	54,990	12,851	1533	493	843	197
Sesklo (EN1+2)	13,674	65,451	20,875	1097	150	718	229
Achilleion (phase I & II)	4,300	86,215	9,486	2256	97	1945	214
Nea Nikomedeia	14,579	70,615	14,806	439	64	310	65
Knossos	6,546	74,944	18,510	443	29	332	82
Anzabegovo I- III	9,906	80,709	9,385	3070	304	2478	288
Bukovačka Cesma	67,285	12,529	20,186	104	70	13	21
Divostin	51,155	3,850	44,995	2182	1116	84	982
Donja Branjevina	23,245	75,259	1,496	1735	403	1305	26
Dudestii Veche	32,692	56,346	10,962	293	96	165	32
Foeni-Gaz	43,071	50,437	6,492	402	173	203	26
Foeni-Salas	44,444	50,409	5,146	2014	895	1015	104
Golokut	63,610	30,659	5,731	409	260	126	23
Gornea- Locurile Lungi	51,704	33,373	14,924	114	59	38	17

Site	Fréquence Bovins (%)	Fréquence Caprins(%)	Fréquence Porcins(%)	NISP Totaux	NISP Bovins	NISP Caprins	NISP Porcins
Hajdučka Vodenica	3,609	0,000	96,392	83	3	0	80
Lepenski Vir III	81,013	17,300	1,688	463	375	80	8
Ludoš-Budzak	13,197	86,462	0,341	2158	285	1866	7
Madzari	41,233	48,247	10,521	2680	1105	1293	282
Miercurea Sibiului-Petriș	64,761	33,722	1,517	1065	690	359	16
Mihajlovac- Knjepište	37,082	62,695	0,223	2298	852	1441	5
Moldova Veche- Rât	73,007	21,377	5,616	234	171	50	13
Na Breg	15,036	79,094	5,870	1366	205	1081	80
Nosa-Biserna Obala	41,600	50,400	8,000	228	95	115	18
Nosa- Gyöngypart	40,967	59,033	0,000	22	9	13	0
Padina	72,000	16,000	12,000	48	35	8	6
Pestera Cauce Lv. I	3,872	82,965	13,164	570	22	473	75
Pojejena-Nucet	84,436	13,813	1,751	155	131	21	3
Röszke-Lúdvár	19,224	79,012	1,764	798	153	630	14
Rug Bair	14,403	70,267	15,329	674	97	473	103

Site	Fréquence Bovins(%)	Fréquence Caprins(%)	Fréquence Porcins(%)	NISP Totaux	NISP Bovins	NISP Caprins	NISP Porcins
Sajan-Domboš	64,234	32,117	3,650	109	70	35	4
Schela Cladovei	50,455	41,212	8,333	794	401	327	66
Şeusa-La Cararea Morii	34,244	58,508	7,248	412	141	241	30
Starčevo	67,623	27,596	4,781	1060	717	292	51
21 Early Koros sites	29,001	69,594	1,406	36851	10687	25646	518

Table 2.1 : Os d'animaux trouvés, énumérés en pourcentage et en nombre de NISP (Number of Identified Specimens).

Echantillon	Fréquence Bovins (%)	Fréquence Caprins(%)	Fréquence Porcins (%)	NISP Totaux	NISP Bovins	NISP Caprins	NISP Porcins
Total	30,621	65,830	5,566	67310	20611	44310	3747
Audit	27,299	59,421	13,280	19605	5352	11650	2604

Table 2.2 : Composition du troupeau estimée sur l'ensemble de tous les sites disponibles et sur les sites audités.

Pour l'audit, les critères décrits par Manning et al. (2013) ont été suivis, selon lesquels 300 NISP constituent un échantillon suffisamment représentatif et par conséquent acceptable ; les sites en dessous de ce seuil sont par contre considérés inadéquats.

En ce qui concerne la Grèce, plusieurs publications sont assez anciennes, et remontent aux années 1960 et 1970. Néanmoins, cela n'affecte pas cette analyse car elle se base seulement sur le comptage des échantillons, qui ne requiert aucun progrès archéologique, à différence

par exemple des datations au radiocarbone. La taille de l'échantillon est adéquate pour tous les sites grecs sauf Otzaki.

Pour les Balkans centraux, beaucoup de sites ont été publiés. L'audit effectué par Greenfield (2008) est considéré valide, en incluant donc toutes les données que l'auteur avait accepté. Tous ces sites ont en effet un nombre de NISP adéquat (>300), tandis que la plupart des sites refusés avaient un nombre d'échantillons très faible (<300).

L'ensemble de 21 sites qui font partie de la culture "Early Körös" publiés par Bartosiewicz (2005) est exclu dans l'audit ; il s'agit de données agrégées, et ce n'est pas possible de vérifier la validité de chaque source.

Donc, sur un total de 67.310 NISP, plus de 65% appartiennent aux caprins ; les bovins sont 29%, et les porcins un peu plus de 5%. En ne considérant que les sites audités, le nombre de NISP acceptés se réduit à 19.605 ; les caprins sont 59% du stock totale, les bovins 27%, tandis que les porcins 13%. Dans ce cas, donc, la prédominance des ovicapridés reste nette et le nombre de suidés augmente, même s'ils restent très minoritaires par rapport aux autres deux espèces.

2.4.2 Un gradient animal ?

La prédominance des ovicapridés dans les assemblages est associée à une végétation ouverte, qui caractérise la région méditerranéenne : les chèvres et les moutons sont en effet, encore aujourd'hui, des animaux typiques de la Grèce. Mais, au fur et à mesure de l'avancée des agriculteurs Néolithiques vers le nord, y avait-il un changement dans le ratio des animaux qui composaient le troupeau ? Peut-on détecter un gradient animale, où le nombre de chèvres et moutons se réduit graduellement pour laisser la place aux bovins ? Ces questions sont de première importance dans la problématique d'une modélisation régionale, qui peut être concernée par des différences locales. Si ce gradient est présent, avec des différences régionales marquées, la création d'un modèle homogène deviendrait problématique, car la structure des troupeaux ne serait pas représentative de la région entière. La présence de restes animaux abondants permet d'explorer si on peut constater une certaine homogénéité dans les

ratios des animaux qui composent le troupeau dans le Néolithique balkanique, ou si chaque zone présente une structure particulière.

Pour afficher ce gradient visuellement, une interpolation spatiale avec la méthode de l'*Inverse Distance Weighting*, basée sur le pourcentage des ovicapridés sur le total du site, a été effectuée. Les ovicapridés ont été choisis car ils sont une large majorité dans les assemblages de la plupart des sites. Avec cette technique d'interpolation spatiale, la valeur de chaque localisation non mesurée est estimée sur la base des valeurs connues, avec un poids qui dépend de l'inverse de la distance. Comme dans cette interpolation le ratio est utilisé, au lieu du nombre absolu de NISP, il était nécessaire de prendre en compte seulement les sites audités, donc ceux qui ont un nombre suffisant de NISP (>300). Sinon, les sites avec un nombre très faible d'échantillons auraient le même poids que les sites mieux prospectés, en conduisant vers un possible biais.

Le résultat de l'interpolation permet d'observer graphiquement le ratio des ovicapridés sur le total d'animaux domestiques pour chaque troupeau, dans toute la région (Fig. 2.1). La carte montre que les ovicapridés sont l'espèce la plus présente dans les assemblages des Balkans méridionaux, en Grèce et en République du Macédoine. Il y a une réduction de ce ratio dans la partie centrale des Balkans ; néanmoins, une présence importante d'ovicapridés est retrouvée en Serbie du Nord et en Hongrie. Un gradient géographique identifiable est donc absent, mais il existe plutôt des différences locales.

Il faut ajouter que les chèvres/moutons sont l'espèce la plus nombreuse aussi dans l'échantillon de 21 sites agrégés relatif à la culture Körös en Hongrie, qui a été exclu ensuite à l'audit, mais qui représente la zone la plus au nord de la région colonisée pendant le Néolithique Ancien. Il n'y a pas d'évidence d'un gradient régulier de réduction des ovicapridés au fur et à mesure que le Néolithique avançait vers Nord, car l'extrémité septentrionale de la région montre le même ratio que la partie méridionale.

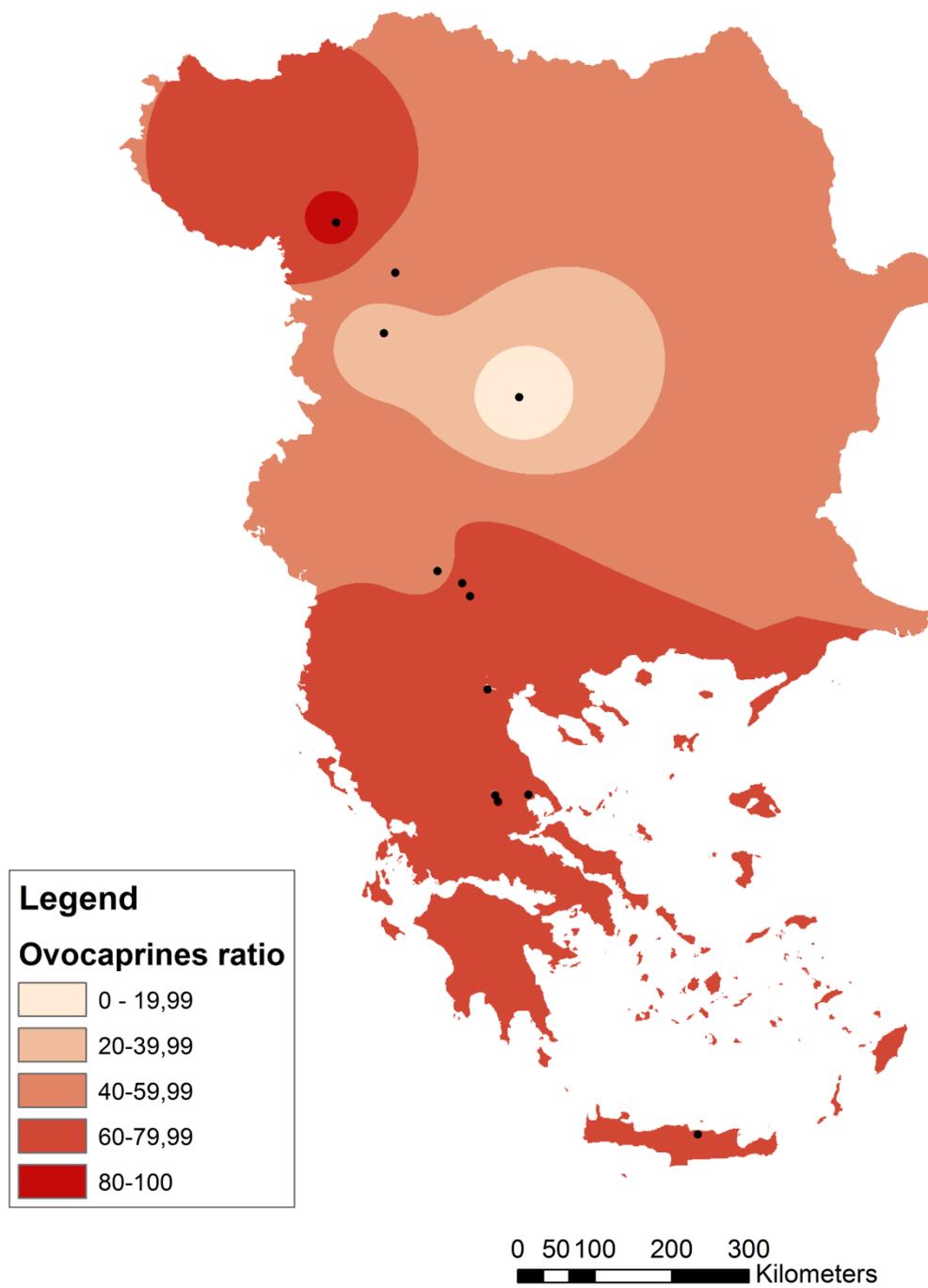


Figure 2.1 : Interpolation *Inverse Distance Weighting* des 12 sites audités.

Cette tendance régionale émerge aussi dans l'analyse de Manning et al. (2013), faite en utilisant la base de données du projet *Origin and Spread of Stock-Keeping (OSSK)*, qui inclut des données sur les restes des animaux trouvés pour le Néolithique dans toute l'Europe, donc aussi pour les Balkans. Cet article montre un ratio d'ovicapridés très haut en Grèce et en Macédoine, suivi par une diminution dans les Balkans centraux, mais qui s'accroît à nouveau dans les Balkans septentrionaux. Cela confirme donc l'absence d'homogénéité, mais aussi la difficulté de trouver un gradient uniforme.

La grande majorité de chèvres et moutons dans le sud des Balkans n'est pas surprenante, cette région étant très adaptée à l'élevage de ces animaux, qui ont une grande importance encore aujourd'hui. C'est par contre plus étonnant de voir un nombre important d'ovicapridés aussi dans les régions plus septentrionales, qui sont théoriquement plus propices à l'élevage des bovins. Une explication est le fait que la période concernée, le Néolithique Ancien, correspond à la première attestation des agriculteurs en Europe. Ils étaient arrivés avec des pratiques développées dans d'autres régions, où l'élevage de chèvres et moutons était optimal ; le changement de ces pratiques nécessite une période d'adaptation. Cette hypothèse est confirmée par les données du Néolithique Final (Orton 2012), qui montrent un grand incrément du ratio bovin dans tous les Balkans septentrionaux. Il est donc plausible que les agriculteurs du Néolithique Ancien se soient installés dans la région avec leur stock animal composé principalement d'ovicapridés ; dans des phases successives seulement, ils ont adapté leur pratiques vers un élevage centré principalement sur les bovins.

Le patron qui émerge de cette analyse montre que les ovicapridés sont sans doute l'espèce principale, étant la plus présente dans presque tous les sites des Balkans ; les bovins sont plus ou moins importants partout, mais moins que les chèvres et moutons. Enfin, les porcins sont marginaux dans presque tous les sites. Ceci est expliqué par le fait que l'adoption complète des cochons au sein du système économique Néolithique a été nettement plus lente que l'intégration des chèvres et moutons (Connolly et al. 2011). En effet, les cochons domestiques étaient presque absents dans la majeure partie des sites de l'Anatolie Centrale (Arbuckle 2013).

Il faut aussi préciser que ce nombre relativement élevé d'ovicapridés n'implique pas qu'ils avaient un rôle extrêmement important dans l'économie Néolithique. Ces animaux ont une taille beaucoup plus petite que celle des bovins ; leur viande donne moins de calories, et ils produisent moins de fumure (Perlès 2001). Donc, un nombre d'ovicapridés plus que double

relativement aux bovidés ne signifie pas nécessairement que ces derniers avaient un rôle secondaire.

L'expansion du système agricole dans les Balkans étant un processus de colonisation basé sur une migration, où les colonisateurs apportent avec eux les éléments qui constituent le "*paquet Néolithique*" (Özdoğan 2008), il n'est pas surprenant que des éléments liés à l'origine des colonisateurs, en particulier la prévalence d'ovicapridés dans le troupeau, se reflètent aussi sur les premières phases du Néolithique Balkanique. A partir des phases successives seulement, les régions commencent à adapter leur type d'élevage à ce qui convient le mieux aux caractéristiques géographiques et climatiques.

Il faut néanmoins préciser que des différences marquées sont parfois présentes entre des sites proches géographiquement, qui font partie de la même culture (Manning et al. 2013). Même si des erreurs d'échantillonnage ne peuvent pas être exclues, la raison peut être aussi liée à des pratiques développées localement (Orton 2012). En tout cas, dans ce travail une tendance qui soit représentative de la région entière est recherchée ; des particularités locales sont toujours présentes, mais elles ne sont pas représentatives de l'ensemble.

2.4.3 L'espérance de vie des animaux

L'hypothèse selon laquelle les ratios des restes animaux trouvés dans un site archéologique, divisés par espèce, seraient représentatifs des ratios des animaux faisant partie du troupeau des agriculteurs Néolithiques, est basée sur un postulat : que les animaux avaient tous la même espérance de vie. Autrement, les animaux avec une vie plus longue seraient sous-représentés, car ils laisseraient moins d'os dans les fouilles ; au contraire, les animaux à vie courte produiraient plus d'os dans les vestiges.

Les analyses des os, en particulier des dents, permettent d'estimer l'âge à la mort des animaux (Greenfield 2005). Le fait que la plupart d'entre eux mourait bien avant leur limite d'âge biologique suggère qu'ils étaient sans doute exploités pour la viande. Dans les paragraphes précédents a été montré que les animaux avaient aussi d'autres rôles dans le système agricole, et étaient utilisés en particulier pour la production de fumure ; néanmoins, ces données

montrent qu'à un certain point de leur existence ils étaient tués et, vraisemblablement, mangés.

La figure 2.2 montre la distribution par âge au décès des ovicapridés dans plusieurs sites et sur différentes périodes ; on s'intéresse au Néolithique, en particulier Ancien (EN). Les chèvres et moutons ne sont pas habituellement tués pendant leur première année de vie, mais la plupart meurt vers 3 ans, comme le suggère aussi Orton (2012). Cela est un indicateur selon lequel ils étaient exploités pour la viande, car leur vie biologique est nettement supérieure, même si la productivité décline après 7 ans (Kimberling 1999). Les données suggèrent donc qu'avant d'être mangés, ils étaient exploités pendant quelques années pour la fumure, ainsi que la laine et peut être le lait. Après le Néolithique seulement, la vie moyenne semble devenir plus longue, avec de nombreux exemplaires de survie à 5 ans ou plus.

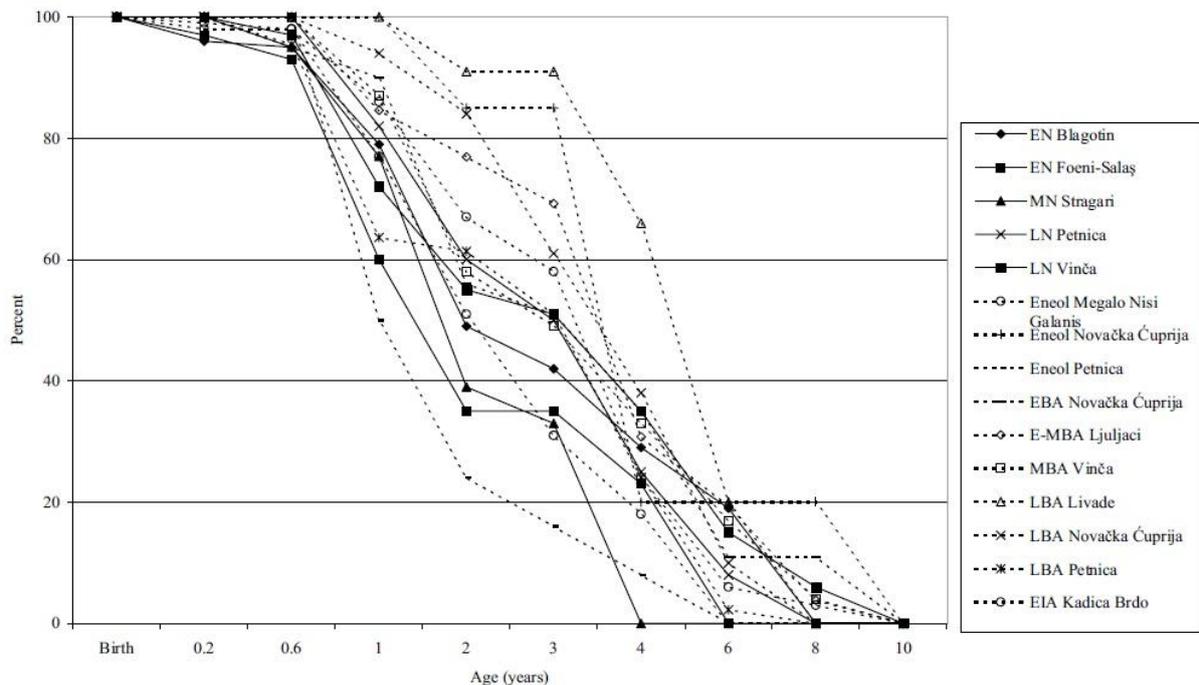


Figure 2.2 : Distribution par âge au décès des ovicapridés, estimée à partir de l'éruption dentaire. *Source : Greenfield 2005.*

Pour les bovidés (fig. 2.3), il y a des décès à partir de 8-18 mois, mais en général l'âge à la mort est vers trois ans. En ce cas aussi, le décès se passe avant l'âge biologique des bovidés, qui peut atteindre 20 ans et plus, et c'est un signe que ces animaux, à un certain moment, étaient exploités pour la viande. Néanmoins, le fait que normalement ils vivaient 3 ans et plus, avec des cas qui arrivent à 8 ans, ne montre pas un abattage systématique de ces animaux, et

est compatible avec le modèle d'un système agricole intensif où les bœufs contribuent à accroître la productivité avec la fumure. Comme pour les ovicapridés, une augmentation de l'âge à l'abattage est montrée pour les périodes successives au Néolithique.

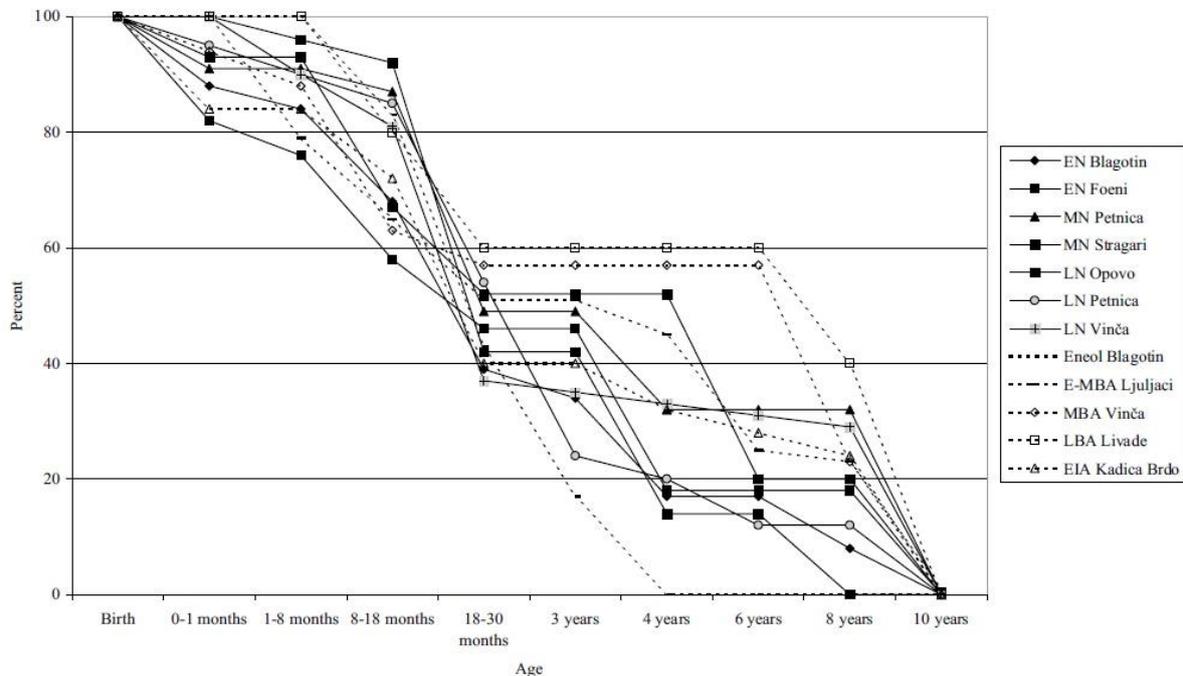


Figure 2.3 : Distribution par âge au décès des bovidés, estimée à partir de l'éruption dentaire. *Source : Greenfield 2005.*

En ce qui concerne les porcins (fig. 2.4), des données spécifiques pour le Néolithique ancien ne sont pas disponibles. Néanmoins, la tendance est uniforme à partir du Néolithique moyen jusqu'à l'âge du bronze ; il s'agit d'un possible signal que le rôle du cochon n'a pas changé dans le temps. Ils ont une mortalité élevée, qui commence à partir de 2-7 mois ; il est très rare qu'ils dépassent les 21-27 mois d'âge. Ces données suggèrent donc que les porcins étaient exploités principalement pour la viande (Greenfield 2008) ; probablement ils n'avaient pas d'autre rôle important dans le système agricole préhistorique.

Un estimation générale est que les ovicapridés et les bovidés sont tués, en moyenne, à 3 ans ; les suidés meurent en moyenne autour du 15^e mois d'âge (1,25 ans). Grâce à ces estimations, les ratios obtenus précédemment, référés aux os qui ont été trouvés, peuvent être calibrés sur la base de l'âge moyen des animaux à l'abattage.

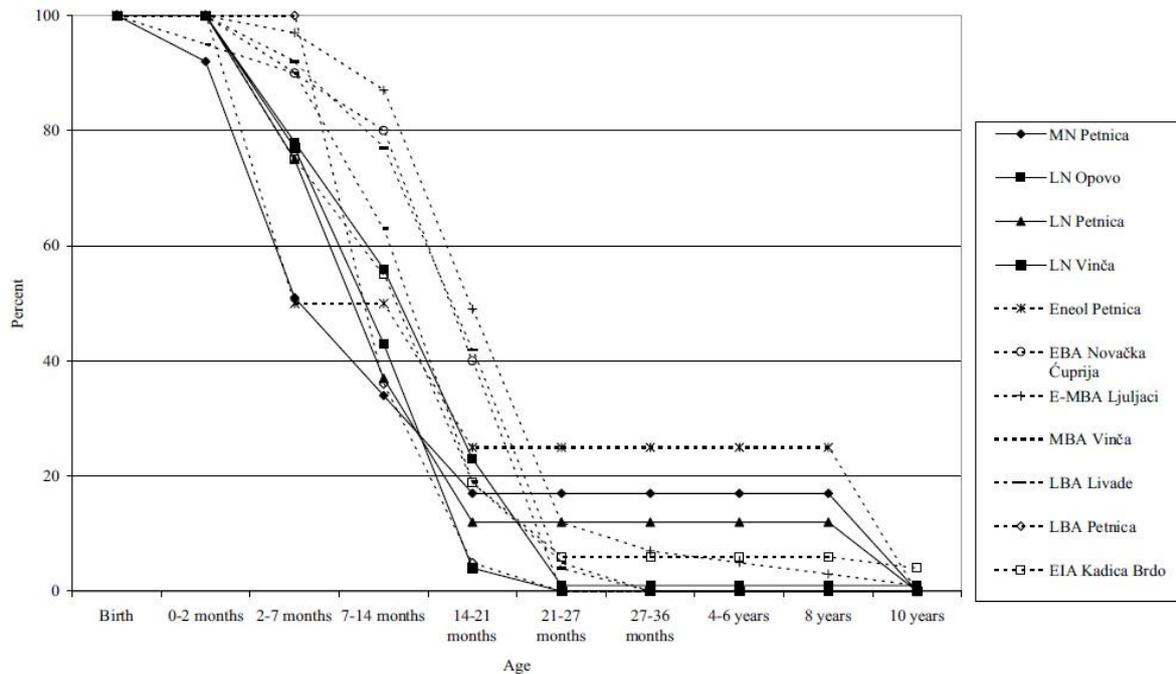


Figure 2.4 : Distribution par âge au décès des porcins, estimée à partir de l'éruption dentaire. Source : Greenfield 2005.

Les valeurs initiales de la table 2.2, corrigées selon l'âge à la mort des animaux, sont présentées dans la table 2.3. Avec cette calibration, le nombre des porcins devient encore plus faible. En effet, à cause de leur durée de vie moyenne, qui était environ un tiers de celle des autres animaux, le nombre de squelettes trouvés, même si faible, avait probablement été l'objet d'une surestimation. Il semble donc que le cochon, au Néolithique ancien, était un animal extrêmement marginal dans le système agricole ; probablement, certaines familles seulement avaient des porcs.

Echantillon	Fréquence	Fréquence	Fréquence
	Bovins (%)	Caprins (%)	Porcins (%)
Total	30,30511	67,40098	2,29389
Audit	29,59104	64,41088	5,99807

Table 2.3 : Fréquences des animaux calibrées sur l'âge moyen à l'abattage.

L'estimation des ratios d'animaux domestiqués qui composent un troupeau typique du Néolithique Initial est une problématique complexe à cause de la mauvaise qualité des échantillons, de leur catalogage et de leur publication. Néanmoins, un comptage des NISP montre d'une façon non équivoque que les chèvres/moutons étaient l'espèce prévalent dans toute la péninsule Balkanique. La présence d'un ratio élevé de ces animaux dans la région Méditerranéenne n'est pas surprenante, mais le fait qu'ils soient prédominants même dans les plaines du Nord des Balkans fait refuser l'hypothèse d'un gradient de réduction des ovicapridés. Des différences régionales sont plus ou moins présentes, dues peut-être à des pratiques locales variées, ou simplement à des problèmes d'échantillonnage.

Une calibration du nombre d'échantillons d'os, basée sur l'âge à l'abattage des animaux, confirme cette prévalence des ovicapridés. La présence des bovidés est toujours importante, tandis que les porcins semblent être très marginaux. Le modèle OBRESOC-BEAN ne peut pas prendre en compte les différences locales relatives à chaque site, mais peut modéliser l'élevage sur la base de la typologie de troupeau standard trouvée dans la région, dont la composition vient d'être décrite.

2.4.4 La chasse

La présence d'os d'animaux sauvages dans les assemblages Néolithiques montre que la chasse était sans doute pratiquée, à côté de l'élevage. Nombreuses sont les espèces trouvées dans les fouilles ; les principales sont le cerf et le lièvre, présentes dans presque tous les assemblages, mais les sangliers et les aurochs sont importants également dans plusieurs sites. On trouve aussi une grande variété d'espèces mineures.

Perlès (2001) met en évidence comment en Grèce la proportion d'animaux sauvages est toujours extrêmement faible par rapport au nombre total d'animaux. Il ne dépasse pas en effet les 10%, sauf pour le cas de Nea Nikomedeia où les os d'animaux non domestiqués représentent les 11% des os trouvés. Aussi dans les tables publiées par Orton (2012) pour les Balkans centre-septentrionales, le pourcentage d'animaux sauvages est généralement assez bas, indiquant une large majorité d'animaux domestiques. Si on exclut les sites des Gorges du Danube et les autres exceptions décrites au paragraphe 2.4.2, le ratio des animaux sauvages

sur le total est pour la plupart des sites d'environ 10%, et ne dépasse pas les 20%. Dans l'échantillon de 21 sites "Early Körös" publiés par Bartosiewicz (2005) les animaux sauvages représentent 10,8% des animaux totaux. Des restes de la culture Körös, en Hongrie du Sud-est, montrent la prédominance des stocks d'animaux domestiqués (principalement chèvres et moutons) par rapport à la faune sauvage (Bogaard 2005).

Le ratio moyen des animaux sauvages sur les animaux totaux est, dans la région des Balkans, d'environ 10% ; il est compris entre 2% et 20% dans presque chaque site, suggérant un patron régionale uniforme. Ces évidences montrent que la chasse était effectivement pratiquée constamment au Néolithique, car des animaux sauvages sont présents dans chaque site ; en même temps, le faible ratio de ces animaux par rapport à ceux domestiqués indique que l'alimentation ne pouvait pas être basée sur la chasse. On peut en déduire que, similairement à la cueillette, il s'agit d'une activité complémentaire, pratiquée seulement occasionnellement par les agriculteurs Néolithiques.

2.5 Les sépultures et les squelettes

Le culte des morts a souvent une grande importance dans les sociétés préhistoriques (Cauvin 1998) ; pour cette raison les sépultures et les pratiques funéraires sont un des sujets les plus étudiés et traités par les archéologues. Dans ce travail de modélisation, on ne s'intéresse pas aux aspects purement culturels comme l'analyse du style ou de la typologie des sépultures elles-mêmes. Cependant, la présence d'un nombre important de squelettes permettrait la formulation d'hypothèses sur la démographie d'une société préhistorique, à travers la reconstruction de tables types de fertilité et de mortalité (Séguy et Buchet, 2011, Bocquet-Appel 2008b).

En ce qui concerne le Néolithique des Balkans, la présence de squelettes est très faible, à cause de la difficulté de la découverte de sépultures, en particulier en Grèce (Fowler 2004). Même si la Grèce, et en particulier la région de la Thessalie, ont été très bien prospectées, les tentatives d'estimer la mortalité pendant le Néolithique n'ont pas eu de succès, à cause de pratiques funéraires qui consistent en crémation, sépultures secondaires, et cimetières situés en dehors du village qui sont difficiles à détecter (Runnels et al. 2009). Perlès (2001) fait

l'hypothèse que l'abondance de figurines, mais la pénurie de sépultures, pourrait constituer une sorte de contraste entre les symboles des vivants, qui se trouvent dans les villages, et les morts, qui sont placés quelque part dans les espaces en dehors du village. Il n'y a pas d'emphase sur la visibilité des morts, ni d'indication de sépultures élaborées et d'inégalité sociale (Jacobsen et Cullen 1981). Un autre type de sépultures trouvé en dehors de la Grèce sont des urnes où les individus sont placés ; on en a découvert à Kovachevo, Rakitovo et Anzabegovo (Barcarov 2006).

Les découvertes faites dans la région, en commençant par la Grèce, seront parcourues brièvement pour mieux rendre l'idée de la pénurie des sépultures. Dans plusieurs cas, elles consistent surtout dans des os dispersés. Par exemple, à Prodromos seulement des sépultures secondaires ont été trouvées, consistant en deux ou trois dépôts successifs d'os désarticulés (principalement crânes et os longs) placés au-dessous du sol d'une maison (Hourmouziadis 1973). A Franchti également il y a des os dispersés, considérés comme des sépultures secondaires, qui consistent juste en quelques os d'un individu (Cullen 1999), même s'il n'est pas possible d'exclure qu'il s'agit en vérité d'une sépulture primaire dispersée (Perlès 2001). Les sépultures reflètent un possible statut différent des personnes, en particulier les enfants opposés aux adultes (Jacobsen et Cullen 1981). Dans certains sites, la plupart des sépultures primaires ne sont que des sépultures d'enfants, comme à Franchti (même s'il existe une possibilité qu'elles appartiennent au Néolithique Moyen plutôt qu'Ancien : Vitelli 1993). Une tombe d'enfant du Néolithique Ancien ou début du Néolithique Moyen a été trouvée à Agios Petros (Efstratiou, 1985) ; il y a en a une deuxième, mais sa datation est plus incertaine. Dans le même site, une mandibule isolée d'adulte a été trouvée (Efstratiou 1985). Les sépultures multiples sont rares dans la région, et semblent concerner surtout des femmes avec des enfants comme à Néa Nikomedeia (Rodden 1962), ou simplement des enfants, comme à Lerna (Caskey 1957).

La crémation était pratiquée aussi. A Soufli Magoula, des crémations ont été trouvées dans des fossés, associées à des petits pots. Elles peuvent être reliées aux vestiges de la petite grotte de Prosymna, où des fragments brûlés d'os humains ont été retrouvés dans plusieurs fosses (Perlès 2001). Le site d'Avgi, qui date du Néolithique Moyen, comporte de nombreuses crémations : 10 sépultures d'humains brûlés y ont été trouvées ; six appartiennent à des adultes, une à un enfant. Cependant, comme il s'agit seulement de fragments, il est impossible d'en établir le sexe et l'âge à la mort (Stratouli et al. 2010).

En dehors de la Grèce, le nombre de sépultures trouvées augmente, mais des problèmes relatifs à la formulation d'inférences paléodémographiques subsistent. Grâce à une collaboration avec des archéologues locaux, de nombreuses sources ont été consultées ; néanmoins, des problèmes de classification et de publication limitent les perspectives d'analyse paléodémographique.

Un nombre de squelettes assez élevé est présent pour les sites des gorges du Danube ; des larges assemblages sont présents pour Lepenski Vir (Boric and Dimitijevic 2009) et Ajmana (Radosavljevićkrunić 1986), et des données sont présents aussi pour Hajdučka Vodenica (Boric and Miracle 2004), Padina (Jovanovic 2008) et Vlasac (Boric et al. 2008). Néanmoins, la particularité des gorges du Danube par rapport au reste de la région ne permet pas de les considérer comme un exemple typique du Néolithique balkanique (cf. par. 2.8). Dans la même région on dispose de fragments d'os humains à Ludaš-Budžak (Whittle et al. 2002) et à Bašće (Girić, 1975), et de fragments de crânes humains à Debelica (Girić, 1975), insuffisants pour fournir des indicateurs sur la démographie du passé.

Certains sites possèdent plusieurs squelettes (cinq ou plus), mais ils ont été catalogués et publiés d'une façon qui ne permet aucun type d'approche paléodémographique ; en particulier, seulement le nombre absolu de squelettes est publié, sans aucune indication sur la classe d'âge des individus. C'est le cas des sites de Alsónyék-Bátaszék (Banffy et al. 2010), Batka C (Wittle et al. 2002), Bukovačka česma (Ventic 1988), Galovo (Minichreiter et Botic 2010), Kamenički potok (Stankovic 1986), Kremenilo (Ružić et Pavlović 1988), Merošina (Stojić and Jocović 2006), Starčevo (Medović 2011), Tečić (Ventić, 1974), Topole- Bač (Whittle et al. 2002), Vršnik (Jovanović, 2004). A Anzabegovo (Ivkovska 2009) il y a des incertitudes sur les divisions par classe d'âge, en particulier entre enfants et juvéniles ; à Grivac (Bogdanović, 2004) on sait seulement que plusieurs squelettes ont été trouvés, sans indications précises sur la quantité.

Dans de nombreux sites, même si la classe d'âge des décédés est parfois connue, un ou deux squelettes seulement ont été trouvés. Ces sites sont : Azmashka mogila (Gerogiev 1961) ; Balgarchevo (Pernicheva-Perec et al. 2011) ; Baštine (Ružić and Pavlović 1988) ; Cerje (Sanev, 1994) ; Chavdar (Görsdorf and Bojadziev 1996) ; Divostin (McPherron and Srejović 1988) ; Donja Branjevina (Wittle et al. 2002) ; Dzhulyunitsa-Smardesh (Elenski 2006) ; Gradshnitsa (Nikolov et Staneva 1974) ; Grnčarica (Naumov, 2011) ; Jaričište (Blagojević et al. 2001) ; Karanovo (Hiller and Kikolov 1997) ; Kazanlak (Georgiev 1974) ; Mikri Volvi

(Lioutas et Kotsos 2006) ; Ohoden - Valoga (Ganetsovski 2009) ; Pista-Novo Selo (Veljanovska, 2006) ; Rakitovo (Raduncheva et al. 2002) ; Samovodene (Stanev 2002); Šašinci (Leković 1988a) ; Tsiganova mogila (Leshtakov. 1997) ; Tumba Optičari (Naumov 2011) ; Tumba Madžari (Ivkovska 2009) ; Vaksevo-Studena voda (Chohadzhiev 2001) ; Veluška Tumba (Simoska and Sanev 1975) ; Zlatara (Leković 1988b).

Les seuls sites qui ont une classification assez précise et présentent au moins cinq squelettes sont Golokut (Zoffman 2004), Karanovo (Hiller et Nikolov 1997), Kardzhali (Peykov 1978), Kazanlak (Georgiev 1974), Kovachevo (Lichardus-Itten et al. 2002), Kula (Sladic 1986), Rudnik (Tasic 1998) et Slatina (Nikolov et Docheva 1992). Le nombre de squelettes reste quand même faible, avec un total de quelques dizaines. En outre, cette distribution de sites ne couvre pas entièrement la région de la simulation, avec une absence totale de sépultures dans la partie méridionale des Balkans. Enfin, il est très difficile d'attribuer les squelettes aux différentes phases d'occupation ; les os, même si trouvés dans le même site, peuvent faire partie de périodes chronologiques différentes.

Un catalogage exhaustif des sources archéologiques n'a pas permis la formulation d'hypothèses paléodémographiques précises sur la structure de la population des Balkans pendant le Néolithique Ancien. La partie méridionale présente en effet très peu de traces, à cause de problèmes liés à la découverte des sépultures. Dans la partie centre-septentrionale le nombre de squelettes augmente, mais reste quand même assez faible, et doit se confronter à des problématiques de classification des restes et avec les difficultés de les attribuer à des phases d'occupation précises.

2.6 La zone de départ

Les récents développements dans la recherche sur l'arrivée du système agricole dans les Balkans suggèrent qu'il s'agit d'un processus complexe qui a eu plusieurs trajectoires différentes plutôt que de se développer en une seule vague migratoire (Özdoğan 2011, 2008). Outre les différences et similarités inter-sites catégorisées dans le *paquet Néolithique* (Özdoğan 2008), l'analyse des datations au radiocarbone le met encore davantage en évidence. Il y a en effet plusieurs sites, situés dans des régions géographiques différentes, dont la

fondation est attestée *grosso modo* dans la même période ; cela suggère l'arrivée des colonisateurs Néolithiques en même temps, mais dans des localisations différentes, en suivant diverses routes maritimes (Papageorgiou 2008).

Les dates citées ici sont toutes incluses dans la base de données (Annexe A). L'ancienneté de l'occupation de la Thessalie est connue depuis longtemps (Rodden 1965). Même si la présence d'une couche acéramique est objet de débat (Brami et Heyd 2011, Reingruber 2011), les dates du site de Sesklo (GrN-16841, GrN-16845, P-1679) y attestent la présence des agriculteurs autour de 6600-6500 BC. Le site de Mavropigi, situé en Macédoine grecque centre-occidentale, a des dates publiées récemment (DEM-1680, DEM-1685) qui montrent une occupation du site très ancienne, probablement avant le 6.500 BC. Le site de Franchti, situé en Argolide, dans la Grèce méridionale, était déjà occupé pendant le Mésolithique : il faut donc se méfier des dates les plus anciennes car le risque d'une contamination existe. Néanmoins, des dates publiées récemment provenant de semences d'espèces domestiquées sont un fort indicateur de la présence d'agriculteurs Néolithiques (GifA 11016 / SacA 23624, GifA 11017 / SacA 23625, GifA 11455 / SacA 26197, GifA 11456 / SacA 26198). Ces dates, obtenues avec la technique de l'AMS (Accelerator Mass Spectrometry), attestent la présence du Néolithique en Grèce du sud entre 6600 BC et 6400 BC. De plus, la présence des agriculteurs est confirmée pour la même période en Macédoine Orientale au site de Dikili Tash (Lyon-7631) et en Thrace à Hoca Çeşme (Bln-4609). Pour tous les sites mentionnés, le début du Néolithique est attesté dans un intervalle qui va de 6.600 à 6.400 cal BC. En outre, il existe des sites (Makri, Achilleion, Argissa Magoula, Halai) qui ont des dates qui se placent aux alentours de 6400 cal BC.

Il y a un autre site avec une datation qui le place parmi les plus anciens de la région : il s'agit de Knossos, sur l'île de Crète. La présence d'une occupation très ancienne avait déjà été objet d'hypothèses, mais les échantillons au radiocarbone disponibles, provenant de charbon de bois, étaient considérés suspects, en plaçant le site en dehors de l'horizon chronologique régional grec (Perlès 2001). La publication de l'échantillon OxA-9215, provenant d'une semence carbonisée et avec une datation obtenue avec la technique de l'AMS (Efstratiou 2004), indique ce site comme le potentiellement plus vieux de tout le Néolithique Grec (Reingruber 2015, Efstratiou et al. 2013) ; sa fondation peut être datée autour de 6900 cal BC. La validité de cette date ne sera pas mise en discussion ici, mais plutôt la liaison entre ce site et le reste de l'expansion agricole balkanique. En effet, l'occupation Néolithique de ce site

semble être un cas isolé, plutôt que le point de départ d'une vague migratoire. Cette considération est faite sur la base d'un hiatus, une interruption d'occupation qui a duré plusieurs siècles (Efstratiou et al. 2004). Après la date montrée par l'échantillon OxA-9215, très ancienne par rapport à l'horizon culturel grec, il y a une totale absence de traces pour les siècles suivants ; de nouvelles dates au radiocarbone sont présentes seulement à partir du Néolithique Moyen. L'hypothèse d'un abandon du site est donc plausible, aussi car sur l'île de Crète il n'y a pas de trace d'autres sites pour la même période en dehors de Knossos (Tomkins 2008). Tous ces éléments suggèrent donc que la première occupation de Knossos autour de 6.900 cal BC peut avoir été un épisode qui n'est pas liée à la vague d'expansion du Néolithique qui a intéressé tous les Balkans à partir de 6.600 cal BC environ.

Ce qui émerge, comme montré en figure 2.5, est que plusieurs sites ont été fondés plus ou moins dans la même période, mais dans des régions géographiques différentes, bien distribuées sur la côte Egéenne. L'explication est que la Néolithisation ne semble pas avoir été un processus linéaire, mais plutôt issu de différentes vagues migratoires. On ne peut pas parler d'un seul point de départ de l'expansion à travers les Balkans, mais de plusieurs zones d'arrivée des premiers agriculteurs.

Cela pose un problème en termes de modélisation : un modèle multi-agents nécessite une zone de départ, c'est-à-dire une zone où les agents sont initialisés. Si dans OBRESOC cette zone de départ était clairement identifiée aux alentours du Lac Balaton, dans la Hongrie actuelle, cela n'est pas aussi simple pour les Balkans. Choisir d'une façon arbitraire une zone de taille limitée est impossible, car cela signifierait l'exclusion d'autres régions où la présence Néolithique est attestée.

La solution consiste dans le choix d'une zone de départ vaste, qui comprend la totalité des zones de peuplement initial des Balkans. Elle comprend toutes les régions qui surplombent la mer Egée, à la fois en Grèce et en Turquie Européenne. Dans le modèle, les colonisateurs choisissent de s'installer dans les endroits les plus favorables à l'agriculture - ce mécanisme sera développé dans le paragraphe 3.2.1. Donc, même si la zone de départ est largement plus vaste que dans le modèle OBRESOC, l'emplacement initial des agents est limité aux zones les plus adaptées à l'activité agricole : en particulier Thessalie, mais aussi Macédoine et Thrace (Figure 2.6). Le carré rouge délimite la zone de départ, et les points rouges représentent les agents initialisés en début de simulation. La position des agents initialisés reflète correctement les zones où les occupations les plus anciennes sont attestées.



Figure 2.5 : Les sites Néolithiques les plus anciens de la région selon la datation au radiocarbone : 1.Achilleion; 2.Argissa Magoula; 3.Dikili Tash; 4 Franchti; 5.Halai; 6.Hoca Çeşme; 7.Makri; 8.Mavropigi; 9.Sesklo.



Figure 2.6 : La zone de départ du modèle.

2.7 Différences culturelles

Une des différences principales du modèle BEAN par rapport à OBRESOC est que ce dernier est destiné à simuler l'expansion du système agricole au sein d'une seule culture, le Rubané ; les éléments qui caractérisent cette société sont plus ou moins uniformes dans toute la région, en ne posant pas le problème d'une diversité culturelle au sein de l'expansion. Dans les Balkans il y a une certaine homogénéité régionale au niveau de la typologie des maisons, du système agricole, de la structure du troupeau. Cependant, différentes cultures se sont développées et ont été identifiées par les archéologues ; la classification est typiquement basée sur la typologie des céramiques produites, mais aussi sur les autres éléments qui constituent le *paquet Néolithique* (Özdoğan 2008). Une idée de la mosaïque de cultures dans la région est donnée en figure 2.6. La complexité du contexte culturel est encore plus grande que ce qui est montré par la carte à cause des sous-divisions régionales et chronologiques. Le Néolithique Ancien grec comprend des cultures diverses comme Argissa, Frühkeramikum, Sesklo en Thessalie ; Elateia en Grèce centrale ; *Rainbow Ware* en Grèce Méridionale ; Nea Nikomedeia/Giannitsa en Grèce Occidentale. En Thrace, le Néolithique d'Hoca Çeşme et d'Asagi Pinar font partie de deux périodes différentes (Demoule à paraître).

En même temps, il faut préciser que souvent les cultures ne présentent pas de différences marquées entre elles, mais sont plutôt le produit d'une tradition archéologique qui tend à attribuer des noms différents à des cultures similaires seulement sur la base de critères géographiques. Par exemple, les cultures nommées Criş et Körös correspondent à des évolutions régionales (respectivement en Roumanie et en Hongrie) de la culture serbe de Starčevo (Demoule à paraître).

Cette grande diversité locale peut-elle avoir eu une influence sur l'expansion géographique des premiers agriculteurs, et doit-elle donc être prise en compte dans la modélisation d'OBRESOC-BEAN ? Les cultures sont déterminées par des aspects comme la poterie, les outils en pierre, les pratiques funéraires ; il s'agit d'éléments qui n'ont aucun lien avec le système économique et social modélisé. Même si les cultures et leur transmission sont des éléments de grand intérêt archéologique, leur diffusion n'est pas parmi les objectifs du modèle, qui s'intéresse à la dispersion des premiers agriculteurs ; dans cette thèse, l'hypothèse

est que l'expansion n'est pas déterminée ni influencée par des éléments culturels, qui sont par conséquent omis.

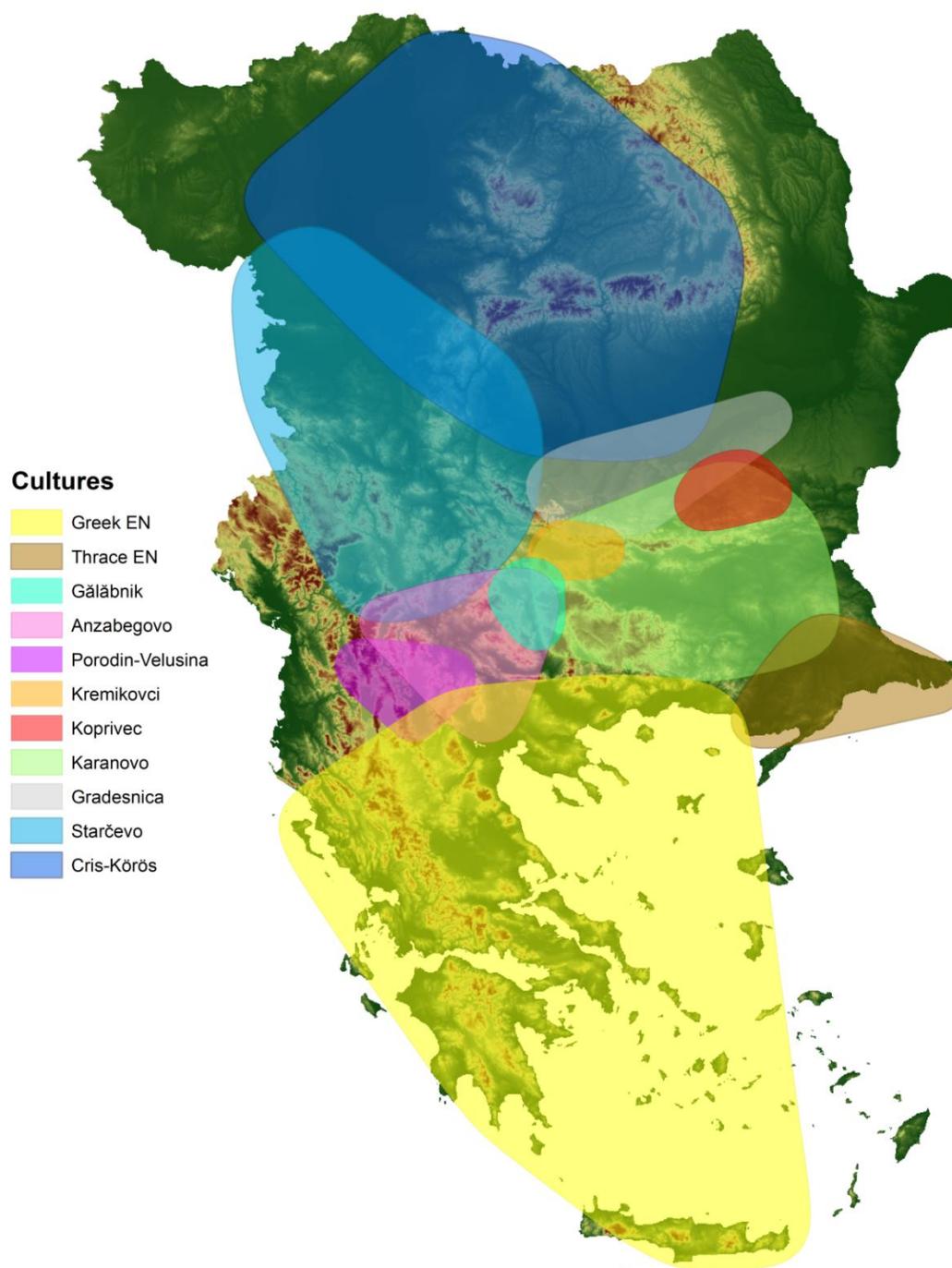


Figure 2.7 : Principales cultures (et régions culturelles) du Néolithique Ancien des Balkans.

2.8 Interactions Mésolithique/Néolithique

Avant l'arrivée des premiers agriculteurs, les Balkans étaient peuplés par des populations de chasseurs/cueilleurs, durant la période connue comme le Mésolithique (Bailey et Spikins 2008). Dans certains contextes historiques, les interactions entre ces deux populations sont considérées comme un élément d'extrême importance, qui a eu une influence remarquable sur l'expansion du système agricole. En faisant une modélisation multi-agents il est nécessaire d'estimer si la présence de chasseurs/cueilleurs peut avoir influencé l'expansion agricole et, si oui, dans quelle mesure.

En ce qui concerne les Balkans, dans le passé des auteurs ont suggéré la possibilité d'un développement local du système agricole (Higgs et Jarman 1969). L'introduction simultanée d'espèces de plantes et d'animaux domestiqués, avec un grand nombre d'éléments du *paquet Néolithique* en commun avec l'Anatolie (Özdoğan 2011, 2008), contredit cette hypothèse de développement local, qui a désormais été rejetée (Perlès 2001).

Un autre scénario proposé par les archéologues concerne l'acculturation des chasseurs/cueilleurs ; les populations Mésolithiques présentes dans la région auraient adopté l'agriculture suite à des contacts avec les agriculteurs d'Anatolie (Theocharis 1973, Gimbutas 1974). Cependant, la présence d'une vraie vague migratoire arrivée depuis l'Anatolie semble vérifiée. Tout d'abord, la croissance soudaine de sites archéologiques au début du Néolithique requiert avec toute probabilité une immigration ; en outre, aucun élément lié à des traditions Mésolithiques précédentes, ni au niveau technique ni symbolique, ne peut être identifié (Perlès 2001). Des analyses basées sur le mtDNA et sur le chromosome Y (Richards 2003b), et sur l'ADN nucléaire Ancien (Gamba et al. 2011, Haak et al. 2010) vont aussi vers l'hypothèse d'une expansion démique, c'est-à-dire la colonisation de la région par une nouvelle population.

Dans l'état actuel de la recherche, les traces archéologiques montrent un nombre très faible de sites Mésolithiques pour les Balkans (Demoule à paraître). Six sites Mésolithiques sont clairement attestés en Grèce : Sidari, Franchti, the Cyclops Cave, Theopetra, Maroulas et Klisoura (Galanidou et Perlès 2003, Perlès 2001) ; un seul site est publié pour la Bulgarie, Pobiti Kamani (Merkyte 2003) ; deux sites sont présents en Serbie du Nord : Peres, près

d'Hajdukovo, et Backa Palanka (Brukner 1966) ; trois sites dans la région des Carpates en Roumanie : Ciumesti II, Cremenea et Glyma (Eichmann 2004) ; deux sites en Hongrie, Jásztelek I et Jászberény I (Kertész 1996).

À ces sites, il faut ajouter la région des Gorges du Danube ; il s'agit d'un vrai cas d'étude, une particularité au niveau régional (Borić 2011). "Gorges du Danube" est le nom qui est donné à une partie du cours du Danube, située entre Serbie et Roumanie. À la différence du reste des Balkans, une importante présence Mésolithique est attestée dans les Gorges du Danube, avec plusieurs sites localisés dans un espace géographique limité (Bonsall 2008). Cette densité élevée de chasseurs/cueilleurs est unique dans la région ; des interactions Néolithiques/Mésolithiques se sont ici produites, comme ils montrent des éléments communs comme la céramique, la structure des maisons, les pratiques funéraires (Borić 2007, Radovanovic 2006). Néanmoins, il n'y a pas de preuve du développement de l'élément le plus caractéristique du Néolithique : le système agricole. Les habitants des Gorges du Danube continuaient à baser leur subsistance sur les ressources disponibles dans l'environnement naturel ; en particulier la pêche, étant donnée la grande disponibilité des poissons (Dinu 2010). Pour cette raison, les sites des Gorges du Danube sont considérés comme une exception, qui n'est pas du tout représentative du système agricole du Néolithique ancien. Comme il s'agit d'une région très petite par rapport à la taille totale de la région, ces possibles interactions sont ignorées et ne sont pas prises en compte dans le modèle de l'expansion agricole OBRESOC-BEAN.

Dans la figure 2.8 sont montrés les sites Mésolithiques mentionnées ; la surface brune représente la région des gorges du Danube. Une fois exclus les Gorges du Danube, 14 sites Mésolithiques sont présents dans toute la région. Cette pénurie est partiellement explicable par les difficultés liées à la découverte de certains types de sites, comme les sites en grotte situés près de la mer, qui pourraient avoir été submergés (Perlès 2001) ; mais cela ne peut pas justifier l'énorme différence dans le nombre de sites. Pour le Mésolithique, qui dure 2.000 ans, 14 sites sont connus ; par contre, on compte environ 800 sites présents pendant le Néolithique Ancien, qui a une durée de 600-800 ans. Au-delà de la possible sous-estimation des sites Mésolithiques, cette différence très marquée suggère que la présence des chasseurs/cueilleurs était extrêmement faible à l'échelle régionale. L'hypothèse est que les premiers agriculteurs se sont trouvés dans une région géographique virtuellement privée d'occupation humaine. D'éventuelles interactions avec les chasseurs-cueilleurs, si elles sont présentes, ne doivent pas

avoir eu une grande importance dans le processus d'expansion, et ne sont pas modélisées dans OBRESOC-BEAN.

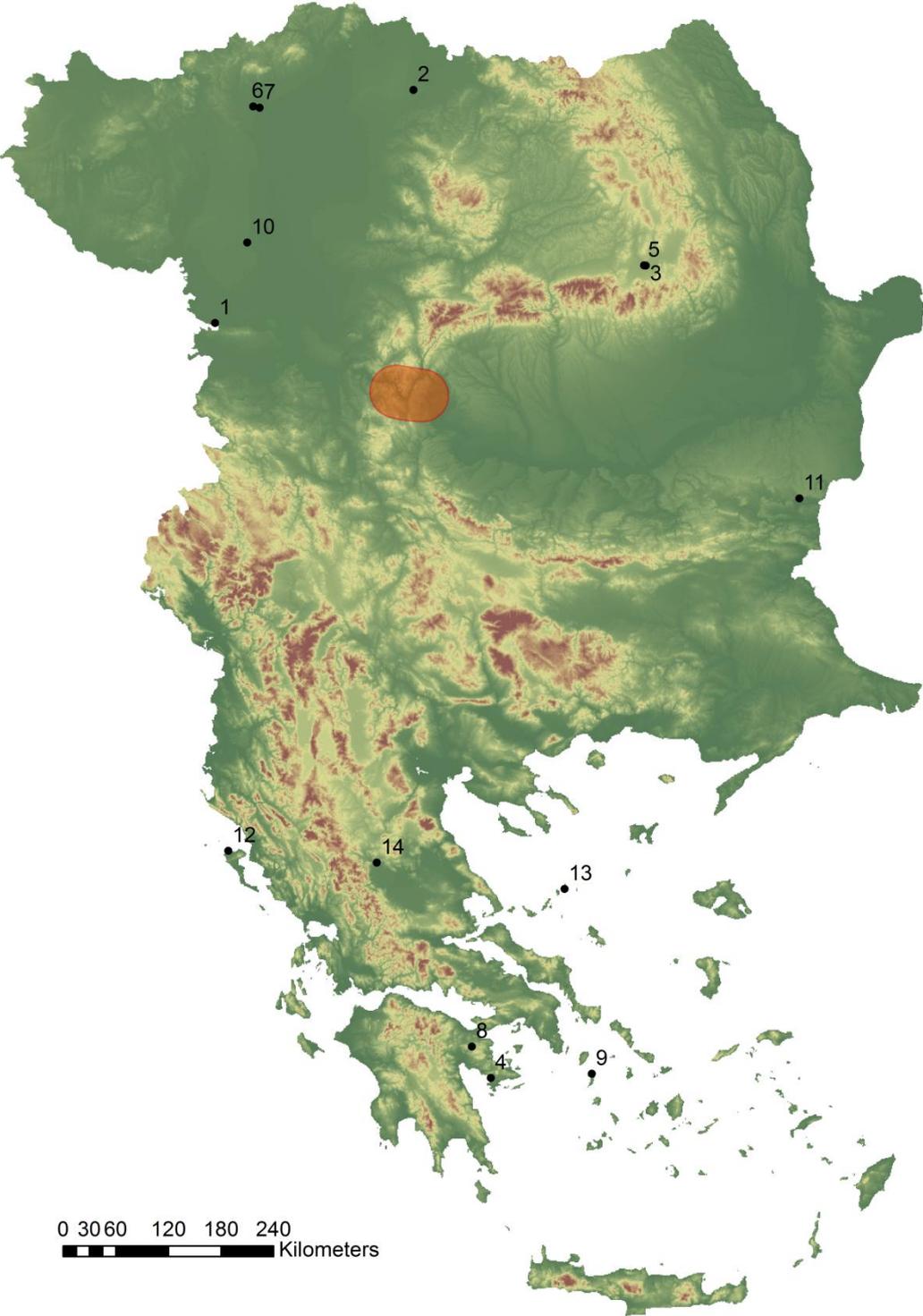


Figure 2.8 : Les sites Mésolithiques mentionnés dans le texte, et la surface de la région des

Gorges du Danube. 1. Backa Palanka ; 2. Ciumesti ; 3. Cremenea ; 4. Franchthi ; 5. Glyma ; 6. Jászberény ; 7. Jásztelek ; 8. Klisoura ; 9. Maroulas ; 10. Peres ; 11. Pobiti Kamani ; 12. Sidari ; 13. The Cyclops Cave ; 14. Theopetra.

2.9 L'émergence du *Big Man*

Les sociétés du Néolithique Ancien des Balkans ont été longtemps considérées comme simples, avec une absence d'indices de stratifications sociales et de hiérarchies (Perlès 2001) ; la raison est que les éléments traditionnellement associés à une société hiérarchique sont absents. En particulier les sépultures, signales typiques de stratification sociale, ne jouent pas un rôle primordial dans le Néolithique Ancien de la région ; il n'y a pas de tombes monumentales, ni sépultures enrichies d'ornements précieux et exotiques. La seule séparation trouvée dans les sépultures semble être entre enfants et adultes, mais on n'observe pas d'autres différences évidentes dans le traitement des morts (Perlès 2001).

En ce qui concerne les maisons, il n'y a pas non plus d'éléments qui pourraient indiquer une hiérarchie. On constate des différences au niveau des techniques de construction ; mais ces techniques ne peuvent pas être prises comme signal d'une complexité sociale, car aucune ne peut être considérée comme supérieure aux autres d'une façon objective (Perlès 2001). La taille du bâtiment pourrait par contre être considérée comme signal d'un statut supérieur ; néanmoins, sauf quelques rares exceptions comme à Nea Nikomedeia, il y a un patron uniforme de petites maisons dans toute la région, sans aucune indication de la présence systématique dans les villages de bâtiments plus grands que les autres (Perlès 2001).

Il y a cependant un axe de différenciation sociale : l'artisanat. Cela se reflète dans la présence d'objets rares, qui peuvent être indicateurs de prestige. Un exemple classique est l'obsidienne : le fait que les sources de ce matériel étaient rares et souvent très distantes suggère que les possesseurs d'objets en obsidienne pouvaient avoir un statut supérieur (Perlès et al. 2011, Perlès et Vitelli 1999). La production de poterie est aussi associée aux éléments de prestige car les outils en céramique ont des fonctions cérémonielles et culturelles au Néolithique Ancien (Vitelli 1993). Il y a encore une série d'artefacts qui peuvent être considérés comme précieux à cause de leur complexité et du temps nécessaires à leur création : par exemple des ornements en pierre ou en coquillage (Perlès 2001).

Il existe donc des éléments qui peuvent suggérer la présence d'individus dotés d'un statut supérieur. Dans cette région les villages, selon les estimations, pouvaient accueillir jusqu'à 200 et plus personnes ; obtenir un consensus entre ce grand nombre d'individus est compliqué, et par conséquent les tensions sociales montent. Généralement, dans des entités complexes de cette taille, des individus plus influents peuvent émerger : ceux qu'on appelle les *Big Man* (Sahlins 1963). Les *Big Man* sont des personnes qui peuvent influencer les décisions au niveau villageois, grâce à un grand pouvoir décisionnel qui lui est reconnu par la communauté. Les traces suggèrent la présence de ce type d'individus dans le Néolithique Ancien des Balkans : par conséquent, la possibilité d'émergence d'un *Big Man* a été incluse dans le modèle. Dans OBRESOC-BEAN, le *Big Man* est un individu qui a une capacité de stockage plus élevée, et qui réduit la tension sociale, en permettant au hameau d'atteindre un nombre d'habitants plus élevé.

Chapitre 3 : Les données

Dans le chapitre précédent, les éléments principaux qui caractérisent le Néolithique Ancien des Balkans et qui ont été utilisés pour la création d'OBRESOC-BEAN ont été parcourus. Les inférences décrites auparavant ont été nécessaires pour construire le modèle et déterminer les éléments de sa structure, ainsi que pour estimer certains paramètres ; ces données sont typiquement qualitatives, basées sur l'observation des traces archéologiques qui ont permis des inférences et des estimations, grâce à l'aide de sources ethnographiques et anthropologiques.

La création du modèle multi-agents a nécessité aussi d'autres types de données. En particulier, une classification précise des données archéologiques, en termes spatiaux et chronologiques des sites fouillés, a été réalisée. Cette base de données a été utilisée pour formuler les hypothèses archéologiques de la modélisation, comme la zone et la date de départ, et pour valider les simulations, en permettant de comparer la distribution géographique des sites archéologiques avec celle des hameaux-pixels simulés. Dans ce chapitre, la base de données des sites géoréférencés utilisée pour ce travail est décrite, ainsi que les règles suivies pour sa construction.

D'autres données qui ont été collectées et qui sont injectées dans le modèle sont les données environnementales. Les agents vivent et interagissent dans un environnement réaliste, qui influence leur choix de colonisation et leur possibilité de survie ; cela a été modélisé à partir d'une série de variables environnementales comme les précipitations, la température, l'altitude, la fertilité des sols. La météorologie du Néolithique Ancien de la région a été estimée à partir de données polliniques, ainsi que son influence sur la production agricole. Les données qui ont permis l'estimation de l'environnement du Néolithique Ancien des Balkans sont décrites dans ce chapitre.

3.1 Les données archéologiques

Les données archéologiques représentent tous les sites du Néolithique Ancien trouvés en Grèce, Bulgarie, Turquie Européenne (Thrace), Roumanie, Macédoine, Serbie, Albanie et Hongrie, qui ont été publiés dans la littérature spécialisée des Balkans jusqu'en 2013. Au total, 1114 séquences issues de 787 sites uniques ont été enregistrées pour le Néolithique Ancien ; tous ces sites sont représentés par les points noirs dans la figure 3.1. Les points rouges sont les 92 sites qui ont au moins une date au radiocarbone publiée, pour un total de 387 dates relatives uniquement au Néolithique Ancien de la région.

D'autres bases de données importantes qui concernent cette région ont été publiées : le Central Anatolian e-Workshop CANeW database (Reingruber and Thissen 2005) ; le Near Eastern radiocarbon CONTEXT database (Böhner and Schyle 2008) ; le 14C backbone database (Brami 2014). Ces bases de données comportent essentiellement des datations au radiocarbone : donc, seules les sites pour lesquels elles sont disponibles sont inclus ; en outre, très peu d'informations complémentaires sont publiées. Ces travaux sont très importants pour la recherche archéologique sur l'expansion de l'agriculture ; cependant, pour cette modélisation, d'autres niveaux d'information sont recherchés. Pour cette raison, une nouvelle base de données a été créée pour cette thèse, appelée "BEAN database", qui présente des différences importantes par rapport à celles qui ont déjà été publiées.

La base de données BEAN représente tous les sites de la région, inclus ceux connus seulement par des ramassages de surface. Cela permet d'avoir un aperçu plus complet de la distribution géographique des sites et de leur densité, sans qu'il soit biaisé par le différent état de la recherche. Par exemple, la figure 3.1 montre qu'une grande quantité de sites archéologiques a été fouillée en Grèce, mais très peu parmi eux ont des dates au radiocarbone publiées. Au contraire, dans la partie septentrionale des Balkans, le ratio entre les dates au radiocarbone et les sites fouillés est beaucoup plus élevé. Prendre en considération seulement les dates au radiocarbone montrerait une densité d'occupation plus élevée dans le Nord que dans le Sud des Balkans, ce qui est exactement le contraire de ce qui est observé en archéologie. En outre, même les sites qui n'ont pas une datation au radiocarbone peuvent être placés dans des séquences typo-chronologiques, ce qui permet d'établir une période plus ou moins précise (intervalle de 200 ans) pour leur occupation.

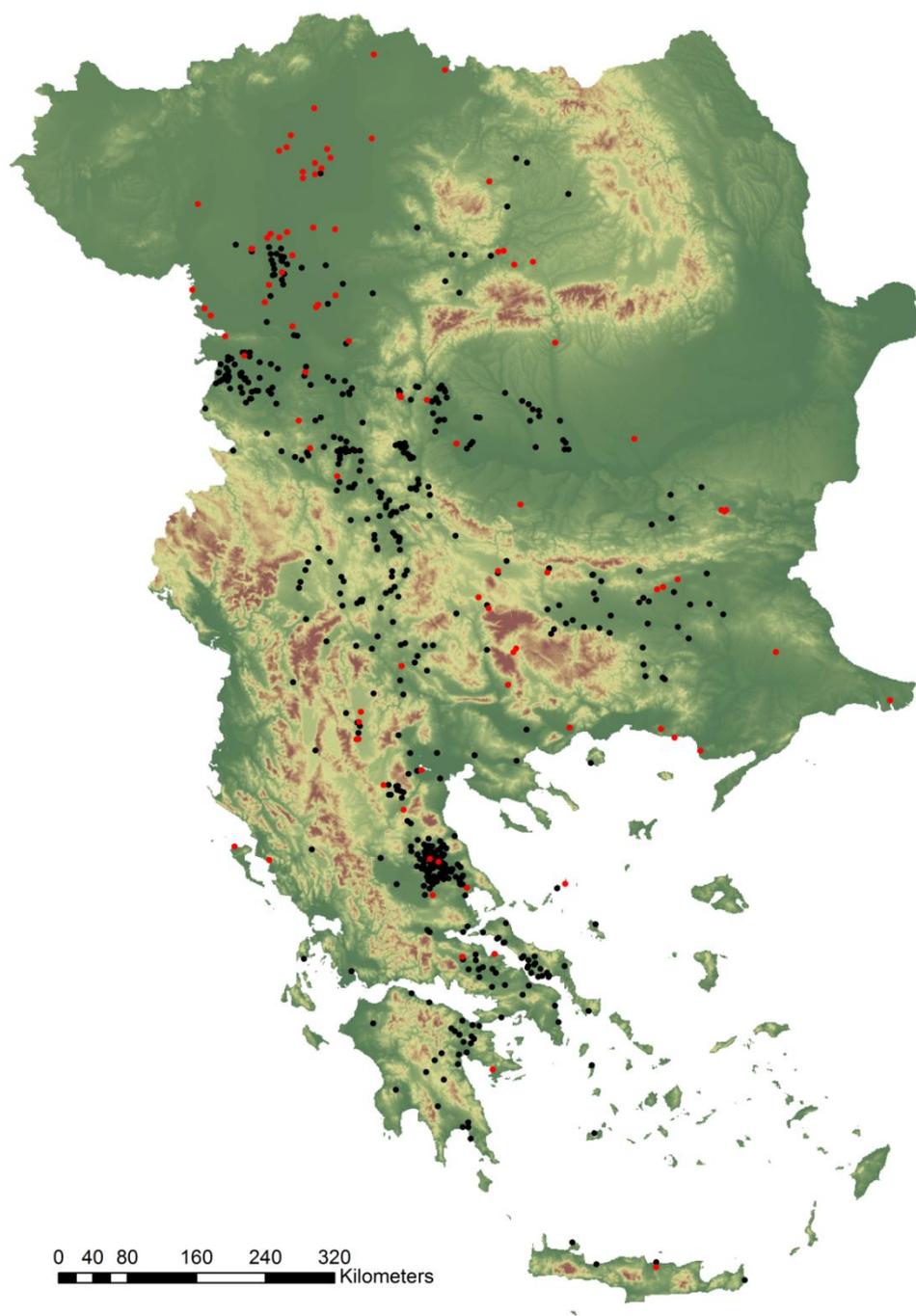


Figure 3.1 : Tous les sites du Néolithique Ancien de la région.

Cette base de données est géoréférencée : les coordonnées géographiques de chaque site sont indiquées et permettent sa localisation immédiate dans l'espace géographique. Cela rend possibles plusieurs types d'analyses spatiales concernant la distribution des sites, ainsi que la

comparaison en termes géographiques entre sites archéologiques et hameaux-pixels simulés. Parfois les coordonnées précises du site sont disponibles dans les publications ; dans d'autres cas il était nécessaire d'identifier le site en utilisant des images aériennes et satellitaires. Si cela n'était pas possible, les coordonnées sont prises sur les villages les plus proches mentionnés dans la littérature. Même si les coordonnées des sites n'ont pas toutes le même degré de précision, une imprécision dans la localisation des sites qui se quantifie en quelques centaines de mètres, ou même quelques kilomètres, n'a pas un impact remarquable sur la configuration spatiale des sites et sur le patron d'expansion, quand on travaille sur une échelle régionale de plusieurs centaines de kilomètres.

On parle de sites/séquences car certains sites ont plusieurs couches qui font partie du Néolithique Ancien ; chacune représente une phase d'occupation différente, qui peut durer plus d'un siècle. Les couches ne sont pas fusionnées, mais classifiées séparément, car elles peuvent donner des informations sur la durée et l'évolution du site dans le temps, et montrer d'éventuelles différences entre les premières phases de colonisation et les phases successives de densification.

D'autres informations complémentaires sont incluses dans la base de données, quand elles sont présentes : le nombre de squelettes humains trouvés (et leur distribution par classes d'âge) ; les espèces de plantes cultivées ; les restes d'animaux domestiqués et d'animaux sauvages. Comme une grande quantité de sites ne sont connus que par des ramassages de surface, il est rare d'avoir d'autres informations, au-delà des coordonnées géographiques et de l'attribution culturelle. La référence bibliographique dont les informations ont été extraites est toujours indiquée.

Même si les sites les plus connus ont été publiés dans des volumes et journaux internationaux en anglais ou en français, il y a aussi un grand nombre de fouilles qui n'ont eu qu'une diffusion nationale ; pour explorer des sources en grec, bulgare et serbe, une collaboration avec des archéologues locaux a été nécessaire. La base de donnée a été réalisée grâce à l'aide de Kamen Boyadzhiev (Bulgarian National Institute of Archaeology), Aikaterini Kostaki (UMR 8215 - Trajectoires ; Université Paris 1) et Milena Vasiljevic (Université de Belgrade).

Dans ce paragraphe sont décrits les critères de choix et d'audit des dates au radiocarbone publiées pour la région, et la façon dont chaque site a été placé dans une séquence typochronologique précise sur la base de son attribution culturelle.

3.1.1 Datations au radiocarbone

Les datations au radiocarbone représentent l'approche standard utilisée par les archéologues pour l'analyse chronologique de l'expansion (Clark 1965). L'utilisation des dates au radiocarbone a permis une grande avance de la recherche archéologique dans les 50 dernières années, en permettant de détecter le timing et la direction de l'expansion Néolithique (outre les bases de données composées par des dates au radiocarbone mentionnées précédemment, on peut citer les travaux d'Ammerman et Cavalli-Sforza 1971, Bocquet-Appel et al. 2009).

Cependant, plusieurs problèmes sont liés à la fiabilité des échantillons au radiocarbone (Pettit et al. 2003). Pour le Néolithique Ancien des Balkans, deux éléments en particulier peuvent conduire à des erreurs dans l'analyse des dates au radiocarbone : l'*effet de vieux bois* et la présence d'échantillons qui ont été analysés il y a plusieurs décennies.

L'*effet de vieux bois* afflige les échantillons de charbon de bois, et consiste dans le fait que la date au radiocarbone du cœur du bois est plus ancienne que celle des cernes extérieurs ; pour les arbres de grand âge, cet écart peut être de plusieurs siècles (Schiffer 1986). Il est donc possible que les échantillons de charbon trouvés dans les vestiges donnent une datation beaucoup plus ancienne que le moment auquel le site était effectivement occupé.

L'autre problème est que certaines dates, notamment pour plusieurs sites grecs, ont été obtenues pendant les années 50 et 60 du XX^{ème} siècle. Outre le fait que les techniques de datation étaient moins avancées en termes technologiques, les standards internationaux de publication et de catalogage des échantillons étaient encore inconnus ; les données sont donc moins robustes et vérifiables.

Pettitt et al. (2003) ont soulevé un autre problème important qui concerne la publication et l'utilisation des dates au radiocarbone. En effet, même s'il y a un consensus général sur le fait que certains échantillons sont meilleurs que les autres, les archéologues sont souvent réticents à décrire les critères de sélection des dates, s'il y en a. Pour éviter ce problème, un audit des données a été effectué dans cette thèse. Comme Pettitt et al. (2003) l'admettent, les critères de sélection sont toujours dans une certaine mesure arbitraires, car c'est l'auteur qui choisit où mettre les limites entre l'acceptation et le refus. Néanmoins, l'important est que ces critères soient bien définis : cela permet aux autres archéologues, et à tous les utilisateurs de la base

de données, de connaître les critères qui ont été suivis, et donc de pouvoir évaluer et juger personnellement la validité des données.

Les données sont traitées de la façon suivante:

-les dates, publiées généralement comme "non calibrées BP", ont été calibrées en utilisant le logiciel CalPal, en suivant la courbe Hulu 2007, en prenant la valeur centrale à l'intervalle de confiance de 95% (Weninger et al. 2007).

-les dates publiées avant 1970 ne sont pas prises en compte, à cause des problèmes connus qui affligent les dates au radiocarbone obtenues il y a longtemps.

-les dates avec un écart-type considérée comme trop élevée (± 100 ans) sont aussi exclues.

-les dates obtenues avec la technique avancée de l'Accelerator Mass Spectrometry (AMS) sont considérées comme plus précises et donc préférables (Harris et Damon 1987) ; néanmoins, très peu sont disponibles pour la région. Pour cette raison, les dates obtenues avec la technique conventionnelle sont conservées elles aussi. Néanmoins, dans le cas où la même couche possède à la fois des dates AMS et des dates conventionnelles, la priorité est donnée aux premières.

- il est très difficile d'estimer l'erreur due à l'*effet de vieux bois*. L'exclusion de toutes les dates obtenue à partir d'échantillons de charbon de bois est déconseillée, car elle aurait comme conséquence une réduction drastique du nombre de sites acceptés ; en effet, la grande majorité des sites ne sont représentés que par des échantillons de ce matériau. Pour cette raison, les dates en charbon de bois sont gardées, à la condition qu'elles respectent les autres critères d'audit et qu'elles soient situées à l'intérieur de la séquence chronologique consensuellement acceptée par les archéologues. Comme dans le cas précédent, si la même couche a des échantillon de charbon de bois et d'autres provenant de matériaux plus fiables comme des semences ou de l'os, ces derniers sont préférés.

-les dates en-dehors de leur horizon chronologique, considérées comme suspectes par la communauté archéologique, sont exclues pour des raisons de précaution. Il s'agit notamment de dates qui sont plus anciennes de plusieurs siècles, en certains cas millénaires, que toutes les autres dates de la région, et pour lesquelles il existe des éléments qui peuvent les signaler comme suspectes (par exemple, des possibles erreurs de mensuration ou le risque d'une contamination mésolithique).

-enfin, les sites de la région de Gorges du Danube sont exclus. Même si leurs datations au radiocarbone respectent les critères d'audit, cette région a été exclue de l'analyse à cause de l'absence de traces du développement d'un Néolithique basé sur l'agriculture (cf. par. 2.8).

En figure 3.2 sont montrés tous les sites qui possèdent au moins une date au radiocarbone. Les dates C14 et leur audit sont publiées intégralement dans l'annexe A et incluses dans le CD-Rom joint à cette thèse. Le catalogage utilisé pour la base de données BEAN prévoit l'inclusion des dates non calibrées BP, avec leur écart-type, et la calibration effectuée. Y sont aussi indiqués le code du laboratoire, le matériau de l'échantillon, et la technique de datation (conventionnelle ou AMS).

3.1.2 Séquences typo-chronologiques

Un niveau d'information supplémentaire, nouveau par rapport aux bases de données précédentes, est représenté par l'ajout des séquences typo-chronologiques. La plupart des sites archéologiques de la région, même sans avoir de datation au radiocarbone, peuvent être placés dans un intervalle de temps déterminé sur la base de l'attribution culturelle.

Le Néolithique Ancien est un processus d'expansion qui a atteint différentes parties des Balkans dans des moments différentes ; la zone d'arrivée, près de la mer Egée, a été colonisée quelques siècles avant la partie la plus septentrionale de la région. Pour cette raison, une chronologie unique régionale n'existe pas ; chaque école archéologique calcule la durée du Néolithique Ancien d'une manière différente. Par conséquent, deux chronologies sont présentes pour les Balkans : celle grecque voit la fin du Néolithique Ancien autour du 5.800 BC. Dans la chronologie de l'Europe de l'Est, le Néolithique Ancien ne s'arrête pas à cette date, mais peut continuer encore quelques siècles (Demoule et Perlès 1993). Dans cette thèse, de nombreuses simulations ont été effectuées seulement sur la base de la chronologie grecque ; elles se terminent donc au 5.800 BC. Cependant, d'autres simulations jusqu'au 5.600 BC ont été effectuées, pour observer les scénarios de l'expansion du Néolithique Ancien aussi en prenant en compte la chronologie de l'Europe de l'Est.

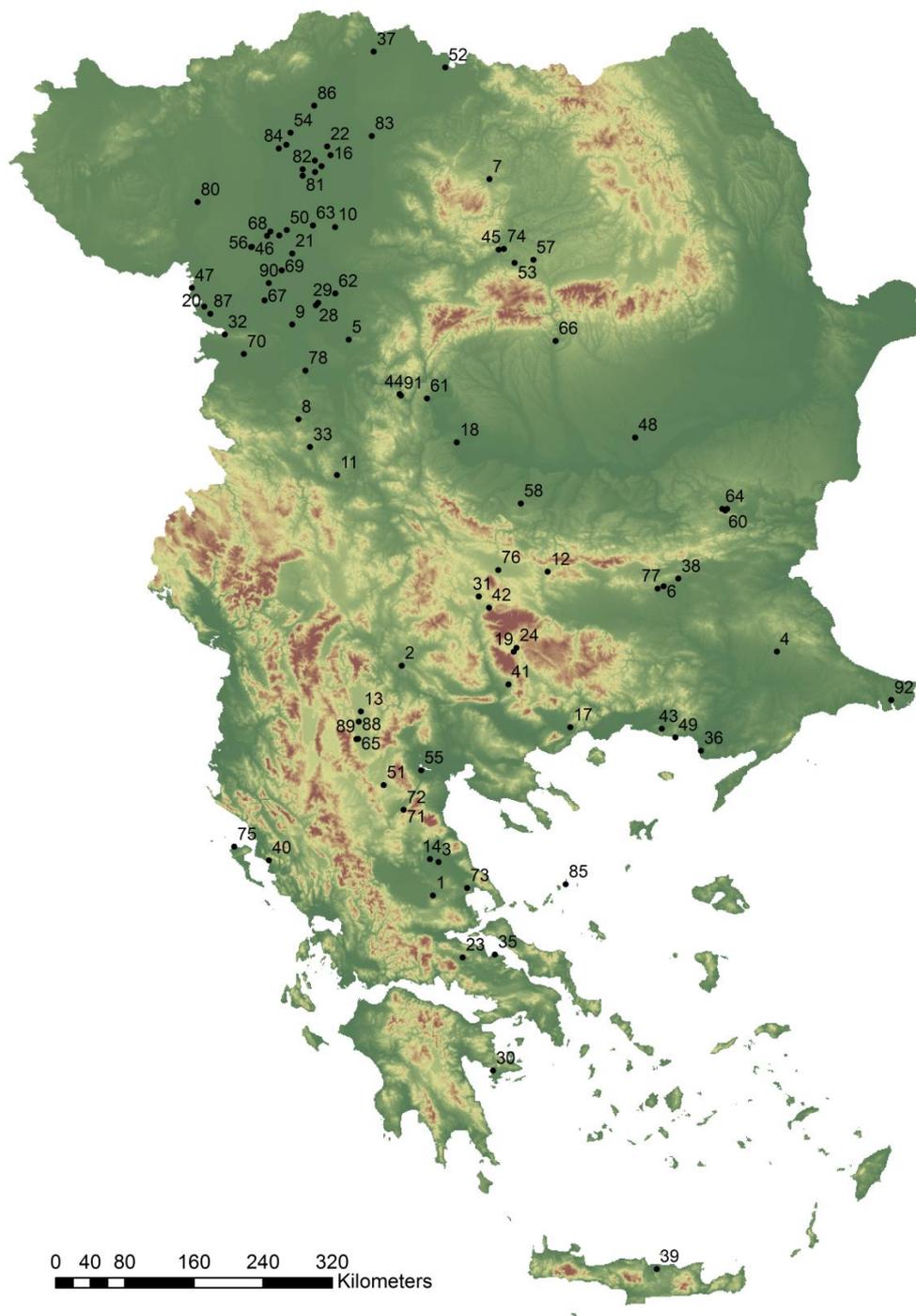


Figure 3.2 : Les sites archéologiques avec au moins une date au radiocarbone.

1.Achilleion, 2.Anzabegovo, 3.Argissa Magoula, 4.Aşağı Pınar, 5.At, 6.Azmashka Mogila, 7.Baciu - Gura Baciului, 8.Banja, 9.Batka "C", 10.Battonya-Basaraga, 11.Blagotin, 12.Chavdar, 13.Čuka, 14.Dendra(Otzaki), 15.Deszk-Olajkut, 16.Devavanya Rehelyigat 17. Dikili Tash, 18.Divostin, 19. Dobrinishte 20.Donja Branjevina, 21.Dudesti Vechi - Movila lui Deciov, 22.Ecsefalva, 23.Elateia 24.Eleshnitsa 25.Endrod 119 26.Endrod 39, 27.Endrod-

Varnyai-tanya, 28.Foeni - Gaz 29.Foeni -Salas, 30.Franchti, 31.Galabnik, 32.Golokut, 33.Grivac, 34.Gyalaret-Szilagy, 35.Halai, 36.Hoca Cesme, 37.Ibrany-Nagyerdo, 38.Karanovo, 39.Knossos, 40.Konispol, 41.Kovachevo, 42.Kremenik, 43.Krovili, 44.Lepenski Vir, 45.Limba 46.Ludaš-Budžak, 47.Magareći Mlin, 48.Magura Buduiasca, 49.Makri, 50.Maroslele-Pana, 51.Mavropigi, 52.Mehtelek-Nadas, 53.Miercurea Sibiului - Petris, 54. Nagykoru-TSZ Gyumolcsos, 55. Nea Nikomideia, 56.Nosa- Biserna obala, 57.Ocna Sibiului, 58.Ohoden - Valoga, 59.Ovcharovo-Gorata 60.Ovcharovo-Platoto I, 61.Padina, 62.Parta Asezarea 5, 63.Pitvaros, 64.Polyanitsa-Platoto, 65. Porodinska Tumba, 66.Ramnicul Valcea, 67.Ribnjak, 68.Roszke-Ludvar, 69.Sajan-Domboš , 70.Šašinci, 71.Servia 72.Servia-Varytimides, 73.Sesklo, 74.Seusa, 75.Sidari, 76.Slatina, 77.Stara Zagora-Okrazhna bolnitsa, 78.Starčevo-Grad, 79.Szajol-Felsofold, 80.Szakmar-Kisulés, 81.Szarvas 23, 82.Szarvas 56, 83.Szentpeterszeg-Korvelyes, 84.Szolnok-Szanda, 85.The Cyclopes cave, 86.Tiszaszolos-Domahazapuszta, 87.Topole- Bač, 88.Tumba I - sred selo, 89.Veluška Tumba, 90.Vinogradi- Bečej, 91.Vlasac, 92.Yarimburgaz.

Une table typo-chronologique a été réalisée récemment par Demoule (à paraître), plus détaillée par rapport à celle synthétique publiée précédemment par Demoule et Perlès (1993). Le Néolithique de la région a été divisé en périodes qui mesurent généralement 200 ans chacune, avec un écart-type de 100 ans. La période 0 est une exception, car sa durée n'est pas délimitée, mais est indiquée seulement comme "avant 6400 BC". Cependant, les données au radiocarbone placent les sites les plus anciens de la région entre 6.600 et 6.400 BC ; l'hypothèse selon laquelle cette période a eu la même durée peut être faite. Une adaptation de la table de Demoule (à paraître), pour les périodes et les zones concernées par cette étude, est présentée en table 3.1.

En connaissant la période correspondant à la diffusion des différentes cultures, la date d'occupation de chaque site est estimée sur la base de la culture retrouvée. Cette méthode a des limites car i) les cultures n'étaient pas strictement contemporaines, et ne duraient pas exactement 200 ans ; ii) l'attribution culturelle n'est pas aussi précise que la datation au radiocarbone, mais est plutôt déterminée par cette dernière. Ces séquences typo-chronologiques sont en effet estimées sur la base des dates connues, qui sont ensuite assignées à tous les sites appartenant à la même culture ; iii) l'intervalle de confiance de 100 ans est relativement large pour des périodes de 200 ans, donc des différences assez importantes pourraient être présentes entre des sites qui sont considérés appartenant à la même période.

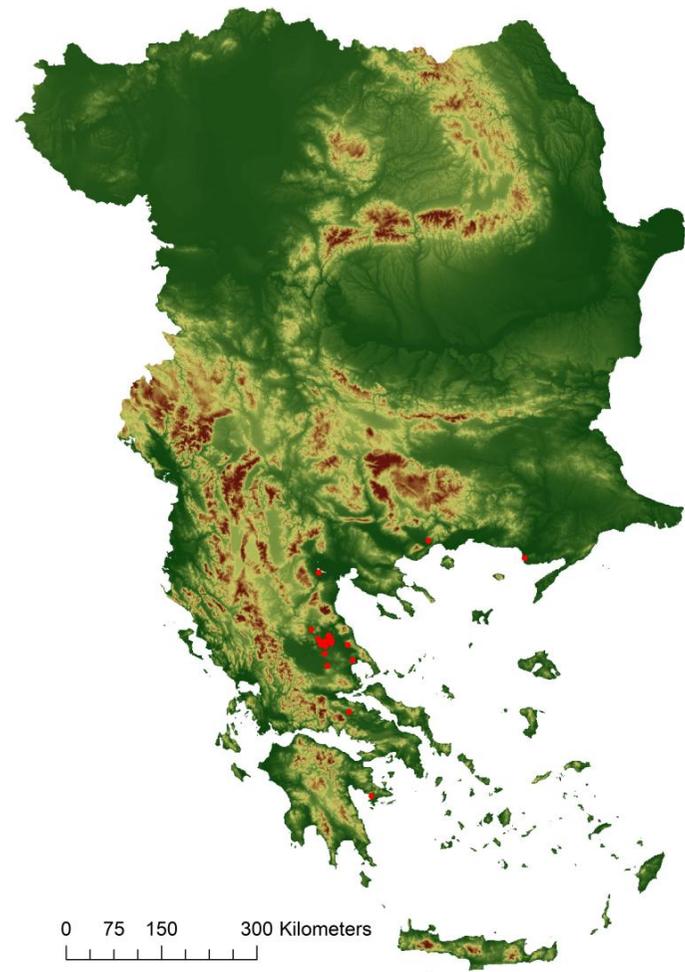
Cependant, cette technique permet d'estimer, avec une marge d'erreur limitée, la configuration spatiale des agriculteurs Néolithiques dans toute la région avec des intervalles de 200 ans. En figure 3.3 (a, b, c, d, e) est montrée la distribution des sites archéologiques selon leur attribution culturelle.

Région	Temps	Période 0 (6600-6400 ±100)	Période 1 (6400-6200 ±100)	Période 2 (6200-6000 ±100)	Période 3 (6000-5800 ±100)	Période 4 (5800-5600 ±100)
Thessalie		Argissa « Pre-Pottery » ??	Frühkeramikum Achilleion ?	Protosesklo	Sesklo Early Impresso	Sesklo Classical
Grèce Centrale			Elateia ?	Elateia	?	Cheronea
Grèce Méridionale			?	Rainbow Ware	transition	Urfirnis Classical
Crète		Knossos Pre- Pottery	Gap	Gap	Gap	Knossos Early Neolithic I ?
Grèce Occidentale (Macédoine)			?	Nea Nikomedeia Giannitsa Early	Kozani (Megali Tumba)	Servia (Sesklo phases)
République de Macédoine			?	Anzabegovo- Vršnik I	Anzabegovo- Vršnik II Porodin	Anzabegovo- Vršnik III Porodin I
Bulgarie du sud- ouest			Krañnici ?	Kovačevo Ia	Kovačevo Ib	Kovačevo Ic-d
Bassin de Sofia				Gălăbник I	Gălăbник II-III Kremikovci Early Slatina IV Rakitovo Elešnica Cavdar 6	Gălăbник Late Kremikovi Late Slatina Late Čavdar 3-5
Thrace Bulgare					Azmaç I Karanovo I	Kararanovo I- II
Bulgarie du Nord Ouest				Koprivec	?	Gradešnica (Malo Pole)
Serbie					Starčevo Early	Starčevo Late

Table 3.1 : Table typo-chronologique du Néolithique Ancien de la région balkanique.



a)



b)

Figure 3.3 : Distribution géographique des sites archéologiques du Néolithique Ancien des Balkans selon leur périodisation typo-chronologique. En jaune (a) la période 0 (6600-6400 BC) ; en rouge (b) la période 1 (6400-6200 BC).



c)



d)

Figure 3.3 : Distribution géographique des sites archéologiques du Néolithique Ancien des Balkans selon leur périodisation typo-chronologique. En orange (c) la période 2 (6200-6000 BC) ; en bleu (d) la période 3 (6000-5800 BC).



e)

Figure 3.3 : Distribution géographique des sites archéologiques du Néolithique Ancien des Balkans selon leur périodisation typo-chronologique. En violet (e) la période 4 (5800-5600 BC).

L'expansion montrée par cette périodisation reflète ce qui est observé à partir des dates au radiocarbone ; même si cela n'apporte pas grand-chose de nouveau en termes d'investigation sur le timing et le direction de l'expansion, une observation de ce type à l'échelle régionale Balkanique est inédite. Les études publiées sont effectuées au niveau supra-continentale (Bocquet-Appel et al. 2009, Cavalli-Sforza 1971), soit limitées à la partie méridionale des Balkans, en intégrant l'Anatolie (Brami et Zanotti 2015, Brami 2014, Reingruber et Thissen 2005). Une observation de cette expansion d'un point de vue exclusivement Balkanique est donc quelque chose de nouveau. En outre, la présence de tous les sites de la région, et non seulement ceux datés au radiocarbone, permet d'avoir une vision plus claire de ces processus aussi en termes de densité et de distribution géographique des sites archéologiques, et non seulement de la vitesse et de la direction des colonisateurs.

La base de données incluant tous les sites du Néolithique Ancien des Balkans avec leur coordonnées géographiques X et Y est publiée intégralement dans le CD-Rom joint à cette thèse.

3.2 Les données environnementales

L'expansion des premiers agriculteurs dans les Balkans a été déterminée par de nombreux facteurs géo-environnementaux : le postulat est que la présence de diverses conditions météorologiques, typologies de sols, et barrières géographiques a joué un rôle primordial dans ce processus. Pour cette raison, les éléments géo-environnementaux qui caractérisaient les Balkans au Néolithique Ancien ont été pris en compte pour modéliser l'expansion de cette société agricole.

La région de la simulation a d'abord été délimitée géographiquement. Même si les frontières politiques sont des concepts qui ne s'appliquent pas à la préhistoire, le choix des zones à inclure a été fait sur la base des pays actuels, car les données archéologiques sont habituellement publiées à l'échelle nationale. Les pays qui ont été touchés par la première vague d'expansion du Néolithique Ancien sont : la Grèce, la Turquie Européenne (Thrace), la République de Macédoine, la Bulgarie, la Serbie, l'Albanie, la Roumanie et la Hongrie ; l'ensemble de leurs surfaces représente l'espace modélisé. La région, de 749.576 km², a été divisée en pixels de la taille de 1 km² chacun, pour un total de 749.576 pixels. Le pixel représente l'unité de base d'information : toutes les données environnementales du modèle ont un détail de 1km². Afin de préserver les distances métriques, un système de coordonnées géographiques projetées conformes est utilisé. Le système de projection UTM (Universal Transverse Mercator) a été choisi, en particulier le fuseau 34N ; les Balkans s'étendent sur un axe Nord-Sud, et ce fuseau comprend la presque totalité de la région.

Dans ce paragraphe est expliqué comment la valeur d'optimum agricole pour chaque pixel a été estimée et injectée dans la carte de *best patch*. En outre, les procédures développées dans OBRESOC utilisées pour estimer la fertilité des sols et la météorologie du Néolithique Ancien sont décrites.

3.2.1 La carte de *best patch*

Lors d'un processus de colonisation géographique, les agriculteurs choisissent l'emplacement où s'établir, parmi la large gamme des possibilités, en cherchant des zones qui correspondent à des critères de production agricole optimale. Cela dépend de plusieurs facteurs : la fertilité pédologique du sol, les conditions météorologiques, l'accessibilité. Les modélisateurs d'OBRESOC ont estimé cet optimum agricole sur la base de plusieurs variables géo-naturelles, et l'ont injecté dans le modèle avec la création d'une carte de *best patch*.

La procédure, qui a été répliquée pour OBRESOC BEAN, consiste dans le choix d'un nombre de variables géoclimatiques réelles ou estimées : fertilité (Fert), précipitations en hiver (PrecHiv), précipitations au printemps (PrecPri), écart-type des précipitations en été (StdPrecEte), écart-type des températures en été (StdTempEte), écart-type des températures en hiver (StdTempHiv), écart-type des températures au printemps (StdTempPri). Le choix de prendre seulement 7 variables sur les 20 totales est due à leur dépendance linéaire, qui s'accroît rapidement, et à des distributions atypiques difficilement modélisables (Bocquet-Appel et al. 2014).

Une variable *dummy* 1/0 est définie : 1 signifie *présence*, et cette valeur est assignée au 787 pixels où existe une attestation archéologique de la présence des agriculteurs ; 0 signifie *absence* et est assigné à un échantillon de 10.000 pixels tirés aléatoirement sur les 749.576 pixels totales de la région. Cette variable *dummy* est régressée sur l'ensemble des 7 variables géo environnementales décrites précédemment (Table 3.2).

Coefficients de régression						
Variable	Coefficient	Erreur Standard	Coefficient Standard	Tolérance	t	p-Value
Fert	0,03358	0,01423	0,02780	0,89596	2,36034	0,01828
PrecHiv	-0,00093	0,00007	-0,29322	0,26346	-13,50102	0,00000
PrecPri	-0,00045	0,00013	-0,05432	0,52009	-3,51434	0,00044
StdPrecEte	0,00637	0,00089	0,12706	0,39730	7,18411	0,00000
StdTempEte	0,30861	0,02221	0,22202	0,48676	13,89508	0,00000
StdTempHiv	0,25326	0,03230	0,14977	0,34052	7,83977	0,00000
StdTempPri	-0,17923	0,01181	-0,32782	0,26637	-15,17752	0,00000

Table 3.2 : Régression de la variable *dummy* 1/0 (présence/absence) sur les sept variables géo environnementales choisies.

Le coefficient de régression de chaque variable est multiplié par la valeur correspondante de chaque pixel, selon la formule suivante :

$$\text{Valeur de best patch} = 0,03358 \times \text{Fert} - 0,00093 \times \text{PrecHiv} - 0,00045 \times \text{PrecPri} + 0,00637 \times \text{StdPrecEte} + 0,30861 \times \text{StdTempEte} + 0,25326 \times \text{StdTempHiv} - 0,17923 \times \text{StdTempPri}$$

Les valeurs obtenues sont ensuite standardisées, afin de donner à chaque pixel une valeur comprise entre 0 et 1. Cette valeur représente l'optimum agricole du pixel, et donc sa probabilité d'être occupé par les agriculteurs. Les agents iront coloniser de préférence les pixels ayant une valeur plus élevée, tandis qu'ils éviteront les pixels à valeur de *best patch* faible. Comme il n'y a aucune attestation de sites archéologiques au-dessus de 1200 mètres d'altitude, tous les pixels ayant une altitude supérieure sont considérés comme mauvais pour l'agriculture et donc pas attrayants pour les colonisateurs.

La carte de best patch réalisée pour le modèle OBRESOC-BEAN est présentée en figure 2.3. Les 787 sites archéologiques trouvés pour le Néolithique Ancien sont représentés sur la carte. Le fait que la presque totalité des sites se trouvent dans des zones à valeur élevée de *best patch* suggère que la carte de *best patch* a été calculée correctement, en identifiant les zones d'optimum agricole.

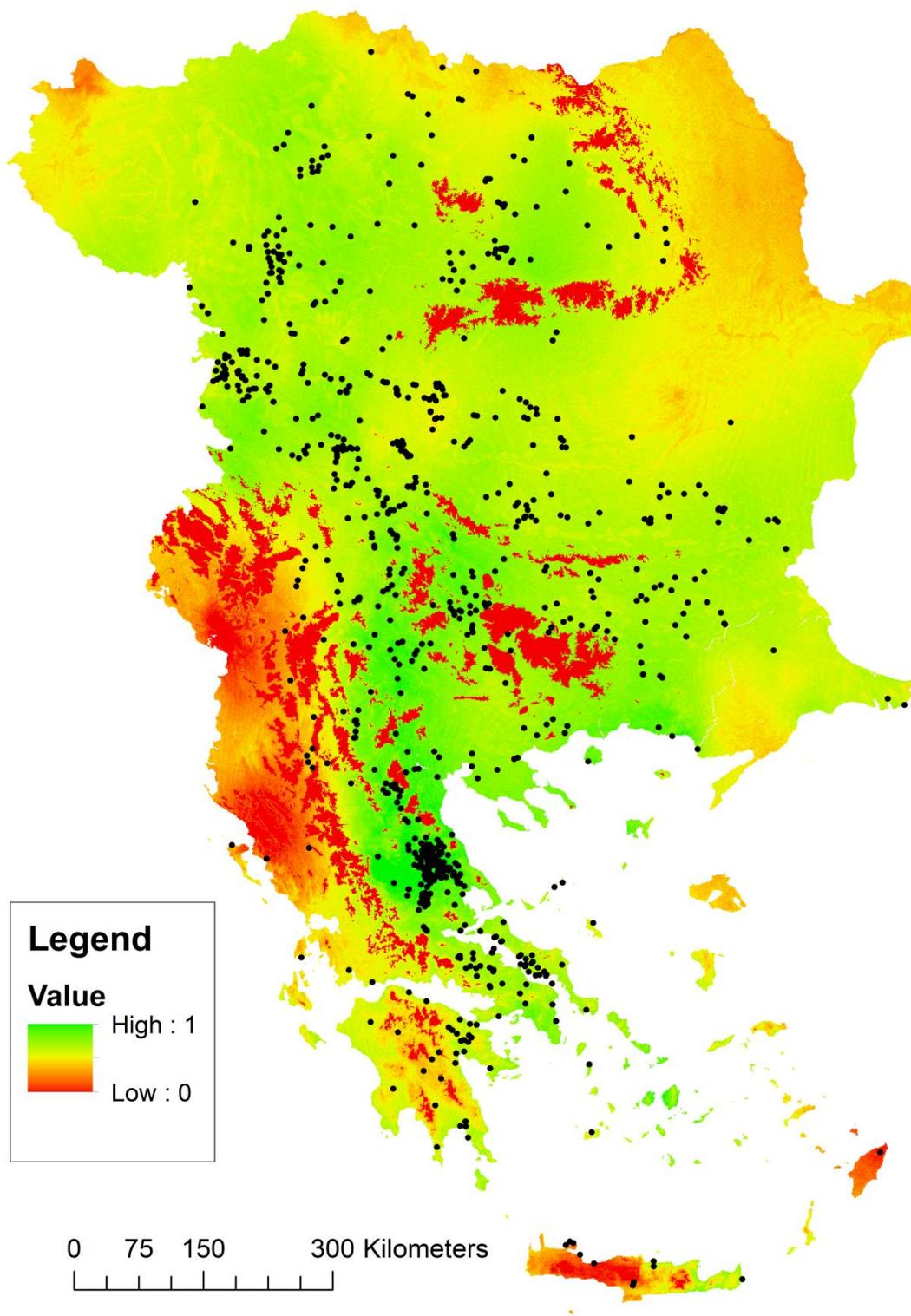


Figure 3.4 : La carte de *best patch*.

Il faut préciser que la création de la carte de best patch ne prend pas en compte l'accès aux sources d'eau. Il y a en effet des îles dans la mer Egée qui ont des valeurs propices de *best patch*, mais qui, selon les évidences archéologiques, n'ont pas été colonisées jusqu'au Néolithique Final ; la cause est probablement une absence de sources d'eau et de lacs (Perlès 2001). En tout cas, ces petites îles représentent une partie très limitée de la région totale de la simulation ; par conséquent, l'impact de cette anomalie sur l'expansion à l'échelle balkanique est minimal.

3.2.2 Estimation de la fertilité des sols

La fertilité des sols est un élément d'importance capitale pour les sociétés agricoles, car elle détermine la productivité du système agricole et, conséquemment, la réussite des cultures. Elle dépend à la base de la géologie, mais elle est influencée par la météorologie : les événements météorologiques peuvent en effet accroître ou décroître la fertilité des terrains.

Dans OBRESOC, une procédure a été développée pour estimer la fertilité du sol dans l'Europe Centrale durant l'occupation de la culture Rubanée ; la même procédure, adaptée pour OBRESOC-BEAN, est décrite ci-dessus. L'hypothèse à la base de cette estimation est que la composition pédologique des sols ne s'est pas modifiée dans les 8.000 dernières années ; la pédogenèse et le changement des sols sont des processus très longs, qui nécessitent de centaines de milliers d'années, parfois des millions (Huggett 1998).

La composition géologique du sol a été obtenue à partir du European Soil Portal (<http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/>), un projet de l'Union Européenne dans lequel sont publiées des cartes des sols avec un détail de 1 km². Les données sont cataloguées selon la classification WRB-Full, qui subdivise les typologies de sol en 130 classes différentes. Dans le cadre de la modélisation BEAN, cette grande quantité de classes a été simplifiée par des experts en 11 différentes classes de fertilité : chernozems ; sols isohumiques-bruns lessivés-euthorpes ; fluviosols ; vertisols ; sols calcaires-acides ; podzols; pseudogleys (rédoxisols) ; gleys (réductisols) ; tourbes; absence de sol ; absence d'information (fig. 2.4).

À chacune de ces classes, une valeur standardisée (0-1) est assignée, représentant la fertilité relative de chaque famille de sols. À la différence de la valeur de *best patch*, qui est fixe, la fertilité du sol de chaque pixel/km² est influencée par la météorologie et est mise à jour

chaque saison de la simulation. En cas d' événements météorologiques particuliers, décrits au paragraphe 3.2.4, la fertilité de chaque pixel peut augmenter ou diminuer conséquemment.

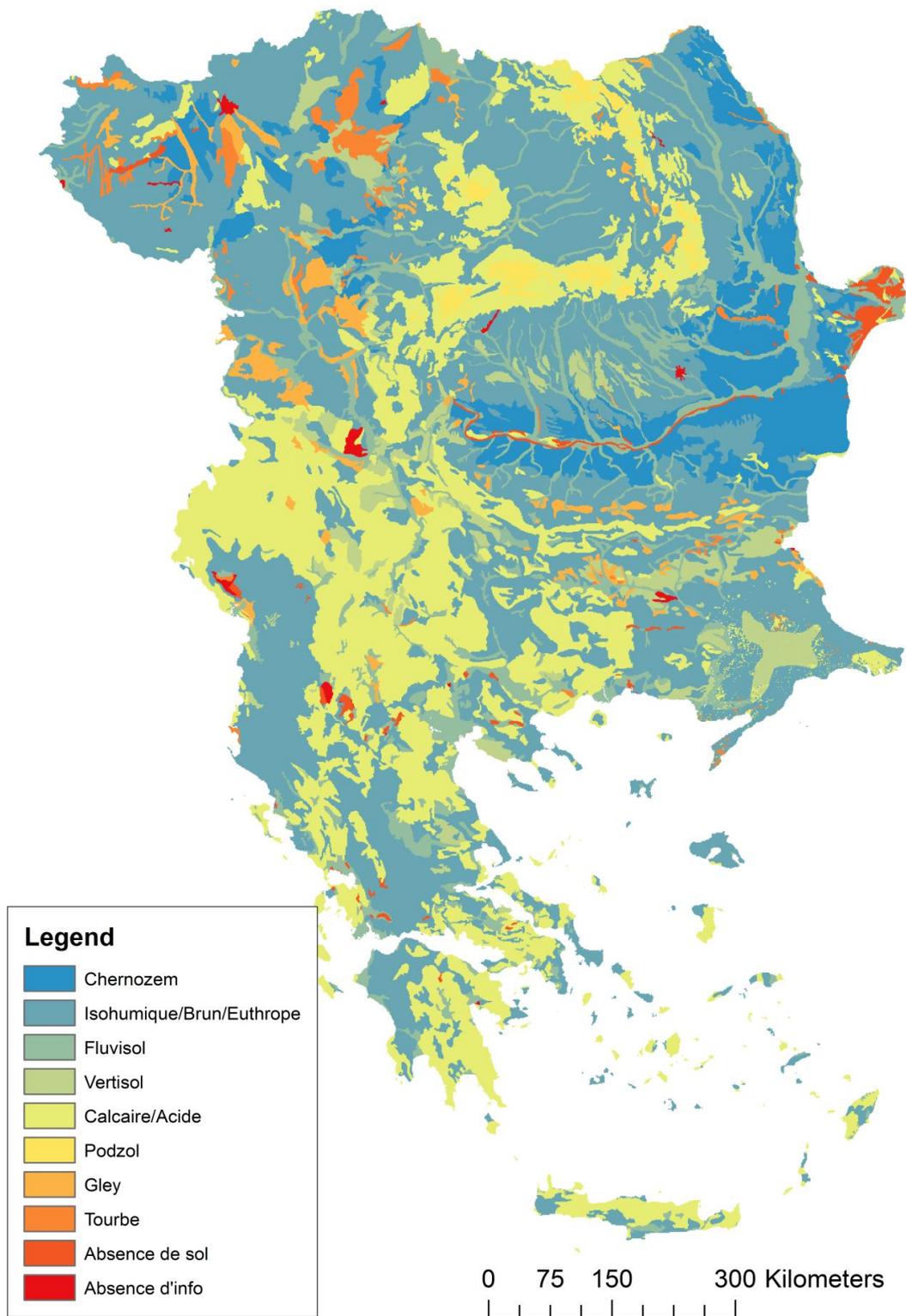


Figure 3.5 : La carte des sols, générée à partir des données du European Soil Portal. *Source :* <http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/>

3.2.3 Données météorologiques

Une estimation de la météorologie du Néolithique Ancien pour la région des Balkans est injectée dans le modèle, en suivant la procédure développée dans OBRESOC (Bocquet-Appel et al. 2015). Pour chaque pixel, à chaque saison de la simulation, des estimations de la température moyenne saisonnière T et des précipitations cumulées saisonnières P sont effectuées. L'estimation est faite à partir de reconstitutions basées sur des données polliniques, qui sont adaptées à chaque pixel en prenant en compte la météorologie et la variabilité observées dans la réalité pour le pixel en question.

L'information source pour les Balkans est représentée par la séquence de pollens à haute résolution, obtenue depuis le site de Tenaghi Philippon en Grèce nord-orientale (Peyron et al. 2011), visible dans les figures 3.6 et 3.7. Les reconstitutions publiées fournissent des estimations des températures et des précipitations à cet endroit.

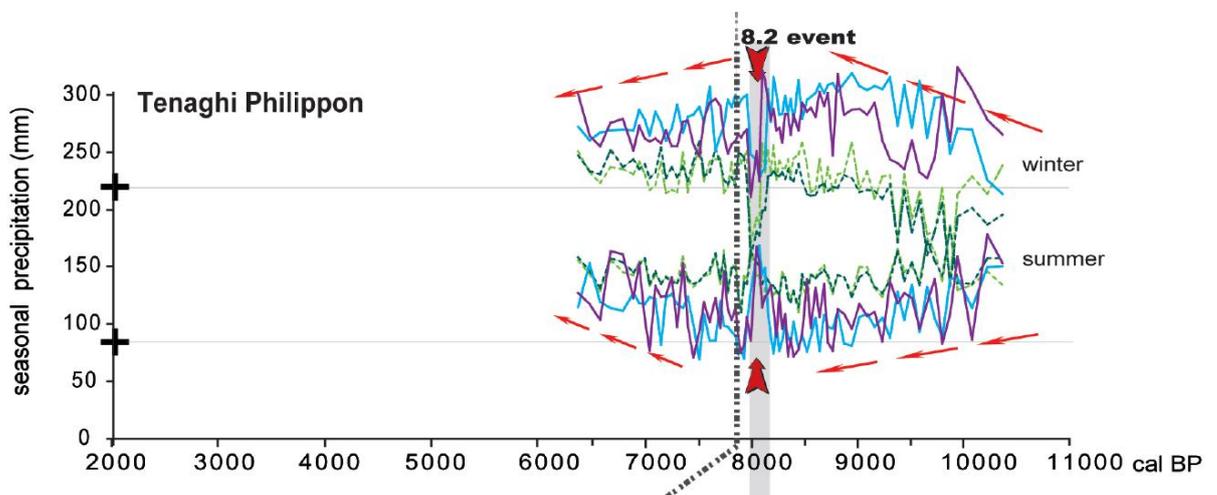


Figure 3.6 : Reconstitution des précipitations saisonnières basées sur des données polliniques à Tenaghi Philippon. *Source : Peyron et al. 2011.*

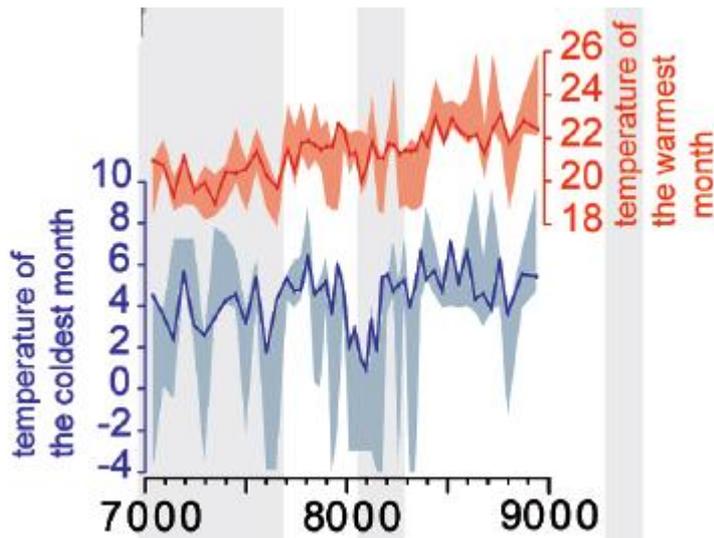


Figure 3.7 : Reconstitution des températures du mois le plus chaud et du mois le plus froid, basées sur des données polliniques à Tenaghi Philippon. *Source : Peyron et al. 2011.*

Les valeurs relatives au site de Tenaghi Philippon ne sont pas suffisantes pour effectuer une reconstitution climatique régionale. Les Balkans sont vastes, et le climat continental remplace le climat Méditerranéen au fur et à mesure qu'on avance vers le nord. Les données de ce site, situé sur la mer Egée, ne sont donc pas représentatives de la totalité de la péninsule Balkanique. Pour cette raison, une procédure de "*centrage*" a été effectuée, en suivant la méthode développée par OBRESOC. Cette dynamique d'estimation météorologique prend en compte des variations climatiques millénaires, basées sur l'hypothèse que la variance locale n'ait pas changé. Les données météorologiques actuelles relatives aux températures moyennes saisonnières et aux précipitations cumulées saisonnières, ainsi que leur variances, sont calibrées sur la base des reconstitutions de Tenaghi Philippon.

Les valeurs météorologiques actuelles sont obtenues à partir de la base de données WorldClim (<http://www.worldclim.org>) qui contient des données climatiques au niveau global avec un détail de 30 arc-secondes (environ 1 km) relatives aux 50 dernières années. Ces données sont disponibles en format raster et sont traitées avec un Système d'Information Géographique pour extrapoler la région de la simulation et pour convertir l'information à la taille utilisée par le modèle (1 pixel = 1 km²). Pour chaque pixel de la région, la température moyenne T et les précipitations cumulées P à chacune des quatre saisons sont connues, ainsi que leur écart-type, sur la base des observations récentes. Un exemple de carte météorologique est présenté en figure 3.8.

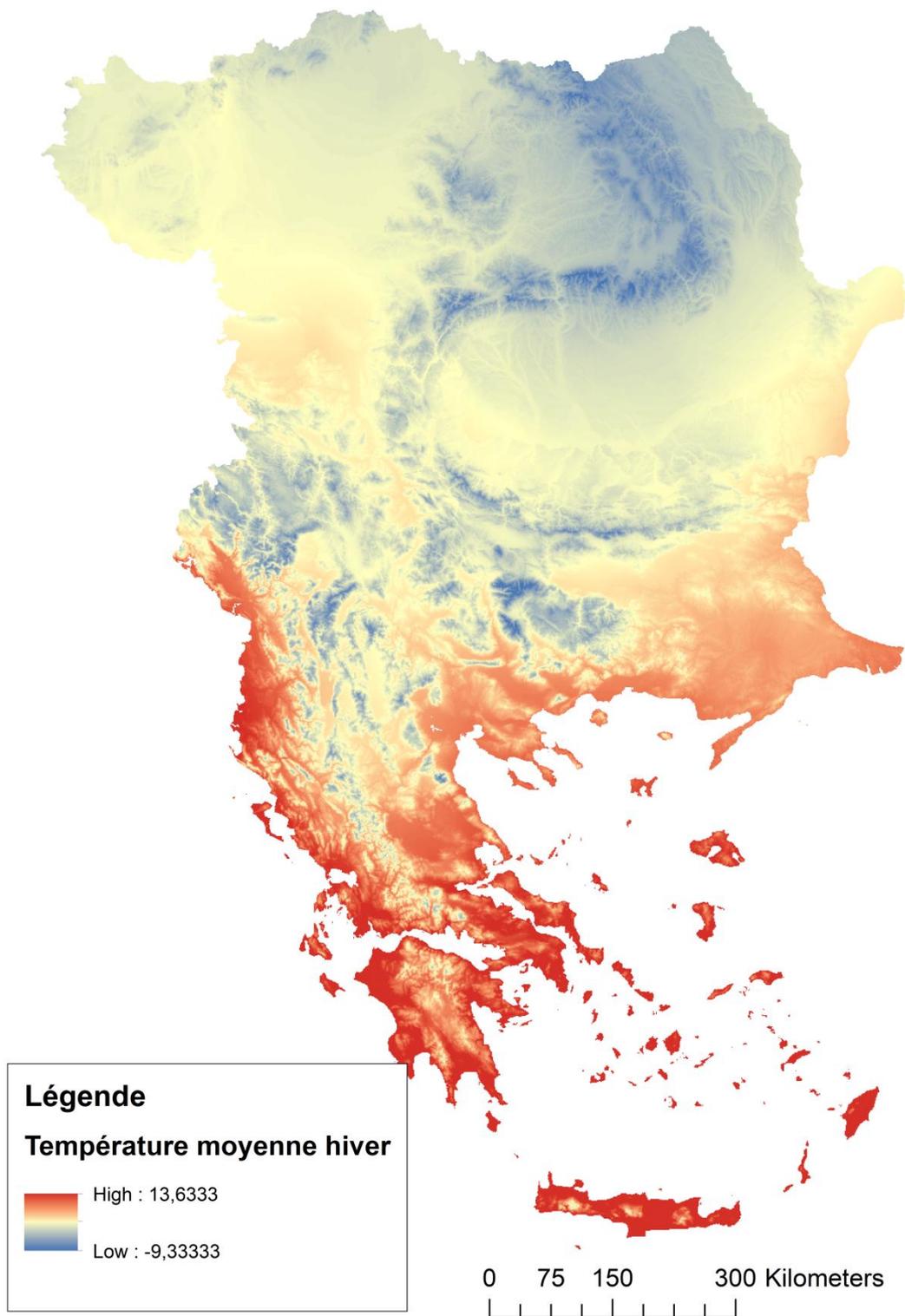


Figure 3.8 : Carte de la température moyenne en hiver, extraite de la base de données WorldClim. *Source : <http://www.worldclim.org>*

La procédure développée avec OBRESOC pour la simulation de la météorologie a partir des données décrites dans ce paragraphe fait partie du fonctionnement du modèle multi-agents et est expliquée dans le paragraphe 4.3.

Chapitre 4 : Le modèle multi-agents

Ce chapitre est dédié à la description du modèle multi-agents utilisé pour simuler l'expansion des premiers agriculteurs du Néolithique Ancien à travers les Balkans. Il s'agit d'un modèle complexe, composé de plusieurs entités, qui effectuent un grand nombre d'interactions et qui sont situées dans un environnement réaliste. La structure et le fonctionnement du modèle sont décrits en utilisant le protocole ODD (Overview, Design Concepts, and Details; Grimm et al. 2010) qui représente un standard international utilisé dans la modélisation multi-agents en écologie.

Le comportement des agents est simulé à travers deux modèles partiels intermédiaires : le modèle économique, qui consiste en l'activité productive des agents, et le modèle démographique, destiné à simuler la natalité, la mortalité et la reproduction des individus, et qui détermine la scission des foyers domestiques. Les règles et le fonctionnement de ces modèles sont décrits dans ce chapitre, ainsi que l'implémentation de la simulation météorologique en suivant les procédures développées avec OBRESOC. Enfin, la liste des paramètres du modèle est publiée, accompagnée d'explications sur leur sélection et leur estimation, pour en justifier le choix.

4.1 Le protocole ODD

Dans ce paragraphe sont décrits la structure et le fonctionnement du modèle OBRESOC-BEAN. Afin d'utiliser une procédure de classification connue et acceptée au niveau international, le protocole ODD (Overview, Design Concepts, and Details) a été suivi (Grimm et al. 2010, 2006).

La structure simplifiée du modèle est présentée en figure 4.1 par un diagramme séquentiel.

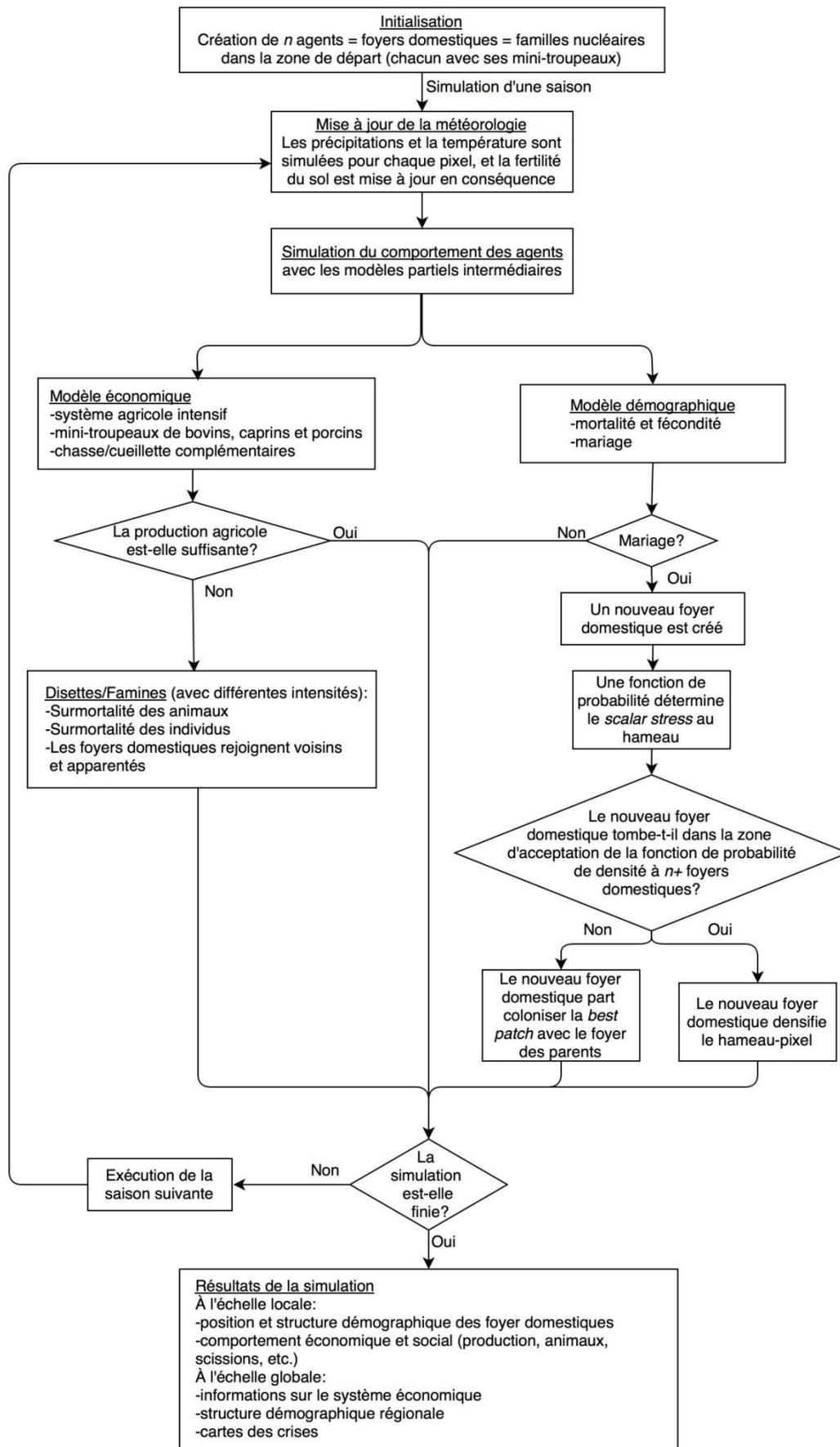


Figure 4.1 : Diagramme séquentiel de la structure du modèle.

4.1.1 Objectif

Le travail effectué pour cette thèse consiste en une adaptation du modèle OBRESOC ; le but principal du modèle originel était de tester la réactivité et le degré de résilience du système socioculturel de la société archéologique Rubanée aux impacts météorologiques (Bocquet-Appel et al. 2015, 2014). Cette problématique reste testable et observable dans OBRESOC-BEAN ; cependant, l'état actuel de la recherche ne suggère pas que les événements météorologiques du Néolithique Ancien des Balkans peuvent avoir eu un impact sur la structure de la population et sur son expansion (cf. par. 6.9). D'autres problématiques sont plus appropriées à ce contexte archéologique : par exemple le fait que, à cause de la pénurie de traces archéologiques, très peu est connu sur la société et sur l'économie des premiers colonisateurs de la région.

Le modèle multi-agents permet l'exploration d'éléments qui sont généralement cachés ou invisibles dans les données archéologiques, en particulier quand on étudie des sociétés préhistoriques, car on ne dispose pas de sources écrites. Ce travail de modélisation se pose comme objectif de trouver de possibles réponses à diverses questions : quelle est la distribution spatiale et temporelle des premiers agriculteurs, ainsi que la taille de leur population ? Dans quelle mesure le patron d'expansion géographique simulé correspond-t-il à celui observé en archéologie ? Comment était structurée, économiquement et démographiquement, une société agricole du Néolithique Ancien dans les Balkans ? Y avait-il des différences entre les zones d'expansion de la colonisation et les zones où la densité s'accroît ? La météorologie a-t-elle eu des impacts qui ont influencé cette expansion ? Le modèle a été construit pour chercher des réponses à ces questions, en ajoutant des idées et perspectives nouvelles à la recherche archéologique.

Outre l'intérêt archéologique et la contribution à la recherche, une idée à la base de cette thèse était de vérifier l'adaptabilité d'OBRESOC : grâce à de modifications précises, ce modèle peut être utilisé pour des régions géographiques et des contextes archéologiques différents. OBRESOC pourra donc représenter, dans le futur, un standard pour la modélisation des sociétés agricoles préhistoriques. En outre, OBRESOC-BEAN a été utilisé avec l'objectif de développer des procédures qui puissent être utilisées pour l'analyse des données simulées produites ; ces procédures rentrent dans le cadre de la manipulation des *big data*.

4.1.2. Entités, variables d'état et échelles

Le deuxième point du protocole ODD consiste en la description des entités présentes dans le modèle, des variables d'état et des attributs par lesquels elles sont caractérisées, et de la résolution temporelle et spatiale du modèle. Cela est vu à travers les trois sous-catégories suivantes : agents ; unités spatiales ; environnement et collectivités.

4.1.2.1 Agents

Les agents modélisés sont des foyers domestiques composés par des familles nucléaires, qui consistent en un couple de parents et leurs enfants non mariés. Les variables d'état des agents incluent leur localisation géographique (cordonnées X et Y), l'année de fondation et de mort éventuelle, le nombre d'individus vivants, morts et partis (divisés par classes d'âge), les animaux possédés, la production agricole, la chasse et la cueillette pratiquées, et le stockage des ressources.

Chaque foyer domestique possède trois mini-troupeaux, un pour chaque espèce principale d'animaux : caprins, bovins et porcins. Les animaux suivent eux-mêmes des règles de natalité et de mortalité.

4.1.2.2 Unités spatiales

L'unité spatiale de base du modèle est le pixel ; un pixel mesure 1 km² et peut être occupé par des agents. Chaque pixel a une valeur standardisée entre 0 et 1, qui représente son optimalité pour l'agriculture, et qui est injectée dans le modèle à travers la carte de *best patch*. Chaque pixel a aussi une valeur de fertilité des sols, qui dépend de la pédologie et est mise à jour à chaque saison selon la météorologie simulée pour le pixel en question. Des groupes de pixels constituent des entités spatiales appelées supercarrés, dont la taille est donnée en paramètre (dans OBRESOC-BEAN elle est par défaut 20x20 kilomètres). Ces supercarrés ont une capacité d'accueil limitée qui, une fois atteinte, ne permettra pas l'occupation d'autres pixels à leur intérieur, obligeant les agents à coloniser ailleurs.

4.1.2.3 Environnement

La région de la simulation inclut toutes les parties des Balkans intéressées par l'expansion du Néolithique Ancien, et est constituée d'un total de 749.576 pixels. L'attractivité de chaque pixel pour les agriculteurs est estimée à travers la carte de *best patch*. La fertilité des sols, les précipitations et les températures sont aussi injectés dans le modèle, comme a été décrit en précédence.

4.1.2.4 Collectivités

Un groupe d'agents situés sur le même pixel représente un hameau, qui a des dynamiques internes, en particulier en termes de scission ; cela sera vu par la suite. En outre, les foyers domestiques ont des relations avec leurs voisins et apparentés, qui peuvent se traduire par de réseaux de solidarité en cas de famine ou de disette.

4.1.3. Processus et ordonnancement

Chaque pas de la simulation correspond à une saison (automne, hiver, printemps et été). Au début de chaque saison, la météorologie est simulée et la fertilité de chaque pixel est mise à jour en conséquence.

Chaque saison, le comportement de tous les agents est simulé à travers deux modèles partiels intermédiaires : le modèle économique, qui consiste en l'agriculture et les autres activités nécessaires à la survie des individus ; et le modèle démographique, qui détermine la natalité, les mariages, la reproduction et la mortalité des agents, ainsi que les mécanismes de scission. Dans le protocole ODD, les modèles partiels intermédiaires rentrent dans la catégorie "*sous-modèles*" ; pour cette raison, ils sont décrits au paragraphe 4.1.7.

Après la simulation de l'activité économique et de la démographie, l'état de chaque agent est mis à jour.

4.1.4 Concepts

4.1.4.1. Principes de base

OBRESOC-BEAN est un modèle complexe, qui est basé sur plusieurs principes. Il consiste dans l'adaptation du modèle OBRESOC et est destiné à simuler l'expansion d'une société agricole préhistorique. OBRESOC est un modèle complètement inédit, qui ne se base pas sur d'autres modèles déjà réalisés dans le passé. Ce modèle s'insère dans le courant de modélisation des sociétés agricoles préhistoriques, comme celles de la culture Anasazi (Janssen 2009, Axtell et al. 2002) et des populations de la Mesa Verte (Kohler et Varien 2012). Cependant, OBRESOC est construit d'une façon différente et totalement indépendante, qui représente *de facto* une nouvelle approche dans le cadre de la modélisation de type multi-agents.

De nombreux concepts généraux du modèle viennent de l'archéologie : le modèle est construit sur plusieurs inférences archéologiques. La famille nucléaire, les plantes cultivées, les troupeaux d'animaux, sont modélisés à partir des traces trouvées dans les vestiges. D'autres éléments qui ne laissent pas de traces directes en archéologie sont modélisés grâce à de sources ethnographiques et anthropologiques ; par exemple le fonctionnement du système agricole et les mécanismes de scission, ainsi que l'estimation de nombreux paramètres. La fertilité des sols et la météorologie sont injectées dans le modèle à partir d'observations et d'estimations paléo-environnementales.

4.1.4.2 Emergence

Le modèle prévoit l'émergence du *Big Man* : il s'agit d'une personnalité influente qui peut émerger dans des hameaux-pixels qui dépassent un certain seuil de densité locale. Le *Big Man* a des privilèges de stockage qui lui permettent d'entretenir une « clientèle » dans le besoin. Ce leader permet de réduire la tension sociale due à l'accroissement de la population dans le hameau au niveau local, et d'attirer d'autres individus au niveau supra-local. Par conséquent, la population dans le hameau pourra croître, et la densité au supercarré pourra augmenter également.

Le modèle ne prévoit pas d'autres éléments qui peuvent émerger à partir du comportement des individus. Les agents n'auront pas des comportements imprévisibles même en changeant les paramètres ; leurs actions sont toujours déterminées par la recherche des zones d'optimum agricole, finalisée à leur survie. La raison est que dans OBRESOC on ne modélise pas des individus : il s'agit d'un modèle mécanique, de type probabiliste, où de nombreux éléments sont déterminés par des tirages aléatoires, sans en connaître la cause ; cette modélisation n'est pas de type psychosociologique. Des patrons géographiques peuvent émerger dans OBRESOC, mais pas des comportement des individus.

4.1.4.3. Adaptation

Les agents suivent des règles précises : lors de la colonisation, ils essaient toujours à s'installer dans la meilleure zone possible pour l'agriculture, selon ce qui est déterminé par la carte de *best patch*. Leur choix sera toujours déterminé par les critères d'optimum agricole ; quand certaines zones ne peuvent plus accueillir d'autres agents, ceux-ci iront vers les meilleurs pixels parmi ceux qui sont disponibles.

En général, les agents ne se trouvent pas dans la situation de choisir pour accroître leurs possibilités de succès ; ils suivent strictement les règles imposées par le modèle. Une situation où les agents seraient obligés de suivre des comportements adaptatifs, c'est-à-dire de changer leur comportement en réponse à des changements dans l'environnement, serait le cas de crises météorologiques qui produisent des famines ou des disettes. Dans ce cas là, les agents réduiront d'abord les consommations, et ensuite chercheront de l'aide chez les voisins et les apparentés qui n'ont pas été touchés par la crise.

4.1.4.4. Objectifs

L'objectif principal des agents est leur survie et leur reproduction. Pour survivre, les agents ont besoin d'une certaine quantité de kilocalories, qui dépend de la taille et de la composition du foyer domestique. Ces kilocalories sont obtenues grâce à l'activité économique : il s'agit principalement de l'agriculture et de l'élevage, avec l'apport complémentaire de la chasse et de la cueillette. Afin d'assurer ce montant de kilocalories, les agents ont besoin d'une production agricole suffisante : pour cette raison, ils choisissent de préférence de coloniser les meilleurs

pixels parmi ceux qui sont disponibles. En cas de crise ou disette, les agents chercheront leur kilocalories ailleurs, soit en intensifiant la chasse et la cueillette, soit avec l'aide de voisins et apparentés, avant de recourir aux comportements adaptatifs décrits plus haut. Il n'y a pas d'autres comportements particuliers qui peuvent être adoptés pour augmenter les probabilités d'atteindre l'objectif. L'expansion géographique et la colonisation de la région n'est pas un objectif des agents, mais une conséquence de la saturation des zones déjà occupées.

4.1.4.5. Apprentissage

Dans ce modèle, un apprentissage comme conséquence de l'expérience des agents n'est pas implémenté. Le comportement des agents reste le même le long de toute la durée de la simulation, indépendamment de l'expérience acquise.

4.1.4.6. Prédiction

La prédiction est fondamentale pour prendre de bonnes décisions. Avant de coloniser, les agents connaissent la valeur de *best patch* du pixel, et ils savent donc si ce pixel est favorable ou non à l'agriculture. En outre, les agents savent combien de semences sont nécessaires pour obtenir une récolte qui soit suffisante pour nourrir tout le foyer domestique, et combien de temps ils doivent dédier à l'activité économique. Par contre, ils ne peuvent pas prévoir les événements météorologiques.

4.1.4.7. Perception

En ce qui concerne les variables environnementales, les agents ont une perception de la valeur de *best patch* ; ils savent donc quels sont les meilleurs pixels à coloniser. Il existe une limite, appelée *rayon de perception*, à l'intérieur de laquelle les agents peuvent chercher les meilleurs pixels disponibles. Les agents n'ont la perception que des pixels compris à l'intérieur de ce rayon, et ne pourront pas partir coloniser plus loin.

Les agents ont aussi une perception des autres agents. Ils peuvent se placer sur un pixel où sont déjà d'autres agents, en joignant leur hameau ; ils peuvent en outre se déplacer vers les voisins et les apparentés en cas de disettes et de famines. Un mariage se fait entre deux

individus appartenant à deux foyers domestiques différents : un *rayon de mariage* existe, et un individu ne peut se fiancer avec un mariable qu'à l'intérieur de ce rayon.

4.1.4.8. Interactions

Dans le modèle OBRESOC-BEAN, les interactions n'impliquent pas une compétition. Une interaction est représentée par le mariage, qui concerne deux individus faisant partie de deux foyers domestiques différents. Cela comporte une mise à jour dans les variables d'état des deux agents, avec la sortie des individus mariés de leur ancien foyer, et la création d'un nouvel agent composé par le couple. Le mécanisme de colonisation, décrit au paragraphe 4.2.2, impose au foyer domestique des parents, soit du mari soit de la femme, de suivre le nouveau couple dans le processus de colonisation ; il y a donc des interactions importantes entre le foyer domestique des parents et celui des enfants. Une autre interaction est représentée par les adoptions : les enfants peuvent être adoptés en cas de crise ou de mort des parents. Toutes ces interactions ne génèrent pas des tensions ou des compétitions, et ne concernent pas une communication entre les agents, mais sont déterminées par les mécanismes du modèle.

4.1.4.9. Stochasticité

Comme nous l'avons expliqué dans l'introduction de cette thèse, ce modèle est peu stochastique. L'expansion des agents n'est pas aléatoire, car leur choix sera toujours de coloniser les meilleurs pixels disponibles. La démographie est déterminée par des tirages aléatoires (mortalité, natalité, mariage, scission) basés sur des tables démographiques des populations préindustrielles. En simulant une expansion sur la *longue durée* de l'histoire, qui concerne des centaines de milliers d'individus, l'effet stochastique de ces tirages est très faible. L'élément le plus stochastique du modèle est la météorologie. Elle suit une trace historique estimée à partir des données polliniques, mais est simulée pour chaque saison en prenant en compte aussi l'écart-type local, et peut donc avoir des variations importantes. La météorologie a une grande influence sur l'expansion des premiers agriculteurs, car elle peut provoquer des famines ou des disettes qui ralentissent la colonisation. Pour cette raison, dans le modèle il existe la possibilité de bloquer le "*random seed*" lié à la météorologie, en permettant d'avoir des simulations avec les tirages météorologiques constants, réduisant ainsi la stochasticité globale du modèle.

4.1.4.10. *Collectivités*

Plusieurs agents situés sur le même pixel constituent un hameau. Les hameaux peuvent accueillir d'autres colonisateurs tant que leur capacité maximale, en termes de foyers domestiques, n'est pas atteinte. En cas de présence d'un *Big Man*, le nombre maximal d'agents qui peuvent se trouver dans le hameau-pixel s'accroît.

4.1.4.11. *Observation*

Les données produites par le modèle sont stockées pour être explorées, manipulées et analysées. Plusieurs sorties du modèle sont exportées en format CSV et TXT, et peuvent être ouvertes avec différents logiciels comme Excel ou des outils de gestion SQL ; les sorties géo-référencées peuvent être chargées dans des Systèmes d'Information Géographique. Les sorties sont très détaillées (une simulation d'OBRESOC-BEAN produit en moyenne cinq ou six Giga-octets de données) et concernent plusieurs types d'informations géographiques, démographiques et économiques qui peuvent être utilisés pour la validation du modèle et pour l'exploration de la structure de la société agricole du Néolithique.

Les états de lieu de tous les foyers domestiques, vivants et morts, sont stockés chaque année (à la fin de l'été). Chaque année, pour chaque agent vivant, sa position géographique (coordonnées X et Y) est connue, ainsi que le nombre d'individus présents dans le foyer domestique (divisés par classes d'âge), et plusieurs informations au niveau social (identité du foyer scissionniste, nombre d'individus adoptés ou qui ont quitté le foyer) et économique (taille et composition du troupeau, production agricole, kilocalories issues de la chasse et de la cueillette, quantité de céréales stockées). Pour les foyers morts, la saison pendant laquelle le foyer s'est éteint est connue, ainsi que son emplacement. Toutes ces données permettent une exploration détaillée de la distribution des agents et de leur structure économique et démographique à des diverses échelles géographiques et temporelles.

Au niveau global du modèle, pour chaque année, des informations relatives à la démographie (nombre total d'individus, classes d'âge, nombre de morts, etc.) et à l'économie (nombre d'animaux, rendement du système agricole, chasse et cueillette, etc.) sont stockées. Grâce à ces données on peut suivre l'évolution globale du modèle, pour chaque année. D'autres données au niveau global sont produites : il s'agit des cartes de crises, qui indiquent où et quand les crises météorologiques se sont produites, ainsi que leur typologie et leur intensité.

4.1.5. Initialisation

En début de simulation, un nombre n (choisi en paramètre) d'agents est créé dans la zone de départ qui est délimitée précisément dans la région Egéenne à partir des traces archéologiques. L'implantation de ces agents suit les règles de *best patch*, c'est-à-dire qu'ils seront initialisés sur les meilleurs pixels de la zone de départ. Il s'agit, au début, de couples de parents ; en outre, de mini-troupeaux des trois différentes espèces d'animaux sont initialisés pour chaque foyer. Avant le début de la simulation, une période d'initialisation de 100 ans est simulé, sans les effets de la météorologie, afin de garantir une dispersion et une différenciation des agents. La simulation commence en 6400 BC, quand la présence des agriculteurs était attestée dans de différentes zones de la côte Egéenne, comme montré par les traces archéologiques. Cette initialisation n'est pas répliquable, même si la stochasticité est très limitée car la météorologie n'est pas concernée.

4.1.6. Données d'entrée

Les données d'entrée environnementales sont représentées par plusieurs cartes et fichiers. Il y a quatre cartes de températures saisonnières moyennes et quatre cartes de leur écart-type standard ; quatre cartes de précipitations saisonnières cumulées et quatre carte de leur écart-type; la carte de fertilité des sols ; la carte d'altitude ; la carte de *best patch* ; en outre, une carte des rivières est ajoutée pour l'affichage des cours d'eau. Il y a aussi quatre fichiers avec les estimations des températures moyennes saisonniers et quatre fichiers avec les estimations des précipitations cumulées saisonniers pour le Néolithique Ancien de la région. Tous ces fichiers doivent être injectés et chargés dans OBRESOC-BEAN avant de démarrer la simulation.

En outre, le modèle est personnalisable à travers un grand nombre de paramètres ; certains sont considérés comme fixés (par exemple les valeurs biologiques de kilocalories fournies par les céréales ou les animaux, le taux de croissance des plantes, etc.), mais bon nombre sont estimés à partir de traces archéologiques (par exemple le ratio des animaux, le nombre de maisons présentes dans un village, la densité d'occupation) ou de suggestions ethnographiques

(le nombre de vaches par individu, le rendement agricole maximal possible, etc.). Les paramètres sont décrits et argumentés dans le paragraphe 4.3.

4.1.7.Sous-modèles

Le comportement des agents est simulé par deux modèles partiels intermédiaires : le modèle économique et le modèle démographique. Le premier consiste principalement en le système agricole, avec toutes les activités qu'il comporte, comme l'ensemencement, l'utilisation de la fumure et la récolte. L'aménagement des animaux, exploités principalement pour la fumure et la viande, rentre dans ce modèle partiel intermédiaire, ainsi que la chasse et la cueillette complémentaires. À chaque saison, les agents ont besoin d'un montant de kilocalories nécessaire à assurer la survie de tous les membres du foyer domestique. Si ce montant n'est pas obtenu, généralement à cause d'événements météorologiques exceptionnels, une disette ou une famine peuvent se déclencher, forçant les agents à réagir en conséquence.

Le modèle partiel intermédiaire démographique règle la vie des agents en termes de natalité, mortalité, fécondité et mariage ; ces éléments sont déterminés par des tables démographiques de populations préindustrielles. Le mariage en particulier a une grande importance dans le modèle, car il coïncide avec la création d'une nouvelle famille nucléaire et, par conséquent, d'un nouveau agent. Chaque hameau a un seuil maximal de foyers domestiques qui peuvent être présents simultanément : il s'agit de la densité locale maximale, déterminée à partir d'estimations archéologiques. Si le nouveau foyer n'est pas accepté, il est obligé de partir coloniser un nouvel endroit. Sur la base d'observations ethnographiques, qui montrent l'improbabilité d'un front pionnier de colonisation composé exclusivement de jeunes couples, les colonisateurs dans OBRESOC-BEAN partent avec le foyer domestique des parents de la femme ou du mari, selon la matrilocalité ou la patrilocalité du modèle.

Ce concept a été un des points fondamentaux de l'adaptation d'OBRESOC-BEAN et nécessite une description plus approfondie. En général, les modèles partiels intermédiaires constituent une part très importante de la modélisation, qui requiert un grand nombre d'inférences archéologiques, ethnographiques et paléodémographiques. Afin de laisser simple et schématique la description du modèle selon le protocole ODD, toutes les recherches qui ont

conduit à la création des modèles partiels intermédiaires sont décrites séparément dans le paragraphe 4.2.

4.2 Les modèles partiels intermédiaires

Les deux modèles partiels intermédiaires ont été mentionnés dans le protocole ODD ; ils constituent une partie très importante du modèle, car ils déterminent le comportement des agents. Le système économique de la culture Rubanée, basé en particulier sur une agriculture intensive, a été modélisé dans OBRESOC ; le Néolithique Ancien des Balkans présente beaucoup de similarités, et seulement d'adaptations mineures, notamment dans le choix des paramètres, ont été nécessaires. Au contraire, le modèle démographique a requis de sévères modifications, notamment à cause de la différence de typologie des maisons : les longues maisons LBK, occupées par des familles élargies, sont remplacées par de petites maisons avec des familles nucléaires. Dans ce paragraphe, les deux modèles partiels intermédiaires sont décrits, ainsi que leur adaptation depuis OBRESOC.

4.2.1. Le modèle économique

Quand on parle de modèle économique, il ne faut pas penser à une économie de marché ; les individus n'ont pas le but de s'enrichir ou d'obtenir un profit. Dans la société Néolithique, l'hypothèse est que les individus pratiquent une activité économique avec l'objectif de garantir leur survie. Dans le modèle OBRESOC-BEAN, les agents doivent assurer la production nécessaire pour satisfaire le besoin énergétique du foyer domestique en termes de kilocalories ; ce montant est déterminé par sa taille et sa structure démographique. Chaque individu au sein du foyer a son besoin propre, qui dépend du sexe et de la classe d'âge ; par exemple, les adultes et les mâles ont besoin de plus de kilocalories que les enfants et les femelles. Pour le Néolithique Ancien, les traces archéologiques suggèrent que l'activité principale des individus était une agriculture intensive, accompagnée de l'élevage, tandis que la chasse et la cueillette étaient plus marginales. Dans ce paragraphe le fonctionnement du

système économique d'OBRESOC-BEAN est décrit, modélisé à partir des traces archéologiques et des suggestions ethnographiques qui ont été narrées dans les paragraphes 2.3 et 2.4.

Le travail concerne tous les individus qui ont atteint un certain âge (donné en paramètre). L'activité agricole comprend la création des champs, l'ensemencement, le sarclage (désherbage) et la récolte des céréales. La fumure produite par le troupeau est récolte et utilisée pour accroître la fertilité des terres. Une partie du travail est aussi dédiée aux animaux et à leur élevage, en particulier à la récolte du feuillage des arbres nécessaire pour nourrir les bovins et les caprins. Certaines activités sont pratiquées à chaque saison de l'année, tandis que d'autres sont saisonnières : par exemple l'ensemencement est normalement en automne, et la récolte en été ; un ensemencement au printemps est possible suite à des conditions météorologiques particulières pendant l'hiver, qui ont forcé les agents à replanter leur cultures. La quantité de travail nécessaire à ces activités est mesurée en unités de temps de travail, choisies en paramètre.

La chasse et la cueillette constituent des activités marginales, pratiquées seulement pour compléter les kilocalories obtenues grâce aux céréales et aux animaux domestiques jusqu'au montant nécessaire à la survie des foyers domestiques. Des unités de travail sont aussi consacrées à la construction de la maison ; théoriquement, sa reconstruction doit être effectuée à intervalles réguliers. Cependant, comme on le verra au paragraphe 6.4, la durée des bâtiments du Néolithique Ancien dans certaines parties des Balkans peut dépendre de plusieurs facteurs.

Si le montant de kilocalories nécessaires à la survie n'est pas atteint, les agents se trouvent dans une situation de crise. Les crises surviennent généralement suite à d'événements météorologiques qui réduisent la fertilité des pixels et provoquent de mauvaises récoltes. Les agents sont obligés de réagir de différentes façons : d'abord, avec un mécanisme d'assurance, qui consiste en la réduction de la consommation et l'envoi d'individus qui ne participent pas à la production (enfants et vieux) chez les voisins ou les apparentés. Si cela ne suffit pas, l'entier foyer domestique, s'il est encore vivant, est forcé à migrer. Les animaux peuvent aussi être touchés par les crises, avec une réduction de la taille des troupeaux et, dans de cas extrêmes, leur disparition.

4.2.2 Le modèle démographique

Les individus à l'intérieur des foyers domestiques sont sujets à des règles démographiques ; ils naissent, meurent et se reproduisent en suivant des tables de mortalité. Dans OBRESOC, la fertilité et la mortalité de la société Rubanée ont été estimées à partir de sources démographiques concernant les populations préindustrielles de l'Europe Centrale (Bocquet-Appel et al. 2015). Pour OBRESOC-BEAN, une recherche bibliographique exhaustive a été réalisée, avec l'objectif de reconstituer la structure démographique des populations préindustrielles dans les Balkans. Cependant, il ne semble pas que des registres d'état civil aient été utilisés. Les archives Byzantines (Laiou 1977) et Ottomanes (Kavas 2013, Behar 1998) n'incluent pas d'informations complètes sur la population, car il s'agit essentiellement de registres d'impôts, où sont seulement noté le nom du chef de la famille et les possessions imposables. Les registres des paroisses, qui sont souvent la principale source d'information pour les sociétés préindustrielles européennes (Livi Bacci 1999), ne peuvent pas aider pour les Balkans. En effet, la pratique de tenir des registres paroissiaux n'est jamais devenue obligatoire dans l'église Orthodoxe, et il n'y a aucun témoignage de registres complets et entretenus méthodiquement dans la région (Todorova 1996).

De sources démographiques qui peuvent s'adapter à la péninsule Balkanique sont celles du "modèle Sud" (Coale et Demeny 1966), qui présentent des tables démographiques standards pour les populations préindustrielles méditerranéennes. Cependant, ces estimations ne sont pas considérées comme appropriées pour la modélisation, car elles ne sont pas issues d'inférences démographiques directes sur ces populations, mais plutôt sur des populations modernes dans plusieurs régions qui présentent un climat méditerranéen (United Nations 1983).

À cause de ces problématiques, plutôt que prendre des estimations approximatives, les tables démographiques utilisées dans OBRESOC ont été conservées aussi pour les Balkans. En effet, malgré les différences régionales, les deux sociétés simulées sont très similaires, caractérisées par une agriculture intensive, basée sur les mêmes cultures et les mêmes animaux. L'hypothèse est donc que les paramètres démographiques du Rubané peuvent s'adapter au Néolithique Ancien des Balkans.

Les agents ont le devoir d'assurer leur reproduction ; ils ont besoin de trouver un partenaire pour se marier. Les individus dans un foyer domestique, une fois atteint l'âge de mariage, doivent chercher une épouse dans leur *rayon de perception*. Le mariage est l'élément qui a demandé le plus de changements et d'adaptations dans OBRESOC-BEAN. En effet, dans OBRESOC le mariage est suivi par l'ajout d'une nouvelle pièce dans la maison pour héberger le nouveau couple ; il ne correspond pas à une scission, qui est modélisée avec l'introduction du ratio producteur/consommateur exprimé par le *scalar stress chayanovien* (Chayanov 1923; Bocquet-Appel et al. 2015, 2014).

Dans OBRESOC-BEAN, où sont modélisés des foyers domestiques composés de familles nucléaires, le mariage coïncide toujours avec la création d'un nouveau foyer domestique, et donc d'un nouvel agent. Les hameaux ont une limite à leur accroissement ; il y a une densité maximale de maisons simultanées qui peut être atteinte. Au bout d'un moment, les nouveaux couples mariés ne peuvent plus être acceptés dans le hameau et sont donc forcés de partir pour coloniser ailleurs. Cela est du *scalar stress* villageois : au fur et à mesure que le village s'accroît, les tensions sociales augmentent aussi ; obtenir un consensus devient de plus en plus difficile (Bandy 2004, Carneiro 1988, Johnson 1982). Conséquemment, un seuil maximal de foyers domestiques par hameau a été estimé grâce à des inférences sur le nombre de maisons qui pouvaient être occupées simultanément . A chaque mariage, un tirage suivant la loi de poisson, basé sur le nombre de foyers domestiques actuellement présents dans le hameau et sur le seuil de densité locale (donné en paramètre), établit si le foyer domestique est accepté ou non dans le hameau.

Quand un foyer n'est pas accepté, il est obligé de partir coloniser un nouveau pixel à la *best patch*. Si ce foyer partait tout seul, le front pionnier de colonisation du modèle serait composé uniquement de jeunes couples récemment mariés. Cependant, cela est considéré comme très improbable : d'abord car cela pourrait causer des tensions sociales ; mais, surtout, car cela provoquerait bientôt un manque de force de travail. En effet, la femme sera fréquemment enceinte dans les années suivantes et sera dans l'incapacité de travailler, mais le nombre des bouches à nourrir augmentera. Les premières années de colonisation demandent un effort majeur en termes de travail : une grossesse pourrait conduire à un échec de la colonisation et à un effondrement du système.

Une source ethnographique régionale (Laiou 1977) montre comment, dans la Grèce paysanne byzantine, le foyer domestique du couple marié a souvent des liens très étroits avec les

parents ; les deux foyers vivent côte à côte, et peuvent partager les ressources, les animaux et les terres. Pour cette raison, dans le modèle de scission implémenté dans OBRESOC-BEAN, le foyer du couple marié sera suivi, dans la colonisation, par le foyer des parents (de la femme ou du mari, selon un tirage basé sur la patrilocalité ou la matrilocalité du modèle). Une source ethnographique, qui décrit le front pionnier dans l'Indonésie Néerlandaise, montre ce qui peut être appelé "les dix commandements des colonisateurs" (Bocquet-Appel et al. 2015 ; Pelzer 1945) : il s'agit de dix règles qui garantissent la bonne réussite d'un processus de colonisation. Le modèle OBRESOC-BEAN ne contredit aucun de ces commandements, et il en suit strictement plusieurs, en particulier:

[...]

III: Select young people; by taking them one reduces future population increase [...]

IV: Select families; families are the foundation of peace and order in the colonies.

V: Don't select families with many young children: the working members of the family cannot carry that burden at the start.

[...]

VIII: Don't accept expectant mothers: the pioneer settles needs the full help of the wife during the first year.

IX: Don't accept bachelors; sooner or later, they will become involved with somebody else's wife.

[...]

Les autres règles, qui sont omises, concernent des situations spécifiques de l'Indonésie qui ne peuvent pas s'appliquer au Néolithique Ancien des Balkans. Cette source ethnographique suggère donc que la colonisation modélisée dans OBRESOC-BEAN remplit toutes les conditions pour avoir du succès, et peut représenter l'expansion d'une vraie société préindustrielle.

4.3 La météorologie

Les données météorologiques ont été présentées dans le paragraphe 3.2.3 ; elles sont représentées par des reconstitutions des températures et des précipitations au site de Tenaghi

Philippon, faites à partir de séquences polliniques,. Dans ce paragraphe est expliqué comment le modèle OBRESOC-BEAN, en utilisant les procédures développées avec OBRESOC, simule la météorologie du Néolithique Ancien des Balkans, et comment les crises agricoles liées aux événements météorologiques ont été injectées dans le modèle.

4.3.1. La simulation météorologique

Une méthode de "*centrage*" des valeurs climatiques reconstituées au niveau régional est utilisée, en suivant la procédure développée pour OBRESOC, pour adapter à toute la région de la simulation données relatives à Tenaghi Philippon, (table 4.1). Une moyenne de toutes les valeurs des pixels dans les données actuelles, ici appelée "Moyenne WC (WorldClim)" (colonne b), est calculée avec un S.I.G., et représente une moyenne globale saisonnière au niveau régional. Cette moyenne est divisée par la valeur actuelle observée à Tenaghi Philippon dans World Clim (colonne a) ; le résultat est le ratio actuel entre la moyenne régionale et ce site spécifique (colonne c). La valeur Néolithique reconstituée à partir du pollen pour une année précise (colonne d) est multipliée ou additionnée à ce ratio (colonne e). Cela donne donc une moyenne globale régionale pour l'année en question (colonne f).

Les valeurs obtenues se réfèrent seulement à des années spécifiques ; les courbes produites par ces reconstitutions sont inadéquates à représenter des données météorologiques au niveau annuel et saisonnier. En effet, l'intervalle de confiance entre chaque point connu dérivé des pollens est assez large pour pouvoir représenter une grande variété de courbes, et non seulement une, comme montré normalement dans les représentations graphiques ; elles sont, en vérité, un artefact graphique qui cache les vraies variations météorologiques (Dubouloz 2014). Comme il a été fait pour OBRESOC, les valeurs reconstituées sont conservées seulement pour les années dont la valeur précise est connue. Par contre, les valeurs intermédiaires inconnues sont placées sur la droite de régression, calculée pour chaque saison pour toute la durée de la simulation.

	a) Tenaghi WC	b) Moyenne WC	c) Calcul WC/Tenaghi	d) Exemple : Tenaghi 5927 BC	e) Transfor- mation	f) "Moyenne Régionale" 5927 BC
Precip. Printemps	121	167,8	1,38668759	146,8	= 146,8 * 1,38668759	203,5
Precip. Hiver	174	172,4	0,99097799	260,0	= 260,0 * 0,99097799	257,7
Precip. Eté	83	171,9	2,07067229	77,0	= 77,0 * 2,07067229	159,4
Precip. Automne	144	162,6	1,12959183	174,4	= 174,4 * 1,12959183	197,0
Temp. Printemps	13,23	10,09	-3,14	9,66	= 9,66 + (-3,14)	6,52
Temp. Hiver	6,17	0,94	-5,23	3,6	= 3,6 + (-5,23)	-1,63
Temp. Eté	23,73	19,74	-3,99	20,8	= 20,8 + (-3,99)	16,81
Temp. Automne	16,03	11,46	-4,57	11,7	= 11,7 + (-4,57)	7,14

Table 4.1 : Méthode de "*centrage*" pour les estimations météorologiques.

Une méthode est utilisée pour rectifier la marge d'erreur relative à la datation au radiocarbone et pour augmenter les probabilités qu'un événement météorologique se produit dans la simulation dans la même année suggérée par les traces de pollens (Dubouloz 2014). Pour les années adjacentes à la valeur connue t , la valeur lissée à $t \pm 2$ est prise (moyenne entre t et $t-2$ et entre t et $t+2$) ; de cette façon, les observations météorologiques réelles auront une probabilité majeure d'impact sur la simulation.

Une fois que toutes les valeurs connues ont été centrées, la régression de ces valeurs sur le temps est effectuée. La valeur de chaque point sur la droite de régression correspond à l'estimation de la moyenne régionale Néolithique des Balkans pour l'année en question. Les pics correspondent aux années connues, où la valeur originale est gardée (Figures 4.2 et 4.3).

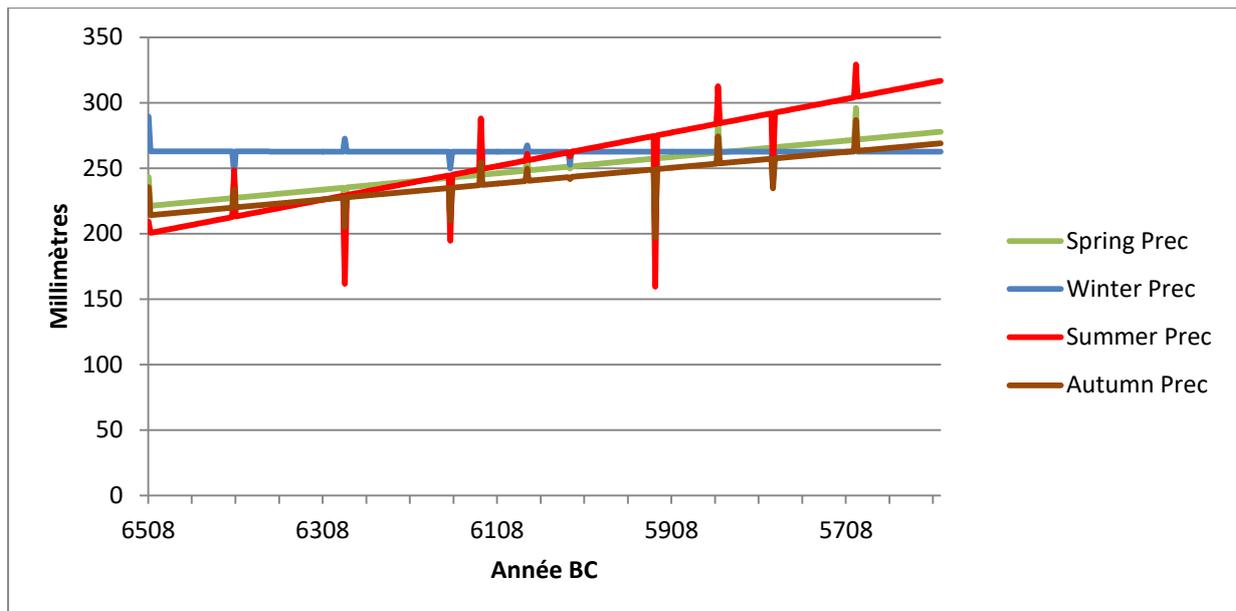


Figure 4.2 : Estimation des précipitations cumulées saisonnières pour le Néolithique Ancien des Balkans.

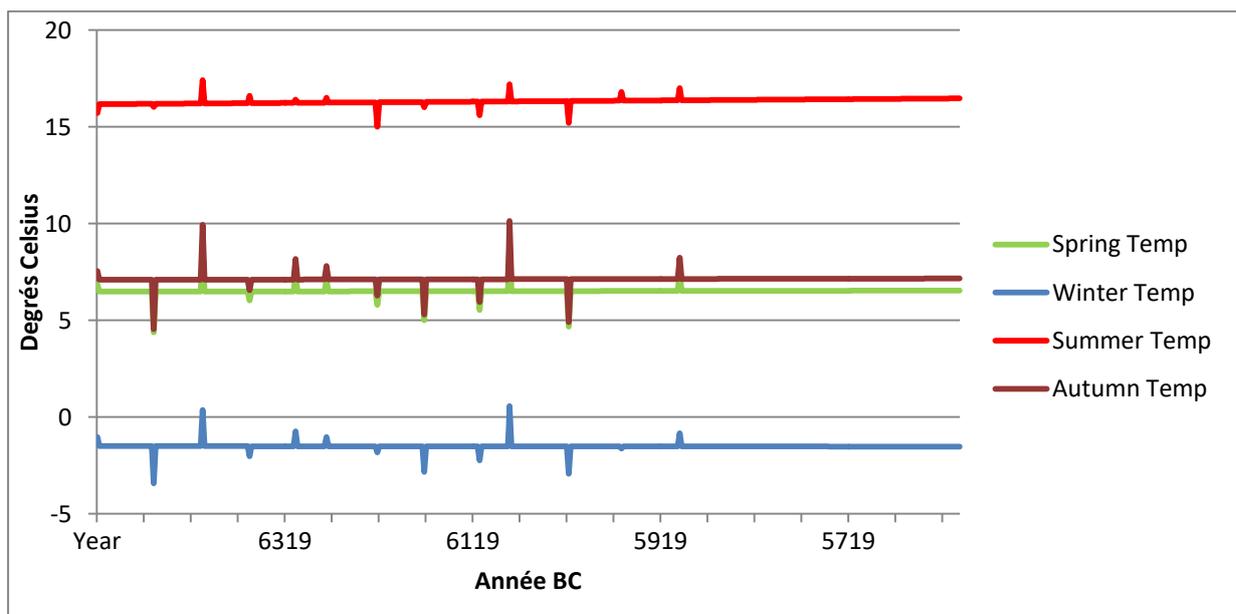


Figure 4.3 : Estimation des températures moyennes saisonnières pour le Néolithique Ancien des Balkans.

Le modèle fonctionne avec, au total, 24 fichiers de type climatique :

-4 cartes WorldClim avec les température moyennes actuelles (sur la base des 50 dernières années) pour chaque pixel ; une carte pour chaque saison.

-4 cartes World Clim avec l'écart-type de la température moyenne pour chaque pixel ; une carte pour chaque saison.

-4 fichiers avec les estimations de la température moyenne régionale au Néolithique ; un fichier pour chaque saison. Il s'agit de fichiers de texte, où chaque ligne représente la valeur pour une précise année.

-4 cartes WorldClim avec les précipitations cumulées actuelles (sur la base des 50 dernières années) pour chaque pixel ; une carte pour chaque saison.

-4 cartes World Clim avec l'écart-type des précipitations cumulées pour chaque pixel ; une carte pour chaque saison.

-4 fichiers avec les estimations des précipitations cumulées moyennes régionales au Néolithique ; un fichier pour chaque saison. Il s'agit de fichiers texte, où chaque ligne représente la valeur pour une année précise.

La météorologie n'est pas statique : elle est simulée par OBRESOC à chaque saison, en tenant compte de la valeur actuelle du pixel, de son écart-type ainsi que de la reconstitution météorologique régionale. Pour chaque saison de chaque année, OBRESOC simule d'abord une hypothétique météorologie actuelle, sur la base de WorldClim. La région est divisée en carrés de 50 x 50 kilomètres par défaut (leur taille est donnée en paramètre) : pour chaque carré un tirage est effectué, en suivant la distribution normale [0, 1], qui donne comme résultat une valeur incluse entre -3σ et $+3\sigma$. Cette valeur, pour chaque carré, est lissée sur les valeurs des carrés adjacents, afin de les rendre plus homogènes. La valeur simulée de chaque pixel pour sa température moyenne saisonnière \hat{T}_p et ses précipitations cumulées saisonnières \hat{P}_p correspond à sa valeur WorldClim T_{wc} et P_{wc} (moyenne des 50 dernières années) à laquelle il faut ajouter son écart-type σ multipliée par la valeur tirée et convenablement lissée, selon les formules suivantes :

$$\hat{T}_p = T_{wc} + \sigma T_{wc} \times Tirage$$

$$\hat{P}_p = P_{wc} + \sigma P_{wc} \times Tirage$$

Le sens de cette procédure est que chaque pixel prend en compte sa variabilité locale, mais en même temps que chaque groupe de pixels a la même tendance. Il serait irréaliste de simuler une saison exceptionnellement chaude dans un pixel, et une autre froide dans le pixel juste adjacent ; le lissage est effectué afin de réduire le contraste entre les zones contigües.

Avec ce processus, OBRESOC a simulé une météorologie hypothétique à partir des valeurs actuelles des pixels, en prenant en compte leur variabilité. Ensuite, OBRESOC adapte cette météorologie actuelle à l'estimation Néolithique, en faisant une soustraction entre la moyenne globale régionale simulée (\bar{T}_{sim} et \bar{P}_{sim}) et la moyenne globale régionale qui a été reconstituée à partir des données polliniques (\bar{T}_{pol} et \bar{P}_{pol}), pour chaque saison. L'écart obtenu est additionné ou soustrait à la valeur de chaque pixel simulé T_p et P_p , et fournit comme résultat la valeur météorologique Néolithique pour chaque pixel utilisée lors de la simulation (\hat{T}_{neo} et \hat{P}_{neo}), selon les formules suivantes :

$$\hat{T}_{neo} = T_p + (\bar{T}_{sim} - \bar{T}_{pol})$$

$$\hat{P}_{neo} = P_p + (\bar{P}_{sim} - \bar{P}_{pol})$$

Cette procédure est répétée pour chaque saison et chaque année, et est effectuée automatiquement par le programme OBRESOC, sur la base des 24 fichiers climatiques injectés qui ont été décrits. De cette façon, OBRESOC simule une météorologie qui prend en compte les variations et les différences régionales actuelles, mais sur la base des estimations du Néolithique de la région.

4.3.2 Les crises agricoles

Ces estimations météorologiques ont été injectées dans le modèle car la météorologie a une importance primordiale dans l'agriculture. Son impact est particulièrement fort quand surviennent des saisons exceptionnellement chaudes ou froides, et sèches ou humides, qui peuvent causer une réduction de la fertilité du sol, en provoquant de mauvaises récoltes qui déclenchent des disettes et des famines.

Dans OBRESOC, différentes typologies de crise ont été modélisées en identifiant des situations particulières dans lesquelles les crises météorologiques peuvent se vérifier. Ces événements peuvent avoir des intensités et des conséquences différentes ; pour cette raison, dans le modèle a été faite une différence entre disettes et famines. L'hypothèse faite pour les crises météorologique est que les conditions à la base des crises qui ont frappé une région

dans l'histoire récente peuvent s'être produites aussi dans le passé, en affectant les premiers agriculteurs.

Plusieurs types de crise ont été injectés dans le modèle OBRESOC, sur la base des témoignages historiques régionales qui décrivent les conditions climatiques dans lesquelles la crise s'est produite, ainsi que ses conséquences sur la population (Le Roy Ladurie 2004, Le Roy Ladurie et al. 2003). Néanmoins, les crises présentes en Europe Centrale ne sont pas du même type que celles qui intéressent les Balkans Méridionaux. Il s'agit de régions climatiques différentes, sujettes à événements météorologiques de nature différente. Pour cette raison, de nouvelles typologies de crise ont été identifiées à partir des sources qui renseignent sur l'histoire climatique des Balkans. Plusieurs sources documentaires sont présentes pour cette région ; les crises décrites ici sont collectées depuis le travail de Xoplaki et al. (2001), qui narre plusieurs événements météorologiques qui ont touché la région du XVII au XIX siècle. Ces témoignages ne sont pas toujours clairs, et il faut les interpréter pour comprendre comment injecter dans le modèle les éléments qu'ils suggèrent, en évaluant l'intensité et les conséquences de la crise. Par exemple, si l'auteur parle de "*very small harvest [...] caused a rise in foodstuff prices*" (Vujevic 1931) on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit seulement d'une disette ; par contre, s'il dit que "*Les gens erraient sur les routes et y mouraient de faim*" (Vujevic 1931) il doit s'agir d'une vraie famine.

Suite à l'interprétation des sources documentaires, six différentes typologies de crise sont injectées dans le modèle :

-Crise 1. Hiver froid et humide : disette. C'est l'événement qui arrive le plus fréquemment dans la région. Il y a plusieurs cas reportés d'hivers très froids et neigeux, qui ont eu des conséquences sur l'agriculture. L'hiver 1628/29 est signalé comme très dur, pluvieux et neigeux à la fois en Grèce (Egée et Crète) et en Serbie. L'hiver 1686/87 est également mentionné, comme ayant été sévère, froid et neigeux, ainsi que l'hiver 1699/1700. L'hiver 1708/09 est connu comme l'un des plus durs des 500 dernières années, avec des conséquences catastrophiques dans l'ex Yougoslavie. Néanmoins, aucune témoignage signale que cet hiver rigoureux a touché la Grèce. Froid et neigeux a été aussi l'hiver 1828/29. Même s'il n'est pas facile d'interpréter les conséquences de tous ces événements, car elles ne sont pas toujours identiques, l'hypothèse est qu'il s'agit de disettes et non de famines. Par exemple, suite à la crise de 1682/83 on observe une hausse des prix de la nourriture ; et, après la crise de 1686/87, la récolte a été seulement retardée ; ce ne sont pas des signaux d'une grande

catastrophe. L'événement du 1708/09 semble avoir été le plus grave, mais il a intéressé seulement l'ex Yougoslavie, sans toucher les Balkans Méridionaux.

- Crise 2. Hiver froid et humide, printemps froid et humide : famine. Les événements qui produisent une crise de type 1 peuvent se prolonger jusqu'au printemps. C'est le cas du début 1683, quand les chutes de neige et le froid extrême sont signalés de janvier jusqu'à avril ; la conséquence est la mort des animaux et la destruction des récoltes. De même, après l'hiver 1807/08, le froid et les chutes de neige durent jusqu'au printemps, en provoquant la mort de personnes et d'animaux. Dans ces cas là, les témoignages suggèrent qu'il s'agit de vraies famines et non seulement de disettes.

- Crise 3. Été froid et humide, automne froid et humide : disette. Un seul cas a été documenté, pendant l'année 1676. Une partie des grains seulement arrivent à être mûrs, à cause de l'été froide et pluvieux ; ensuite, des neiges en septembre détruisent les récoltes. Les conséquences citées suggèrent une disette plutôt qu'une famine.

-Crise 4. Sécheresse pendant 2 ou 3 saisons : disette. Les événements de sécheresse sont très communs dans la région. Plusieurs cas sont narrés, comme la sécheresse de novembre 1680 à mars 1681 , ou pendant tout l'automne et l'hiver 1695/96, ou encore de mai à octobre 1802. Il est donc difficile de trouver un patron de crises de sécheresse : elle peuvent se vérifier pendant toute l'année (voir aussi la crise de type 5). Il semble suffisant d'avoir au moins deux saisons de sécheresse consécutives pour déclencher une crise ; elle est classifiable comme disette, les conséquences étant décrites comme simplement l'augmentation des prix ou la pénurie de nourriture, mais sans témoignages de catastrophe.

-Crise 5. Sécheresse pendant l'année entière : famine. Dans les Balkans il est possible d'avoir une année entière, et même plus, caractérisée par la sécheresse. Il y a un cas de sécheresse qui commence en novembre 1712 et se termine l'été 1714, presque deux ans après. Toute l'année 1696 est aussi considérée comme sèche. Dans ces cas là, ces événements sont considérés comme des famines, car les auteurs décrivent des récoltes complètement détruites et, en effet, de longues famines.

-Crise 6. Hiver humide, printemps humide : disette. Selon un témoignage, pendant l'hiver 1804/05 et le printemps 1805 la pluie excessive a causé la mort des vaches et a provoqué une récolte faible en Macédoine Occidentale ; cet événement est classifié comme disette.

Pour établir dans quelles conditions une saison est exceptionnelle, et donc potentiellement déclencheuse d'événements catastrophiques, des seuils de crises sont introduits, comme cela a été développé par OBRESOC. Le but de ces seuils est de déterminer dans quelles situations la météorologie peut avoir eu un impact sur l'agriculture. Pour OBRESOC-BEAN, les seuils sont estimés à partir des observations météorologiques faites à Larissa (Thessalie) de 1955 à 2004, publiées par le National Center for Environmental information (<http://www.ncdc.noaa.gov/>). Vu l'absence de données agro-climatiques de référence sur les seuils d'impact dans l'agriculture régionale, ils ont été établis là où les valeurs moyennes de températures et les valeurs cumulées des précipitations de trois mois sont systématiquement en dessous (froid, sec) ou au-dessus (chaud, humide) des trois valeurs mensuelles (Dubouloz 2014). Conséquemment, le seuil d'humidité correspond au minimum de ces précipitations maximum cumulées (chaque mois de la saison au-delà de la moyenne mensuelle) ; le seuil de sécheresse au maximum de ces précipitations minimum cumulées (chaque mois de la saison en deçà de la moyenne mensuelle) ; le seuil de chaleur au minimum de ces températures moyennes maximum (chaque mois de la saison au-delà de la moyenne mensuelle) ; et le seuil de grand froid au maximum de ces températures moyennes minimum (chaque mois de la saison en deçà de la moyenne mensuelle). Les seuils de crises calculées pour Larissa sont montrées en Table 4.2.

	Seuil Sécheresse	Seuil Humidité	Seuil Chaleur	Seuil Froid
	Précipitations	Précipitations	Température	Température
Automne	64,00813	341,63068	17,14815	14,90741
Hiver	17,78004	222,25044	7,537037	4,48148
Printemps	33,78207	201,67640	14,70370	11,31481
Été	4,06401	127,50826	25,77778	23,48148

Table 4.2 : Seuils de crises à Larissa.

Ces valeurs de seuils sont relatives à la station météorologique de Larissa ; elles ne sont pas appropriées pour d'autres parties des Balkans, où les conditions météorologiques sont très différentes. Un seuil de crise qui soit applicable à tous les pixels de la région est donc obtenu, en calculant l'écart entre le seuil trouvé pour Larissa et la valeur saisonnière World Clim identifiée au même endroit (table 3.5) ; cet écart représente le seuil de crise au niveau régional. Pendant la simulation, une saison est considérée exceptionnelle et est susceptible de

déclencher une crise si la valeur simulée pour un pixel se trouve en dessous ou au-dessus de ce seuil, appliqué à sa valeur moyenne.

	Ecart Seuil Sec = Seuil Larissa - moyenne Larissa	Ecart Seuil Hum. = Seuil Larissa - moyenne Larissa	Ecart Seuil Chaud = Seuil Larissa - moyenne Larissa	Ecart Seuil Froid = Seuil Larissa - moyenne Larissa
Automne	-73,91414	203,70840	1,037778	-1,2021
Hiver	-101,03575	103,43465	1,39222	-1,66333
Printemps	-78,61177	89,28255	1,15704	-2,23185
Été	-55,43984	68,004402	1,13185	-1,16444

Table 4.3 : Seuils de crise pour le Néolithique Ancien des Balkans.

4.4 Paramétrage

Le modèle OBRESOC-BEAN possède une grande quantité de paramètres personnalisables ; leur valeur peut être modifiée à chaque simulation. Plusieurs paramètres ont été conservés inchangés depuis OBRESOC, tandis que d'autres ont requis une adaptation, sur la base des sources archéologiques et ethnographiques régionales. Ce paragraphe est destiné à expliquer les paramètres du modèle et les choix qui ont été faits dans OBRESOC-BEAN. Les valeurs indiquées ici ont été utilisées pour la simulation 49. Toutes les combinaisons de paramètres testées sont publiées dans l'annexe B ; les paramètres qui ne sont pas présents dans l'annexe ont été fixés.

Configuration de la simulation

Paramètre	Valeur	Notes
Nombre agents initiaux	150	Agents créés dans la zone de départ
Numéro Simulation	49	Code assigné à la simulation (pour son catalogage)
Nombre Itérations Initiales	400	Nombre de saisons dans la période d'initialisation (100 ans)
Nombre Itérations Simulées	2400	Nombre de saisons simulées (600 ans)
Variation Précipitations	0	
Variation Température	0	

Table 4.4 : Paramètres pour la configuration d'une simulation.

Le nombre d'agents au départ ne peut pas être connu depuis l'archéologie, même si certains auteurs ont fait des hypothèses sur le nombre de colonisateurs qui pourraient avoir atteint la

Thessalie au début du Néolithique (Perlès 2001). Ce paramètre a donc été trouvé par balayage, en testant différentes valeurs possibles. L'estimation du nombre d'agents initiaux dans OBRESOC-BEAN est traitée au paragraphe 5.4.2.

Le nombre d'itérations initiales choisi est de 400 saisons, donc 100 ans. Comme dans OBRESOC, cette période est considérée optimale pour générer une distribution des foyers domestiques réaliste, en suivant les seules règles démographiques (naissances, décès, mariages).

Le nombre d'itérations simulées représente la durée totale de la simulation, exprimée en saisons. Dans la simulation 49, 2.400 saisons ont été simulées, c'est-à-dire 600 ans. Cet intervalle va de 6400 BC à 5800 BC et comprend la totalité du Néolithique Ancien selon la chronologie grecque ; mais de simulations de 3.200 saisons (800 ans) ont aussi été effectuées, pour couvrir le Néolithique Ancien aussi selon la chronologie de l'Europe de l'Est.

Le modèle permet aussi de faire varier les précipitations et les températures par rapport à leurs estimations ; cela n'est pas effectué, et la courbe historique est suivie.

Configuration du modèle

Le modèle a un interrupteur qui permet de choisir entre le modèle OBRESOC, basé sur une maison composée de plusieurs pièces où habite une famille élargie, et le modèle BEAN, basé sur une maison d'une seule pièce, occupée par une famille nucléaire. Dans cette thèse, le modèle BEAN a été utilisé.

Configuration météorologique

Paramètre	Valeur	Notes
Filter X	50	Taille en km de la grille climatique (axe X)
Filter Y	50	Taille en km de la grille climatique (axe Y)
Seuils climatiques	Voir par. 3.4.3	Seuils de crises (décrits au par. 3.4.3)
Random seed	OFF	Interrupteur du tirage aléatoire météorologique

Table 4.5 : Paramètres pour la configuration météorologique.

Les variables météorologiques sont lissées sur la base de carrés qui mesurent 50x50 kilomètres (cf. par. 4.3.1). Les seuils climatiques, qui déterminent les conditions dans lesquelles des crises météorologiques peuvent se vérifier, ont été estimés pour OBRESOC-

BEAN ; la procédure et les valeurs ont été décrites au paragraphe 4.3.2, sur la base des observations des 50 dernières années à Larissa (Thessalie).

Le modèle permet de choisir le *random seed* des tirages météorologiques ; de cette manière, la météorologie simulée peut être répétée. Cependant, la simulation 49 a été effectuée avec une simulation météorologique aléatoire.

Configuration du sol et de la végétation

Paramètre	Valeur	Notes
Arbres		
Quantité arbres	25000	Quantité d'arbres au pixel/km ² , à ajuster avec fertilité du sol
Température gelée arbres	2	Température en degrés Celsius au dessus de laquelle le nombre d'arbres n'augmente pas
Ratio transpiration arbres	450	Evapotranspiration des arbres
Température croissance arbres	2	Température en degrés Celsius à partir de laquelle le nombre d'arbres croît
Taux croissance arbres	0,02	
Probabilité chablis	0,05	
Taux chablis	0,06	Taux de réduction suite à un chablis
Probabilité Incendie	0,15	
Taux incendie	0,06	Taux de réduction suite à un incendie
Herbacés		
Ratio herbacées/arbres	20	Ratio des herbacés relativement au nombre des arbres
Ratio transpiration herbacés	450	
Température croissance herbacés	2	Température à partir de la quelle le taux d'accroissement s'applique
Taux diminution herbacés	0,5	
Taux croissance herbacés	0,2	

Table 4.6 : Paramètres pour la configuration du sol et de la végétation.

Tous ces paramètres sont conservés depuis OBRESOC, sans aucune modification : il s'agit en effet de valeurs biologiques relatives aux arbres et aux plantes, qui ne changent pas d'une région à l'autre.

Configuration des ressources

Paramètre	Valeur	Notes
Animaux		
Kg prise	102,22	Pois moyen d'un gibier
Pourcentage Viande Herbivores	0,5	fréquence viande herbivore
Pourcentage Viande Sangliers	0,8	fréquence viande sanglier
KiloCal Herbivores	1174	Kilocal par kg de viande d'herbivore
KiloCal Sangliers	1300	Kilocal par kg de viande de sanglier
Fruits		
Fruits secs	6500	Kilocal par kg de fruits secs
Fruits frais	520	Kilocal par kg de fruits frais
Champignons	280	Kilocal par kg de champignons

Table 4.7 : Paramètres pour la configuration des ressources.

Les paramètres des ressources liées à la chasse et à la cueillette ne sont pas modifiés depuis OBRESOC. Il s'agit de valeurs biologiques fixes pour ces espèces de flore et faune.

Configuration du supercarré

Paramètre	Valeur	Notes
X Scale	20	longitude du supercarré en kilomètres
Y Scale	20	latitude du supercarré en kilomètres
Ratio Normal	0,03	fréquence normale pixels occupés au supercarré
Ratio BigMan	0,06	fréquence pixels occupés au supercarré en situation de <i>Big Man</i>
Capacité Pixel	25	espérance distribution nombre foyers domestiques au pixel/km ² (loi de poisson)
BigMan	1	Interrupteur : 1 = <i>Big Man</i> activé, 0 = <i>Big Man</i> désactivé

Table 4.8 : Paramètres pour la configuration du supercarré.

Une comparaison entre la densité observée en archéologie et dans le modèle au même endroit dans une région bien prospectée (Thessalie Orientale) a permis de déterminer la taille optimale du supercarré ainsi que sa capacité d'accueil (en terme de fréquence de pixels occupés) en conditions normales et en condition de *Big Man* (cf. par. 5.4.4). La capacité d'accueil au pixel est choisie sur la base des maisons simultanées estimées dans un village Néolithique typique (cf. par. 2.2). L'interrupteur *Big Man* est activé car les traces archéologiques suggèrent la présence d'individus plus influents pendant le Néolithique Ancien des Balkans (cf. par. 2.9).

Configuration de l'agriculture

Paramètre	Valeur	Notes
Rendement Fumure	10	Rendement d'un champ avec utilisation de fumure
Rendement No Fumure	5	Rendement d'un champ sans utilisation de fumure
Ratio 1	2	Effet de l'abatis-brûlis à la première année
Ratio 2	1,5	Effet de l'abatis-brûlis à la deuxième année
Ratio Totale	1	Effet de l'abatis-brûlis à 3+ ans
Fumure/Ha	1	Nb vaches nécessaires pour assurer la fumure sur un hectare
Production Max	600	rendement maximum en kg pour un hectare
Perte Grains	0,1	fréquence perte grains à la récolte
Perte décortication	0,4	fréquence perte grains à la décortication
Kcal grains	3425	kilocalories pour un kg de grains

Table 4.9 : Paramètres pour la configuration de l'agriculture.

Certains de ces paramètres sont conservés inchangés depuis OBRESOC, car il s'agit de valeurs biologiques (rendement en kilocalories) ou en tout cas de valeurs standard pour cette typologie de système agricole intensif. La fumure par hectare fait l'objet de tests : même si elle n'est pas détectable en archéologie, des sources suggèrent que 2-3 vaches pouvaient être utilisées pour un terrain de 1-2 hectares (cf. par. 2.4.1). Des estimations pour le rendement maximum pouvant être atteint dans les Balkans sont aussi disponibles (cf. par. 2.3.3).

Configuration du foyer domestique

Paramètre	Valeur	Notes
Mariage		
Age Min Mariable	17	Age minimum au mariage
Age Max Mariable	25	Age maximum au mariage
Rayon mariable	250	Rayon en km pour trouver un mariable
Choix de se marier	0,5	Patrilocal = 1; Matrilocal = 0; Néolocal = 0,5
Crises		
Disette	-200	diminution des Kcal/individu/jour en cas de disette
Famine	-300	diminution des Kcal/individu/jour en cas de famine
Rayon famine	75	rayon en km affecté par la famine
Réduction disette	0,05	proportion de réduction de la consommation en cas de disette
Proportion Grains	0,75	proportion des grains récoltés destinés à la consommation
Sécurité	0,25	Marge de sécurité en proportion de la récolte

Paramètre	Valeur	Notes
Main-d'œuvre		
Jours de travail	90	Jours d'activité pour un foyer domestique
Age production min	6	Age minimum pour travailler à la collecte
Age production medium	15	Age minimum pour travailler à l'agriculture
Durée maison	20	Durée de vie d'une maison ou intervalle de sa réparation
Reconstruction maison	200	Temps en unités de travail (UT) pour reconstruire une maison
Création champ	15	Temps en UT pour créer un champ
Ensemencement	5	Temps en UT pour l'ensemencement
Sarclage	15	Temps en UT pour le Sarclage
Récolte	10	Temps en UT pour la récolte
Fumure nuit	1	Temps en UT pour obtenir la fumure nuit
Fumure jour	1	Temps en UT pour obtenir la fumure jour
Elevage	1	Temps en UT pour l'élevage
Feuillage pour bovins	0,65	Temps en UT pour cueillir le feuillage pour nourrir les bovins
Feuillage pour caprins	0,05	Temps en UT pour cueillir le feuillage pour nourrir les caprins
Chasse	90	Temps en UT pour la chasse
Cueillette	90	Temps en UT pour la cueillette
Expansion		
Moyenne Best Patch	0,62	Moyenne des valeurs de best patch
Sqrt Best Patch	0,19	écart-type des valeurs de best patch
Quantité Big Man	35	seuil des foyers domestiques au pixel/km ² à partir duquel le hameau devient <i>Big Man</i>
Rayon seuil	1	distance minimale d'expansion pendant un temps seuil en début de simulation
Temps seuil	1	temps pendant lequel s'applique le rayon seuil
Rayon Expansion	150	rayon de perception des agents en kilomètres
Rayon Chasse	5	rayon de l'aire de chasse, en kilomètres

Table 4.10 : Paramètres pour la configuration du foyer domestique.

Les règles du mariage d'OBRESOC permettent de choisir entre un mariage patrilocal, matrilocal et néolocal. Dans OBRESOC-BEAN, chaque mariage implique la création d'un nouveau foyer domestique ; il s'agit donc toujours d'un mariage néolocal. Le concept de patrilocalité et matrilocalité a été conservé pour indiquer si dans le processus de colonisation ce sont les parents de la femme ou ceux du mari qui suivent le couple scissionniste. Comme il est impossible d'en détecter des signaux en archéologie, une valeur de 0,5 a été choisie : les deux foyers domestiques de parents ont la même probabilité de prendre part au processus de colonisation.

Les paramètres qui affectent les crises n'ont pas été modifiés, car l'impact de ces événements sur des sociétés agricoles du même type est considéré comme similaire. La proportion des

grains consommés a été objet de tests, en la faisant varier ; les sources archéologiques du Néolithique des Balkans permettent des inférences sur ce sujet, même si très génériques.

Les paramètres relatifs à la main-d'œuvre n'ont pas été modifiés. Il s'agit d'estimations précises sur le fonctionnement et l'aménagement d'un système agricole intensif, qui ont été faites par des chercheurs spécialisés dans ce domaine. La même typologie de système agricole présent dans la culture Rubanée est trouvée dans les Balkans : aucune modification n'a été nécessaire. La seule exception concerne la reconstruction des maisons, qui dans OBRESOC a été estimée pour des maisons en bois, tandis que dans le Balkans Méridionaux des maisons en brique crue et en adobe sont présentes. Ce type de construction peut durer théoriquement très longtemps, mais en même temps a besoin de travaux de réparation et d'entretien. Dans OBRESOC-BEAN, ces unités de travail ne correspondent pas nécessairement à une reconstruction, mais aussi à des réparations (cf. par. 6.4).

Les paramètres relatifs à l'expansion ont requis de nombreux ajustements. La moyenne et l'écart type de la carte de *best patch* sont calculés avec un S.I.G. à partir des valeurs de la carte de *best-patch* utilisée dans OBRESOC-BEAN. La quantité de foyers domestiques nécessaires à l'émergence du *Big Man* a aussi été ajustée sur la densité locale observée au Néolithique Ancien des Balkans, où des villages avec de nombreuses maisons sont présents, au lieu des petits hameaux du Rubané.

Le rayon minimum d'expansion, et le nombre d'années pendant lesquelles il s'applique, ont été introduits dans OBRESOC afin d'avoir une expansion plus rapide dans les premières années de simulation, en répliquant la rapide avancée au début de la culture Rubanée montrée par les traces archéologiques. Cependant, cela n'est pas observé au Néolithique des Balkans, où les premiers agriculteurs restent longtemps dans les zones de colonisation initiales avant de partir vers d'autres régions. Donc, ces deux paramètres ne sont pas nécessaires et sont fixés à la valeur minimale (1). Enfin, le rayon d'expansion a été obtenu suite à un test par balayage, en essayant plusieurs valeurs pour ce paramètre, et en comparant les résultats avec les données archéologiques (cf. par. 5.4.2).

Configuration du troupeau

Paramètre	Valeur	Notes
Vie du troupeau		
Ratio bovin	0,75	Ratio bovin/humain
Proportion caprins	2	Proportion caprins relativement au nombre de bovins
Proportion porcins	0,3	Proportion porcins relativement au nombre de bovins
Taux accroiss bovins	0,05	Taux accroissement annuel bovins
Taux accroiss caprins	0,15	Taux accroissement annuel caprins
Taux accroiss porcins	1	Taux accroissement annuel porcins
Economie du troupeau		
kcal lait bovin	79200	production annuelle lait pour une vache
kcal lait caprin	14000	production annuelle lait pour un caprin
gain lait	0,25	proportion du lait consommé par les humains
kcal viande bovin	150000	Kilocalories à l'abattage d'un bovin
kcal viande caprin	32000	Kilocalories à l'abattage d'un caprin
kcal viande porcine	100000	Kilocalories à l'abattage d'un porcine
Crise du troupeau		
Température min	0	Température minimum pour déclencher une surmortalité des animaux
Durée	5	durée reconstitution du troupeau suite à une crise
Perte bovin	0,5	fréquence de perte de bovins en cas de crise
Perte caprin	0,4	fréquence de perte de caprins en cas de crise
Perte porcine	0,9	fréquence de perte de porcins en cas de crise

Table 4.11 : Paramètres pour la configuration du troupeau.

Les ratios des trois espèce d'animaux ont été estimés à partir des os trouvés dans les vestiges, calibrés sur l'âge moyen à l'abattage (cf. par. 2.4.3). Le ratio bovin, qui détermine la taille du troupeau de chaque foyer domestique, est choisi sur la base d'estimations du nombre d'animaux possédés par une famille nucléaire du Néolithique Ancien Balkanique. Tous les autres paramètres concernent des valeurs biologiques ou des estimations qui ont été effectuées par des experts pour OBRESOC, et sont conservés car ils s'appliquent aux mêmes espèces d'animaux.

Chapitre 5 : Ajustement et validation du modèle

Une fois que le modèle OBRESOC a été adapté au contexte Balkanique, que les données météorologiques et environnementales ont été injectées, et que de paramètres réalistes ont été choisis, une série de simulations a été effectuée. Chaque exécution du modèle, dite *run*, représente un possible scénario de l'expansion des premiers agriculteurs dans les Balkans, et produit une grande quantité de données. Les simulations décrites dans cette thèse ont été réalisées avec la version du modèle nommée OBRESOCBEAN30112015. La liste des simulations effectuées avec la version finale du modèle est disponible en Annexe B ; de nombreuses autres simulations avaient été effectuées avec des versions intermédiaires pour tester le fonctionnement correct du modèle, mais elles ne sont pas traitées ici.

Les sorties du modèle sont déterminées par un grand nombre de paramètres : par conséquent, chaque combinaison de paramètres peut générer de résultats très différents. Il y a beaucoup d'éléments fixes : les données géo-environnementales et météorologiques, les règles des modèles partiels intermédiaires, certains paramètres fixés (valeurs biologiques en kilocalories des plantes et des animaux, taux de croissance des céréales cultivées, tables démographiques, etc.). Néanmoins, il y a aussi plusieurs paramètres qui sont issus d'estimations impossibles à vérifier avec exactitude ; la valeur qui représente l'estimation la plus appropriée n'est pas connue *a priori*. Chaque combinaison de paramètres donne un scénario différent de l'expansion des agriculteurs à travers les Balkans ; une analyse des sorties est nécessaire pour évaluer quel scénario, et donc quelle combinaison de paramètres, produit les résultats qui adhèrent le mieux aux données observées en archéologie.

Cette adhérence entre les données archéologiques et les données simulées par le modèle peut être mesurée avec l'approche "*Espéré – Observé*" où *Espéré* coïncide avec les données archéologiques, ce que l'on s'attend à voir produit par le modèle, et *Observé* consiste en les données simulées, celles qui est observées dans la simulation.

Avec cette approche, la différence entre ce qui est observé en archéologie et les données produites par la simulation peut être mesurée. Là où il y a une coïncidence ou une petite différence entre l'espéré et l'observé, le modèle a réussi à représenter correctement l'aspect en question : il ne s'agit pas d'une reproduction de la réalité, mais il en est une possible

explication (Epstein 2006). Si, au contraire, la différence est importante, elle implique un problème dans le modèle : soit il y a une erreur dans l'estimation des paramètres qui ont déterminé cette sortie, soit le modèle lui-même n'a pas été structuré correctement. Un large écart entre l'espéré et l'observé n'est pas forcément quelque chose de mauvais : au contraire, il peut donner de nouvelles idées et perspectives à la recherche archéologique, afin de comprendre et d'expliquer cette anomalie.

La difficulté de cette procédure est due à la nature des données archéologiques : ce qui est trouvé dans les fouilles n'est pas représentatif de ce que les individus avaient, ni de leur société. Seule une petite partie de leurs ordures est trouvée ; il s'agit souvent de ce qu'ils ne gardaient pas, comme des pots cassés ou des déchets de la fabrication d'outils. Le problème de l'archéologie est de savoir comment ces petites traces peuvent être représentatives du tout dont elles sont partie. Tout ce qui n'est pas matériel ne peut pas être trouvé : les institutions et les structures sociales sont pour la plupart invisibles. Les vestiges montrent une très petite portion de ce qui caractérisait la vie d'une société préhistorique, permettant des inférences très limitées. Il y a seulement une petite coïncidence entre les données archéologiques et ce qui composait effectivement une société archéologique ; le reste fait partie de l'ethnographie (Testart 2012).

Ce problème, qui afflige l'archéologie de la préhistoire en général, est encore plus accentué dans la région des Balkans, où la recherche archéologique a des limites, notamment à cause de la pénurie de sépultures et de l'absence de sites complètement fouillés. La presque totalité des sorties économiques et démographiques du modèle ne trouvent pas de termes de comparaison dans les fouilles : par exemple, il est impossible de tester la distribution par classes d'âge à la mort des individus et de formuler aucune hypothèse paléodémographique pour cette région. La majorité des données concernant la société (par exemple la taille et la structure du hameau, la composition des maisons, la taille du troupeau, le rendement agricole) sont en vérité représentées par des estimations ; leurs valeurs exactes ne sont pas connues. Il est aussi impossible de trouver de signaux de la Transition Démographique Néolithique dans le modèle ; de données concernant les populations Mésolithiques ne sont pas produites, car ce modèle simule l'expansion d'une société Néolithique qui a déjà passé cette phase de transition.

Malgré l'absence de données robustes sur la structure socio-économique de cette société, d'autres éléments qui permettent de mesurer l'adhérence des données archéologiques aux données simulées ont été trouvés. Si les données archéologiques sur la société Néolithique

sont problématiques, il existe par contre de données géochronologiques abondantes sur l'expansion Néolithique dans la région. On connaît les coordonnées géographiques d'un grand nombre de sites archéologiques, placés dans des séquences typo-chronologiques grâce aux datations au radiocarbone ou à leur attribution culturelle.

La plupart des tests de validation et d'ajustement du modèle sont concentrés sur des éléments de nature géographique :

-vérification que les zones d'expansion où la présence d'agriculteurs Néolithiques est attestée archéologiquement sont occupées par les agents dans le bon timing.

-comparaison de la configuration ponctuelle sur la carte géographique entre hameaux-pixels simulés et sites archéologiques, basée sur leur emplacement et sur leur position relative.

-analyse de la densité spatio-temporelle des villages Néolithiques trouvés en archéologie et des hameaux-pixels simulés par le modèle.

-comparaison entre la vitesse d'expansion du Néolithique observée en archéologie et celle produite par les agents.

La géographie est un élément objectif, qui a un rôle important dans un processus de colonisation. Une expansion géographique simulée qui montre une bonne correspondance avec l'expansion observée en archéologie représente un premier critère de validation.

En outre, même si les données archéologiques sont problématiques, des comparaisons en dehors du domaine de la géographie ont été faites, à partir des données disponibles :

-la troupeau simulé par le modèle a la même taille du troupeau estimé depuis les sources ethnographiques.

-l'importance de la cueillette dans l'alimentation au sein du modèle est comparable avec la proportion de plantes et de fruits récoltés pendant le Néolithique.

Une fois détectés quels sont les paramètres clés et les variables les plus affectées par leur variation, l'ajustement et la validation du modèle sont faits, en comparant les données simulées aux données archéologiques disponibles, afin de trouver quelle est la simulation qui donne l'écart le plus petit entre l'espéré et l'observé.

5.1 La stochasticité du modèle

Un problème qui afflige la modélisation multi-agents est la stochasticité. L'imprévisibilité de l'influence des variables, et l'aléatoire dans les tirages au sein de la simulation, ont comme conséquence que les modèles multi-agents peuvent être fortement stochastiques ; la même simulation, avec les mêmes paramètres, peut donner des résultats très différents. Cela est vrai en particulier pour des modèles comportant un nombre limité de paramètres, qui sont fortement stochastiques, et nécessitent une quantité très élevée de répétitions (par exemple Carrignon et al. 2015, Gallagher et al. 2015) ; mais d'autres modèles multi-agents sont différents. OBRESOC-BEAN est un modèle relativement peu stochastique : le choix des agriculteurs de coloniser une région plutôt qu'une autre sera très peu stochastique, mais plutôt déterminée par des critères d'optimum agricole finalisés à la survie des individus.

Néanmoins, la présence d'éléments stochastiques ne peut pas être ignorée ; beaucoup de processus du modèle sont déterminés par des tirages aléatoires. Dans une simulation qui concerne des centaines de milliers d'individus et qui se déroule sur plusieurs siècles, la stochasticité relative à la démographie est très faible ; par contre, elle peut être particulièrement élevée dans les simulation météorologiques. En effet, même si la météorologie suit une trajectoire historique estimée à partir des données polliniques, sa variabilité dépend d'un tirage aléatoire sur l'écart-type local, effectué à chaque saison. La météorologie influence fortement la vie des agriculteurs, en particulier quand des cas de famine et de disette se vérifient : la mort d'un grand nombre d'individus a comme conséquence le ralentissement de l'expansion géographique. Le modèle permet de bloquer le *random seed* relatif à la météorologie : toutes les simulations avec la même valeur de *random seed* auront les mêmes tirages météorologiques et, en conséquence, exactement les mêmes températures et précipitations ; de cette façon, la stochasticité du modèle est drastiquement réduite.

Pour évaluer dans quelle mesure la stochasticité météorologique affecte le modèle OBRESOC-BEAN, cinq simulations avec la même configuration de paramètres, mais avec *random seed* aléatoire, ont été effectuées (sim. de 63 à 67); elles sont contrastées à 5 simulations faites avec un *random seed* constant, et donc avec une météorologie fixée (sim. de 68 à 72).

De différentes sorties économiques et démographiques ont été prises : Taille de la population ; Distance entre apparentés ; Distance entre scissionnistes ; Nombre *Big Man* ; Individus touchés par catastrophes ; Mariages ; Nombre de bovins ; Kilocalories totales dans l'alimentation ; Ensemencement ; Récolte en automne ; Chasse ; Cueillette ; Gain animal en kilocalories.

Les moyennes de ces 13 variables données en sortie dans les cinq simulations avec météorologie fixée ont été comparées à celles des cinq simulations avec météorologie aléatoire à travers un test statistique t (Table 5.1). Tous les tests effectués donnent une valeur p supérieure au seuil d'acceptation de 0,05 ; selon les critères conventionnels, la différence entre météorologie fixée et aléatoire n'est pas considérée statistiquement significative. Donc, la variation de la météorologie influence seulement marginalement la structure démographique et économique des agents produite en sortie.

Sortie	P-value
Taille Population	0,8153
Distance Apparentés	0,9261
Distance Scissionnistes	0,6125
Nombre <i>BigMan</i>	0,7001
Individus touchés par catastrophes	0,5266
Mariages	0,8190
Nombre bovins	0,8136
Kilocalories totales dans l'alimentation	0,8144
Ensemencement	0,8048
Récolte en automne	0,8034
Chasse	0,9724
Cueillette	0,7798
Gain animal en kilocalories	0,4322

Table 5.1 : Tests t pour les moyennes de 13 variables entre 5 simulations avec météorologie fixée et 5 simulations avec météorologie aléatoire.

5.2 L'analyse de sensibilité

Les résultats générés par OBRESOC sont produits par une combinaison de 108 paramètres (cf. par. 4.3) ; même si beaucoup sont fixés (seuils de crises météorologiques, valeurs

biologiques de la croissance des plantes et de la reproduction des animaux, rendement en kilocalories des céréales et de la viande, etc.), il y en a un certain nombre pour lesquels seules des estimations sont disponibles, sans qu'on puisse déterminer avec certitude quelle est la valeur la plus appropriée. L'ajustement du modèle implique de nombreux tests en faisant varier ces paramètres ; néanmoins, les combinaisons sont potentiellement des milliers. Une simulation complète prend quelques heures : il est impossible de tester un grand nombre de paramètres, tout en devant se limiter à quelques combinaisons. Il est donc nécessaire d'identifier quels sont les paramètres clés du modèle, ceux qui ont une plus grande importance et influence sur les sorties ; les tests du modèle seront concentrés sur ces paramètres, en bloquant les autres qui sont moins influents. L'outil qui permet de trouver ces paramètres clé est l'analyse de sensibilité (Faivre et al. 2013).

L'analyse de sensibilité est une pratique utilisée pour explorer l'influence des différents inputs, c'est-à-dire les paramètres du modèle, sur les sorties de la simulation (Ginot et al. 2006). Grâce à cette analyse, les paramètres qui ont le plus d'importance dans les processus de la simulation peuvent être identifiés ; s'il y a une incertitude sur la valeur d'un paramètre, l'importance de cette incertitude peut être déterminée (Thiele et al. 2014). Au cas où les paramètres s'avèrent avoir une grande influence sur les résultats de la simulation, leur valeur doit être choisie attentivement, à partir d'estimations bien déterminées. Inversement, les autres paramètres peuvent être fixés à de valeur réalistes, sachant que leur influence sur les sorties du modèle est très modeste (Schmolke et al. 2010). Par conséquent, les tests peuvent être concentrés seulement sur les paramètres les plus importants, ce qui permet une exploration exhaustive du modèle sans devoir effectuer de milliers de simulations.

La procédure de l'analyse de sensibilité consiste, tout d'abord, dans le choix des paramètres à tester ; pour chaque paramètre, au moins deux valeurs possibles sont prises. Ensuite, une série de simulations est effectuée : à chaque simulation correspond une combinaison de valeurs des paramètres ; toutes les combinaisons possibles sont simulées. Pour l'analyse de sensibilité du modèle OBRESOC-BEAN, un échantillon de paramètres considérés comme importants a été choisi ; en particulier, ceux qui peuvent influencer directement le système agricole, le nombre d'agents produits et leur vitesse d'expansion. Leur valeurs sont réalistes, basées sur des inférences ethnoarchéologiques, et varient sur la base d'estimations possibles. Les paramètres, avec les valeurs testées, sont présentés dans la table 5.2. La description des paramètres a été donnée dans le paragraphe 4.4.

Paramètre	Valeur 1	Valeur 2
Nombre agents initiaux	150	300
Big Man (1 = oui, 0 = non)	1	0
Fumure/Ha	1	3
Production Max	600	1000
Proportion grains	0,75	0,85
Rayon Expansion	125	250
Ratio Bovin	1	0,5
Capacité Pixel	20*	25*

Table 5.2 : Les paramètres testés avec l'analyse de sensibilité.

* le paramètre *Quantité Big Man*, qui représente la capacité d'accueil d'un pixel s'il y a la présence d'un *Big Man*, est aussi fait varier, respectivement à 28,94 e 35, en suivant la formule $Quantité\ Big\ Man = 2 \sqrt{(Capacité\ Pixel)}$

Avec huit paramètres et deux valeurs possibles pour chacun il y a 256 combinaisons différentes de paramètres à tester, présentées en Annexe C. Pour des raisons de temps, ces 256 simulations ont été effectuées d'une façon partielle, sur 400 ans au lieu de 600 ou 800. Cet intervalle est considéré comme suffisant pour voir la sensibilité du modèle, en la durée de chaque simulation. En outre, ces simulation ne suivent pas les estimations météorologiques décrites au paragraphe 3.4.2, mais ont été effectuées avec une météorologie fixe. Le but est de n'avoir aucune influence de la stochasticité météorologique, en s'assurant que les différences dans les sorties sont dues uniquement à la variation des paramètres.

Une fois effectuée les simulations, des variables en sorties sont choisies : grâce à l'analyse de sensibilité, il est possible d'observer dans quelle mesure ces variables ont été influencées par la variation des paramètres. L'analyse de sensibilité a été effectuée avec le logiciel SaSAT, construit en Matlab, mais qui fonctionne d'une façon indépendante et est complètement gratuit (Hoare et al. 2008). L'analyse de sensibilité donne comme résultat des valeurs comprises entre 0 et 1 pour chaque paramètre, référées à chacune des variables en sortie, qui représentent le coefficient de corrélation entre la variable et le paramètre ; plus la valeur est élevée, plus le paramètre a eu d'influence sur la sortie.

Les variables en sortie qui ont été choisies pour l'analyse de sensibilité sont :

NbTotalMariages : nombre de mariages à l'année.

NbTotalPerson : nombre de personnes vivantes.

NbMaisons : nombre de foyers domestiques vivants.

NbHameaux : nombre de hameaux vivants.

TauxAccroissement : taux d'accroissement naturel du nombre total de personnes survivantes.

NbBigman : nombre de hameaux *Big Man*.

NbPersCatastrophe : nombre total de personnes touchées par une catastrophe.

DistMoyApparentes : grande moyenne de la distance euclidienne entre apparentés (frères/sœurs et cousins/cousines).

DistMoyScission : distance euclidienne moyenne des scissionnistes relativement à leurs foyers de départ.

AlimentationM : besoin alimentaire moyen en kilocalories au foyer domestique.

RecolteBrutM : récolte brut moyenne en kilogrammes au foyer domestique.

SemenceM : semences moyennes en kilogrammes déposées en automne et/ou printemps au foyer domestique.

SurfaceSemisAutM : surface ensemencée en automne moyenne en hectares au foyer domestique.

NbBovinsM : nombre moyen de bovins au foyer domestique.

ChasseM : quantité moyenne de viande chassée en kilocalorie au foyer domestique.

CueilletteAutM : cueillette moyenne en automne en kilocalorie au foyer domestique.

GainAnimalM : quantité moyenne de viande et lait en kilocalories, obtenues avec élevage et chasse, au foyer domestique.

L'analyse de sensibilité est effectuée sur la moyenne des sorties (fig. 5.1) pour prendre en compte le fonctionnement du système le long de toute la simulation, et sur la variance (fig. 5.2) pour voir comment la variabilité de ces sorties est impactée par le changement des paramètres.

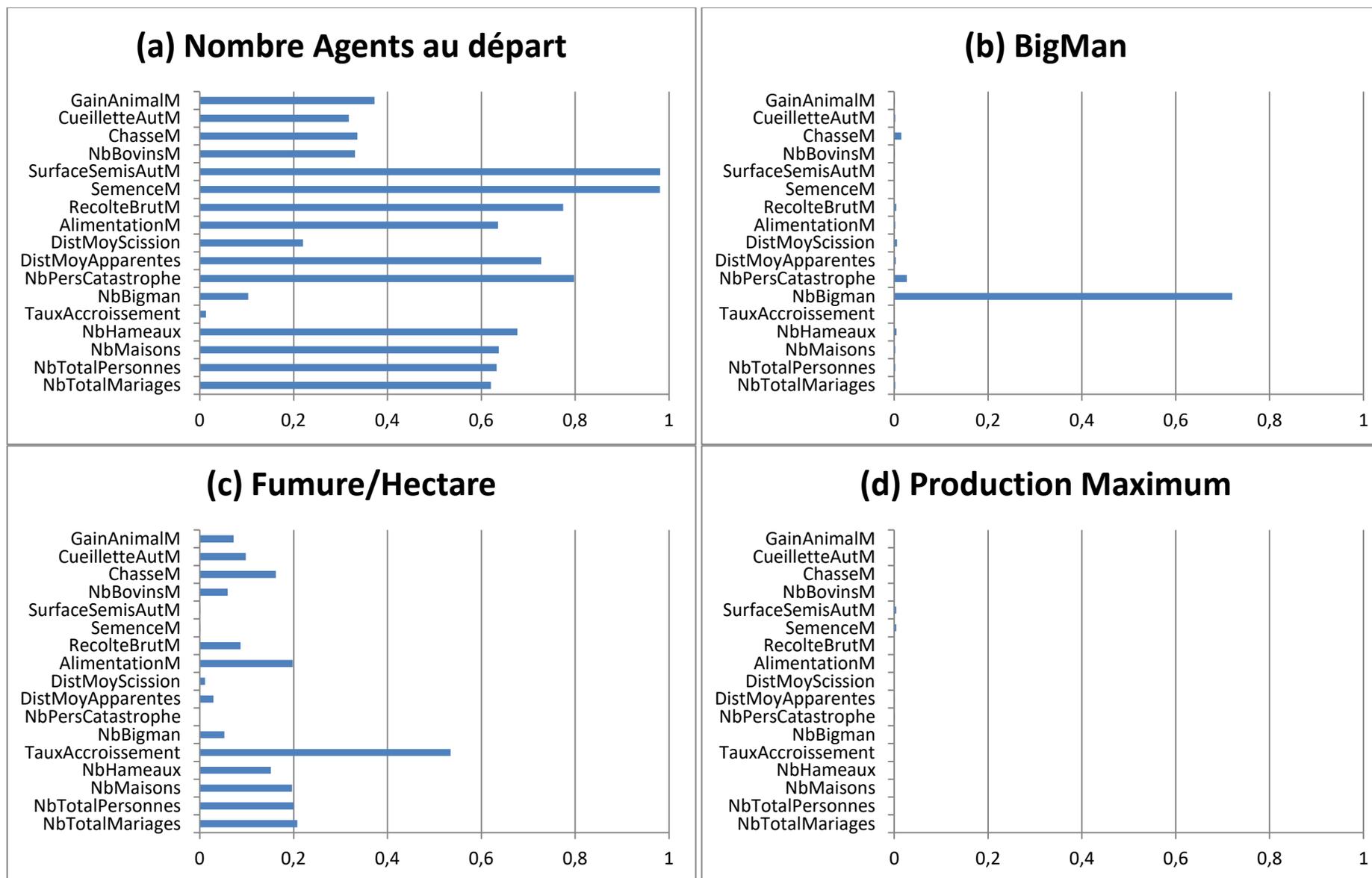


Figure 5.1 : Analyse de sensibilité sur la moyenne.

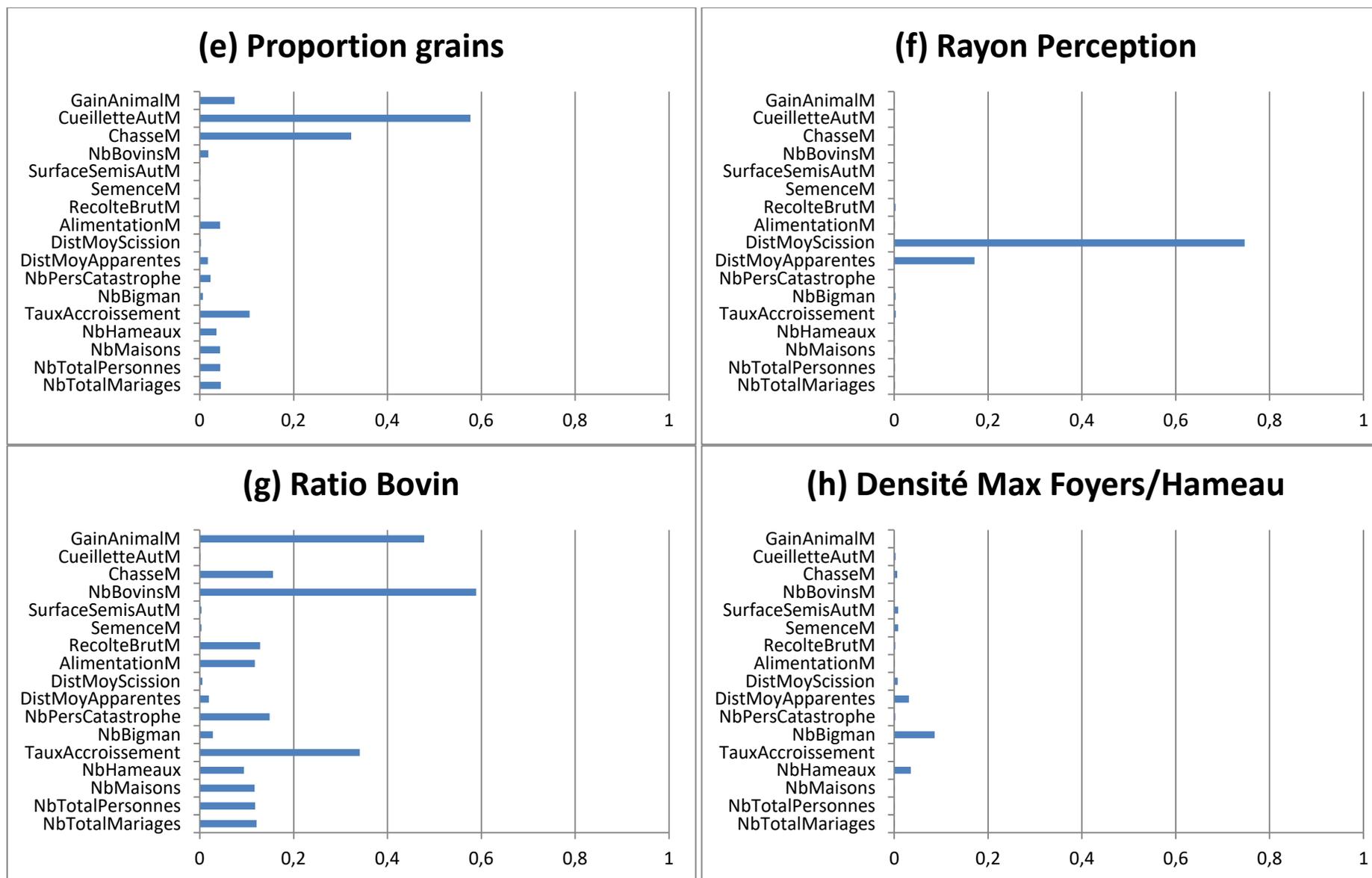


Figure 5.1 : Analyse de sensibilité sur la moyenne.

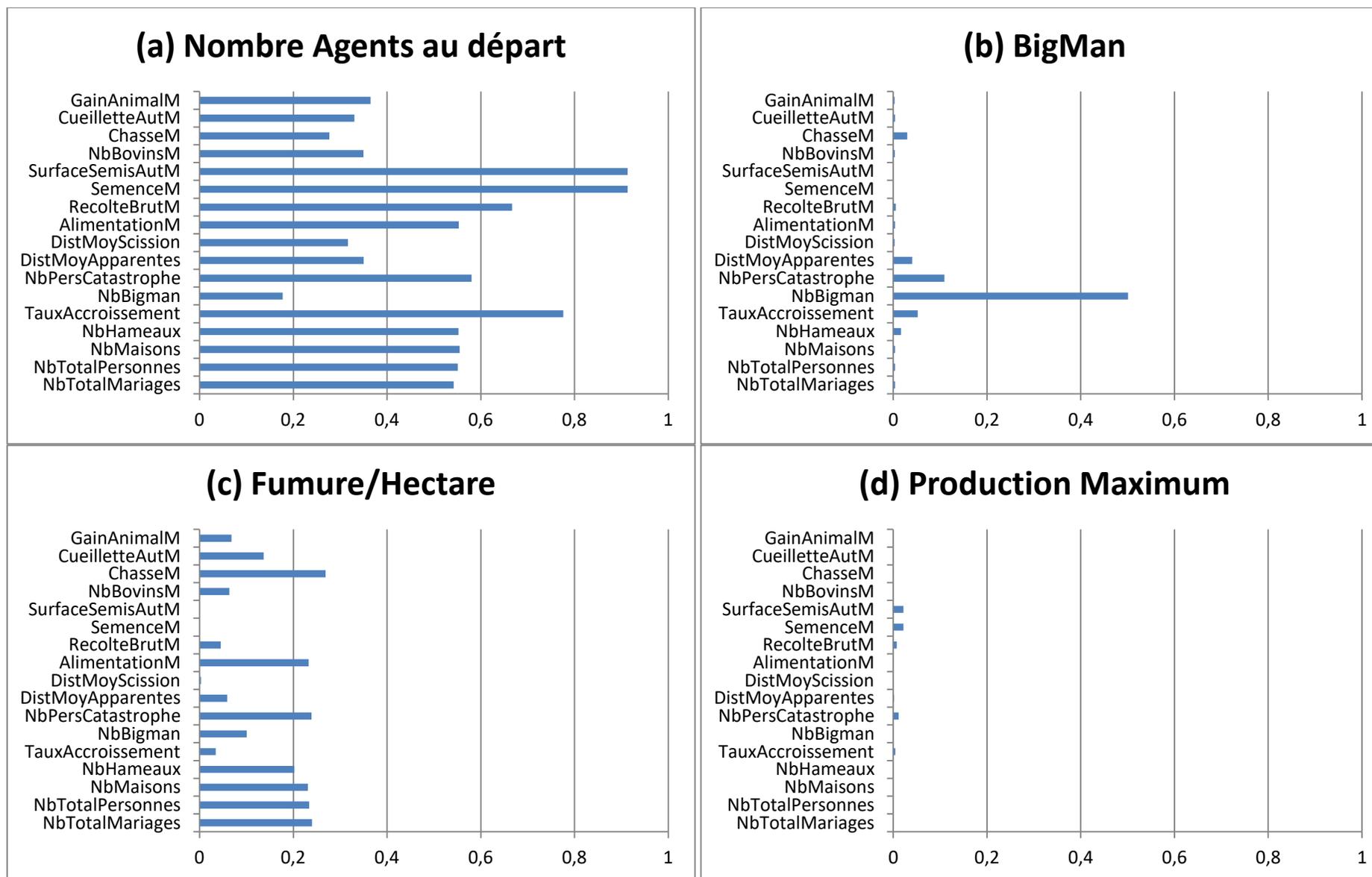


Figure 5.2 : Analyse de sensibilité sur la variance.

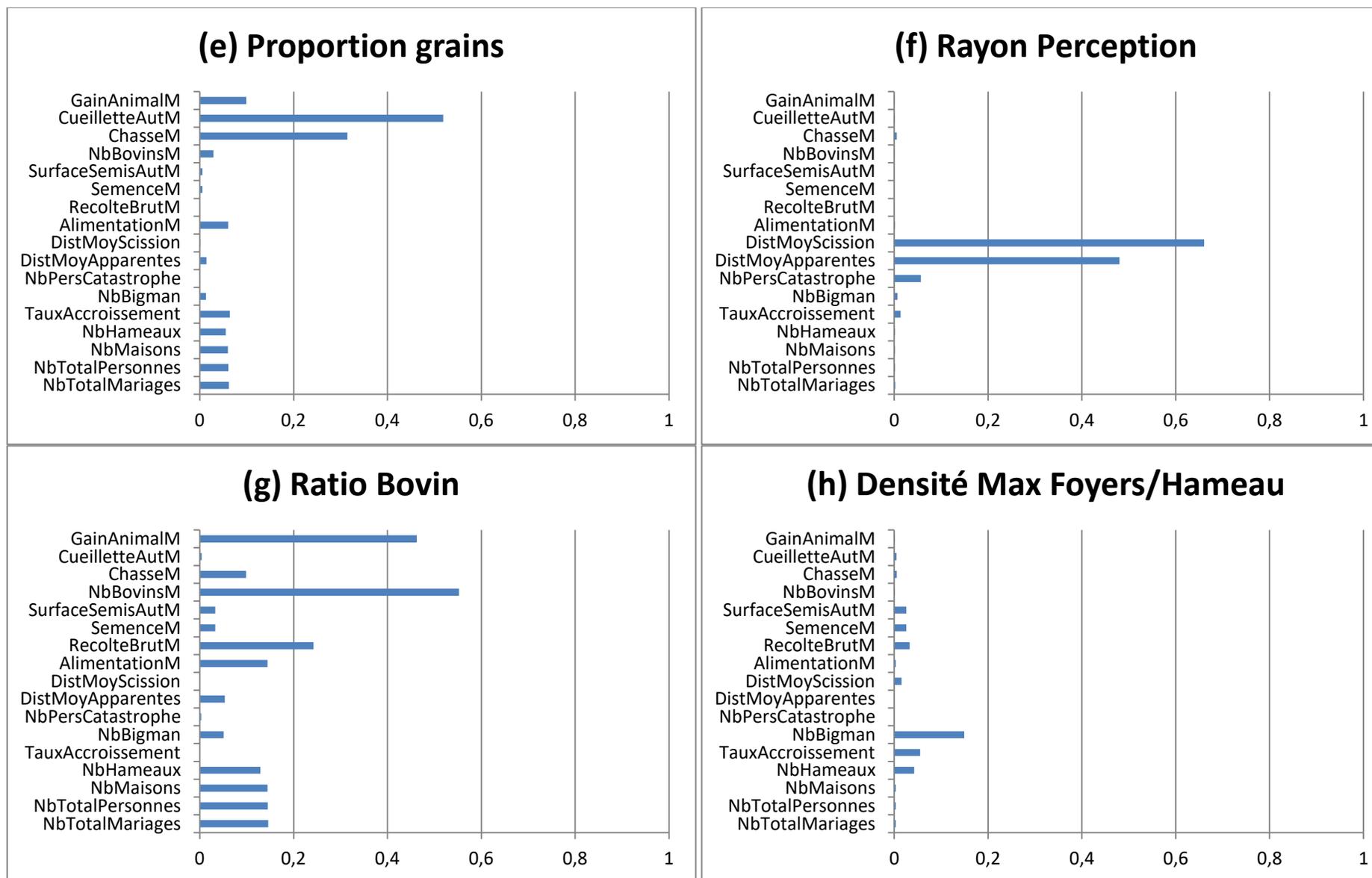


Figure 5.2 : Analyse de sensibilité sur la variance.

L'analyse de sensibilité montre la présence d'un paramètre ayant une influence largement supérieure aux autres : il s'agit du nombre d'agents au départ (fig. 5.1a et 5.2a). Le modèle est très sensible au nombre de couples qui sont initialisés en début de simulation ; en effet le nombre d'agents au départ détermine la quantité d'individus générés pendant toute la durée de la simulation, qui affecte inévitablement un grand nombre de sorties économiques et démographiques. Le nombre d'agents initiaux nécessite donc une estimation précise, qui n'est pas facile à cause des limites des données archéologiques qui ne permettent pas de savoir précisément combien de personnes se trouvaient dans la région pendant la période d'initialisation du modèle. En revanche, le modèle étant très sensible à ce paramètre, une estimation peut être trouvée par balayage, c'est-à-dire en essayant plusieurs valeurs pour ce paramètre. En effet, vue son énorme influence sur les sorties, seule une petite fourchette de valeurs donnera des configurations qui adhèrent bien aux données observées en archéologie ; les valeurs au-delà ou en deçà d'un certain seuil produiront des simulations aberrantes. Le paragraphe 5.4.1 est consacré à l'estimation du nombre d'agents au départ.

L'activation de l'option *Big Man* influence logiquement le nombre de *Big Man* produits par le modèle, mais ce paramètre n'a pas d'influence sur toutes les autres sorties économiques et démographiques (fig. 5.1b et 5.2b). D'autres analyses du modèle ont montré que l'influence de la présence des *Big Man* peut être détectée seulement dans des simulations où se vérifient des crises qui ont des conséquences importantes sur la population ; elles ne se sont pas produites dans les simulations effectuées pour l'analyse de sensibilité. Une autre situation où la présence d'un *Big Man* dévient visible est quand une sur-densification se produit ; cela est invisible dans les variables économiques et démographiques choisies pour cette analyse de sensibilité, mais pourrait être détecté dans des sorties différentes. En tout cas, ce paramètre a été fixé à 1 ; l'hypothèse est que des *Big Man* étaient présents, car les traces suggèrent la possibilité de la présence d'individus avec un statut supérieur (cf. paragraphe 2.9).

L'analyse de sensibilité sur la moyenne suggère que la fumure par hectare a une certaine influence sur le taux d'accroissement, avec sa valeur qui dépasse 0,5 (fig.5.1c). Cependant, cette influence est partiellement redimensionnée dans l'analyse de sensibilité sur la variance, car cette sortie ne montre aucune variabilité suite au changement de la valeur du paramètre (fig. 5.2c). En ce qui concerne les autres sorties, l'influence de ce paramètre est très modeste, avec toutes les valeurs situées en dessous de 0,2. Ce paramètre montre donc une certaine influence sur une seule sortie, le taux d'accroissement. Cependant, une observation spécifique des sorties ne permet pas de détecter une relation entre ceux deux éléments ; pour cette raison,

ce paramètre est fixé à une valeur réaliste issue de l'ethnographie régionale (1 vache per hectare).

La production maximale par hectare a une influence presque nulle sur toutes les sorties ; l'analyse de sensibilité montre que le modèle est totalement insensible à ce paramètre (fig. 5.1d et 5.2d). L'absence de sensibilité s'explique par un bug qui a été détecté dans le fonctionnement du modèle ; pour cette raison, le paramètre est fixé à 600 kg/ha, valeur réaliste issue de plusieurs estimations (cf. par. 2.2.3).

La proportion de grains a un effet assez marqué sur la cueillette ; l'analyse de sensibilité, à la fois sur la moyenne et sur la variance, donne une valeur de presque 0,6 pour cette sortie (fig. 5.1e et 5.2e). Ce paramètre indique le pourcentage de kilocalories obtenues depuis les grains sur le total nécessaire pour la survie ; il influence la cueillette car, en mangeant plus de céréales, les agents ont besoin d'une quantité limitée de plantes sauvages et de fruits supplémentaires. Au contraire, si le nombre de céréales mangées décroît, les agents doivent satisfaire leurs besoins alimentaires en intensifiant la cueillette.

Le rayon de perception pendant l'expansion détermine jusqu'à quelle distance les agents peuvent chercher des pixels favorables pour la colonisation. Il a des conséquences importantes sur la distribution géochronologique des sites, en influençant la vitesse de l'expansion ; l'analyse de sensibilité montre que ce paramètre influence la distance entre les foyers scissionnistes et leurs apparentés car, si l'on augmente le rayon de perception, les colonisateurs peuvent partir plus loin et accroître cette distance (fig. 5.1f et 5.2f). Ce paramètre sera repris lors de l'analyse de l'expansion géographique au paragraphe 5.4.2. En tout cas l'analyse de sensibilité montre que, au-delà des éléments liés à l'expansion géographique, le rayon de perception n'a aucune influence sur le système économique et démographique : toutes les autres sorties n'ont aucune sensibilité à ce paramètre.

Le ratio bovin/humain a une influence modeste sur plusieurs sorties, mais une forte influence sur deux d'entre elles : le gain, en termes de kilocalories, depuis les animaux, et le nombre de bovins dans le modèle (fig. 5.1g et 5.2g). Il s'agit de la conséquence du choix des paramètres : un ratio plus élevé comporte plus d'animaux, et cette abondance aura aussi une influence sur le régime alimentaire. Il faut ajouter que les autres animaux (caprins et porcins) sont déterminés, dans le modèle, sur la base des bovins présents ; le ratio bovin influence donc la taille et la composition de tout le troupeau, et est un paramètre clé pour la simulation des animaux.

Pour terminer, la densité maximale de foyers domestiques dans un hameau a une importance très marginale sur les sorties économiques et démographiques, avec une influence, quand même limitée, seulement sur le nombre de *Big Man* produits (fig. 5.1h et 6.1h). Le nombre de foyers domestiques dans un hameau est l'élément qui détermine l'émergence d'un *Big Man* ; modifier la quantité maximale de foyers changera aussi la possibilité de générer des *Big Man*.

Pour récapituler, l'analyse de sensibilité montre que le modèle a un paramètre extrêmement important : le nombre d'agents initiaux. La variation de ce paramètre a des effets très marqués sur de nombreuses sorties, et pour cette raison il nécessite une estimation précise. Les autres paramètres ont moins d'influence en termes généraux ; certains influencent des sorties spécifiques, tandis que d'autres semblent être très marginaux. Ces derniers (FumureHA, BigMan, NbHouse) sont par conséquent fixés sur des valeurs fondées sur des inférences archéologiques, anthropologiques et ethnographiques réalistes. D'autres paramètres (PropGrain, RatioBovin, RaidusExpansion) sont testés par balayage : en sachant qu'ils influencent des sorties spécifiques, il est possible de voir quelles valeurs de ces paramètres donnent comme résultat les sorties qui adhèrent le mieux à ce qui est observé en archéologie.

5.3 La détermination du modèle

En faisant de la modélisation multi-agents il y a le risque, pour le modèle, d'être sous-déterminé : c'est-à-dire que très peu de paramètres doivent expliquer beaucoup de sorties. Les résultats produits par des modèles de ce type ne peuvent pas être analysés d'une façon adéquate, puisqu'il est difficile de comprendre les éléments qui ont généré les processus observés (Railsback et Grimm 2012). Il y a aussi le risque inverse, moins commun, d'avoir un modèle surdéterminé, où beaucoup de paramètres sont utilisés pour expliquer très peu de sorties.

Le modèle OBRESOC-BEAN essaie d'échapper à la sous-détermination, dans la mesure permise par les données disponibles dans la région. Pour s'assurer que le scénario généré par le modèle est le produit des paramètres choisis, et non d'une combinaison aléatoire de ces valeurs, il faut identifier dans quelles sorties on peut voir l'effet des paramètres qui ont été choisis. Grâce à l'analyse de sensibilité effectuée, les paramètres clés ont été identifiés, ainsi

que les sorties qui sont déterminées par eux. Les paramètres qui se sont avérés être les plus importants sont le nombre d'agents initiaux, le rayon de perception, le ratio bovin et la proportion de grains consommés. Les premiers deux paramètres rentrent dans le cadre de l'expansion géographique, qui est influencée par une série d'éléments, tandis que le ratio bovin et la proportion de grains influencent des sorties plus spécifiques.

L'expansion géographique est l'élément qui fera l'objet des principaux tests, grâce à la large base de données qui inclut un grand nombre de sites archéologiques géo-référencés. Les datations au radiocarbone et l'attribution culturelle ont permis d'obtenir la distribution géographique et chronologique des sites et de la comparer avec les résultats de la simulation, en comblant la pénurie d'informations sur la structure socio-économique dans les vestiges archéologiques. Au sein de la problématique de la détermination du modèle, il faut comprendre par quoi cette expansion est déterminée dans le modèle.

L'expansion géographique est concernée par plusieurs éléments ; parmi eux, il faut citer d'abord les variables contributives météorologiques et la fertilité pédologique. Les agents iront toujours coloniser les pixels les plus favorables pour l'agriculture, en suivant ce qui est déterminé par la carte de *best patch*. Les crises météorologiques peuvent avoir un impact sur l'expansion, car le décès d'un grand nombre d'individus provoquera un ralentissement de leur avancée. Toutes ces données environnementales, néanmoins, sont fixées ; on ne le fait pas varier dans chaque simulation afin de tester des scénarios différents. En effet, la carte de *best patch* est inchangée pendant toute la durée de la simulation. La trajectoire météorologique pour le Néolithique Ancien des Balkans et les seuils de crises sont fixés respectivement à des estimations basées sur des données polliniques et à des observations météorologiques historiques. Les typologies de sols sont aussi fixes ; elles ne font pas partie des paramètres modifiables. Tous ces éléments ont donc une influence déterminante sur l'expansion géographique des agents, mais, une fois qu'ils ont été estimés et injectés dans le modèle, ils restent fixes et ne varient pas à chaque simulation.

L'influence du nombre d'agents initiaux sur une grande quantité de sorties du modèle a émergé depuis l'analyse de sensibilité. Ce paramètre influence aussi l'expansion, car un nombre élevé d'agents au départ entraîne une croissance plus élevée de la population et la conséquente rapide saturation des zones de *best patch*, en forçant les agents à partir pour coloniser ailleurs. Inversement, avec un nombre faible d'agents initiaux, la population augmentera très lentement, et les agents resteront confinés longtemps dans les zones de départ

avant de les saturer et de partir coloniser ailleurs ; par conséquent, l'expansion sera lente. Le nombre d'agents initiaux est donc d'importance capitale pour l'expansion géographique des hameaux-pixels.

Un autre paramètre qui influence la vitesse d'expansion, comme cela émerge depuis l'analyse de sensibilité, est le rayon de perception. Une valeur élevée permet aux agents d'aller coloniser plus loin ; par contre, un rayon de perception court les oblige à s'arrêter dans des zones plus proches. Ce paramètre est ajustable avec une mesure de la vitesse d'expansion, en comparant celle observée en archéologie, à partir des périodisations culturelles et des dates au radiocarbone, avec celle produite par la simulation.

Il y a un autre élément qui influence l'expansion : elle est déterminée implicitement par la densité maximale que les agents peuvent atteindre dans un supercarré. Plus ils peuvent accroître la densité, plus l'expansion sera lente, car elle se bloquera dans certaines zones de *best patch*. Si les agents se trouvent déjà dans la zone la plus favorable à l'agriculture au sein de leur rayon d'expansion, ils n'ont aucune raison de partir coloniser ailleurs, sauf si cette zone est saturée. Le paramètre qui détermine la densité est le pourcentage du supercarré qui peut être occupé par les agents (en conditions normales et en condition de *Big Man*). Pour trouver la valeur optimale, la densité spatio-temporelle des villages Néolithiques trouvés en archéologie est comparée à celle des hameaux-pixels produits par le modèle. Même si la valeur de ce paramètre est suggérée par l'archéologie, plusieurs estimations se sont avérées possibles ; les valeurs qui donnent l'écart le plus petit entre l'espéré archéologique et l'observé simulé représentent le meilleur ajustement.

La distribution géochronologique des hameaux-pixels, et les paramètres qui la déterminent, rentrent dans la catégorie de l'expansion géographique, et sont testables grâce aux données archéologiques géo-référencées et placées dans des séquences typo-chronologiques. Deux autres paramètres importants ont émergé depuis l'analyse de sensibilité : le ratio bovin, qui détermine la taille et la composition du troupeau ; et la proportion des grains consommés sur le total de la récolte, qui a un effet sur la cueillette. Ces deux éléments sont plus difficilement testables et vérifiables, mais les données archéologiques et ethnographiques peuvent donner des suggestions.

Même si la proportion des divers animaux dans le troupeau est donnée en paramètre, et si donc la composition du troupeau est virtuellement choisie par le modélisateur, la taille totale du troupeau dépend du ratio entre les bovins et les humains, qui n'est pas connu *a priori*. Le

troupeau simulé par le modèle est ajusté afin d'avoir une taille et composition similaire à ce qui est estimé depuis les sources ethnoarchéologiques.

Enfin, l'analyse de sensibilité a montré que la proportion des grains a un impact sur la cueillette. Une comparaison est extrêmement compliquée, car un calcul précis de l'apport effectif de la cueillette dans le Néolithique Ancien des Balkans est impossible (cf. par. 2.3.2) ; cependant, des sorties du modèle qui se trouvent dans le même ordre de grandeur que les estimations archéologiques peuvent donner des indications sur la validité du modèle. Une valeur correcte de ce paramètre doit produire une cueillette simulée qui a une importance comparable à celle qui est estimée pour les agriculteurs de la région à partir des observations archéologiques.

La table 5.3 présente un résumé de la détermination du modèle, avec les éléments qui sont testés dans la comparaison entre l'espéré archéologique et l'observé simulé. Les tests utilisés seront décrits dans les paragraphes suivants.

Élément	Déterminé par	Testé avec
Expansion géographique	Fertilité des sols	Fixée
	Météorologie	Fixée
	Nombre Agents initiaux	Procruste
	% supercarré occupé	Densité (Thessalie Orientale)
	Rayon Perception	Vitesse d'expansion (régression <i>dist vs time</i>)
Taille du troupeau	Ratio Bovin	Comparaison avec sources ethnoarchéologiques
Céréales/cueillette	Proportion Grains	Comparaison avec données archéologiques

Table 5.3 : La détermination du modèle.

5.4 L'expansion géographique

Les problèmes liés aux traces archéologiques ont déjà été mis en évidence ; une comparaison entre l'espéré et l'observé est très difficile vue la pénurie d'éléments à tester. Très peu d'informations sur la vie et la structure d'une société préhistorique peuvent être obtenus à partir de ce qui est trouvé dans les fouilles ; même si d'inférences ethnoarchéologiques ont permis de construire le modèle et d'en estimer les paramètres, valider les sorties socio-économiques est plus compliqué. Cependant, il existe un élément pour lequel une quantité plus élevée d'informations est disponible : il s'agit de l'expansion géographique. Il y a une relative abondance de sites archéologiques dont la localisation géographique et la séquence typo-chronologique d'appartenance sont connues ; plusieurs façons de tester l'expansion géographique du modèle sont possibles.

Ce paragraphe est donc consacré au test géographique du modèle, qui consiste en la comparaison entre l'emplacement géographique et chronologique des hameaux-pixels simulés par le modèle et celui des sites archéologiques fouillés. Le but est de trouver quelle est la configuration de paramètres qui produit un scénario d'expansion simulé le plus similaire à ce qui est observé en archéologie.

5.4.1 Le nombre d'agents initiaux

L'analyse de sensibilité a montré que le modèle est extrêmement sensible au nombre d'agents initiaux. L'effet de ce paramètre ne se limite pas aux sortie démographiques et économiques, mais il influence aussi la vitesse de l'expansion. En effet, un nombre plus élevé d'agents provoquera la saturation plus rapide des meilleures zones de *best patch*, et en conséquence un incrément de cette vitesse.

Pour cette raison, le nombre d'agents initiaux est considéré comme un paramètre clé, qui nécessite une estimation très précise. Néanmoins, une estimation sur base archéologique est très incertaine, puisqu'il est impossible de connaître le nombre d'individus qui ont atteint la côte Egéenne de la Grèce avant 6400 BC. Le nombre total de sites étant inconnu, et la plupart

d'entre eux étant connus seulement par des ramassages de surface, une estimation du nombre total des individus est complexe. Perles (2001) a estimé qu'une population initiale de 200 individus en Thessalie Orientale aurait été suffisante pour produire, dans les 500 années suivantes, les vestiges archéologiques qui sont aujourd'hui observés. Même si la Thessalie Orientale a été très bien fouillée et prospectée, cette estimation n'est issue d'aucun modèle, mais est faite simplement sur l'hypothèse d'un taux d'accroissement constant. En outre, il y a d'autres régions qui ont été atteintes par les premiers agriculteurs dans la même période ; il faudrait donc ajouter d'autres estimations pour les colonisateurs qui sont arrivés en même temps en Macédoine grecque et en Thrace, mais elles ne sont pas connues. Ces données sont donc considérées insuffisantes pour les buts de cette modélisation ; en tout cas, ce que Perles (2001) suggère est qu'un nombre relativement faible d'individus pourrait avoir été suffisant pour produire le patron de colonisation observé dans la région.

Le modèle multi-agents permet de tester cette hypothèse, à travers les différents scénarios produits selon le nombre d'agents au départ qui est choisi. Ce paramètre étant très sensible, il y a un large spectre de valeurs qui donnent des résultats aberrants en termes d'expansion, et qui peuvent donc être exclus, tandis que seulement un nombre limité d'estimations de ce paramètre peut être considéré valide. Les valeurs des paramètres qui produisent des sorties qui adhèrent aux données archéologiques peuvent être considérées comme des possibles estimations du nombre de couples au départ. Le nombre d'agents initiaux n'est pas le seul paramètre qui influence l'expansion ; les autres paramètres (densité au supercarré et rayon d'expansion) sont estimés séparément, et leur ajustement est décrit dans les paragraphes suivants.

Certaines simulations donnent des résultats aberrants en termes d'expansion : il n'y a besoin d'aucun test spécifique pour voir qu'elles ne sont pas conformes à ce qui est observé en archéologie. Par exemple, avec 50 couples au départ, les agents, en fin de simulation, n'auront atteint que la Serbie Méridionale, avec une totale absence d'occupation en Hongrie du Sud, Serbie du Nord et Roumanie (fig. 5.3 a-b) ; le nombre d'agents est sans doute trop faible, et leur expansion est trop lente. De la même façon, une simulation avec 300 agents au départ est trop rapide : la Roumanie et la Serbie du Nord sont déjà atteintes au $t = 400$ (6.000 BC), alors que cette occupation était attendue plus tardivement (fig. 5.3 c-d).

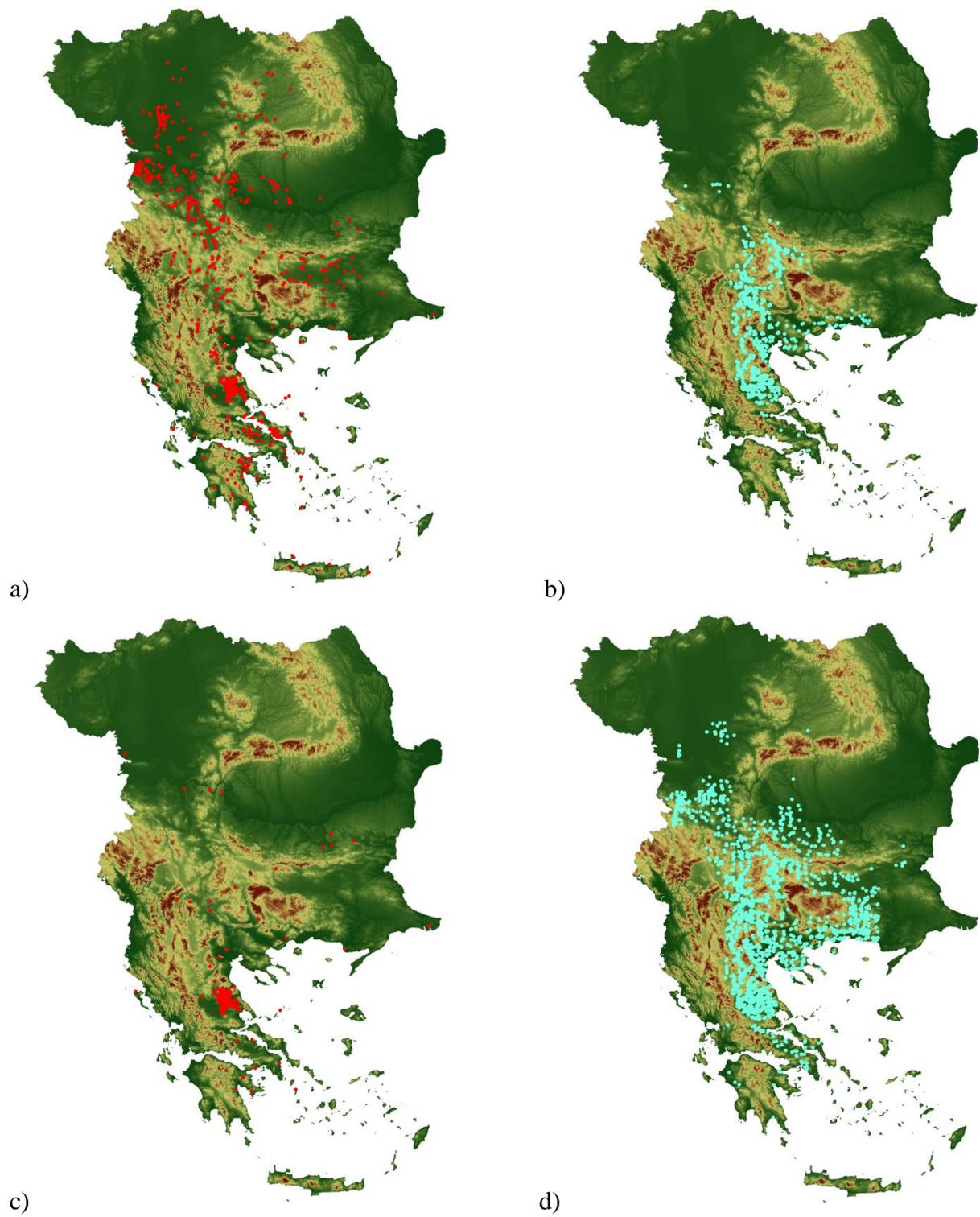


Figure 5.3 : Données archéologiques (a) et simulées (b) avec 50 couples au départ au temps = 600 ; données archéologiques (c) et simulées (d) avec 300 couples au départ au temps = 400.

Seules les simulations qui donnent des résultats conformes à ce qui est observé en archéologie ont été testées ; les simulations avec un nombre d'agents au départ qui produit une expansion extrêmement rapide ou trop lente sont exclues *a priori*. Les valeurs d'agents initiaux comprises entre 100 et 250 couples produisent des sorties qui s'avèrent acceptables du point de vue géochronologique.

Dans la figure 5.4 est présentée la configuration des hameaux-pixels après 200 ans de simulation, selon différents nombres d'agents au départ ; la configuration après 400 ans est présentée en figure 5.5 et celle après 600 ans en figure 5.6. Les hameaux-pixels montrés sont tous ceux qui sont vivants à cette date, plus ceux qui sont morts pendant la période considérée. Ces expansions sont comparées avec celles observées en archéologie présentées dans le paragraphe 3.1.2, afin d'avoir un aperçu graphique immédiat des données. Même si les densités sont différentes, car un nombre plus élevé de couples au départ produit une plus grande quantité d'agents, les expansions géographiques résultantes sont similaires : les zones où il y a une présence attestée en archéologie sont occupées par les agents dans un timing correct. Pour établir quelle est la meilleure configuration, une technique permettant une mesure précise de ce degré de similarité a été adoptée.

La méthode choisie pour tester quel nombre d'agents initiaux produit la configuration la plus adhérente à la réalité observée archéologiquement est l'analyse Procruste (Gower 1975, Lalouel 1980, Bocquet-Appel 1984). Cette technique, introduite initialement en biologie et en paléontologie, permet de comparer la forme de deux objets, en mesurant leur degré de coïncidence ; elle se base sur une mesure de la localisation des points ainsi que de leur position relative. Bien qu'appliquée normalement dans d'autres domaines, cette technique a déjà été employée pour comparer la distribution géographique de deux configurations de points (Wang et al. 2010).

a)



b)



c)



d)

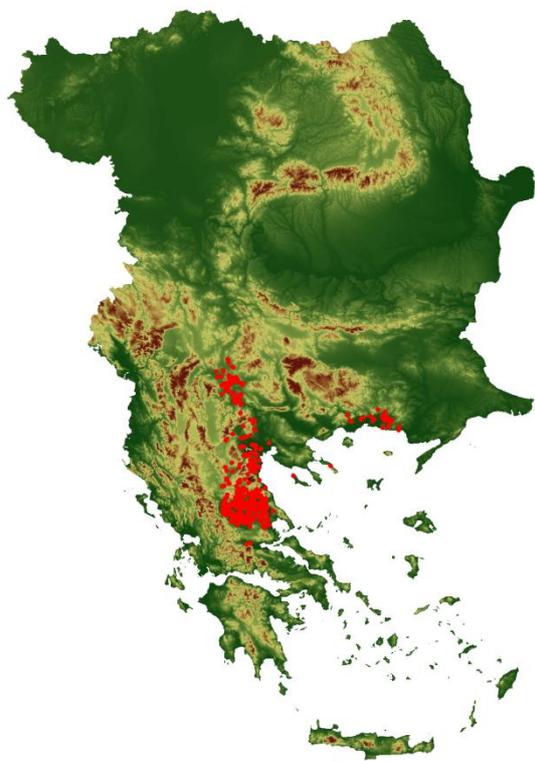
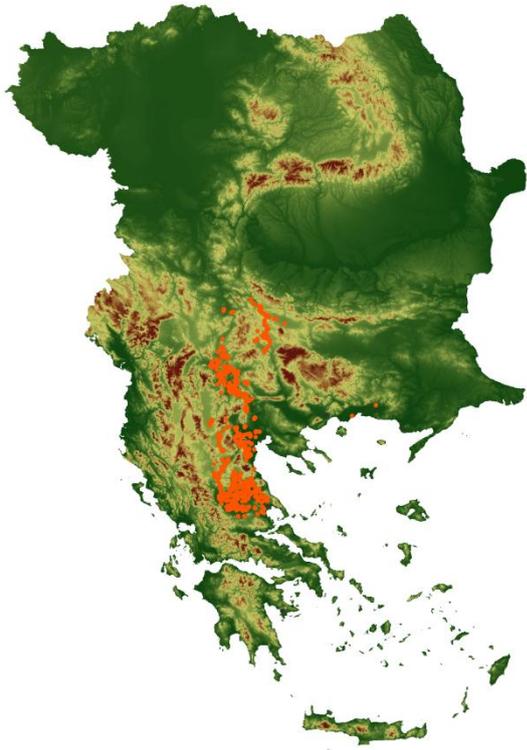
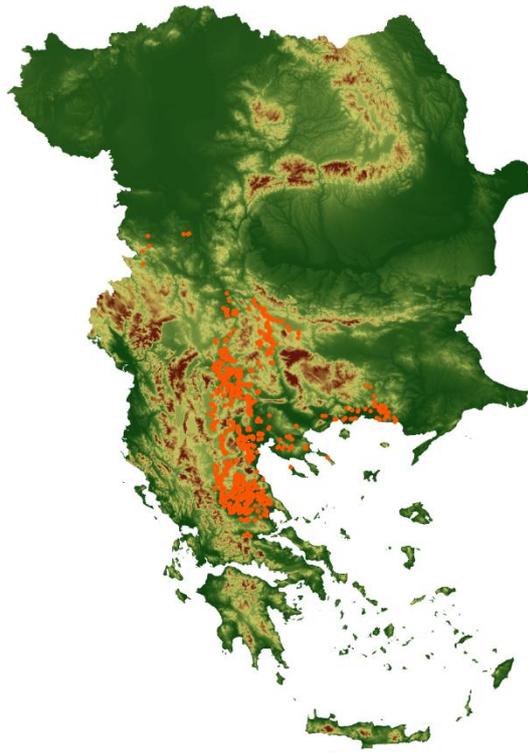


Figure 5.4 : Expansion au temps = 200 avec 100 (a), 150 (b), 200 (c) et 250 (d) agents au départ.

a)



b)



c)



d)

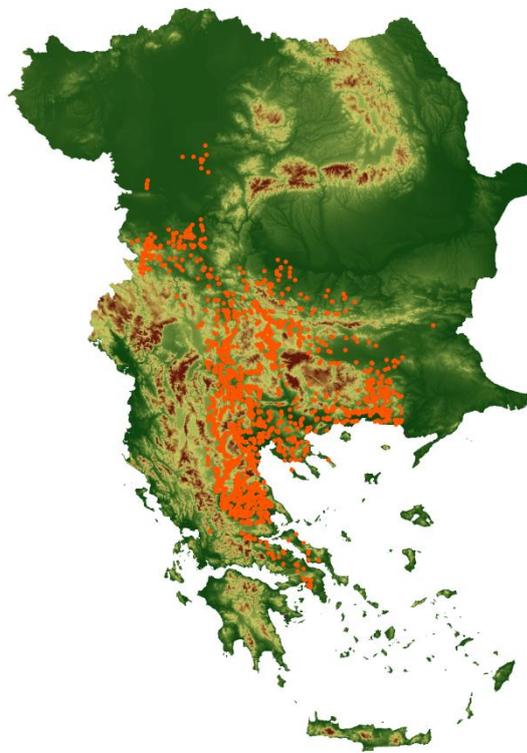
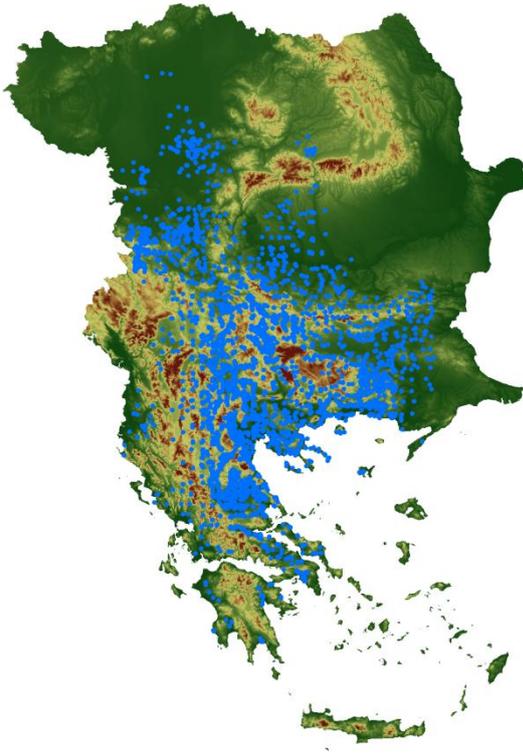
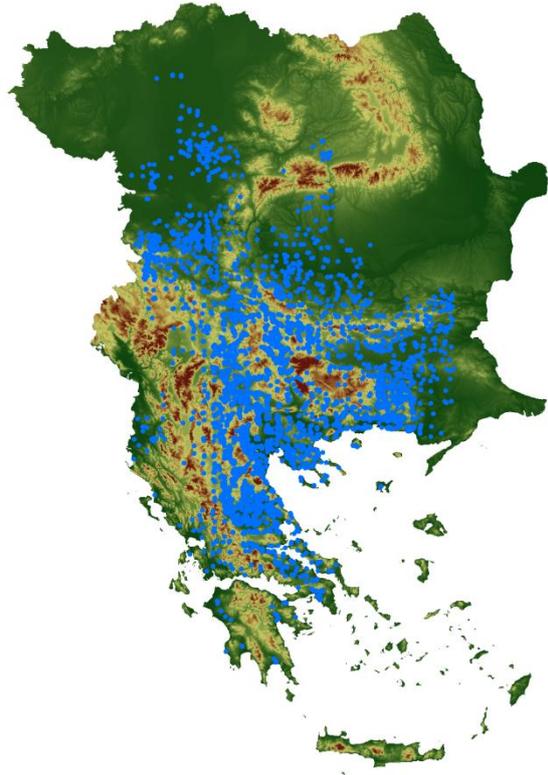


Figure 5.5 : Expansion au temps = 400 avec 100 (a), 150 (b), 200 (c) et 250 (d) agents au départ.

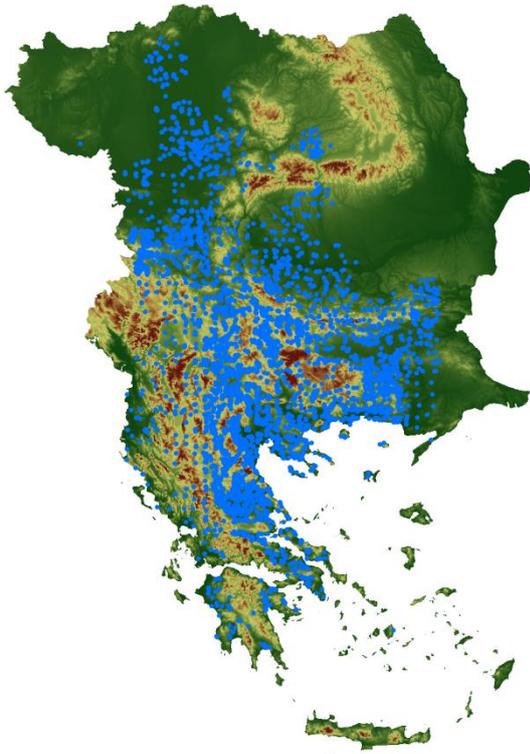
a)



b)



c)



d)

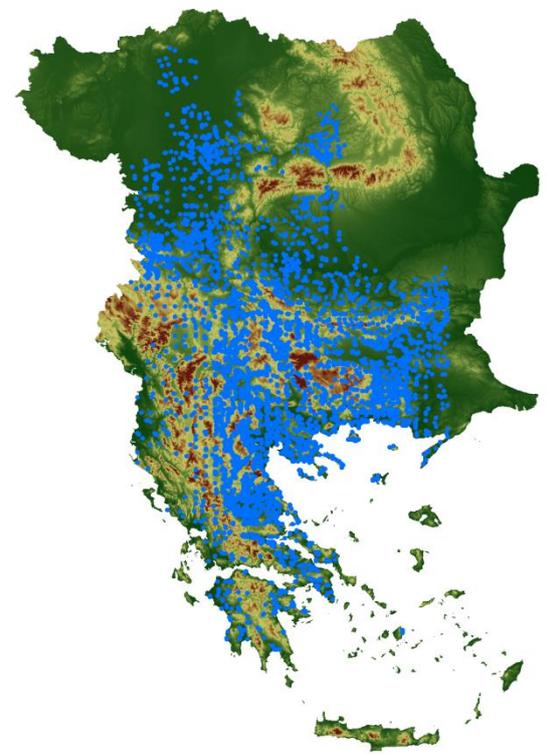


Figure 5.6 : Expansion au temps = 600 avec 100 (a), 150 (b), 200 (c) et 250 (d) agents au départ.

La technique Procruste est ici brièvement passée en revue. Deux matrices de points sont données, $E = (X_i, Y_i \dots X_n, Y_n)$ et $O = (X_i, Y_i \dots X_n, Y_n)$, où E correspond aux coordonnées géographiques des sites archéologiques espérés (observés en archéologie) et O correspond aux coordonnées géographiques des hameaux-pixels observés (produits par la simulation). Les deux matrices peuvent être vues comme deux cartes géographiques différentes qui décrivent le même phénomène, mais avec deux jeux de coordonnées différents (Wang et al. 2010). L'analyse Procruste vise à trouver la transformation qui produit la configuration spatiale où les distances entre les points $d(X_e, Y_e; X_o, Y_o)$ sont les plus petites possibles. La distance totale entre les points est calculée pour un nombre élevé de permutations, afin de trouver la permutation avec la moindre somme des carrés des distance entre les points. L'ajustement est indiqué par la *statistique de Procruste*, qui est obtenue par une standardisation entre 0 et 1 de cette distance, où une valeur faible indique une petite distance et donc une similarité élevée entre les deux configurations de points. Cette similarité peut être évaluée avec le coefficient de corrélation dans la permutation Procruste.

La superposition de Procruste est effectuée à travers une translation, rotation et mise à l'échelle des objets ; la table E avec les données archéologiques reste fixe, et la table O avec les données simulées est l'objet des permutations. Dans une analyse Procruste, deux cercles seront toujours considérés comme coïncidents car ils ont la même forme, indépendamment de leur taille effective. De même, l'expansion géographique des agents simulés a toujours une forme d'ellipsoïde : même si deux distributions ont une extension visiblement différente, elles seront considérées comme similaires dans une comparaison de leur forme. Pour cette raison, une "*analyse Procruste partielle*" a été effectuée, où l'échelle a été fixée à 1 ; les deux configurations de points sont simplement translattées et mises en rotation, mais non transformées en termes métriques, et les distances sont donc conservées.

L'analyse Procruste nécessite que les deux matrices aient un nombre égal de points, car chaque point espéré est couplé avec un point observé. Les sites archéologiques étant présents en quantité largement inférieure aux hameaux-pixels simulés, un nombre de hameaux-pixels égal au nombre total de sites archéologiques est tiré aléatoirement sur la distribution. Le caractère aléatoire du tirage provoque des différences dans les résultats au sein de la même simulation OBRESOC-BEAN : afin d'en réduire la stochasticité, cinq tirages sont effectués pour chaque simulation avec un nombre différent d'agents au départ (table 5.4). Les résultats du test Procruste, avec la moyenne des quatre simulations à différents intervalles de temps,

sont montrés en table 5.5. L'analyse a été effectuée sur 999 permutations, faites par le logiciel statistique R (<https://www.r-project.org/>).

100agents	t = 200	t = 400	t = 600
tirage1	0,9102	0,9176	0,9942
tirage2	0,9163	0,8905	0,9942
tirage3	0,9265	0,9246	0,9939
tirage4	0,8773	0,9142	0,9943
tirage5	0,9212	0,9235	0,9931
moyenne	0,9103	0,91408	0,99394

150agents	t = 200	t = 400	t = 600
tirage1	0,9412	0,9565	0,9934
tirage2	0,9747	0,9551	0,9943
tirage3	0,9665	0,9687	0,9947
tirage4	0,9092	0,9566	0,9949
tirage5	0,9694	0,9467	0,9947
moyenne	0,9522	0,95672	0,9944

200agents	t = 200	t = 400	t = 600
tirage1	0,8823	0,9514	0,9951
tirage2	0,8851	0,9402	0,995
tirage3	0,8983	0,9573	0,9949
tirage4	0,9326	0,9543	0,9949
tirage5	0,9076	0,9627	0,9954
moyenne	0,90118	0,95318	0,99506

250agents	t = 200	t = 400	t = 600
tirage1	0,913	0,9577	0,9956
tirage2	0,9354	0,9432	0,9944
tirage3	0,8882	0,9583	0,9942
tirage4	0,9018	0,9537	0,9951
tirage5	0,8655	0,9467	0,9948
moyenne	0,90078	0,95192	0,99482

Table 5.4 : Coefficients de corrélations de l'analyse Procruste entre la distribution géographique des sites archéologiques et celle des hameaux-pixels simulés, pour quatre simulations OBRESOC-BEAN différentes.

Temps	t200	t400	t600
Nb Agents			
100	0,9103	0,91408	0,99394
150	0,9522	0,95672	0,9944
200	0,90118	0,95318	0,99506
250	0,90078	0,95192	0,99482

Table 5.5 : Coefficients de corrélation moyens de cinq réplifications de l'analyse Procruste entre la distribution géographique des sites archéologiques et celle des hameaux-pixels simulés, à différents temps de l'expansion.

En fin de simulation, c'est-à-dire au temps 600, les coefficients de corrélation sont, dans les quatre simulations, extrêmement élevés ; il n'y a pas une simulation qui s'avère clairement meilleure que les autres, car elles sont toutes très adhérentes aux données archéologiques. La raison est que, en fin de simulation, la région a été presque complètement colonisée ; en particulier, les zones les plus favorables de *best patch* sont totalement occupées. Le degré de correspondance élevé produit par chaque simulation s'explique par la saturation de l'espace géographique : s'il y a un nombre d'agents suffisant pour coloniser toutes les zones de *best patch*, la configuration spatiale en sortie coïncidera toujours avec celle observée en archéologie, où la large majorité des sites est située dans les mêmes zones de *best patch*. Une fois que la colonisation de la région est complète, les configurations géographiques de points sont très similaires, même si les densités diffèrent.

A cause de cette coïncidence en fin de simulation, d'autres analyses sont effectuées à des moments intermédiaires, aux temps 400 (6.000 BC) et 200 (6.200 BC) de la simulation. De cette façon, le degré de correspondance en différentes phases de l'expansion est testé. Ces intervalles ont été choisis sur la base de la périodisation suggérée par Demoule (à paraître) ; d'intervalles plus flexibles auraient pu être obtenus en utilisant seulement les dates au radiocarbone, mais la quantité de sites à tester aurait été beaucoup plus limitée.

Au temps 400, le coefficient de corrélation est plus bas qu'au temps 600, mais reste néanmoins très élevé, surtout pour les simulations avec 150, 200 et 250 agents au départ ; par contre, avec 100 agents au départ, la coïncidence est plus faible. Dans cette simulation l'absence presque totale de hameaux-pixels en Grèce Occidentale, Macédoine et Thrace pourrait expliquer la différence ; au contraire les trois autres simulations sont correctes et très similaires entre elles.

Au temps 200, l'écart entre les quatre simulation devient plus remarquable. Les données archéologiques montrent que l'expansion à cette date était limitée à la Grèce égéenne, sans

atteindre l'actuelle république de Macédoine. Cependant, les simulations avec 200 et 250 agents au départ anticipent cette expansion ; pour cette raison, leur corrélation est plus faible. La simulation avec 100 agents a très peu d'agents présents en dehors de la Thessalie. Le test Procruste suggère donc qu'au temps 200 (6.200 BC) la simulation avec 150 agents au départ a plus d'adhérence à la configuration spatiale des sites archéologiques.

Le graphe avec les coefficients de corrélations des 4 simulations dans le temps est montré en figure 5.7.

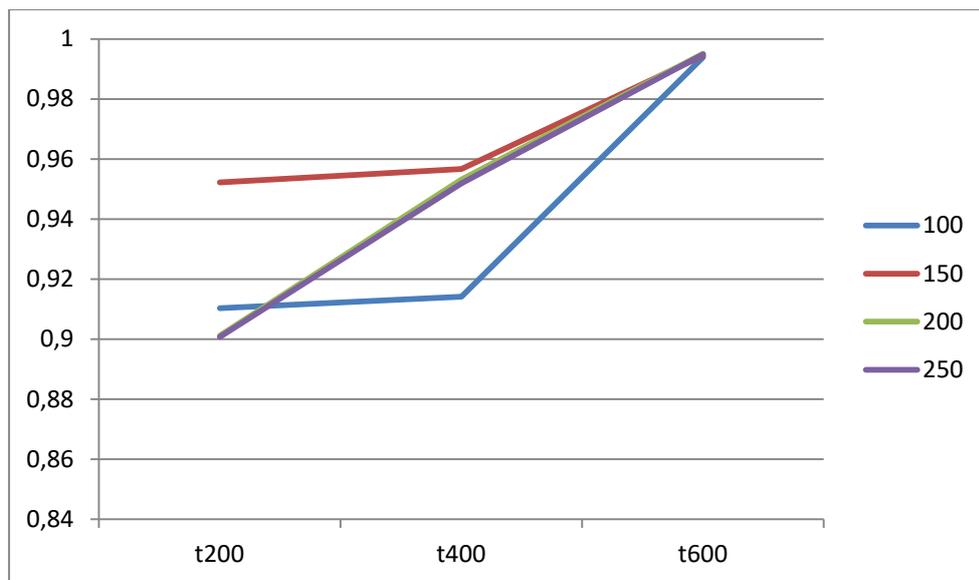


Figure 5.7 : Coefficients de corrélation moyens de cinq réplifications de l'analyse Procruste entre la distribution géographique des sites archéologiques et celle des hameaux-pixels simulés, à différents temps de l'expansion et selon le nombre d'agents au départ.

Les quatre simulations donnent toutes des valeurs de corrélation élevées : elles ont une bonne adhérence aux données archéologiques. Néanmoins, la simulation avec 150 agents au départ s'avère être la meilleure. Les simulations avec 200 et 250 agents, presque identiques, ont une moindre adhérence après 200 ans de simulation ; la simulation avec 100 agents au départ a une corrélation plus faible aussi après 400 ans. En fin de simulation, les quatre scénarios sont presque identiques.

La corrélation est toujours très élevée (>0.9), même si une certaine dispersion relative peut être observée ; certains sites archéologiques se trouvent dans des régions non colonisées par les agents, et vice-versa. Cela s'explique par le fait que la presque totalité des sites archéologiques et des hameaux-pixels se trouve dans des régions de *best patch* bien

délimitées et relativement restreintes. Il y a en effet des zones avec une densité très élevée, dans l'archéologie comme dans le modèle, tandis que les points isolés et dispersés sont très rares. Ces derniers ont donc un poids très limité dans la configuration totale des sites de la région.

L'analyse Procruste indique qu'une expansion modélisée avec 150 agents initiaux produit le scénario qui adhère le mieux à ce qui est observé en archéologie. Même si les traces ne permettent pas de vérifier dans quelle mesure cette estimation correspond à la réalité, la présence d'un nombre relativement faible de colonisateurs initiaux est cohérente avec l'hypothèse de Perlès (2001) selon laquelle, pour produire les traces observées en archéologie, quelques dizaines d'individus en début d'expansion étaient suffisantes. Le modèle suggère donc que les premiers colons arrivés dans les Balkans devaient être en nombre très limité ; une migration de masse ne semble pas possible, car elle aurait produit une colonisation de la région nettement plus rapide.

5.4.2 La vitesse d'expansion

L'expansion géographique des premiers agriculteurs est déterminée dans une large mesure par le nombre d'agents au départ ; mais d'autres paramètres sont aussi concernés. L'analyse de sensibilité a montré que le rayon d'expansion a une certaine influence sur des éléments en sortie, comme la distance des foyers apparentés et scissionnistes. Ce paramètre influence aussi l'expansion, surtout en termes de vitesse : un rayon d'expansion très large permet aux agents de se disperser rapidement ; vice-versa, un rayon d'expansion limité provoque une expansion beaucoup plus lente.

Un autre test d'ajustement du modèle peut être effectué sur la base de la vitesse de l'expansion. En choisissant un point à l'origine i et un point archéologique j , la distance d_{ij} entre ces deux points est calculée pour chaque site archéologique et est régressée sur le temps de son occupation t , donnant une estimation de la vitesse d'expansion du Néolithique. Cette approche a été introduite en archéologie par Ammerman et Cavalli-Sforza (1971), et est devenue une approche standard pour calculer la vitesse d'expansion du système agricole (voir par exemple Pinhasi et al. 2005, Gkiasta et al. 2003). Le problème de cette approche est qu'elle se base sur l'hypothèse que l'expansion est linéaire avec le temps ; en vérité, l'avancée

du système agricole est très rarement linéaire, surtout à une échelle régionale limitée (Brami et Zanotti 2015). Cependant, de critères formels qui peuvent s'ajuster à ces variations de vitesse ne sont pas connus ; par exemple, les isochrones peuvent montrer l'expansion d'une façon graphique, mais ne donnent pas des valeurs précises pour sa vitesse.

La vitesse d'expansion est donc calculée pour le Néolithique des Balkans à travers la régression de la distance sur le temps, à la fois pour les données archéologiques et pour les données simulées. Ce test n'est pas géographique car il ne concerne pas directement l'espace : les coordonnées géographiques X et Y sont remplacées par la variable unidimensionnelle d (distance) ; il s'agit seulement d'un test d'ajustement complémentaire à l'analyse Procruste, qui au contraire prend en compte la position de chaque site sur la carte.

Choisir un point unique d'origine à partir duquel calculer les distances est aussi problématique, car il y a plusieurs points d'arrivée du Néolithique dans la péninsule Balkanique ; pour ce test de vitesse, le choix est tombé sur le site de Sesklo. La datation place ce site parmi les plus anciens du Néolithique, mais c'est surtout sa position géographique qui en détermine le choix : Sesklo se trouve en Thessalie, qui est la région où la densité la plus élevée est observée, à la fois pour les sites archéologiques (Cavanagh 2004) et pour les hameaux-pixels simulés. Même si elle n'est pas la seule zone d'arrivée des premiers colonisateurs, il s'agit de la zone où leur densité était la plus élevée et qui a eu le plus d'influence sur l'expansion suivante (Perlès 2001).

Les distance d_{ij} entre chaque site archéologique et Sesklo sont calculées, pour un total de 787 couples de points, et entre chaque hameau-pixel simulé et le site de Sesklo, pour un total de 6.327 couples de points. Les distances d_{ij} ont ensuite été régressées sur les cinq périodes décrites précédemment (cf. par 3.1.2). L'échantillon n'est pas limité à quelques dizaines de dates au radiocarbone comme dans les études précédentes, mais prend en compte tous les sites de la région. La régression *distance vs time* est montrée en figure 5.8 : en rouge pour les sites archéologiques (coefficient de régression 0,83618) et en bleu pour les hameaux-pixels simulés (coefficient de régression 0,87682).

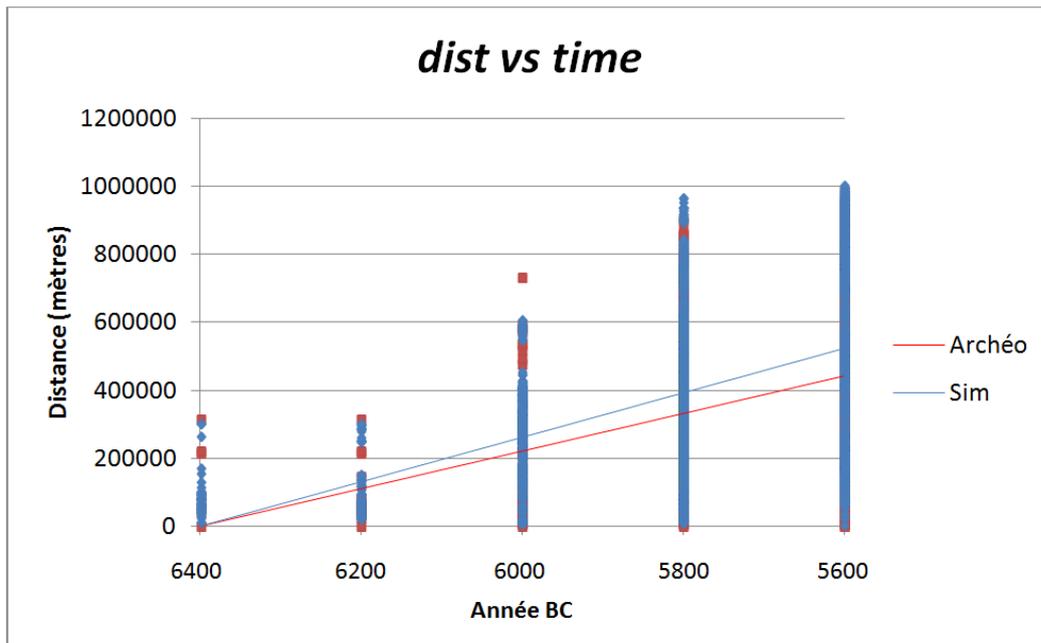


Figure 5.8 : Régression *dist vs time* pour les sites archéologiques et les hameaux-pixel simulés.

Suite à un test par balayage, en essayant de nombreuses valeurs pour ce paramètre, le rayon d'expansion optimale s'avère être de 150 kilomètres. Les coefficients de régression donnent une estimation de la vitesse V , selon la formule :

$$V = \frac{\Delta dist}{\Delta time}$$

La vitesse estimée est de 0,84 kilomètres parcourus chaque année pour les sites archéologiques et de 0,88 kilomètres parcourus chaque année pour les hameaux-pixels simulés. Ces valeurs ne s'éloignent pas des estimations d'Ammerman-Cavalli Sforza (1971) (0,7 kilomètres par an dans les Balkans) et de Pinhasi et al. (2005) (vitesse comprise entre 0,7 et 1,1 kilomètres par an à l'échelle sous-continentale).

Des simulations avec une valeur inférieure pour le paramètre du rayon de perception produisent un écart plus grand entre la régression des données archéologiques et celle des données simulées, car l'expansion deviendrait trop lente, empêchant les agents d'atteindre les zones où une présence archéologique est attestée dans le bon timing. Au contraire, un rayon d'expansion important provoquerait une expansion géographique trop rapide, car il permettrait aux agents de partir coloniser trop loin, en sautant des zones où par contre des traces archéologiques ont été trouvées.

Même si la vitesse d'expansion est déterminée dans une large mesure par le nombre d'agents initiaux, ce test d'ajustement a permis de détecter quel rayon de perception produit une expansion géographique simulée adhérente aux observations archéologiques, et quelles sont par contre les valeurs de ce paramètre qui donnent des résultats aberrants. Le modèle suggère donc que les premiers agriculteurs pouvaient partir coloniser jusqu'à 150 kilomètres de distance à partir du hameau où ils se trouvaient.

5.4.3 La densité

La vitesse d'expansion est influencée aussi par la densité. Si les agents peuvent atteindre des densités élevées, ils pourront se concentrer dans les régions les plus propices pour l'agriculture, là où il y a les meilleures valeurs de *best patch*, et y resteront longtemps, car la zone ne sera saturée que lentement. Au contraire, de densités maximales faibles forceront les agents à quitter les zones de *best patch* plus rapidement, car elles seront saturées facilement, et une expansion plus rapide se produira. Par conséquent, la densité maximale qui peut être atteinte au supercarré est un autre élément qui nécessite une estimation précise.

La densité des hameaux-pixels ne peut pas être estimée en comparant simplement le nombre de hameaux-pixels produits par le modèle avec le nombre de sites archéologiques connus. D'abord, les sites fouillés représentent seulement une petite partie des villages Néolithiques qui étaient effectivement présents ; ils ne sont pas indicatifs de la densité effective des hameaux. En outre, la densité de sites fouillée n'est pas homogène : il y a des régions qui ont été bien prospectées, et d'autres où les fouilles ont été marginales. Par conséquent, une estimation pour l'ensemble des Balkans est difficile.

Une estimation à l'échelle locale est cependant possible pour une région archéologiquement très bien prospectée, dans laquelle la plupart des sites archéologiques ont été trouvés. Dans le contexte régional Balkanique, le choix ne peut se porter que sur la Thessalie, en particulier sa partie orientale (Fig. 5.9). Cette région a été très bien fouillée et exhaustivement publiée (Perlès 2001). En outre, les sites de cette région sont typiquement des *tells*, c'est-à-dire de petites collines qui mesurent quelques mètres d'altitude ; pour cette raison les vestiges sont très facilement identifiables par les archéologues, réduisant la possibilité que des sites n'aient pas été trouvés.



Figure 5.9 : La Thessalie Orientale, la zone choisie pour le test de densité.

Un problème lié à la découverte des vestiges archéologiques est la taphonomie : il s'agit de la disparition des sites due à la dégradation des matériaux, et le risque de leur destruction avec le temps. Il est possible d'estimer combien de sites étaient présents au temps t si l'on connaît le nombre de sites qui ont survécu et le ratio de destruction des sites, dit aussi *ratio taphonomique* (Surovell and Brantingham, 2007). Cette estimation peut s'ajuster selon l'hypothèse que le ratio taphonomique n'est pas constant, c'est-à-dire que la probabilité de disparition décroît avec l'âge du site (Surovell et al. 2009) ; en effet, si les vestiges ont survécu pendant une très longue période, la disparition du site en question dans les années suivantes devient plus improbable. Prendre en compte la taphonomie est nécessaire pour les restes qui sont effectivement objet d'une dégradation ; les auteurs citent souvent les os, mais elle s'applique aussi à d'autres matériaux, comme le bois. Les ratios taphonomiques peuvent varier selon le matériau ; par exemple un ratio taphonomique considéré comme bas est de 5×10^{-5} , tandis qu'un ratio taphonomique haut est de 1×10^{-3} (Surovell et al. 2009).

Une difficulté a été trouvée dans l'estimation d'un ratio taphonomique valide pour la Thessalie Orientale. En effet, malgré une recherche bibliographique exhaustive, nous n'avons pas trouvé de références applicables à la typologie des maisons de la région, comme les bâtiments avec leurs fondations en pierre de Sesklo. Cela peut s'expliquer par le fait que la pierre, en particulier les grands blocs en pierre qui constituent les fondations des maisons dans cette zone, ne peut pas être considérée sujette à la taphonomie, à la différence d'autres matériaux ; la pierre ne se dégrade pas, et théoriquement elle peut se conserver très longtemps. *A priori*, les sites de cette région ne doivent pas avoir disparu pour des raisons de dégradation des matériaux. Néanmoins, d'autres raisons peuvent conduire à la disparition d'un site, comme la typologie du sol ; il y a des sols qui ont tendance à se dégrader, en causant la perte aussi de ce qui se trouvait dessus. Cependant, des analyses régionales (Van Andel et al. 1990, Van Andel et Zanggel 1990), montrent que la région a une typologie de sol très favorable à la préservation des sites ; des zones marginales seulement peuvent avoir été objet d'une dégradation (Perlès 2001). La Thessalie Orientale est donc la région optimale pour mesurer la densité des sites archéologiques et la comparer avec les hameaux-pixels simulés : elle a été exhaustivement fouillée et publiée, et les sites ont difficilement disparu, grâce aux matériaux utilisés et à la typologie des sols qui en ont favorisé la préservation. En outre, les sites de cette région sont typiquement en *tell*, et sont facilement visibles dans la plaine de Thessalie Orientale grâce à leur élévation ; il est donc probable que seule une quantité très limitée de sites a échappé à la détection archéologique.

Le modèle ne reproduit pas directement la formation d'un *tell* ; cependant, la présence de ce type de hameau peut être inférée sur la base de la durée d'occupation du hameau-pixel. Les *tells* sont produits suite à une occupation qui dure dans le temps, à cause de la stratification de plusieurs couches, qui correspondent à des phases d'occupation différentes (Rosenstock 2006). Au contraire, les sites qui ont eu une occupation courte n'ont pas formé de *tell*, et ont plus probablement échappé à la détection par les archéologues. Perlès (2001) affirme que le taux de croissance des *tells* peut être estimé à environ 1 mètre chaque siècle, même s'il a pu être un peu plus lent pendant les premières phases du Néolithique Ancien. L'élévation des *tells* est très variée, mais des dépôts sont trouvés à partir de deux mètres de hauteur (Perlès 2001). Par conséquent, une occupation de 200 ans est considérée comme suffisante pour avoir causé la formation d'un *tell* : tous les hameaux-pixels qui ont eu une vie de 200 ans ou plus dans la simulation sont donc considérés comme des villages Néolithiques ayant produit une *tell* et ils seront appelés dans la suite "*hameaux-pixels en tell*".

En archéologie, 113 sites appartenant au Néolithique Ancien ont été trouvés en Thessalie Orientale. Un balayage des paramètres qui déterminent la densité du modèle - la taille du supercarré et sa capacité d'accueil en termes de hameaux-pixels - permet de détecter la densité optimale. Cette valeur est représentée par la densité de hameaux-pixels simulés la plus similaire à celle observée en archéologie. La combinaison optimale (supercarré de 20x20 kilomètres, dont 3 pourcent sont occupés en conditions normales et 6 pourcent avec la présence d'un *Big Man*) produit, sur 10 simulations, le nombre de hameaux-pixels en *tell* le plus similaire à celui des sites trouvés en Thessalie orientale : $117,6 \pm 15,85$ (Fig. 5.10).

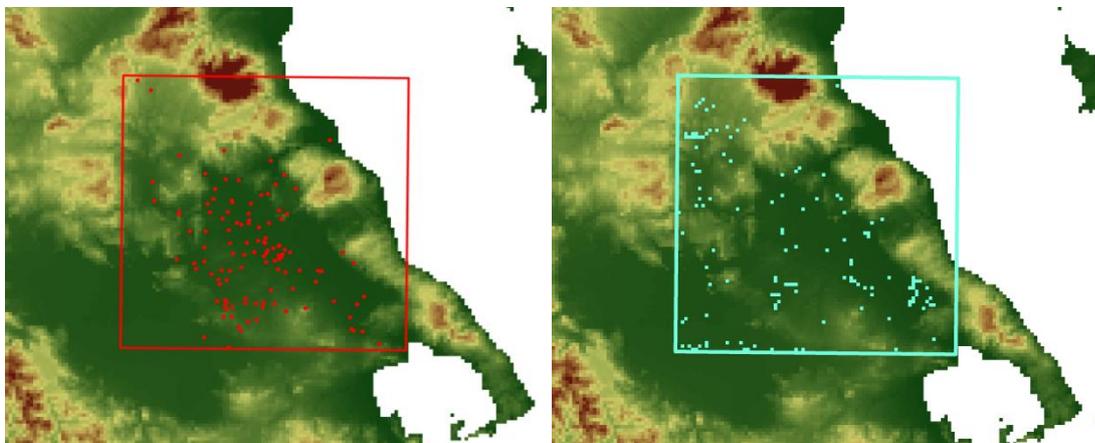


Figure 5.10 : Distribution des sites archéologiques trouvés (à gauche) et des hameaux-pixels simulés vivants pendant 200 ans et plus ans (à droite) en Thessalie Orientale.

La densité maximale atteinte dans cette région dépend strictement de ces deux paramètres : la taille du supercarré et sa capacité d'accueil ; même en modifiant d'autres paramètres, comme le nombre d'agents initiaux, la variation dans le nombre de hameaux produits dans cette zone est minimale. En effet la Thessalie Orientale a des valeurs de *best patch* très élevées, et représente un choix préférentiel pour les agents ; cette région est toujours saturée, et le seuil de densité maximale est toujours atteint. Les petites différences entre chaque simulation sont déterminées par le nombre de hameaux *Big Man* initiés, qui permettent des variations dans la densité régionale.

Le nombre total de hameaux produits par le modèle en Thessalie Orientale pendant le Néolithique Ancien, y compris ceux qui ont été occupés pendant moins de 200 ans, est de $205 \pm 22,6$ dans 10 simulations. Le modèle suggère donc que seulement environ 60% des hameaux de la région ont eu une durée de vie suffisante pour générer un *tell*. Les autres ont

été occupés pendant une période trop courte, et par conséquent ils n'ont pas laissé de traces suffisantes pour être retrouvés par les archéologues.

5.4.4 Autres tests de validation

Un autre test a été effectué : il consiste à vérifier que les hameaux-pixels simulés ont la même distribution chronologique que les sites archéologiques, en calculant si le ratio des sites pour chaque période archéologique correspond au ratio des hameaux-pixel simulés. Ce test est possible grâce à la grande quantité de sites archéologiques fouillés qui sont placés dans des séquences typo chronologiques précises sur la base de la classification suggérée par Demoule (à paraître), à partir de leurs dates au radiocarbone et de leur attribution culturelle. La distribution des sites archéologiques et des hameaux-pixels produits dans la simulation 46 pour chaque période est donnée en table 5.6. La période 0 a été exclue, car la simulation commence en 6400 BC.

Période	Nb sites	
	Archéologiques	Simulées
1 (6400-6200 BC)	21	145
2 (6200-6000 BC)	153	821
3 (6000-5800 BC)	614	3153
4 (5800-5600 BC)	774	3959

Table 5.6 : Nombre de sites archéologiques attribués à chaque période et de hameaux-pixels simulés vivants dans chaque période.

Le nombre de hameaux-pixels produits par la simulation étant largement plus élevé que celui des sites trouvés en archéologie, ces données sont converties en fréquences. La figure 5.11 représente la fréquence des sites archéologiques et des hameaux-pixels par période.

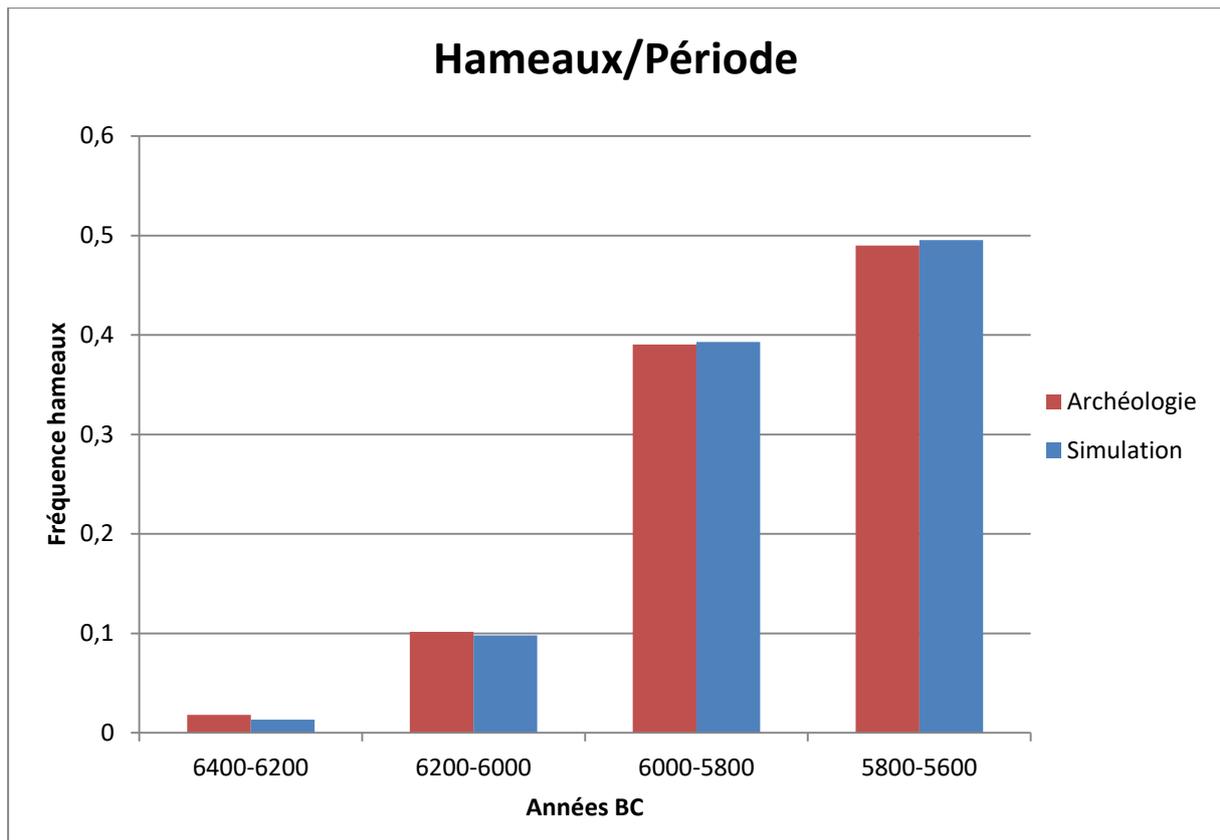


Figure 5.11 : Fréquence de sites archéologiques et de hameaux/pixels simulés pour chaque période.

L'histogramme suggère qu'il y a une bonne adhérence entre les données archéologiques et les données simulées. Le nombre de sites et de hameaux/pixels est faible en début de simulation, avec une augmentation relativement limitée entre 6200 et 6000 BC. C'est surtout dans la période suivante, entre 6000 et 5800 BC, que la croissance du nombre de hameaux devient très marquée, dans l'archéologie comme dans le modèle. Les deux derniers siècles, entre 5800 et 5600 BC, le nombre de hameaux continue à augmenter, mais pas d'une manière drastique comme dans la période précédente.

La similarité des deux distributions peut être démontrée d'une façon formelle avec un test du khi-deux (Table 5.7).

Période	Espéré	Observé	Total
1	21	145	166
2	153	821	974
3	614	3153	3767
4	774	3959	4733
Total	1568	8162	9730

Chi-square test

Période	Espéré	Observé	Total
1	1,29307	0,25004	1,54311
2	0,14722	0,02847	0,17570
3	0,02148	0,00415	0,02563
4	0,06567	0,01270	0,07838
Total	1,52746	0,29535	1,82282

X-squared = 1,8228, df = 3,

p-value = 0,61

Table 5.7 : Test khi-deux entre les nombre de sites archéologiques (Espéré) et celui des hameaux-pixels produits par le modèle (Observé) pour chaque période.

La valeur-p 0,61 est supérieure au seuil de rejet de 0,05 du test d'homogénéité des distributions : les deux distributions (sites archéologiques et hameaux-pixels simulés) ne sont pas significativement différentes. La distribution chronologique des hameaux-pixels produite par le modèle n'est pas différente de celle observée en archéologie. Il y a une quantité faible de hameaux au début, avec une croissance relativement lente jusqu'en 6000 BC. C'est à partir de cette date que le nombre de hameaux a un incrément très élevé ; cette augmentation continue, bien qu'avec un rythme plus lent, jusqu'à la fin du Néolithique Ancien.

5.5 Le troupeau simulé

À cause des problématiques liées à la nature des données archéologiques, la plupart des tests de validation et d'ajustement du modèle ont nécessairement eu une nature géographique : il s'agit du seul domaine où de traces archéologiques abondantes sont disponibles. Néanmoins,

d'autres paramètres ayant une grande influence sur certaines sorties du modèle ont été identifiés grâce à l'analyse de sensibilité. Un de ces paramètres est le *ratio bovin/humain*, qui est déterminant dans la simulation des animaux.

Les restes relatifs à la faune sont parmi les plus présents dans les fouilles archéologiques : une importante quantité d'os d'animaux a été trouvée dans un grand nombre de sites (cf. par. 2.4) ; ces informations peuvent donner des suggestions importantes sur la composition des troupeaux. La proportion des animaux dans le troupeau simulé est donnée en paramètre et donc, *a priori*, elle est déjà déterminée en entrée et ne dépend pas du fonctionnement du modèle. Cependant, une observation des sorties du modèle montre que la composition du troupeau est variable, car les mini-troupeaux suivent eux-mêmes des lois de mortalité et fertilité ; il y a de différences entre chaque foyer domestique de l'ordre de 5-6%. Le patron des troupeaux dans le modèle est en tout cas constant, avec les caprins qui constituent entre 60 et 65% du troupeau, les bovins entre 24 et 30% et les porcins entre 9 et 12%, pendant toute la durée de la simulation.

À la différence de la composition, qui peut être estimée à partir des restes d'os trouvés dans les fouilles, les traces archéologiques ne donnent aucune information sur le nombre d'animaux pouvant être possédés par chaque foyer domestique. De sources ethnographiques sont par conséquent utilisées : selon des estimations, une famille typique pouvait avoir environ 10-15 animaux (Perlès 2001). Le paramètre du "*ratio bovin/humain*" est testé par balayage : comme on ne sait pas, *a priori*, combien d'humains seront produits, il est impossible de prévoir le nombre de vaches générées par le modèle, qui en dépend directement. La valeur optimale a été trouvée parmi les nombreuses valeurs possibles : le modèle, avec un ratio bovin/humain de 0,65, produit un ratio moyen entre animaux totaux et humains de 2,14 ; donc, un foyer domestique qui va de 5 à 7 personnes aura un nombre d'animaux compris entre 10,7 et 14,98, parfaitement adhérent à l'estimation de Perlès (2001).

Cet ajustement a été fait avec des hypothèses basées sur les inférences archéologiques et ethnographiques, qui estiment la taille d'un foyer domestique typique à 6 ou 7 personnes. Le modèle suggère en vérité que la taille moyenne des maisons était plus petite que ce que l'on pense communément (cf. paragraphe 6.5). En tout cas, le ratio d'animaux dépend de la taille du foyer domestique ; donc, le nombre d'animaux est proportionnellement réduit quand les familles sont moins nombreuses.

5.6 Les céréales et la cueillette dans le modèle

L'analyse de sensibilité a montré un autre paramètre qui a une remarquable importance : le pourcentage de grains consommés parmi ceux récoltés, qui influence la cueillette. Ce paramètre nécessite donc une estimation qui permette de produire une cueillette, dans le modèle, qui soit comparable à celle qui est observée pour le Néolithique Ancien. *A priori*, il n'est pas possible de tester et d'ajuster ce paramètre à partir des données archéologiques ; même si des hypothèses sur l'importance de la cueillette peuvent être formulées, des estimations précises sont presque impossibles (cf. par. 2.3.2).

Les seules informations disponibles montrent que les plantes cultivées sont toujours entre 80% et 100% des plantes totales trouvées dans les assemblages (Perlès 2001) ; même s'il faut prendre en compte la possibilité d'une sous-estimation, le modèle peut être ajusté pour reproduire ce scénario. En acceptant cette estimation, la quantité de plantes sauvages et de fruits obtenus avec la cueillette dans le modèle ne devrait pas dépasser les 20% des plantes totales.

Le modèle ne donne pas d'informations sur la cueillette pratiquée en termes de plantes et de fruits récoltés, mais montre son apport en kilocalories dans le régime alimentaire. Il est donc possible de comparer les kilocalories issues de la cueillette avec celles obtenues depuis les grains cultivés. Le modèle montre une grande variabilité dans la cueillette, avec des variations marquées pouvant se produire d'une année à l'autre. La raison, comme l'ont montré d'autres analyses (cf. par 6.8.), est que la cueillette est liée aux événements météorologiques : elle augmente en cas de pénurie dans la récolte. Avec une valeur pour le paramètre *Proportion de grains consommés* de 0,75 (75% des kilocalories totales provenant des grains récoltés), le ratio entre les kilocalories issues de la cueillette et celles issues de plantes domestiquées varie toujours entre 7% et 20%. Cette fourchette est large à cause de la variabilité élevée de cette sortie ; néanmoins, elle est toujours comprise entre les valeurs présentées dans les tables publiées par Perlès (2001).

Ce test d'ajustement ne peut pas être plus précis, à cause de la difficulté d'obtenir de données exactes sur la cueillette en archéologie. Cependant, avec le paramètre testé, le modèle simule une cueillette qui a un rôle marginal, avec un apport des plantes sauvages par rapport aux

plantes domestiquées qui ne dépasse pas les 20%. Cela suggère un ajustement correct du modèle, et l'estimation de ce paramètre peut par conséquent être acceptée.

Chapitre 6 : Analyse des simulations

Le but du chapitre précédent était de valider et d'ajuster le modèle : c'est-à-dire de trouver la meilleure correspondance entre les données archéologiques et les données simulées, à travers une analyse des éléments qui sont déterminés par les paramètres injectés. De cette façon, un ajustement du modèle à la réalité archéologique a été fait ; les paramètres qui donnent les meilleurs résultats ont été choisis, parmi une série de valeurs possibles issues de plusieurs estimations. Même si la comparaison entre l'espéré et l'observé est limitée par les nombreux problèmes qui affligent les sources archéologiques, de simulations qui ont une bonne adhérence aux données archéologiques, mesurée en particulier en termes géographiques, ont été individuées. L'analyse et interprétation des résultats devient possible : outre à reproduire correctement l'expansion observée, le modèle ajoute-il quelque chose de nouveau à la recherche archéologique actuelle ?

Le modèle produit une quantité très élevée de données en sortie, les *big data* ; ce terme est utilisé pour décrire un ensemble de données très volumineux. Les *big data* contiennent de nombreuses informations sur la structure démographique et économique des premiers agriculteurs simulés, à la fois au niveau local de chaque agent et au niveau global du modèle. Une exploration de ces données est complexe, vue leur quantité et poids, et a nécessité du développement de techniques spécifiques pour leur manipulation.

Le modèle permet d'estimer le nombre d'individus présents dans la région, ainsi que le nombre de hameaux qui ont été produits par les premiers colonisateurs du Néolithique Ancien. L'analyse des sorties démographiques globales a permis de formuler des estimations inédites, qui ne pourraient pas être obtenues avec l'utilisation de données purement archéologiques.

Le degré de coïncidence géographique a déjà été testé, mais une observation de cette expansion d'un point de vue narratif, en faisant des inférences à partir de ce qui est observé sur la carte, peut donner des suggestions importantes. La composante géographique a-t-elle influencé l'expansion et, si oui, dans quelle mesure ? S'il y a des zones où l'avancée des agents est différente de ce qui est montré par l'archéologie, comment peut cette différence être expliquée ?

Grâce au stockage et à l'analyse d'une grande quantité de sorties relatives à la vie et à l'activité des agents, leur structures sociales et économiques peuvent être observées. Elles sont très difficilement détectables en archéologie, en particulier pour les sociétés préhistoriques ; elles ne pourraient pas être inférées à partir des restes matériels, mais deviennent explorables à travers ce modèle de type multi-agents. En particulier, cette approche a permis de questionner de croyances archéologiques fondées sur d'hypothèses qui n'étaient pas testables avant la création de ce modèle.

Un autre niveau d'exploration, rendu possible par cette approche de modélisation, est l'analyse du front pionnier, c'est-à-dire la zone de nouvelle colonisation où les agriculteurs s'établissent lors de leur avancée à travers la région. Y-a-t il de différences dans le système économique et démographique entre les zones d'expansion, qui viennent d'être colonisées, et les zones d'ancienne occupation où une augmentation de la densité de hameaux se produit ? Il s'agit d'un sujet de grand intérêt en ethnographie et anthropologie, mais qui est inexploré dans l'archéologie de la région, à cause de la difficulté d'en détecter des signaux dans les vestiges.

Enfin, grâce aux données en sortie relatives aux crises météorologiques, il est possible d'évaluer la sensibilité des premiers agriculteurs aux événements météorologiques. Dans quelle mesure peuvent-ils avoir influencé l'expansion du Néolithique Ancien, et quelles sont les typologies de crise qui peuvent avoir intéressé la région en cette période historique ?

Le nombre d'éléments qui sont analysés dans cette thèse est limité par la difficulté de trouver en archéologie des explications pour le comportement du modèle, à cause de l'absence ou de la pénurie de traces qui peuvent donner des informations sur la structure démographique et socio-économique des premiers agriculteurs. Les sorties ne constituent pas une reproduction de la réalité, mais sont issues du comportement du modèle, des contraintes que lui ont été données, ainsi que des paramètres injectés : même si ce modèle a été bâti sur des observations et estimations réalistes, et a généré des sorties qui sont adhérentes, en plusieurs éléments, aux données archéologiques, il s'agit seulement de possibles scénarios de l'expansion des premiers agricultures. Le modèle se limite à fournir des suggestions et des idées à la recherche archéologique, à travers la comparaison des données simulées aux hypothèses et estimations qui ont déjà été formulées, soit grâce aux limitées traces archéologiques, soit à partir d'inférences ethnographiques. Quand les données ethnoarchéologiques confirment ce qui est produit par le modèle, alors une possible explication du processus en question a été modélisée ; si, au contraire, un écart entre ethnoarchéologie et simulation est présent, alors de nouvelles

hypothèses sont formulées pour expliquer ces différences, en ajoutant des idées et perspectives à l'état actuel de la recherche.

Dans ce chapitre, de différentes simulations ont été choisies pour l'analyse des données simulées. La raison de cette diversité est que chaque simulation correspond à une étape différente du travail ; après avoir effectué les premières explorations des données, d'autres simulations ont été effectuées et analysées à leur fois.

6.1 La manipulation des *big data*

On vit dans l'époque des *big data* (Lohr 2012). On possède la technologie qui permet de stocker une quantité énorme de données, et les instruments nécessaires pour les analyser. Dans le passé, il n'y avait pas les moyens pour gérer une quantité d'informations qui va au delà de la possibilité d'un être humain. Grâce au progrès de la technologie, il est désormais possible de stocker, d'extraire et d'analyser des grandes quantités de données dans des marges de temps raisonnables. Pour cette raison, les *big data* sont un sujet de grand intérêt, toujours en cours d'expansion : leur application devient de plus en plus commune dans de secteurs différents, qui vont de la santé aux Etats-Unis à l'administration publique en Europe (Manyika et al. 2011).

Dans cette thèse, un nouveau domaine pour l'application des *big data* a été atteint : l'archéologie. Le modèle OBRESOC, et son adaptation OBRESOC-BEAN, génèrent une quantité très importante de données : une simulation moyenne produit environ 5 giga Octets de fichiers de sortie, et certaines simulations peuvent dépasser les 10 giga Octets. Il y a quelques années, une simulation de cette portée aurait pris des jours, et les disques durs n'auraient pas été capables de stocker toutes les données simulées produites. Aujourd'hui, avec la technologie disponible, un ordinateur personnel de moyenne-haute gamme peut effectuer une simulation en deux ou trois heures, et des milliers de simulations peuvent être stockées dans les disques durs externes.

Il s'agit d'un quantitatif de données énorme, laquelle manipulation est en dehors de la capacité humaine. Chaque simulation produit, pour chaque année, deux fichiers avec les états de lieu de tous les agents, ainsi que 10 fichiers avec les sorties globales, et de nombreuses cartes de

crise. Une simulation de 600 ans génère plus de 1200 fichiers à analyser ; ce montant est à multiplier par le nombre total de simulations, qui consiste en plusieurs dizaines (outre aux 256 simulations nécessaires pour l'analyse de sensibilité). Le produit final des simulations effectuées pour cette thèse consiste donc en de centaines de milliers de fichiers, avec une taille totale qui dépasse le téra Octet (1.000 giga Octets). Les *big data* traitées par certaines entreprises ont des dimensions largement plus élevées ; néanmoins, les données produites par OBRESOC-BEAN sont très volumineuses, si comparées à d'autres modèles plus simples utilisés en archéologie.

Une analyse des sorties d'une façon exhaustive, qui va au-delà de l'observation de certains fichiers spécifiques, est impossible avec des techniques conventionnelles. Par conséquent, des procédures qui permettent de manipuler les *big data* ont été développées, afin de saisir complètement la complexité du modèle. Le langage SQL (Sequential Query Language), en particulier sa version postgresSQL (<http://www.postgresql.org/>), a été utilisé ; il permet de gérer des base de données relationnelles et d'effectuer des requêtes sur ces données. À travers la création de scripts et de macros en langage SQL, de procédures partiellement automatisées et facilement répliquables ont été créés, en permettant de réduire drastiquement le temps nécessaire à l'extraction et à l'analyse des données. Les scripts SQL utilisés dans cette thèse sont inclus dans le CD-Rom ci-joint ; chaque script est numéroté et commenté. Dans les paragraphes suivants, quand une procédure SQL a été utilisée, le numéro du script est indiqué.

En termes pratiques, tous les fichiers produits en sortie par le modèle (en format CSV ou TXT) sont importés d'une façon automatisée dans un gestionnaire de bases de données postgresSQL, appelé PgAdmin III (www.pgadmin.org ; script SQL 1 dans le CD-Rom). Chaque fichier constitue une table qui est liée aux autres, en faisant partie de la même base de données relationnelle. Des requêtes SQL finalisées à l'individuation des sorties recherchées spécifiquement sont effectuées : tous les éléments qui correspondent au critères de sélection sont données comme réponse à la requête, et sont exportés et analysés séparément.

De nombreux éléments qui sont décrits dans ce chapitre ont été observés grâce à l'analyse de ces *big data*. Le travail effectué pour la réalisation de cette thèse ne consiste pas seulement dans l'adaptation du modèle OBRESOC à un différent contexte archéologique, mais aussi dans la construction de procédures pour manipuler la grande quantité de données qui sont produites ; ces procédures seront transférées à l'analyse des sorties d'OBRESOC. Outre

l'intérêt archéologique potentiel, cette thèse veut mettre en évidence l'importance des *big data* dans le domaine de l'archéologie, et les vastes possibilités d'analyse qu'elles offrent.

De procédures SQL ont aussi été utilisées lors de l'analyse de sensibilité (cf. par. 5.2), afin d'extraire rapidement les sorties nécessaires et de calculer leur moyenne et leur variance (script SQL 2 dans le CD-Rom). Cette thèse donne seulement quelques exemples de manipulation des big data, afin de montrer les potentialités de cette approche ; mais ils y a beaucoup d'autres éléments qui peuvent être explorés.

6.2 Les sorties démographiques du modèle

Les données produites par le modèle peuvent fournir des suggestions sur des éléments qui ne sont pas facilement estimables à partir de l'archéologie. Un exemple est la démographie : en effet, d'estimations du nombre d'individus présents dans la région pendant le Néolithique Ancien et du nombre de villages qui ont fondés sont difficiles à réaliser à partir de données archéologiques. Seulement une petite partie des villages Néolithiques a été trouvée par les archéologues ; en outre, les sites des Balkans ont été objet de fouilles marginales, ou seulement de ramassages de surface. D'estimations du nombre d'individus présents dans certains villages Néolithiques ont été faites avec des modèles construits spécifiquement (Porčić et Nikolic 2014, Porčić 2011), ou simplement à partir de la surface estimée du hameau (Perlès 2001). Néanmoins, ces estimations ne couvrent pas toute la région Balkanique, et ne donnent aucune information sur le nombre d'individus totales qui pouvaient être présents pendant le Néolithique Ancien. Grâce au modèle multi-agents, d'hypothèses sur ce sujet sont formulées.

Dans la figure 6.1 est présenté le nombre d'individus vivants dans le modèle pendant une simulation de 600 ans ; il s'agit de la période qui va du 6.400 BC au 5.800 BC, comprenant toute la durée du Néolithique Ancien grec. De différentes valeurs du paramètre *agents initiaux* ont été testées, choisies parmi celles qui donnent des configurations en sortie probables, car il s'agit du paramètre qui a la plus grande influence sur le nombre d'agents générés (cf. par. 5.1). La table 6.1 montre le nombre d'individus vivants en fin de simulation.

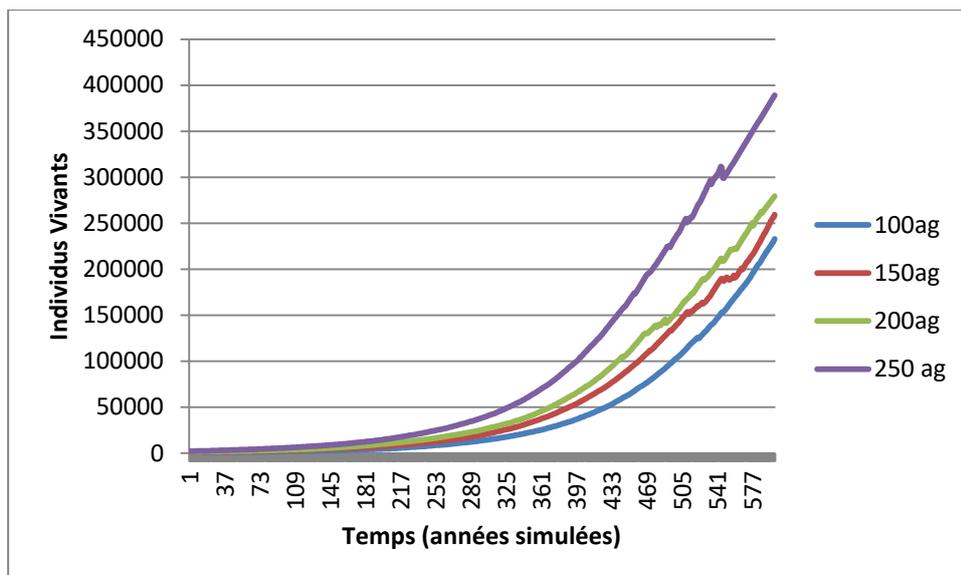


Figure 6.1 : Nombre d'individus vivants pendant la simulation, selon le nombre d'agents au départ.

	Individus
100 agents	232.946
150 agents	259.199
200 agents	279.571
250 agents	388.959

Table 6.1 : Nombre d'individus vivants en fin de simulation, selon le nombre d'agents au départ.

Le modèle suggère que le nombre d'individus présents dans la région autour de 5.800 BC pouvait être compris dans un intervalle qui va de 232.000 à 389.000 individus, qui dépend du nombre d'agents au départ. Les limites de cette fourchette sont déterminées par le scénario le plus conservatif (100 couples au départ) et le scénario le plus abondante (250 couples au départ). De valeurs au-delà ou en deçà de ces seuils sont considérées improbables, car de simulations avec une quantité inférieure ou supérieure d'agents au départ produisent des patrons d'expansion aberrants (cf. par 5.4.1). L'estimation d'environ 260.000 individus vivants dans les Balkans autour de 5.800 BC est considérée comme la plus probable, vue la meilleure adhérence aux données archéologiques de la simulation avec 150 agents au départ.

Le modèle multi-agents permet aussi d'estimer le nombre de villages qui ont été fondés par les premiers agriculteurs de la région. Le nombre total de sites archéologiques connus représente en effet seulement une petite parties de hameaux qui étaient effectivement présents au

Néolithique. Le ratio entre le nombre de sites découverts et le nombre de hameaux-pixels simulés a été calculé pour la Thessalie Orientale (cf. par. 4.3.3), mais il ne peut pas être appliqué à la totalité de la région. D'abord, la densité de sites fouillés n'est pas constante dans tous les Balkans : certaines zones sont très bien prospectées, tandis que d'autres ont été fouillées seulement marginalement. En outre, la Thessalie est considérée comme une zone avec une densité de hameaux supérieure au reste de la région (Cavanagh 2004) ; la densité estimée n'est pas applicable à l'échelle Balkanique. Cependant, le modèle peut donner une idée de combien de hameaux ont été fondés dans tous les Balkans pendant le Néolithique Ancien. Les hameaux produits par les quatre simulations, avec de différents nombres d'agents au départ, sont représentés dans la figure 6.2 ; leur quantité en fin de simulation est montrée en table 6.2.

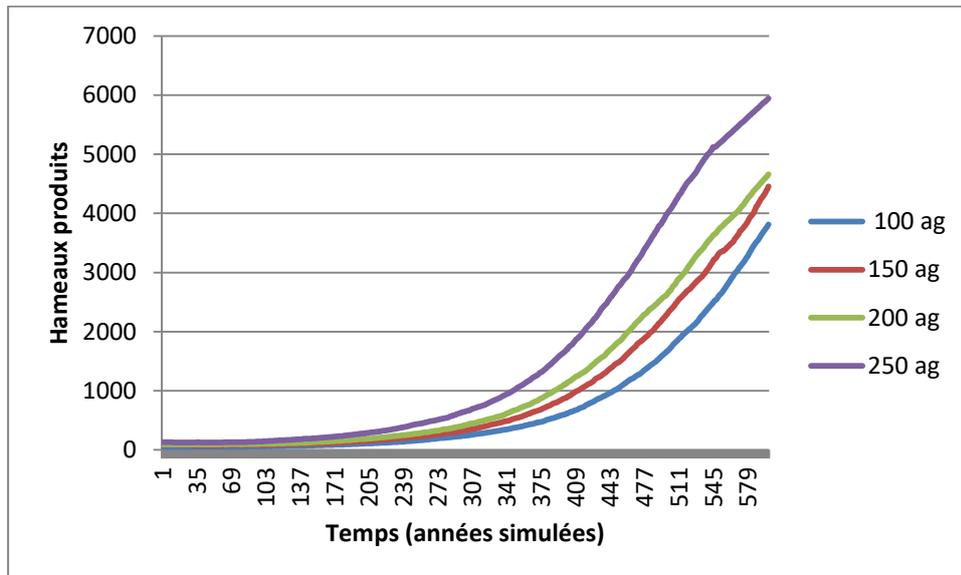


Figure 6.2 : Nombre de hameaux produits pendant la simulation, selon le nombre d'agents au départ.

	Hameaux
100 agents	3811
150 agents	4454
200 agents	4659
250 agents	5129

Table 6.2 : Nombre de hameaux totaux en fin de simulation, selon le nombre d'agents au départ.

Le modèle suggère que le nombre de hameaux qui ont été fondés dans la région entre 6400 BC et 5800 BC pouvait aller de 3.800 à 5.900. L'estimation qui est considérée la meilleure est d'environ 4.500 hameaux, car la simulation avec 150 agents au départ est la plus adhérente aux données archéologiques.

Ce montant de hameaux-pixels simulés est largement supérieur au 787 sites archéologiques qui ont été trouvés. Outre la pénurie de fouilles, la faible quantité de sites découverts peut être due à leur courte durée d'occupation : en effet, dans la simulation avec 150 agents au départ, seulement 1.196 hameaux sur le 4.454 totaux (le 27%) ont eu une occupation supérieure à 200 ans. Tous les autres hameaux ont eu, au contraire, une occupation courte. Les traces archéologiques produites par des villages occupés seulement quelques dizaines d'années sont faibles : la découverte de ces sites est plus difficile, et leur dégradation est plus probable. Le modèle suggère que le ratio entre les hameaux présents au Néolithique et les sites archéologiques fouillés, au niveau régional Balkanique, peut être d'environ 7,5 : 1.

Des simulation sur 800 ans, jusqu'à 5.600 BC, ont été aussi effectuées, afin d'avoir une estimation du nombre d'individus présents dans la région à la fin du Néolithique Ancien selon la chronologie de l'Europe de l'Est. Avec 150 agents au départ, en fin de simulation il y a environ 350.000 individus vivants et un total de 5.945 hameaux produits. Dans les deux derniers siècles simulés environ 1.500 hameaux sont fondés, tandis que 3.000 hameaux avaient été fondés entre 6000 et 5800 BC. Ces données reflètent le patron observé au paragraphe 5.4.4, où une grande augmentation du nombre de hameaux se passe entre 6000 et 5800 BC, pour ralentir pendant la période suivante ; cela est observé en archéologie comme dans les données simulées. En effet, les meilleures régions de *best patch* commencent à être saturées autour de 5800 BC ; pendant les siècles suivants, les agriculteurs Néolithiques essaient de densifier le plus possible, plutôt que partir coloniser des mauvais endroits. Le modèle suggère donc que la plus grand quantité de villages Néolithiques doivent avoir été fondées entre 6000 et 5800 BC ; l'accroissement se réduit dans les deux siècles suivants.

6.3 Interprétation de l'expansion géographique

6.3.1 Observation

Une partie importante du chapitre précédent était dédiée à la comparaison entre l'expansion géographique produite par les agents dans le modèle et celle montrée par les données archéologiques. Le degré de cette coïncidence a été mesuré à travers des tests statistiques ; mais une observation directe de cette expansion peut aider à mieux comprendre ce processus. Normalement, les hameaux-pixels simulés devraient atteindre les zones où il y a une occupation attestée archéologiquement dans le bon timing. L'expansion est observable sur la carte : l'emplacement géographique des sites archéologiques est connu, et la période d'arrivée des colonisateurs dans les régions différentes peut être estimée grâce aux dates au radiocarbone ou à l'attribution culturelle. Généralement il y a une très bonne adhérence entre l'expansion géographique réelle et celle simulée, comme a été montré par l'analyse Procuste. Cependant, le modèle peut produire, dans certaines zones, des différences entre l'expansion simulée et celle observée en archéologie ; d'explications pour les écarts sont nécessaires, et peuvent aider à mieux comprendre certains éléments au sein du processus de colonisation.

Les problématiques liées aux zones d'arrivée des premiers agriculteurs dans la région ont déjà été décrites : les traces archéologiques ne suggèrent pas la présence d'un seul point d'arrivée, mais plutôt de quelques zones de contact, liées à des vagues de migration différentes et plus ou moins contemporaines. Même si certaines dates peuvent suggérer une occupation plus ancienne (OxA-9215, GifA 11016, P-1681, GifA 11017, DEM-1685), la présence des premiers agriculteurs est attestée entre 6600 BC et 6400 BC en plusieurs lieux près de la côte Egéenne. Pour cette raison, les agents sont initialisés dans une zone large qui couvre toute cette région.

La simulation décrite et illustrée en ce paragraphe est spécifiquement la numéro 55, avec 150 agents au départ, qui résulte la plus adhérente aux données archéologiques selon les tests d'ajustement décrits dans le chapitre 5.

Dans la figure 6.3 est montrée la configuration des hameaux-pixel en 6400 BC, après les 100 ans d'initialisation. Les agents sont situés dans les régions où il y a une présence attestée en

archéologie : Thessalie (Sesklo) ; Macédoine grecque (Dikili Tash et Mavropigi) ; Thrace (Hoca Çeşme). La plupart des agents se trouvent en particulier en Thessalie ; la même chose est observable en archéologie, où la densité de sites est plus élevée que dans le reste de la région (Cavanagh 2004). Même si la Thessalie a été plus largement fouillée que les autres parties des Balkans, il existe un consensus sur son importance dans ce contexte historique et sur son élevée densité de peuplement (Perlès 2001).

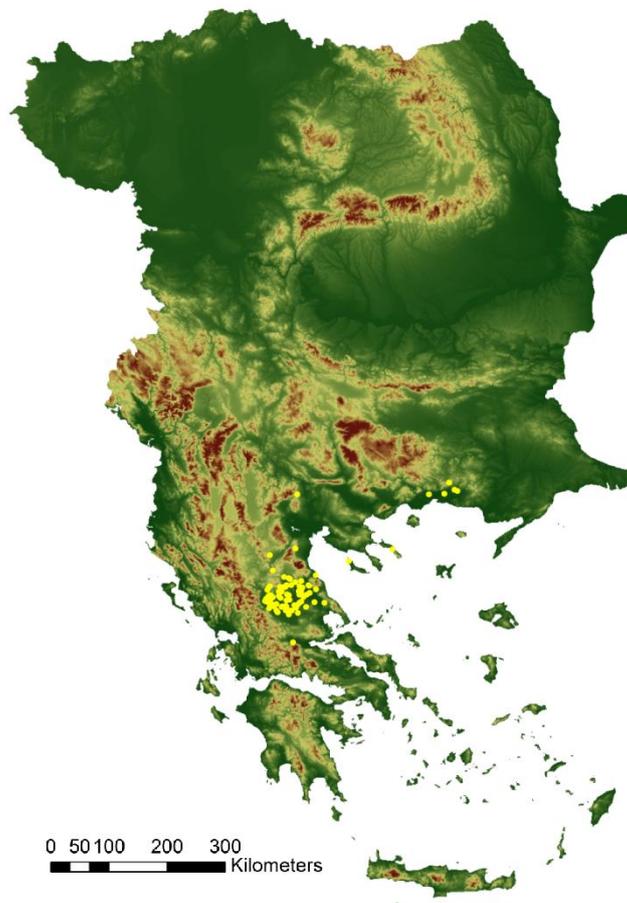


Figure 6.3 : Expansion des agents simulés en 6.400 BC.

Le modèle n'initialise pas d'agents dans le sud de la Grèce, où se trouve le site de Franchti, en Argolide ; il s'agit de la seule remarquable différence entre les données archéologiques et les données simulées dans cette phase, et sera traitée dans la discussion. Knossos a été volontairement placé en dehors de la zone d'initialisation car les traces archéologiques suggèrent que les premiers agriculteurs qui ont habité dans ce site ne faisaient pas partie de la

même vague qui a contribué à coloniser les Balkans. En effet, l'abandon du village pendant plusieurs siècles durant le Néolithique Ancien, et l'absence d'autres sites contemporains sur l'île de Crète, suggèrent qu'il s'agit d'une occupation épisodique qui ne concerne pas la vague de Néolithisation de la région (cf. par 2.6).

Pendant les deux siècles successives (fig.6.4), la taille de l'expansion simulée n'a pas une augmentation importante. Il y a l'apparition de quelques nouveaux hameaux-pixels, mais l'expansion reste confinée aux régions de départ, même si une tendance d'expansion en direction nord est observée, vers l'actuelle république de Macédoine. Aussi en archéologie, les données montrent l'absence d'expansion en cette période : la presque totalité des sites restent confinés dans les régions de départ entre 6400 BC et 6200 BC. Il y a une seule date qui pourrait représenter une exception : Polyanitsa, en Bulgarie (Bln-1571). Les dates pour ce site sont anciennes par rapport à l'horizon chronologique régional, mais sont considérées fiables par certains archéologues (Todorova 1995) ; la présence de ce site sera traitée lors de la discussion.

Il faut signaler que dans cette période tombent aussi les dates les plus anciennes relatives aux sites des Gorges du Danube. Cependant, cette région a été exclue car les traces montrent l'absence de l'adoption du système agricole. Même si des éléments archéologiques communs au Néolithique de la région ont été trouvés, ce contexte économique est totalement différent de ce qui est modélisé dans OBRESOC-BEAN (cf. par. 2.8). Pour cette raison, la région des Gorges du Danube a été exclue de la modélisation, et l'absence d'agents en cette région à cette date est considérée normale.

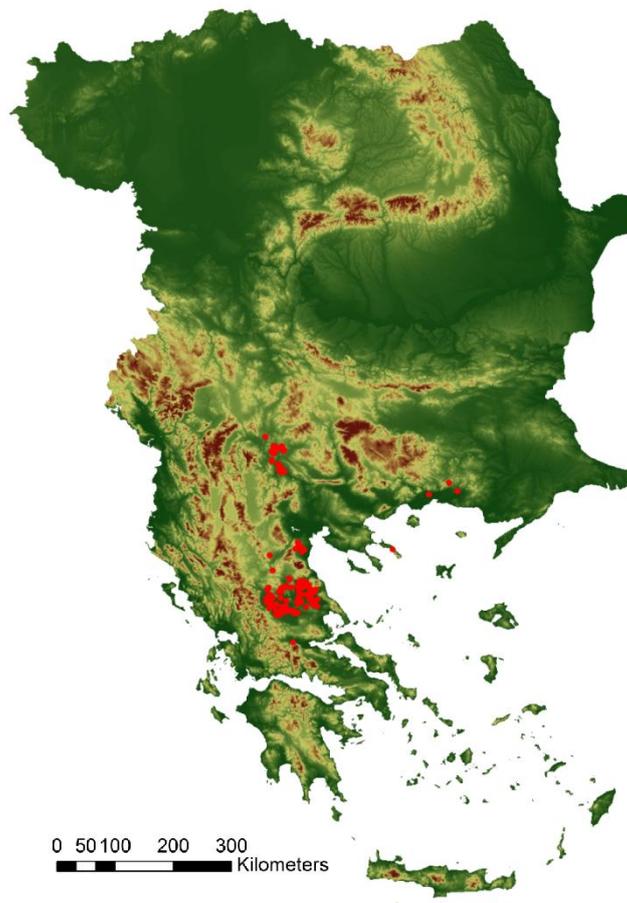


Figure 6.4 : Expansion des agents simulés entre 6.400 et 6.200 BC.

La période suivante, entre 6200 et 6000 BC, l'expansion vers le nord devient plus marquée (Fig.6.5). Outre une augmentation de la densité dans la zone de départ, on observe la présence de nombreux hameaux-pixels simulés dans les vallées entre les montagnes situées entre la Grèce, l'actuelle République de Macédoine et la Bulgarie Orientale. L'occupation de cette région est attestée par les données archéologiques, en particulier là où les cultures d'Anzabegovo et de Galabnik se sont développées.

La presque totalité de hameaux-pixels se trouvent dans la partie méridionale des Balkans, mais il y en a certains qui dépassent la région montagneuse située au centre de la péninsule, en atteignant la Serbie Occidentale. Même si le début de la culture Starčevo est généralement indiqué après 6.000 BC, certains sites (Blagotin, Donja Branjevina, Batka "C") ont des dates au radiocarbone qui pourraient placer la colonisation de la région plus tôt, avant 6.000 BC.

Par contre, il y a une totale absence de sites dans la partie centre-orientale de la Bulgarie, qui pourrait ne pas correspondre aux données archéologiques observés. Il s'agit d'une possible anomalie, qui sera objet de discussion.

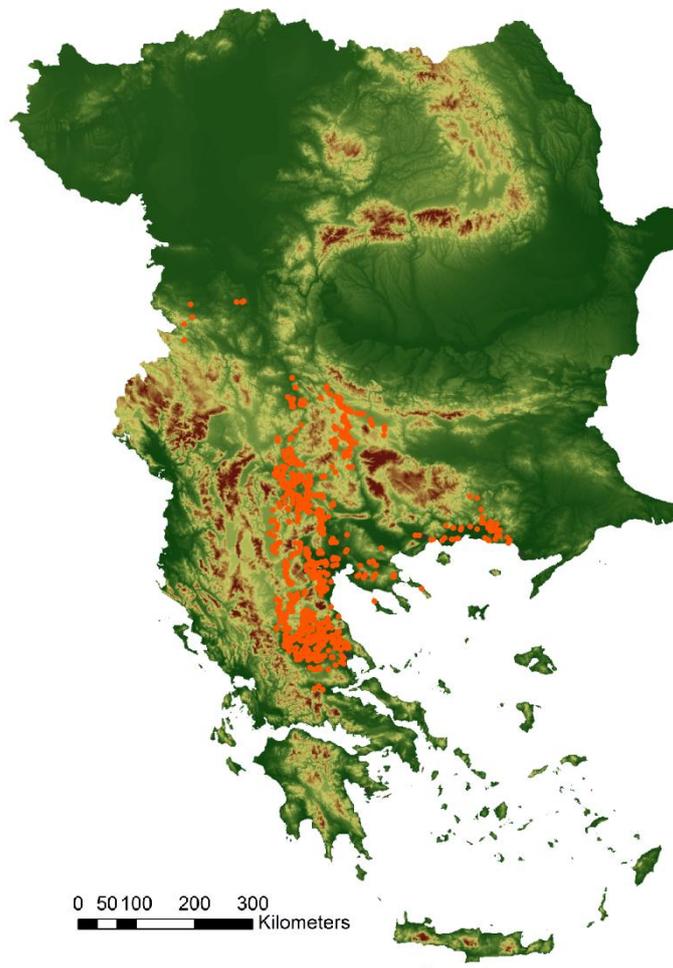


Figure 6.5 : Expansion des agents simulés entre 6.200 et 6.000 BC.

La période suivante, entre 6000 et 5800 BC (fig. 6.6), l'expansion produite par les agents est très importante. Leur nombre et leur densité s'accroissent, et leur avancée dévient plus rapide ; la péninsule Balkanique est presque complètement colonisée. Cette période correspond en archéologie à la diffusion de la culture Starčevo en Serbie, Criș en Roumanie et Körös en Hongrie. La présence d'agents en Bulgarie centre-orientale est finalement attestée aussi dans le modèle, même si elle pourrait être plus tardive que ce qui est montré par les traces archéologiques. Pendant cette période, l'expansion est très rapide, avec les colonisateurs qui atteignent la Voïvodine et la Transylvanie en Roumanie, en arrivant jusqu'à la partie méridionale de la Hongrie ; des grandes distances ont été parcourues, et une large partie de la région a été colonisée en seulement deux siècles. À ce point, la coïncidence entre l'expansion

simulée et celle observée dans les vestiges est très élevée ; les agents ont désormais colonisé toutes les meilleures zones de *best patch*, qui correspondent aux régions où la plupart des sites archéologiques ont été découverts.

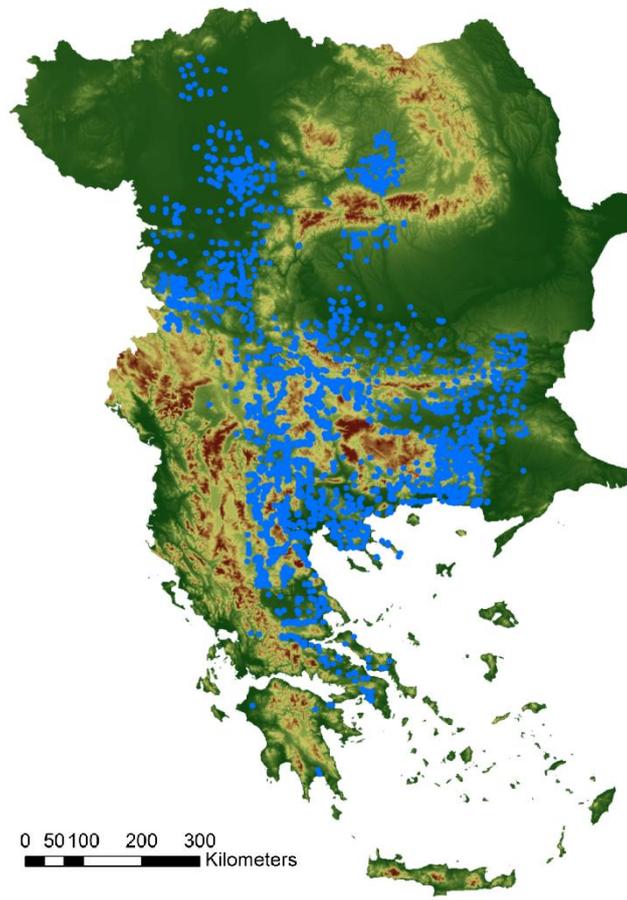


Figure 6.6 : Expansion des agents simulés entre 6.000 et 5.800 BC.

Le Néolithique Ancien se conclut en 5.800 BC selon la chronologie Grecque, mais pas selon celle de l'Europe de l'Est. Pour cette raison, des simulations qui arrivent jusqu'à 5600 BC ont été effectuées, afin d'observer l'expansion qui s'est produite dans les deux siècles suivants. Les données simulées pour la période qui va de 5800 à 5600 BC (fig. 6.7) ne montrent pas une expansion marquée ; il y a l'apparition de quelques hameaux-pixels dans des zones plus marginales, mais il s'agit surtout d'une augmentation de la densité des hameaux-pixels, plutôt que d'une nouvelle colonisation. La même chose est observable en archéologie ; l'expansion dans cette période est très limitée géographiquement, et les traces suggèrent qu'il s'agit plutôt d'une phase de densification.

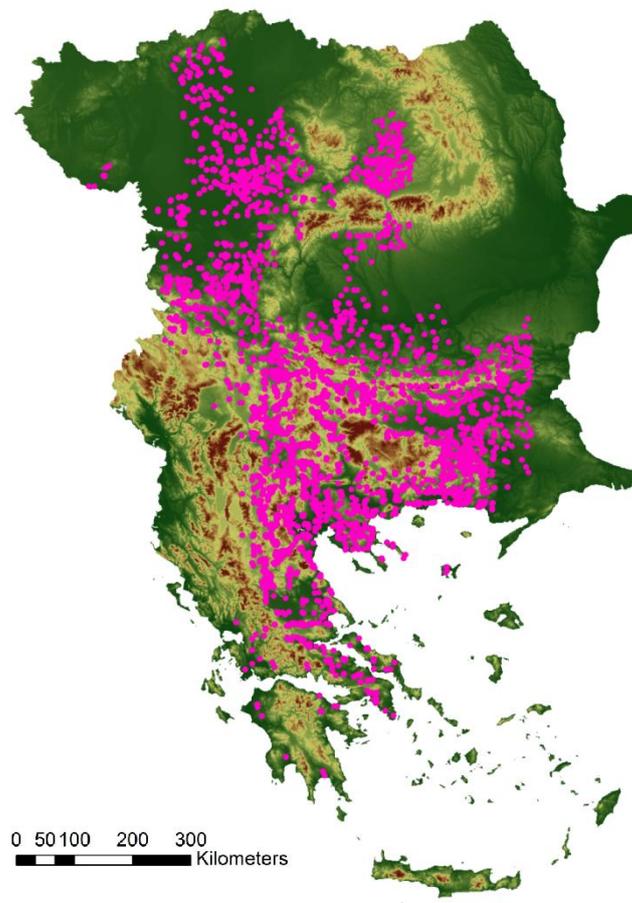


Figure 6.7 : Expansion des agents simulés entre 5.800 et 5.600 BC.

6.3.2 Discussion

La simulation de l'expansion des premiers agriculteurs dans les Balkans, à partir d'une zone relativement large située près de la côte Egéenne, a produit un patron de colonisation qui est adhérent en plusieurs points aux données archéologiques. Les hameaux-pixels simulés ont une tendance d'expansion du sud vers le nord, comme mis en évidence par plusieurs reconstitutions à l'échelle régionale et super-régionale, effectuées avec de techniques différentes (Brami et Zanotti 2015, Bocquet-Appel et al. 2009, Ammerman et Cavalli-Sforza, 1971). Le modèle reproduit correctement aussi le contraste entre l'est et l'ouest de la Grèce ; il existe en effet une vraie barrière géographique et climatique qui a retardé l'expansion vers la Grèce occidentale (Perlès 2001). Traverser les monts de la partie centrale de la Grèce était compliqué pour les agriculteurs, qui ont par conséquent préféré se diriger vers le nord, à

travers les vallées des rivières qui franchissent les montagnes (Davidson et al. 2006, Biagi et al. 2005). En outre, les conditions météorologiques de la côte ouest de la Grèce étaient moins favorables, et donc pas attrayantes pour les agriculteurs (Perlès 2001), comme mis en évidence aussi par la carte de *best patch* (cf. par. 3.2.1)

L'observation de cette expansion permet de comprendre que la géographie a eu un rôle déterminant. La Grèce est une région en prévalence montagneuse ; de vallées fertiles sont présentes, mais elles ont une extension limitée. Les premiers agriculteurs n'avaient pas beaucoup de choix au niveau de zones à occuper ; leur expansion a été obligée par les contraintes géographiques. À leur arrivée dans la péninsule Balkanique, ils se sont installés dans des régions fertiles et inhabitées comme la Thessalie, la Macédoine grecque, la Thrace. Pendant les trois-quatre siècles suivantes, presque aucune expansion n'est observée : les colonisateurs se trouvaient déjà dans des régions favorables pour l'agriculture et ils n'avaient pas la nécessité de partir ailleurs. Les premiers siècles consistent donc surtout en une densification des zones déjà occupées. Seulement quand les régions de départ sont saturées, les agriculteurs doivent partir coloniser ailleurs : le parcours est presque obligé, car la Grèce ne dispose pas d'autres vastes plaines où ils peuvent s'installer. Franchir les montagnes de la Grèce centrale était plus compliqué et moins pratique que suivre les vallées des fleuves qui se trouvent à nord. Un fois dépassée la zone montagneuse située dans la partie centrale de la péninsule Balkanique, et atteintes les plaines des Balkans septentrionaux, l'expansion devient beaucoup plus rapide. Les colonisateurs se trouvent finalement dans une région très vaste et principalement plate, avec très peu de frontières géographiques ; ils peuvent partir coloniser loin, sans être obligés à s'arrêter dans les rares et petites plaines comme dans les Balkans Méridionales. Une fois atteinte la barrière géographique située dans le sud de l'Hongrie (Banffy et Sümegei 2012, Sümegei et al. 2002) l'expansion s'arrête pour quelques siècles, suivie par une phase de densification, avant de recommencer avec le début de la culture Rubanée en Europe Centrale.

Le modèle a fourni une interprétation de l'expansion en termes géographiques ; il donne une possible explication pour le fait que l'expansion a été relativement lente au début - environ 300 ans pour sortir de la côte Egéenne, et 500 ans pour atteindre la partie centrale des Balkans - pour devenir ensuite énormément plus rapide : tout le reste de la région est colonisé dans les 200 ans suivants. Les contraintes géographiques sont sans doute une possible explication de cette différence dans la vitesse de l'expansion, qui est observable en archéologie et est reproduite correctement par le modèle.

Pendant l'analyse narrative des sorties il y avait des points obscurs, là où le modèle n'était pas adhérent aux observations archéologiques. Il s'agit de cas particuliers référés seulement à certaines zones, qui n'affectent pas la validité de la simulation dans son ensemble ; cependant, ces anomalies nécessitent d'une explication, pour comprendre s'il y a des facteurs qui n'ont pas été pris en compte correctement lors de la modélisation.

La différence la plus importante concerne la Bulgarie. En effet, dans la modèle il y a une totale absence de hameaux-pixels simulés dans la Bulgarie centre-oriental autour de 6000 BC ; les agents atteignent cette région seulement à partir du siècle suivant. Le site de Polyanitsa, situé en cette région, a des dates au radiocarbone qui peuvent attribuer son occupation autour de 6300 BC (Bln-1571) ; cette date est ancienne pour l'horizon culturel régional, mais Todorova (1995) la considère valide, en suggérant qu'il peut s'agir de la phase initiale d'une colonisation démique de la région. Outre à Polyanista, qui est un site particulièrement ancien, la culture Koprivets a été attribuée à la période entre 6.200 et 6.000 BC, même si sa datation est également objet de débat (Demoule à paraître). L'occupation tardive de la Bulgarie centre-orientale dans le modèle s'insère dans ce débat sur la présence d'agriculteurs en Bulgarie bien avant le 6.000 BC.

L'écart entre les données simulées et les traces archéologiques permet de s'interroger sur la nature de ce processus. Le modèle simule une expansion qui a comme point de départ les Balkans Méridionaux, avec les sites distribués dans de zones différentes situées près de la côte de la mer Egée. La simulation montre que les agents, au début de leur expansion, se dirigent vers la République de Macédoine. De preuves à soutien de cette thèse se trouvent en archéologie : la culture Anzabegovo, attestée en cette zone, a plusieurs éléments en commun avec le Néolithique ancien grec, en particulier avec la Thessalie, outre qu'avec la région d'origine de l'Anatolie de l'Ouest (Çilingiroğlu 2009). Aussi l'expansion suivante des agents vers le nord, en direction de la Serbie, trouve des confirmations dans la littérature : une similarité entre la Grèce et les Balkans du Nord, qui peut dater à l'émergence de la culture Starčevo, a été observée avec des analyses du chromosome Y (Voskarides et al. 2016). Le fait que les agents se dirigent de la Grèce vers les Balkans du Nord, à travers la Macédoine, est donc cohérente avec les traces observées en archéologie.

La situation en Bulgarie Septentrionale et Orientale est différente. Plusieurs auteurs comme Özdoğan (1999), Boyadzhiev (2006), Gurova (2008) suggèrent que le Néolithique bulgare n'a pas des origines liées au Néolithique Grec. Une comparaison des éléments du *paquet*

Néolithique suggère en effet que le Néolithique bulgare fait plutôt partie d'une autre vague de Néolithisation, qui a ses origines dans l'Anatolie Septentrionale, et qui est arrivée dans la région à travers le Bosphore.

Cela constitue une explication pour l'occupation tardive de la Bulgarie Nord-Orientale dans la simulation. Le modèle suggère qu'une expansion du système agricole à partir de la région Egéenne, basée sur de critères d'optimum agricole, se dirige d'abord en Macédoine et en Serbie, mais pas en Bulgarie, qui est colonisée plus tardivement par les agents. Cet écart peut donc dépendre de l'impossibilité de prendre en compte cette deuxième vague de Néolithisation. En effet, un des problèmes de la modélisation multi-agents est qu'un modèle est un système fini ; un agent peut y entrer seulement s'il y est né ou généré (Kohler et Varien 2012). Pour cette raison, la présence de cette deuxième vague de Néolithisation dans les Bulgarie Orientale n'est pas testable avec OBRESOC-BEAN.

Une solution aurait été de simuler directement l'expansion à partir de l'Anatolie Centrale, pour en suivre la direction et les trajectoires, plutôt que de déduire une sorte de validation narrative à partir d'un point de départ unique. Plusieurs essais de reproduire ce scénario ont été effectués en phase de construction et de test préliminaire de modèle, mais avec des résultats peu satisfaisants : les agents prenaient toujours la voie du Bosphore, en colonisant l'Europe à travers la Trace, mais ils ne passaient jamais par la mer Egée. Il ne s'agit pas d'une erreur dans le paramétrage ou dans l'estimation des variables géographiques, pédologiques et météorologiques ; cela est dû à l'impossibilité par le modèle de reproduire la voie maritime prise par les premiers agriculteurs arrivés en Grèce. Simuler une expansion à partir de l'Anatolie Centrale aurait été de grand intérêt, en permettant de tester des scénarios relatifs à cette précédente phase de dispersion, mais ce n'était pas possible avec ce modèle et aurait demandé des sévères modifications à sa structure.

La Bulgarie n'est pas la seule région où une possible anomalie est présente : le modèle n'initialise pas de hameaux-pixels dans le sud de la Grèce, même si un site très ancien, qui date probablement avant le 6.500 BC, a été retrouvé : il s'agit de Franchti, en Argolide. Le modèle montre une tendance d'expansion vers le nord, avec les agents qui se dirigent vers le sud beaucoup plus lentement ; cependant, la présence du site de Franchti contredit ce scénario, en attestant une occupation ancienne aussi dans la Grèce Méridionale.

Dans ce cas-là, l'anomalie peut être expliquée par la nature de ce site. Il s'agit d'un site en grotte, qui était déjà présent pendant le Mésolithique, avec une continuité d'occupation

jusqu'au Néolithique (Perlès et al. 2013). Quand les chasseurs/cueilleurs Mésolithiques ont occupé cette grotte, leur choix n'était pas basé sur les critères d'optimum agricole sur lesquels est construit le modèle, car à cette époque l'agriculture n'était pas encore connue. Ces individus sont entrés en contact avec les agriculteurs Néolithiques seulement après plusieurs siècles, et ils ont adopté la pratique de l'agriculture, comme montré par les semences trouvées dans les vestiges ; pourtant, leur emplacement n'était pas déterminé par la présence de terrains cultivables fertiles, mais par le fait qu'ils se trouvaient déjà là. La carte de *best patch* montre que Franchti a une valeur inférieure à la Thessalie ; pour cette raison, les hameaux-pixels simulés s'installent d'abord dans cette dernière région, et se dirigent vers le sud de la Grèce dans une phase plus tardive, seulement une fois que la Thessalie est saturée.

Cela explique d'autres petites anomalies où il y a la présence de sites avec un substrat Mésolithique, comme Sidari, dans l'île grecque de Corfou. Cette zone est occupée par les agents beaucoup plus tardivement que ce qui est montré par les dates au radiocarbone relatives à la présence des premiers agriculteurs. Le modèle suggère que les colonisateurs choisissent de s'installer dans les meilleures régions pour la pratique de l'agriculture ; néanmoins, dans la réalité, aussi les rares sites déjà occupés pendant le Mésolithique pouvaient adopter l'agriculture. Dans ce cas là, leur emplacement ne sera pas nécessairement dans les zones de *best patch*, mais là où le hameau avait été fondé bien avant le début du système agricole. Étant le nombre de sites mésolithiques dans la région très limité (cf. par. 2.8), cette anomalie n'a pas de conséquences sur le patron d'expansion régional.

Pour récapituler, l'observation de la distribution géochronologique des hameaux-pixels a montré qu'il y a une correspondance généralement très bonne entre l'expansion simulée par le modèle et celle observée en archéologie ; les contraintes géographiques peuvent avoir causé des variations dans le rythme de l'expansion. L'écart entre les données archéologiques et celles simulées peut être expliqué grâce à l'aide des traces archéologiques : la Bulgarie a probablement été colonisée par une autre vague de colonisateurs, qui ne peut pas être reproduite par le modèle ; et les zones où il y avait déjà une présence pendant le Mésolithique sont souvent occupées plus tardivement par les agents, car elles peuvent se trouver sur des pixels non optimaux pour l'agriculture.

6.4 Les foyers domestiques et les maisons archéologiques

La durée de vie des maisons, en termes d'années de leur occupation, n'a pas été traitée directement dans le chapitre relatif au contexte archéologique de la région. En effet, la durée d'une maison typique du Néolithique Ancien des Balkans n'est pas connue, à cause de l'absence d'estimations publiées en archéologie et des différences dans les matériaux utilisés dans toute la région, qui rendent impossible de formuler une estimation unique. Les maisons en bois, présentes dans le nord des Balkans, ont été déjà modélisées dans OBRESOC ; mais les maisons trouvées dans le sud des Balkans, en particulier en Grèce, représentent quelque chose de nouveau, étant typiquement bâties en brique crue ou adobe. De sources ethnographiques montrent que les maisons de ce type peuvent durer très longtemps : des siècles, et même des millénaires dans des cas exceptionnels, comme dans certaines grandes structures cérémonielles (Revuelta-Acosta et al. 2010). Ces matériaux sont très sensibles à la pluie et à l'humidité, mais s'adaptent très bien à des régions sèches (Rosenstock 2006). Même si une durée de vie extrêmement longue est improbable pour les petites maisons observées dans les Balkans, elles peuvent théoriquement être conservées longtemps avec des opportunes réparations (McHenry 1989). Parler d'une durée de vie standard pour des maisons bâties avec ce matériel n'est pas approprié, car la durée totale dépend de l'intention des habitants de les garder intègres. Les traces archéologiques suggèrent que souvent les phases d'occupation des sites se terminent avec un incendie. L'hypothèse qu'il s'agit d'incendies accidentels a été rejetée par plusieurs auteurs, en suggérant qu'il s'agit plutôt d'incendies volontaires pour clôturer une phase d'occupation (Brami 2014b, Chapman 1999). Les vestiges montrent donc qu'estimer la durée de vie moyenne d'une maison n'est pas approprié pour cette région ; les maisons sont détruites quand les individus décident de n'y habiter plus, plutôt que pour des raisons de dégradation physique des bâtiments.

Par contre, surtout dans la partie septentrionale des Balkans, l'utilisation du bois est importante. Ce matériau est plus facilement dégradable, et une reconstruction de la maison est nécessaire fréquemment ; les agents consacrent donc une partie de leur travail à la reconstruction des maisons. Cette estimation n'est pas appropriée pour les maisons en brique crue et adobe, qui ont une durée de vie potentiellement plus longue ; mais un portion de travail serait également nécessaire pour les réparations. L'hypothèse est que le modèle

fonction correctement pour toute la région : les unités de travail dédiées à la maison peuvent représenter sa reconstruction, comme dans OBRESOC, ou simplement les réparations.

Cependant, cette hypothèse rend *de facto* invalide la sortie qui concerne le nombre de maisons bâties par les agents : chaque maison réparée sera comptée comme une nouvelle maison. Pour cette raison, dans OBRESOC-BEAN on ne peut pas raisonner en termes de maisons : un foyer domestique qui construit sa maison en bois, avec une courte durée de vie, produira une quantité de maisons plus élevée qu'un foyer domestique qui vit dans une maison en brique crues, qui peut survivre longtemps. Il y a pourtant un élément commun à toute la région, selon les inférences archéologiques à la base de la modélisation : l'occupation de ces maisons par des familles nucléaires. L'analyse des sorties ne s'intéressera pas au nombre de maisons produites, mais plutôt au foyers domestiques générés. Dorénavant, le terme *maison* ne sera plus utilisé pour décrire les sorties du modèle, qui seront analysées seulement en ce qui concerne les *foyers domestiques* simulés ; ces derniers sont contrastés aux *maisons archéologiques*.

Avec l'hypothèse que chaque foyer domestique bâtit sa propre maison au moment du mariage, le modèle devrait générer une quantité de foyers domestiques qui n'est pas supérieure au nombre de maisons trouvées dans les fouilles archéologiques : chaque foyer doit avoir construit *au moins* une maison. L'absence de sites complètement fouillés rend cette analyse très compliquée, car il est presque impossible de connaître une valeur espérée archéologique à quoi s'attendre. Cependant, des estimations du nombre total de maisons présentes dans un village ont été décrites dans le paragraphe 2.2. À Nea Nikomedeia l'hypothèse est de 105 maisons totales produites pendant la phase 1, le même nombre pour la phase 2, et 90 maisons pour la phase 3. Les dates au radiocarbone ne permettent pas de détecter la durée de chacune de ces phases, mais elles montrent que la durée du Néolithique Ancien à Nea Nikomedeia a été d'au moins 350 ans. 300 maisons archéologiques sont estimées pour cette durée ; le taux de construction des maisons observé en ce site est d'environ 85 maisons bâties tous les 100 ans. Il faut préciser que le risque d'une surestimation est très élevé : dans d'autres contextes archéologiques, comme le Néolithique Final de Gomolava, le nombre total de maisons accumulées dans un site de taille similaire est estimé à 114 ± 20 sur une période de 350 ans ; il y aurait donc environ 32 maisons construites à chaque siècle. En outre, la durée d'occupation de Nea Nikomedeia pourrait avoir été plus longue : l'échantillon P-1202, rejeté lors de l'audit, suggère une possible durée totale d'occupation de 500 ans ; le taux de création de maisons serait de 60 par siècle, plus proche à ce qui est estimé pour Gomolava.

Ces inférences pourraient devenir plus robustes en les contrastant avec d'autres sites archéologiques, mais cela n'est pas possible à cause de l'absence de sites exhaustivement fouillés. Par exemple, une estimation pour Kovachevo est compliquée, car il s'agit d'un site de grande taille, supérieure à celle des hameaux-pixels simulés dans OBRESOC-BEAN, et donc non atteignable dans le modèle. En outre, la stratigraphie de ce site est compliquée, car seulement la couche Ib et Id sont évidentes, tandis que la couche Ia et Ic sont moins claires ; il est impossible d'estimer le nombre de maisons pour chacune de ces couches.

Ces estimations de maisons archéologiques sont contrastées au nombre de foyers domestiques produits par le modèle dans des hameaux comparables aux sites fouillés. La plupart de hameaux-pixels simulés ont une durée de vie largement inférieure à 350 ans ; leur occupation est souvent plus courte. En fin de simulation, seulement environ 5% des sites a été occupé au moins 350 ans ; il s'agit d'une durée d'occupation très longue, qui n'est pas commune. Les sites archéologiques fouillés sont souvent les plus importants de la région, composés de plusieurs couches issues d'une occupation longue ; mais le modèle suggère que la plupart des sites ont eu en vérité des occupations plus courtes. En outre, la plupart de hameaux-pixels sont créés dans la partie finale de la simulation, après 6.000 BC. Même dans les simulations qui arrivent jusqu'à 5.600 BC, de nombreux hameaux-pixels n'ont pas eu le temps de durer au moins 350 ans, car ils ont été fondés seulement vers la fin de la simulation. Il est donc difficile de trouver, dans les sorties, des hameaux qui ont une durée d'occupation comparable aux sites archéologiques ; il y en a surtout dans la partie centre-méridional des Balkans, qui a été colonisée plus tôt.

Une autre précision est nécessaire : le modèle produit des différences remarquables dans le nombre de foyers domestiques présents à l'intérieur des hameaux-pixels pendant de la durée de leur occupation. En effet, il existe des hameaux-pixels qui arrivent à compter une trentaine de foyers domestiques contemporains, tandis que d'autres ne dépassent jamais la quinzaine ; à parité de durée, les premiers auront généré un nombre de foyers domestiques plus élevé. Comme dans la réalité les villages peuvent avoir des tailles différents, aussi le modèle produit de hameaux-pixel plus grands et d'autres plus petits.

Dans les données en sortie du modèle, les hameaux-pixels qui atteignent leur capacité maximale arrivent à produire un nombre de foyers domestiques plus élevé que les maisons archéologiques espérées. En effet, sur 350 ans, plus de 400 foyers domestiques sont générés, à différence des 300 maisons archéologiques maximales estimées. En termes plus généraux, un

hameaux-pixel simulé où vivent 25-30 foyers domestiques (la taille estimée d'un village néolithique, cf. par 2.2) voit, pendant un siècle, la succession d'environ 125 foyers domestiques. Le ratio estimé en archéologie est, dans l'estimation la plus abondante, de 85 maisons/siècle. Le modèle produit donc un nombre de foyers domestiques supérieur aux maisons archéologiques espérées ; cet écart est assez grand, et pourrait être encore plus important en considérant les risques d'une surestimation du nombre de maisons de Nea Nikomedeia.

La simulation, contrastée à l'archéologie, montre que l'hypothèse que chaque foyer domestique bâtit sa propre maison au moment de sa fondation ne semble pas correcte. Si cela était vrai, on observerait un nombre de maisons archéologiques adhérent au nombre de foyers domestiques produits par le modèle. Il serait possible de voir plus de maisons archéologiques, car les foyers domestiques peuvent reconstruire leur maison à de certains intervalles de temps. Cependant, les foyers domestiques produits par le modèle, dans une période de temps coïncidente aux phases d'occupation archéologiques, sont plus nombreux que les maisons archéologiques ; de nouvelles hypothèses sont formulées pour comprendre cet écart.

D'abord, une erreur dans l'estimation des maisons archéologiques présentes dans un village est possible. Il y a en effet un biais qui concerne les sites en *tell*, à cause d'une tendance à la sous-estimation de leur surface. En même temps, les estimations faites sur la base d'une densité homogène de maisons sur toute la surface du site se basent sur l'hypothèse que cette densité soit constante, chose qui ne peut pas être prouvée vu l'absence de sites complètement fouillés. Le progrès de la recherche archéologique, en particulier avec l'augmentation de sites exhaustivement fouillés, pourrait être de grand aide pour résoudre cette question, en permettant de formuler d'hypothèses plus robustes sur le nombre de maisons archéologiques. Néanmoins, à l'état actuel de la recherche, il n'est pas possible d'attribuer cet écart exclusivement à une mauvaise estimation archéologique, et d'autres possibles raisons sont explorées.

Un problème dans la structure du modèle ne peut pas être exclu : le taux de création des foyers domestiques peut être erroné. Cependant, les variables démographiques comme le taux d'accroissement, la fertilité, la mortalité, le mariage, sont basées sur de robustes inférences paléodémographiques qui ont déjà été testées dans le modèle OBRESOC ; il est improbable qu'elles sont complètement erronées et qu'elles peuvent donner des sorties aberrantes.

L'estimation du nombre de foyers domestiques simultanés présents dans un hameau pourrait n'être pas correcte : les données simulées montrent que les hameaux qui ne dépassent pas 15-20 foyers domestiques simultanés produisent environ 75-85 foyers domestiques chaque siècle ; ces valeurs sont plus adhérentes aux estimations de Nea Nikomedeia. Pour s'approcher à des valeurs conformes aux estimations de Gomolava, le nombre de foyers simultanés dans le modèle ne devrait pas dépasser 10-12 foyers. Une hypothèse qui pourrait expliquer ce grand écart est donc une mauvaise estimation de la taille du hameau moyen faite dans le paragraphe 2.2.1 : si les villages Néolithiques étaient largement plus petits de ce qui est communément pensé, il y aurait une meilleure adhérence entre les foyers domestiques simulés et les maisons archéologiques fouillées, car chaque hameau-pixel serait occupé par moins de foyers domestiques.

Les valeurs suggérées par le modèle sont en contraste avec toutes les estimations archéologiques publiées jusqu'à maintenant, où la taille moyenne du village Néolithique est toujours d'environ 200 personnes, et jamais inférieur à 100 individus (Perlès 2011). En outre, le modèle suggère que la présence de hameaux de cette petite taille est improbable. En effet, avec un paramètre de densité locale maximale plus faible, et donc avec des hameaux plus petits, l'expansion deviendrait beaucoup plus rapide : les hameaux seraient saturés plus rapidement, forçant les agents à partir coloniser plus tôt. Cette vitesse peut être réduite en augmentant la densité au supercarré, mais cela impliquerait une plus grande densité de hameaux, qui n'est pas observée pour les sites archéologiques. Une autre possibilité est de réduire ultérieurement le déjà limité nombre d'agents initiaux ; cependant, une quantité plus faible de couples au départ n'arriverait pas à produire assez d'agents pour coloniser la totalité de la région avant la fin du Néolithique Ancien. Donc, le modèle multi-agents suggère que des hameaux occupés par une quantité très faible de foyers domestiques ne sont pas probables, car l'expansion simulée aurait une plus faible adhérence au patron de colonisation observé en archéologie.

Ce résultat pourrait aussi mettre en discussion l'hypothèse à la base du modèle que les maisons sont occupées par des familles nucléaires : la faible adhérence entre le nombre de foyers domestiques simulés et les maisons archéologiques serait explicable si deux familles nucléaires (ou plus) pouvaient vivre sous le même toit. Dans ce cas là, le nombre de foyers domestiques serait évidemment supérieur à ce des maisons construites. Les traces archéologiques ne permettent pas de donner une réponse à cette question ; mais il reste très improbable que deux familles nucléaires pouvaient habiter dans la même maison, vue la taille

extrêmement petite de cette dernière. Dans certains cas la fusion entre deux foyers domestiques différents suite à la mort d'une partie des membres de la famille, ou quand un vieux parent reste seul, ne peut pas être exclue. Cependant, il devrait s'agir de cas particuliers, non de la routine dans la vie familiale.

Une autre explication est aussi possible : la réoccupation des maisons. Quand un foyer domestique s'éteint, où si un couple de parents quitte le village pour partir coloniser ailleurs avec leurs enfants, une maison reste vide dans le village ; il est possible que cette maison sera occupée à nouveau. Les maisons en briques crues et adobe peuvent durer théoriquement très longtemps ; avec les opportunes réparations, une maison peut se conserver pour la durée totale de la phase d'occupation d'un village. Pourquoi les agriculteurs du Néolithique devraient-ils détruire une maison encore parfaitement habitable, pour en bâtir une nouvelle ? Seulement à la fin d'une phase d'occupation, parfois clôturée par un incendie, les maisons étaient détruites et reconstruites à nouveau (Brami 2014b). Outre la possibilité d'une réoccupation, l'hypothèse d'une reconstruction au même endroit peut aussi être faite. Cette idée est suggérée par les fondations en pierre qui sont présentes en certains sites, comme Sesklo (Pike et Yiouni 1996) ou Achilleion (Gimboutas 1974). Il s'agit de fondations très robustes et durables ; si pour quelque raison une maison est détruite, les mêmes fondations peuvent être réutilisées et la nouvelle maison peut être bâtie au même emplacement, en ne laissant pas les traces de deux différentes maisons, malgré le fait que deux foyers domestiques y ont vécu. La possibilité de la réoccupation des maisons n'a pas été prise en compte dans la modélisation d'OBRESOC-BEAN ; cependant, elle constitue une possible explication pour l'écart entre les foyers domestiques simulés et les maisons archéologiques estimées.

Cette hypothèse d'une réoccupation et d'une reconstruction des maisons est inédite dans ce contexte archéologique, car elle aurait difficilement été mise en évidence sans l'utilisation de ce modèle multi-agents. Il existe plusieurs raisons qui peuvent expliquer cet écart ; même si d'erreurs dans le modèle ou dans les estimations archéologiques ne peuvent pas être exclues, de nouvelles hypothèses ont aussi été formulées. Le modèle n'est pas une représentation de la réalité, donc ce qui émerge n'est pas une découverte archéologique ; cependant, l'exploration d'éléments qui sont cachés dans les vestiges à ajouté des suggestions et des perspectives différentes à la recherche, en permettant d'introduire une nouvelle problématique. Grâce au modèle, l'hypothèse d'une réoccupation ou d'une reconstruction des maisons au même emplacement a été formulée ; mais seulement l'archéologie peut valider ou rejeter cette hypothèse. De fouilles plus extensives permettraient de savoir plus sur le nombre effectif de

maisons trouvées dans un site archéologique, pour mieux comprendre l'entité de cet écart. En outre, une estimation de la durée de vie des maisons en adobe et brique crues dans le contexte spécifique des Balkans Méridionaux serait importante : trouver des traces qui montrent la possibilité de leur occupation par plus qu'une génération représenterait une validation de cette hypothèse.

6.5 La vie des foyers domestiques

Le foyer domestique est un autre élément qui peut être exploré grâce à ce modèle. D'informations sur la composition d'une famille Néolithique sont totalement indétectables dans les vestiges ; les seules suggestions proviennent d'inférences ethnoarchéologiques. Les estimations effectuées par les archéologues sur le nombre de personnes présentes dans un foyer domestique sont généralement basées sur la surface de la maison archéologique (Porčić 2010) ; une valeur généralement acceptée et de 6 ou 7 individus présents simultanément (Perlès 2001).

Cependant, il y a souvent une tendance à surestimer le nombre de membres du foyer domestique dans les sociétés préindustrielles ; outre la mortalité infantile très élevée, il faut aussi prendre en compte le taux de rotation des enfants, c'est-à-dire que les enfants les plus âgés quitteront la maison quand la mère sera encore en âge fertile. Donc, même si la mère peut générer un nombre élevé d'enfants, c'est rare qu'ils seront tous simultanément présents, car certains meurent tôt, tandis que d'autres quittent le foyer domestique une fois atteinte l'âge adulte. Laiou (1977) observe que dans la société paysanne grecque, pendant la période byzantine, la taille moyenne du foyer était comprise entre 3,7 et 4,7 personnes : l'ethnographie suggère donc un nombre d'individus présents dans le foyer domestique inférieur aux estimations archéologiques classiques. Analyser le fonctionnement et la structure des foyers domestiques produits par OBRESOC-BEAN peut aider à explorer cette problématique. Le modèle reproduit-il les estimations des archéologues, ou suggère-t-il plutôt que les foyers domestiques étaient relativement petits ?

Dans les sorties agrégées, le nombre d'individus dans chaque foyer domestique est de 2,74 personnes moyennes par foyer dans la simulation 44. Il s'agit d'un nombre d'individus très

faible, situé en dessous de toutes les estimations des familles dans les sociétés préindustrielles, même les plus conservatives. Cela est dû à la modélisation de la scission dans OBRESOC-BEAN, où les enfants, au moment du mariage, abandonnent le foyer domestique des parents pour en créer un nouveau. La conséquence est la présence d'un grand nombre de foyers domestiques où il n'y a que deux personnes : le jeune couple qui vient de se marier. Ce n'est pas rare en outre de trouver des foyers où il ne reste que le couple de vieux parents (ou un seul parent veuf), lesquels enfants ont tous quitté le foyer domestique. Une analyse des sorties globales du modèle n'explore pas seulement les familles nucléaires "*typiques*", composées par les parents et leurs enfants non mariés, mais aussi de situations particulières et intermédiaires où les foyers domestiques sont bien plus petits. Les foyers qui se trouvent en cette situation ont un grand poids dans le modèle : à l'année finale de la simulation 44, 81.447 foyers domestiques sont présents ; parmi eux, 43.523 (le 53,4%) sont composés par 1 ou 2 personnes. Donc, plus de la moitié des foyers domestiques présents dans le modèle ne sont pas composés par une famille nucléaire typique avec les parents et leurs enfants non mariés, mais par un couple qui vient de se marier ou par les vieux parents à la fin de leur vie.

Une observation des sorties agrégées montre donc les foyers domestiques dans de différents moments de leur vie ; cela n'est pas explicatif de la structure de chaque famille et de son cycle de vie. Grâce à la manipulation des *big data*, les foyers domestiques peuvent être pris et analysés individuellement. Un échantillon de 50 foyers domestiques est suivi à partir du moment de leur fondation, pendant les 50 ans suivants (script SQL 3 dans le CD-Rom). Cet échantillon couvre de différentes zones et de différents intervalles chronologiques ; le but est d'observer l'évolution d'un foyer domestique à partir de sa naissance jusqu'à sa mort.

Vingt-sept parmi les 50 foyers domestiques ne survivent pas jusqu'à 50 ans : les deux parents meurent avant, et les foyers s'éteignent par conséquent. 50 ans après la fondation du foyer, c'est-à-dire après le moment du mariage, les parents ont plus de 65 ans ; un décès avant cet âge est probable à cause du taux de mortalité estimé pour le Néolithique. Cependant, la présence d'au moins un parent de plus de 60 ans est signalée dans les autres 23 foyers.

Les foyers domestiques ne suivent pas tous la même trajectoire ; il y en a certains qui restent petits, et d'autres qui deviennent plus larges. Un exemple de foyer domestique petit est le foyer 537, où la femme a généré seulement trois enfants, et deux parmi eux sont morts avant leur cinquième année d'âge ; le taille maximale du foyer ne dépasse jamais les quatre

individus (fig. 6.8a). Cependant, le foyer vit très longtemps et il n'est pas encore éteint à la 50ème année, à cause de la présence d'un parent veuf qui n'est pas encore décédé.

Des foyers domestiques très grands sont aussi présents, comme le foyer 8.656, où il y a un maximum de 8 personnes simultanées à la 24ème année depuis sa fondation (fig. 6.8b). Dans ce foyer, la femme a généré huit enfants, et seulement deux parmi eux sont morts dans leur premières cinq années de vie ; les six survivants vivent sous le même toit des parents. Il s'agit néanmoins d'une situation transitoire : en effet, le nombre d'individus décroît très rapidement après avoir touché ce pic de huit personnes simultanées. Seulement quatre personnes restent dans la maison à la 26ème année : un enfant et un parent sont morts, tandis que deux enfants se sont mariés et ont quitté le foyer domestique. Le foyer s'est éteint 37 ans après sa création, quand les deux parents fondateurs sont morts.

Le modèle reproduit donc des situations familiales très différentes, néanmoins possibles, en étant bâti sur des observations anthropologiques et ethnographiques, et en utilisant des tables démographiques réelles.

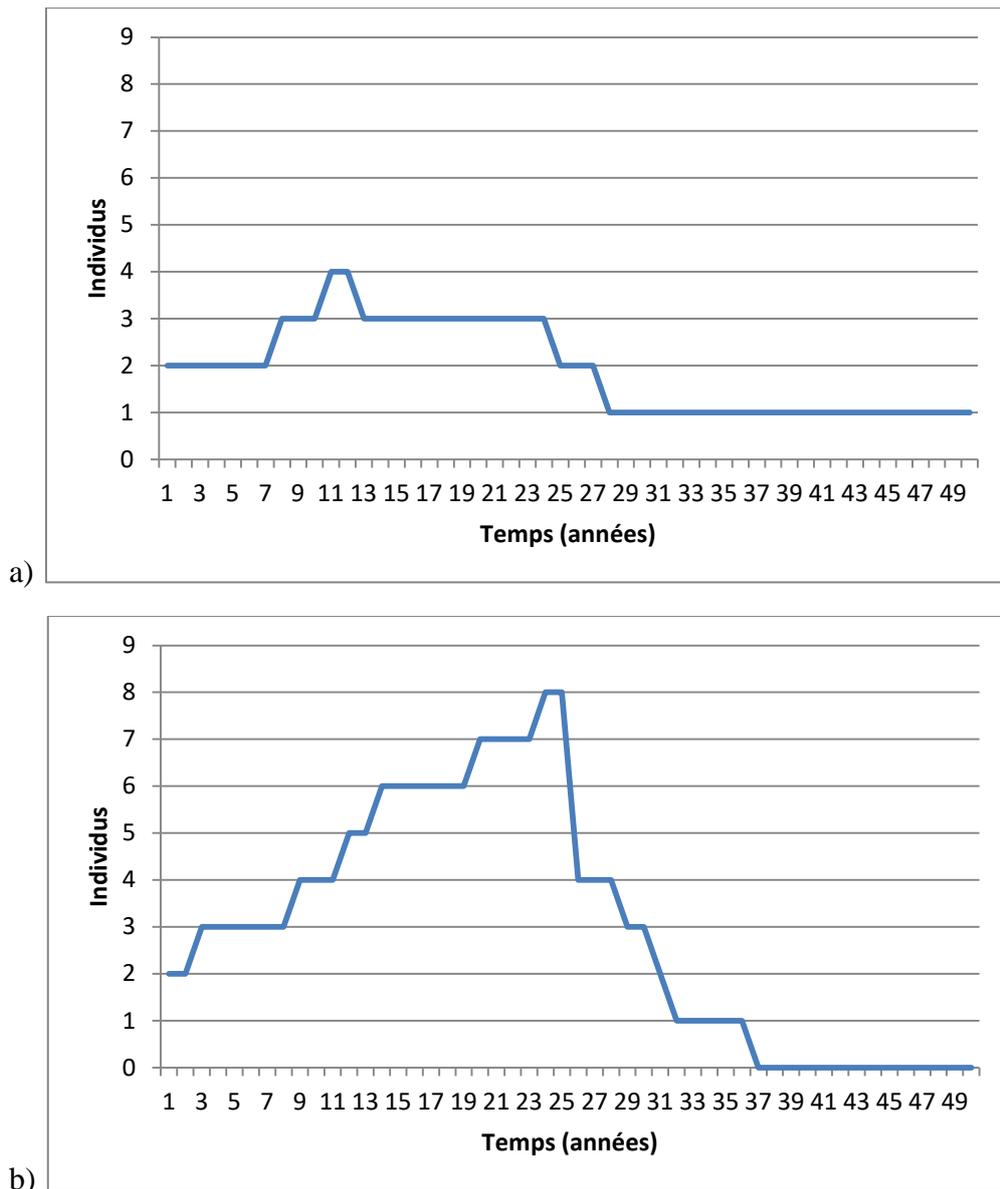


Figure 6.8 : Evolution démographique de deux foyers domestiques : le foyer 537 (a) et le foyer 8.656 (b).

Dans la figure 6.9 est présenté le nombre moyen de personnes qui habitent simultanément dans les foyers domestiques de l'échantillon des 50 foyers tirés, dans leur temps relatif. Le graphique montre que le moment de la taille maximale des foyers est entre 16 et 24 ans à partir de leur création. Dans cette période la mère est encore fertile et continue à avoir des enfants, tandis que les enfants ne se sont pas encore mariés et n'ont pas quitté le foyer domestique. Pendant les premiers 17 ans la population moyenne des foyers s'accroît car les couples de parents génèrent des enfants ; cette croissance est nette malgré la mortalité infantile très élevée. Une fois touché le pic, la population du foyer commence à décroître à cause du taux de rotation des enfants, qui se marient et quittent le foyer, ainsi que de la mortalité. En

moyenne, les foyers arrivent à dépasser 4 individus simultanés dans leur moment d'expansion maximale.

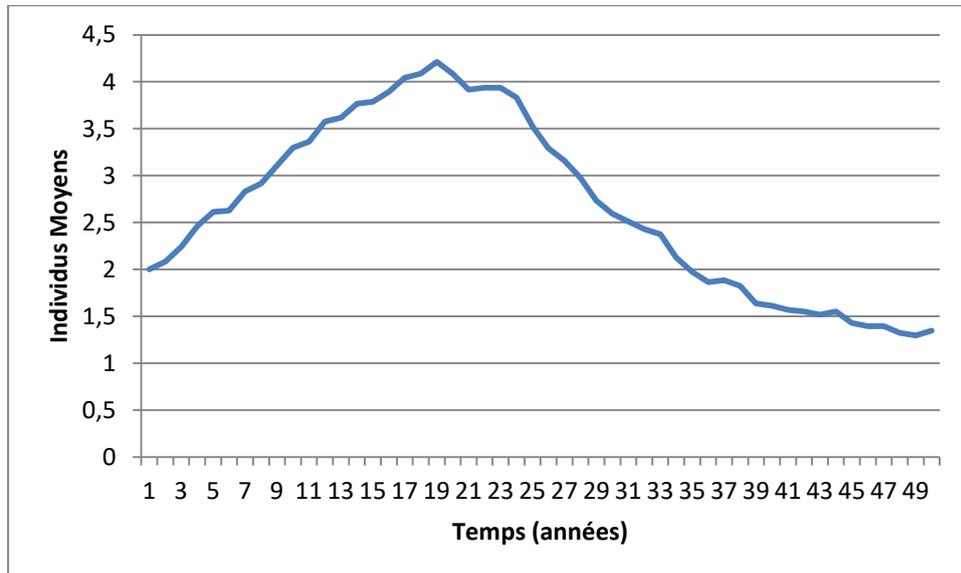


Figure 6.9 : Variation au cours du temps du nombre moyen d'individus dans un échantillon de 50 foyers domestiques.

Les foyers domestiques simulés montrent une différence marquée par rapport aux estimations faites par les archéologues : le nombre moyen d'individus présents est largement plus faible dans le modèle. L'estimation des archéologues d'avoir 6 ou 7 individus dans une maison est en vérité reproduite par certains foyers : ce nombre de personnes peut être présent dans certains moments de leur vie. Cependant, il s'agit de situations transitoires, quand la femme a généré plusieurs enfants qui ne se sont pas encore mariés et qui conséquemment n'ont pas quitté le foyer domestique des parents. Dans un village où de nombreuses maisons contemporaines sont présentes, il est très improbable que toutes les maisons sont occupées par des familles qui se trouvent dans leur moment d'expansion maximale. Le modèle suggère qu'il y a aussi des foyers domestiques composés par de couples qui n'ont pas encore eu des enfants, ou par de vieux dont les enfants ont déjà quitté le foyer pour se marier. Le modèle montre qu'une surestimation archéologique pourrait avoir été effectuée : les foyers domestiques n'étaient pas typiquement composés *par* 6-7 personnes, mais *jusqu'à* 6-7 personnes. De la même façon, une estimation de 200 personnes dans un village Néolithique est probablement exagérée : le modèle suggère qu'une valeur moyenne est d'environ 80 individus.

Ce questionnement d'une hypothèse généralement acceptée en archéologie ouvre à une autre réflexion : la taille d'une maison ne peut pas être considérée comme un indicateur du nombre

de personnes à son intérieur. Quand une nouvelle maison est créée, il y a seulement deux occupants : le couple marié, qui aura bientôt des enfants. Le couple ne construira pas une maison planifiée pour deux personnes, qui devra être agrandie les années suivantes. De la même façon, quand les enfants quittent le foyer, il n'y a aucune raison de réduire la taille de la maison. Construire une maison comporte une quantité de travail importante, qui rend improbable la modification de sa structure chaque fois qu'il y a un changement dans la composition démographique du foyer domestique. Le paragraphe précédent a en effet montré comme les maisons du Balkans Méridionaux peuvent avoir une durée de vie très longue, en suggérant l'hypothèse de la possibilité d'une réoccupation. Dans les vestiges archéologiques, sauf des rares exceptions, la taille des maisons est toujours homogène ; il n'y a pas de différences dans les dimensions qui peuvent suggérer que la structure de la maison dépend du nombre d'individus y vivants. Probablement, les maisons étaient déjà bâties en prévision d'accueillir jusqu'à 6 ou 7 personnes, indépendamment du fait que le foyer atteint effectivement cette taille ou non. Cette valeur correspond aux estimations des archéologues, mais se réfère à la taille maximale ; dans plusieurs moments de la vie d'une famille, le nombre d'individus présents dans la maison est plus faible.

En analysant la structure des foyers domestiques, l'utilisation d'un modèle de type multi-agents a montré une autre grande potentialité : mettre en discussion les croyances archéologiques. Les résultats des simulations suggèrent que les estimations des archéologues peuvent être exagérées, et ont permis de comprendre la raison de cette erreur. D'estimations faites seulement sur la base de vestiges archéologiques n'auraient pas pu prendre en compte plusieurs éléments qui, au contraire, sont simulés par le modèle. Cette approche a donc permis une nouvelle exploration de cette problématique et la formulation de nouvelles estimations sur la structure d'un foyer domestique Néolithique, ainsi que sur la taille d'un village typique.

6.6 Le front pionnier

Le front pionnier est un autre élément qui est difficilement détectable dans les vestiges archéologiques, mais qui peut être exploré grâce à ce modèle de type multi-agents. En particulier, le modèle permet la comparaison en termes démographiques et économiques entre les zones d'expansion de la colonisation, appelées "*front pionnier*", et les autres régions déjà

colonisées où la densité s'accroît. Le terme front pionnier est un abus de langage, et ne se réfère pas nécessairement à un front linéaire, comme le front de la Première Guerre Mondiale. Le front pionnier de l'expansion Néolithique peut être ponctué et discontinu ; le critère qui le caractérise est qu'il est situé à la périphérie de l'aire globale d'expansion. Une comparaison entre la structure économique et démographique des agents situés dans les régions de nouvelle colonisation et celle des agents qui habitent dans des zones de densification permet une exploration d'éléments inédits qui peut donner des nouvelles idées à la recherche archéologique.

6.6.1 Ethnographie du front pionnier

Pour détecter le front pionnier dans les vestiges archéologiques il est nécessaire d'identifier quels sont les restes les plus anciens dans un site, ceux qui appartiennent aux premiers colonisateurs. Dans les Balkans il n'y a pas de sites archéologiques complètement fouillés, et même les plus connus présentent une stratification des couches complexe qui ne permet pas d'identifier avec certitude le moment de la première occupation ; trouver des traces du front pionnier dans cette région est impossible. Dans certains sites, de différentes phases d'occupation ont été reconnues ; la couche la plus ancienne correspond, théoriquement, à la première phase d'occupation du village. Cependant, ces phases peuvent durer un siècle et plus ; même à l'intérieur de la couche la plus ancienne, il est impossible d'identifier les vestiges qui appartiennent aux colons qui sont arrivés en premier.

Pour cette raison, le front pionnier du modèle ne peut pas être contrasté aux données archéologiques de la région ; une idée du fonctionnement d'un front pionnier peut être trouvée seulement dans l'ethnographie. Cependant, l'ethnographie du front pionnier est parfois trompeuse : les fronts pionniers ne sont pas tous identiques, et certains éléments sont spécifiques des sociétés modernes et ne sont pas adaptables au contexte Néolithique. Par exemple, les cultivateurs sur le front pionnier de l'Amazonie ont une partie des terrains consacrée aux cultures "*économiques*" comme le café, donc destinées uniquement au marché (De Sartre 2006). Dans plusieurs cas, l'expansion dépend de la tendance du marché ; le contexte Néolithique est très différent, car les premiers agriculteurs n'avaient aucun intérêt à produire pour le marché, en se préoccupant uniquement de leur survie. Dans d'autres

situations, des politiques du gouvernement peuvent favoriser la colonisation de certaines régions, par exemple avec la création d'infrastructures. Cela n'est pas appropriée à représenter le front pionnier Néolithique, où l'expansion ne peut pas avoir été planifiée par des entités suprarégionales. Dans l'analyse des sources ethnographiques, il faut comprendre quels sont les éléments qui peuvent caractériser un front pionnier, indépendamment de l'époque, et qui sont cohérents avec la société du Néolithique Ancien des Balkans.

Les "*dix commandements*" des colonisateurs (cf. par.4.2.2) suggèrent que la présence de familles avec des petits enfants est improbable sur le front pionnier. Néanmoins, Perz (2002) montre qu'aussi de parents avec des nouveaux nés peuvent faire partie du processus de colonisation de l'Amazonie. Dans ce cas là, les colonisateurs, pendant les premières années, préfèrent des cultures avec un rendement sûr, et seulement dans un deuxième moment ils convertissent une partie de leur terrain à d'autres cultures en fonction du marché. *A priori*, cette description est en contraste avec le modèle OBRESOC-BEAN, où les familles avec de petits enfants ne partent pas coloniser le front pionnier ; cependant, plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence. D'abord, les techniques actuelles assurent un rendement majeur avec un moindre effort ; cela réduit le déséquilibre entre producteurs et consommateurs, en permettant de diminuer la quantité de travail nécessaire. En outre les agriculteurs actuels sont moins vulnérables aux mauvaises récoltes. De différences substantielles sont aussi trouvées dans la structure du foyer domestique : sur le front pionnier Amazonien il y a en moyenne plus de 4 adultes par foyer domestique (Perz 2002); il ne s'agit pas de familles nucléaires. Ce type de famille est différente de celle modélisée pour les Balkans ; avec un nombre d'adultes plus élevé, la production sera assurée malgré la présence d'enfants dans le foyer .

Comme dans le modèle OBRESOC-BEAN, aussi dans les sources ethno-historiques le mariage est la raison qui déclenche le départ d'un couple et, par conséquent, la colonisation. Par exemple en Thaïlande (Vanlandingham et Hirschman 2001) le mariage coïncide avec la création d'un nouveau foyer domestique ; ce foyer peut soit s'installer dans l'ancien village, soit partir vers un nouveau village qui vient d'être fondé. Il existe aussi la tendance à aller rejoindre des membre de la famille qui se trouvent déjà sur le front pionnier. Le même comportement, en termes de mariage et de colonisation, a été observé dans les Philippines (Wernstedt et Simkins 1965).

Les agents, notamment en début de simulation, préfèrent rester dans les zones où il sont déjà installés ; seulement une fois que ces régions sont saturées, les agents partiront coloniser

ailleurs. Le même comportement peut être observé dans les sources ethno-historiques. La région de Mindanao, dans les Philippines, est très fertile et favorable à l'agriculture ; cependant, avant la Deuxième Guerre mondiale elle n'était pas choisie comme destination par les colonisateurs, qui préféraient rester cultiver les zones déjà occupées. Seulement quand la pression démographique est augmentée dans le reste du pays, les gens ont commencé à coloniser Mindanao (Wernstedt et Simkins 1965). Donc cette source suggère que, si les agriculteurs se trouvent déjà dans une région fertile, ils n'ont pas de raisons de la quitter, même s'il y a d'autres régions propices pour l'agriculture avec une grande quantité de terre libre. Ce comportement est correctement reproduit par le modèle, où les agents quittent les régions où il se trouvent seulement après que la densité maximale est atteinte. En outre, dans le modèle comme dans l'ethnographie, les premières zones de colonisation, donc le premier front pionnier, deviennent dans un deuxième moment les zones de départ d'émigrants ; le Nicaragua en est un exemple (Maldidier 2004).

Plusieurs auteurs ont réfléchi sur la raison pour laquelle les gens décident d'émigrer. Dans plusieurs cas il s'agit de la pénurie de terre ou la pauvreté, comme en Népal (Shrestha 1989) ; cependant, parfois les colonisateurs ne sont pas pauvres, mais ce sont des individus qui décident de partir à la recherche d'un majeur profit (Fite 1976). Dans le cas du Néolithique, ces raisons ne semblent pas appropriées : la terre est abondante, au moins pendant la première phase d'expansion ; la richesse ne peut pas être mesurée en termes économiques actuels, et difficilement pouvait être la raison à la base de la scission. Ce qui pousse les agriculteurs à partir, dans le modèle OBRESOC-BEAN, a été modélisé à travers le *scalar stress* (cf. par. 4.2.2), c'est-à-dire une augmentation des tensions sociales, et une réduction du consensus, à fur et à mesure que la densité s'accroît.

Ces sources ethno-historiques aident à comprendre et à expliquer les mécanismes de colonisation, et montrent des similarités entre ce qui a été modélisé dans OBRESOC et ce qui a été observé dans des sociétés réelles. Cependant, elles ne donnent pas d'idées sur ce qui peut être examiné lors de l'analyse des données simulées ; quelques suggestions sur ce sujet sont décrites ci-dessous.

Easterline (1986), avec un étude sur la colonisation du Nebraska pendant le 19ème siècle, montre comment la natalité était beaucoup plus haute dans les zones de frontière que dans les anciennes zones d'occupation. L'auteur en donne deux explications: i) il y a beaucoup de jeunes couples parmi les colonisateurs, qui auront bientôt des enfants ; cela provoque une

augmentation de la natalité ; ii) une grande disponibilité de terre et de ressources peut pousser les couples à avoir plus d'enfants. Au contraire, dans les zones densément peuplées, les couples essaient de limiter leur fécondité ; avoir de nombreux enfants provoquerait une réduction de la richesse de la famille. S'il n'y a pas de terrains libres, ce n'est pas possible d'en obtenir plus, et conséquemment les possessions doivent être partagées parmi tous les enfants. La même chose est décrite par Vanlandingham et Hirschman (2001) en Thaïlande : la fertilité est plus faible dans les anciennes zones de colonisation que sur le front pionnier. L'hypothèse des auteurs est que, même s'il n'existait pas de vraies méthodes contraceptives, les gens savaient comment réduire la fécondité. Ces sources donnent un premier point d'investigation des données simulées dans OBRESOC-BEAN : le modèle suggère-t-il le même scénario, avec une fécondité plus élevée sur le front pionnier par rapport aux autres zones de densification ?

Un autre point intéressant qui émerge depuis les sources ethno-historiques est l'évolution de l'activité des foyers domestiques dans le temps. Perz (2002) montre qu'en début de colonisation les foyers ont des terrains cultivés assez petits ; les premières années sont dédiées surtout à agrandir ces terrains. Dans les Balkans est pratiquée une culture intensive, à la différence de l'Amazonie où la culture est extensive (Brondizio et al. 2002) ; donc, la priorité des colonisateurs néolithiques pourrait avoir été l'intensification des cultures, plutôt que leur extension. Quand le foyer a 10-15 ans, les colons arrêtent de défricher et faire des champs et donnent plus d'importance aux animaux. À partir de la 20^{ème} année de vie d'un foyer, quand les enfants commencent à quitter la maison, le travail est dédié surtout aux animaux, tandis que seulement des cultures simples sont pratiquées. En cette phase, les colonisateurs ne sont plus jeunes, et leur capacité de travail est limitée ; s'occuper des animaux demande moins d'effort que cultiver sur une grande échelle. Laiou (1977), dans sa reconstitution de la société agricole byzantine en Grèce, montre néanmoins comme il y avait des relations très étroites entre le foyer des parents et ce des enfants ; même si les enfants n'habitaient plus sous le même toit, ils partageaient les terrains et le stock d'animaux. Par exemple, les enfants pouvaient profiter du troupeaux des parents, en lui donnant en échange une partie de la récolte agricole.

En tout cas, ce que les sources suggèrent est une évolution dans l'activité économique pendant la vie du foyer domestique, qui s'adapte et s'évolue selon l'âge des individus qu'y habitent. Le modèle peut donner d'intéressants points de réflexion : y a-t-il un changement et une adaptation de l'activité économique selon l'ancienneté des foyers domestiques dans le modèle OBESOC-BEAN ?

6.6.2 Le front pionnier dans OBRESOC-BEAN

Le front pionnier n'est pas quelque chose d'objectif et d'identifiable d'une façon univoque : de critères qui déterminent la présence d'un front pionnier ont été choisis pour analyser les données simulées d'OBRESOC-BEAN. La méthode suivante a été adoptée : une fois identifié un supercarré qui n'a jamais été occupé auparavant, situé en dehors de la zone actuel d'expansion, les foyers domestiques qui sont les premiers occupants de ce supercarré sont considérés comme appartenant à un front pionnier. Plus précisément, les pionniers sont tous les agents qui s'installent dans un supercarré non encore colonisé, pendant une période déterminée qui est fixée à 25 ans à partir du moment de sa première colonisation. L'analyse effectuée consiste dans le suivi de tous ces pionniers pour les 25 ans suivants leur arrivée dans le supercarré. Même si les pionniers peuvent s'être installés dans des moments différents, ils sont tous suivis pour la même durée de temps, afin de les placer dans le même repère chronologique. Les *densificateurs* sont identifiés comme tous les foyers qui se trouvent dans un supercarré qui a été occupé au moins 100 ans.

Cinquante différents supercarrés ont été choisis par tirage systématique, afin d'avoir un échantillon robuste et représentatif de toute la région, à la fois géographiquement et chronologiquement (Fig. 6.10). Pour récapituler, les colonisateurs sont tous les agents qui s'installent dans ces 50 supercarrés jamais occupés en précédente, et ils sont suivis longitudinalement pendant 25 ans à partir de leur installation. Les *densificateurs* sont tous les agents qui se trouvent dans les mêmes supercarrés, mais à partir de 100 ans après la première occupation; ils sont suivis également longitudinalement pendant 50 ans.

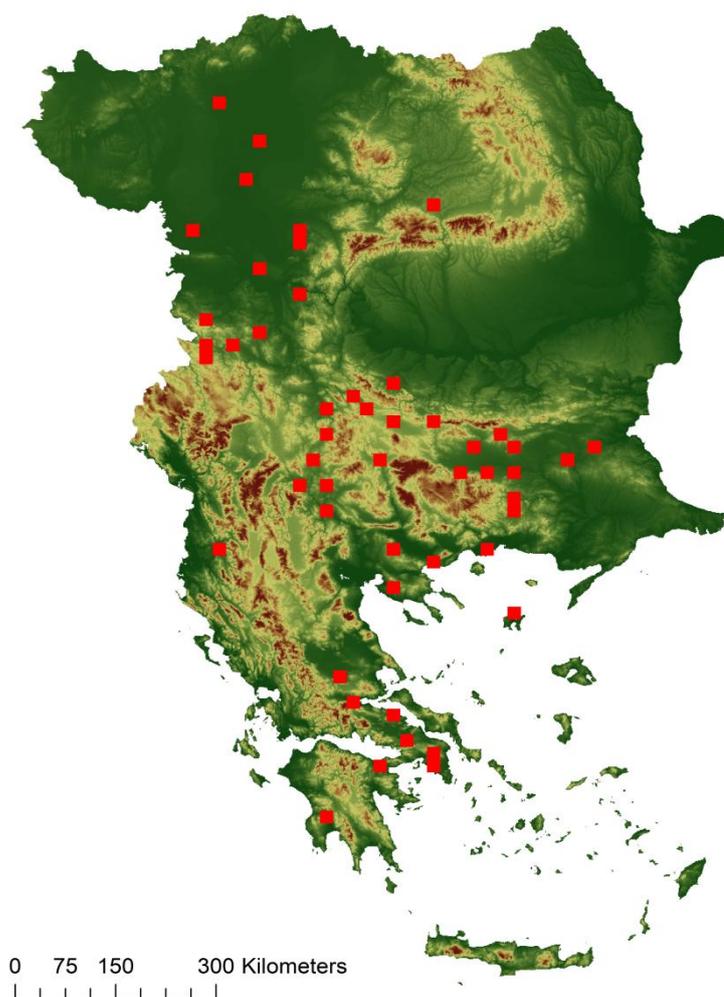


Figure 6.10 : Echantillon par tirage systématique de 50 supercarrés pour l'investigation du front pionnier.

Extraire les informations d'une façon manuelle, à partir des vastes données simulées générées par le modèle, aurait demandé une quantité de temps énorme ; pour cette raison, une procédure d'analyse des *big data* a été développée. Les hameaux-pixels qui correspondent à ces critères sont extraits en utilisant un script SQL. Les données du front pionnier sont groupées sous le même repère temporel de $t1$ à $t25$, où $t1$ est la première année de vie du foyer domestique colonisateur et $t25$ est la 25ème année. De cette façon, des statistiques de position sont obtenues pour tous les foyers domestiques, pour chaque année de leur vie (script SQL 4 dans le CD-Rom). En ce qui concerne les données des zones de densification, la tendance des sorties est homogène, sans avoir des variations remarquables d'une année à l'autre ; donc, la moyenne sur les 50 ans est prise (script SQL 5 dans le CD-Rom).

En figure 6.11 sont contrastés de nombreux éléments concernant la structure socio-économique sur le front pionnier et dans les zones de densification ; la figure 6.12 est dédiée à la comparaison démographique entre colonisateurs et *densificateurs*. L'abscisse représente le temps relatif des colonisateurs, qui va de la première à la 25ème année de vie des foyers domestiques sur le front pionnier. Pour chaque année, la moyenne de tous les colonisateurs est prise ; pour les *densificateurs*, au contraire, une moyenne constante sur les 50 années est utilisée. La raison est que les *densificateurs* ont une tendance constante sur les 50 ans, avec très peu de variations d'une année à l'autre ; une moyenne globale est suffisante et permet la comparaison avec le front pionnier qui, au contraire, est plus variable. Ces données ont été produits par la simulation 49.

6.6.2.1 Personnes moyennes par foyer domestique

Au niveau de personnes moyennes par maison, le patron observé pour les foyers domestiques sur le front pionnier ne présente pas de différences très marquées de ceux qui se trouvent dans les zones de densification (fig. 6.11a). Au début, le foyer domestique moyen des colonisateurs est légèrement plus petit, mais entre 13 et 25 ans le nombre d'individus parmi les pionniers dépasse ce des *densificateurs* ; il s'agit du moment dans lequel de nombreux enfants sont présents dans le foyer. Ce nombre décroît vers la 25ème année, car les enfants commencent à quitter le foyer domestique. Des familles nucléaires petites sont observées parmi les colonisateurs comme parmi les *densificateurs* ; les raisons ont été explorées au paragraphe 6.5. L'écart maximale entre le front pionnier et les *densificateurs* ne dépasse pas 0,6 - 0,7 individus, et ne suggère pas de différences importantes entre ces deux populations. La taille de la famille, et donc du foyer domestique, est assez similaire dans les différentes phases de la colonisation.

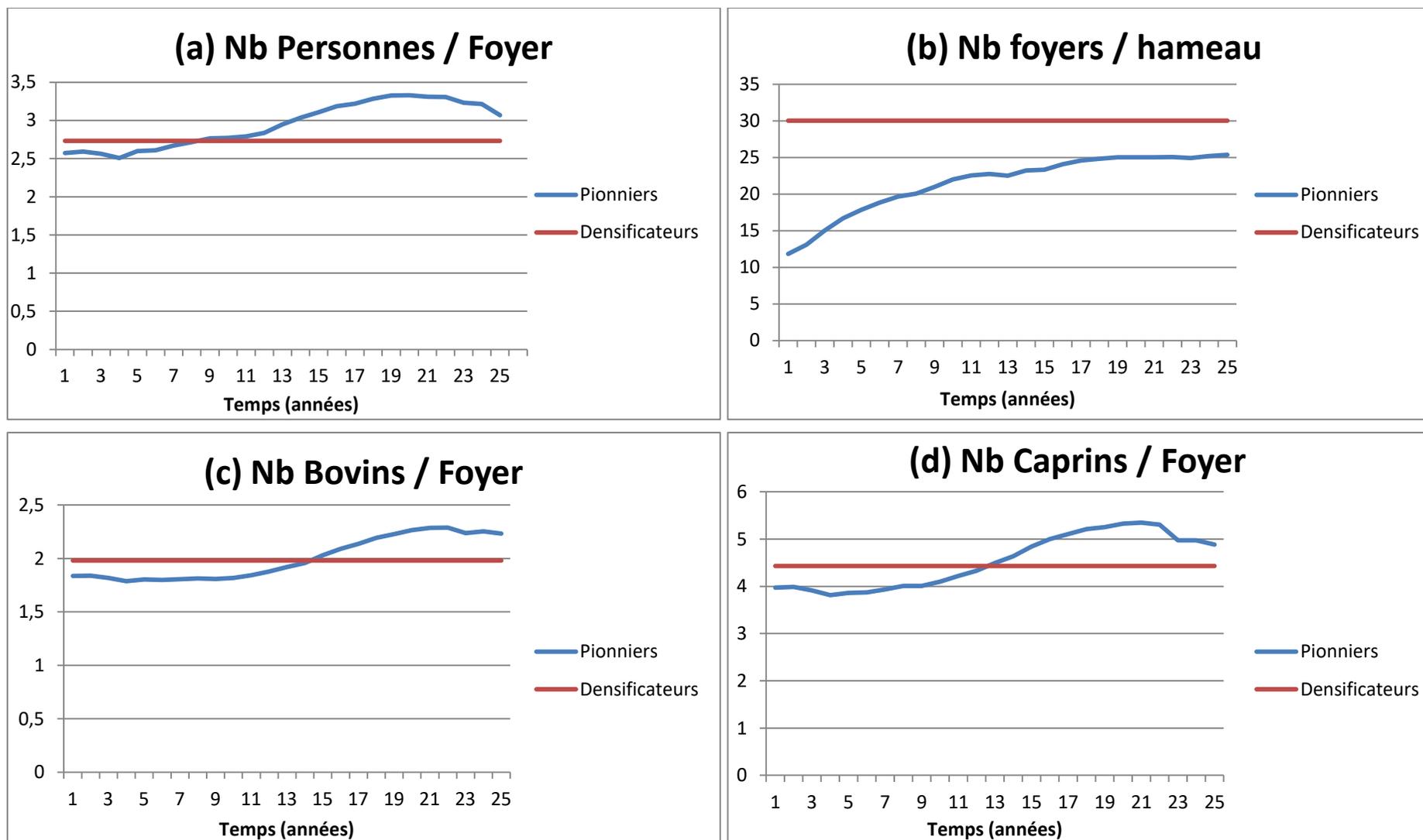


Figure 6.11 : Front pionnier et *densificateurs* dans le modèle.

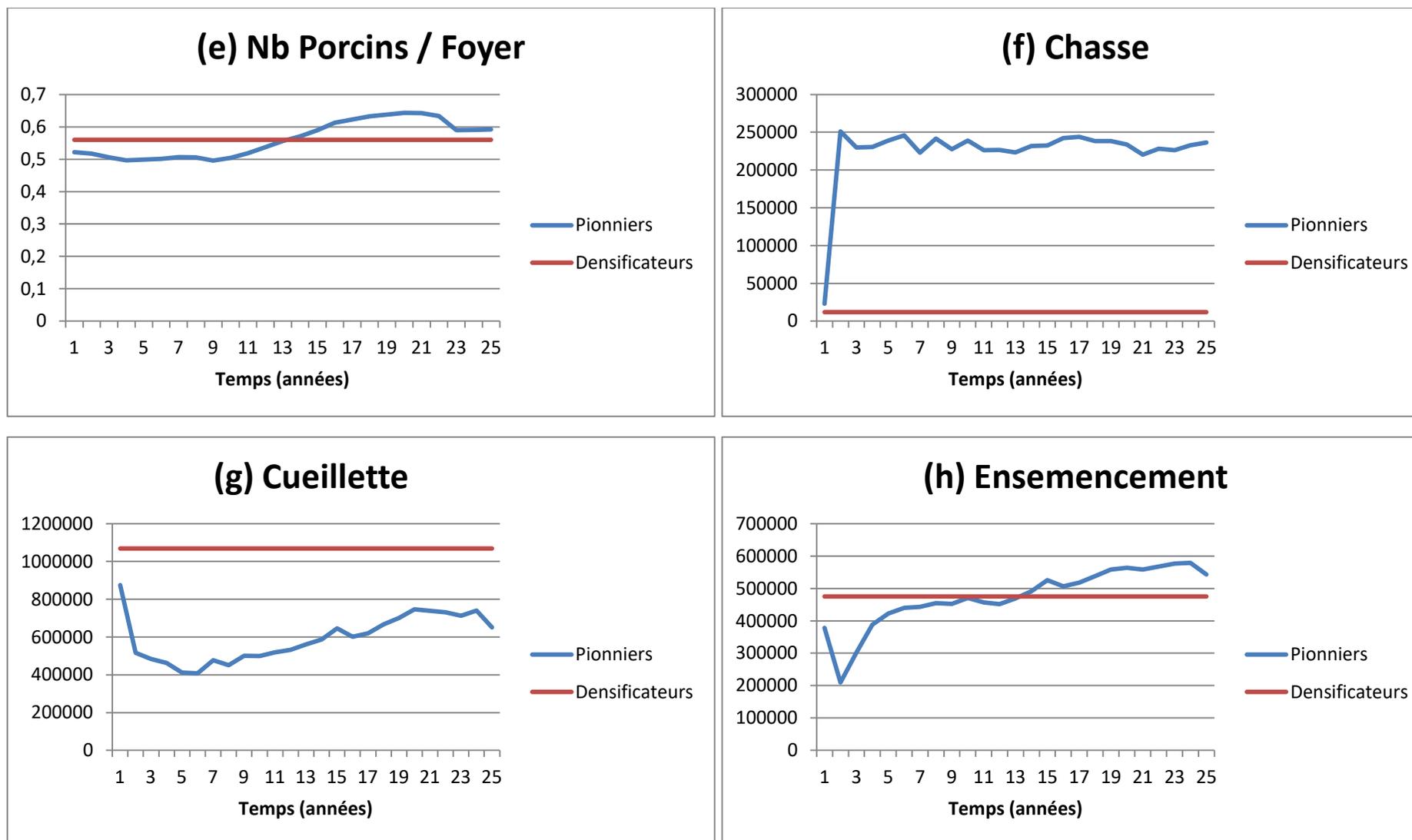


Figure 6.11 : Front pionnier et *densificateurs* dans le modèle.

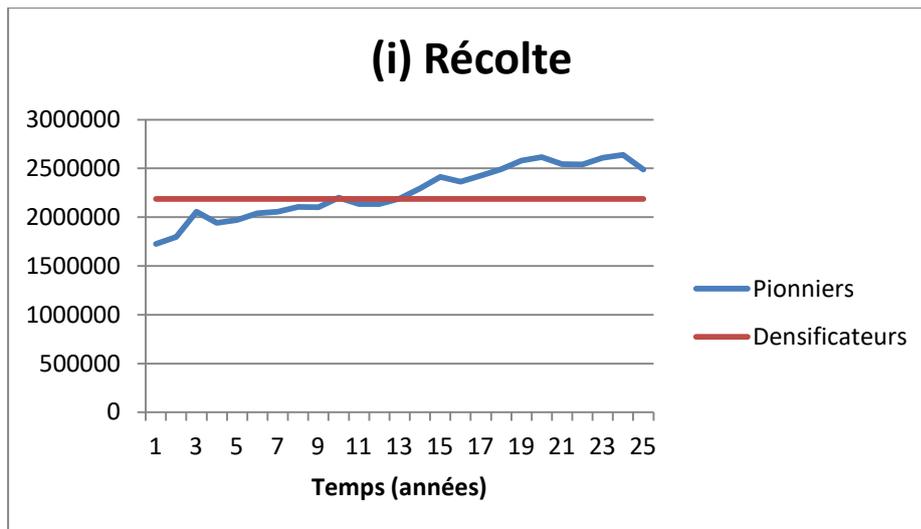


Figure 6.11 : Front pionnier et *densificateurs* dans le modèle.

6.6.2.2 Foyers moyens par hameau

Une observation de la taille du hameau moyen, en termes de foyers domestiques simultanés, montre que les hameaux sur le front pionnier sont en moyenne plus petits (fig. 6.11b). Leur croissance est rapide, mais au 25ème année ils ont en moyenne 25 maisons, tandis que le hameau typique des *densificateurs* en compte 30. La raison est que la densité locale maximale de la simulation analysée est de 25 foyers, et elle atteinte, en moyenne, vers la 20ème année de vie sur le front pionnier. Le modèle permet que ce seuil soit dépassé seulement avec l'émergence d'un *Big Man* ; donc, les hameaux *densificateurs*, pour atteindre 30 maisons simultanées en moyen, doivent avoir la présence d'un *Big Man*. Cette exploration du front pionnier montre que, même si le nombre de foyers domestiques sur le front pionnier s'accroît très rapidement, l'émergence d'une figure influente ne s'avère pas pendant les premières années : il n'y a pas de *Big Man* parmi les colonisateurs. Ce point est intéressant et pourrait être exploré en archéologie : les premières phases d'occupation des sites sont-elles moins étendues, où moins densément peuplées, que les phases successives ? À l'état actuel des fouilles, ce n'est pas possible de donner une réponse à cette question ; mais il s'agit d'une nouvelle hypothèse qui peut être ajoutée à la recherche archéologique.

6.6.2.3 Animaux

L'observation des ratios des animaux relatifs aux humains (fig. 6.11c, d et e) n'est pas très explicative : le modèle prévoit que la composition du troupeau dépend strictement du nombre de personnes présentes dans un foyer domestique. Donc, le nombre d'animaux dans chaque foyer suit la même distribution des individus qu'y sont présents. Les trois espèces d'animaux ont la même tendance, qui est en même temps celle des personnes par foyer domestique. L'observation des animaux dans les foyers domestiques n'ajoute rien à la connaissance du front pionnier.

6.6.2.4 Chasse

La chasse présente l'écart observé le plus grand entre le front pionnier et les zones de densification (fig. 6.11f). Le modèle suggère que les pionniers donnent une grande importance à la chasse : cette activité fournit un grand apport de kilocalories, et est donc pratiquée régulièrement par les colonisateurs. Par contre, pour les *densificateurs* la chasse est une activité totalement marginale : sa contribution en termes de kilocalories est minimale. Cet écart est extrêmement large et ouvre à de nombreuses réflexions. Le rôle de la chasse dans une société Néolithique a donc été approfondi, et cette problématique sera traitée séparément dans le paragraphe 6.7.

6.6.2.5 Cueillette

Au contraire, le modèle suggère que la cueillette est plus importante pour les *densificateurs* que pour les pionniers (fig. 6.11g). Même si l'écart n'est pas marqué comme dans le cas de la chasse, il s'agit d'un autre élément qui peut ouvrir à des interrogations. Une exploration des *big data* peut donner une réponse à ce comportement des agents, comme sera vu dans le paragraphe 6.8.

6.6.2.6 Ensemencement et récolte

En ce qui concerne l'ensemencement (fig. 6.11h) et la récolte (fig. 6.11i), le modèle ne suggère pas quelque chose de particulier : la comparaison entre front pionnier et

densificateurs est triviale. Ces sorties sont logiquement très liées l'une à l'autre, car un majeur ensemençant comporte aussi une récolte plus abondante ; la tendance de ces sorties suit simplement le nombre d'individus par foyer domestique.

6.6.2.7 Démographie du front pionnier

Le modèle permet également l'exploration de sorties démographiques ; en particulier, la distribution des individus pour chaque classe d'âge. La version actuelle du modèle permet l'exploration de certaines classes d'âges seulement : 0-4,99 ; 5-14,99 ; 15-16,99 ; 17-59,99 ; 60+. Identifier des classes différentes n'est pas possible, et demanderait une modification dans la structure informatique du modèle. Les classes n'ont pas toutes la même ampleur : certaines comprennent des intervalles plus longs, tandis que d'autres sont plus courtes. Donc, la distribution des individus pour chaque classe ne tient pas compte du poids relatif des individus de chaque classe ; les classes les plus courtes auront normalement moins d'individus que les classes les plus longues. Deux scripts SQL ont été utilisés pour explorer les données démographiques (script SQL 6 et 7 dans le CD-Rom).

6.6.2.8 0-4,99 ans

Au début de la colonisation, à l'arrivée sur le front pionnier, il y a très peu d'individus dans la classe d'âge 0-4,99 (fig. 6.12a). La raison est que le front pionnier est composé par un grand nombre de nouveaux couples mariés qui n'ont pas encore eu d'enfants. Quelques enfants sont néanmoins présents : le foyer domestique des parents qui suit le couple dans la colonisation peut inclure des enfants. Le nombre d'individus âgés de 0 à 4,99 s'accroît rapidement, car les nouveaux couples ont bientôt des enfants ; après environ 7 ans, la moyenne d'enfants dans cette classe d'âge sur le front pionnier dépasse celle des zones de densification. Cette valeur reste supérieure pour le reste de la durée du front pionnier ; les données simulées suggèrent donc que, parmi les colonisateurs, il y a un nombre plus élevé d'enfants que parmi les *densificateurs*.

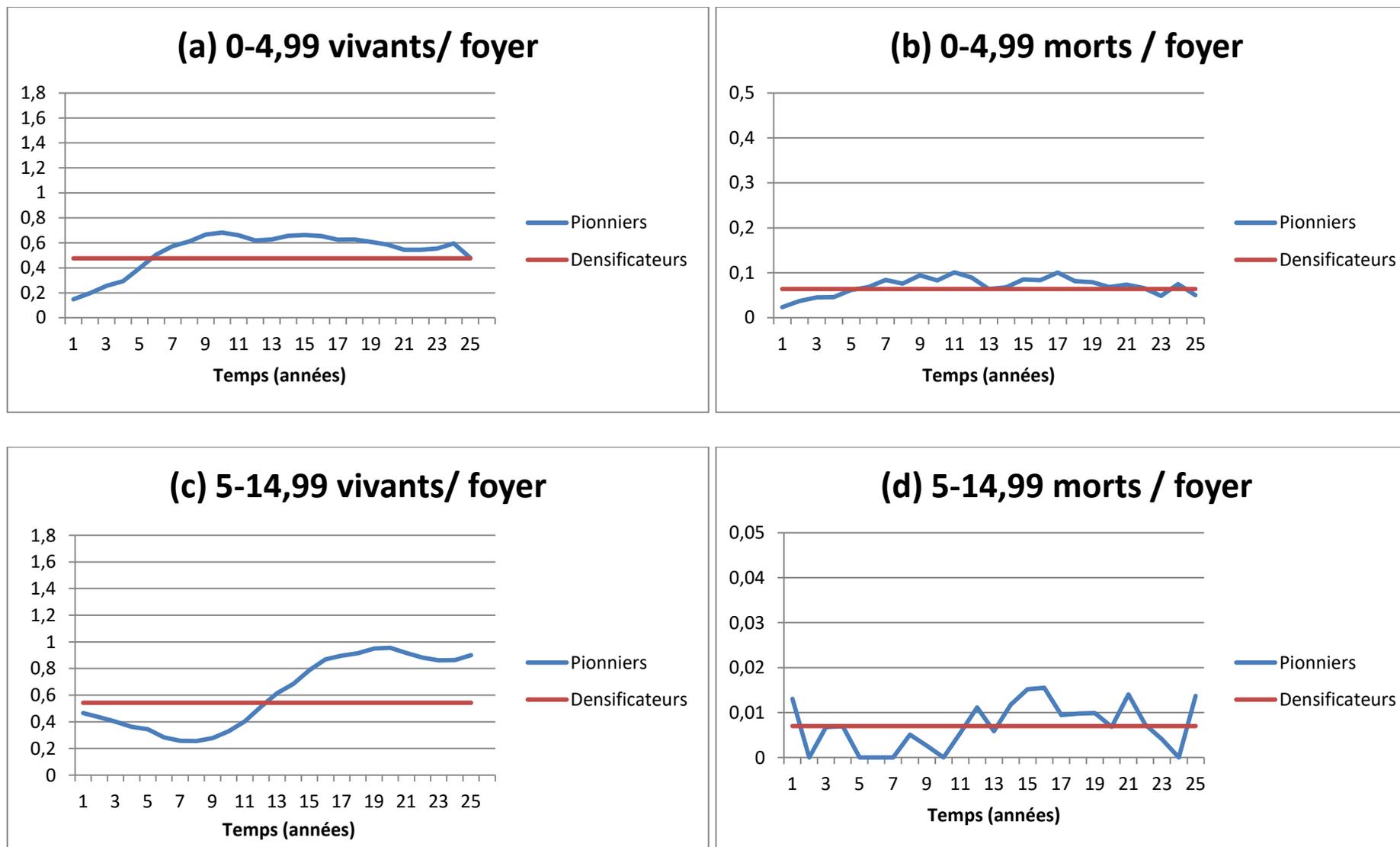


Figure 6.12 : Démographie du front pionnier et des zones de densification.

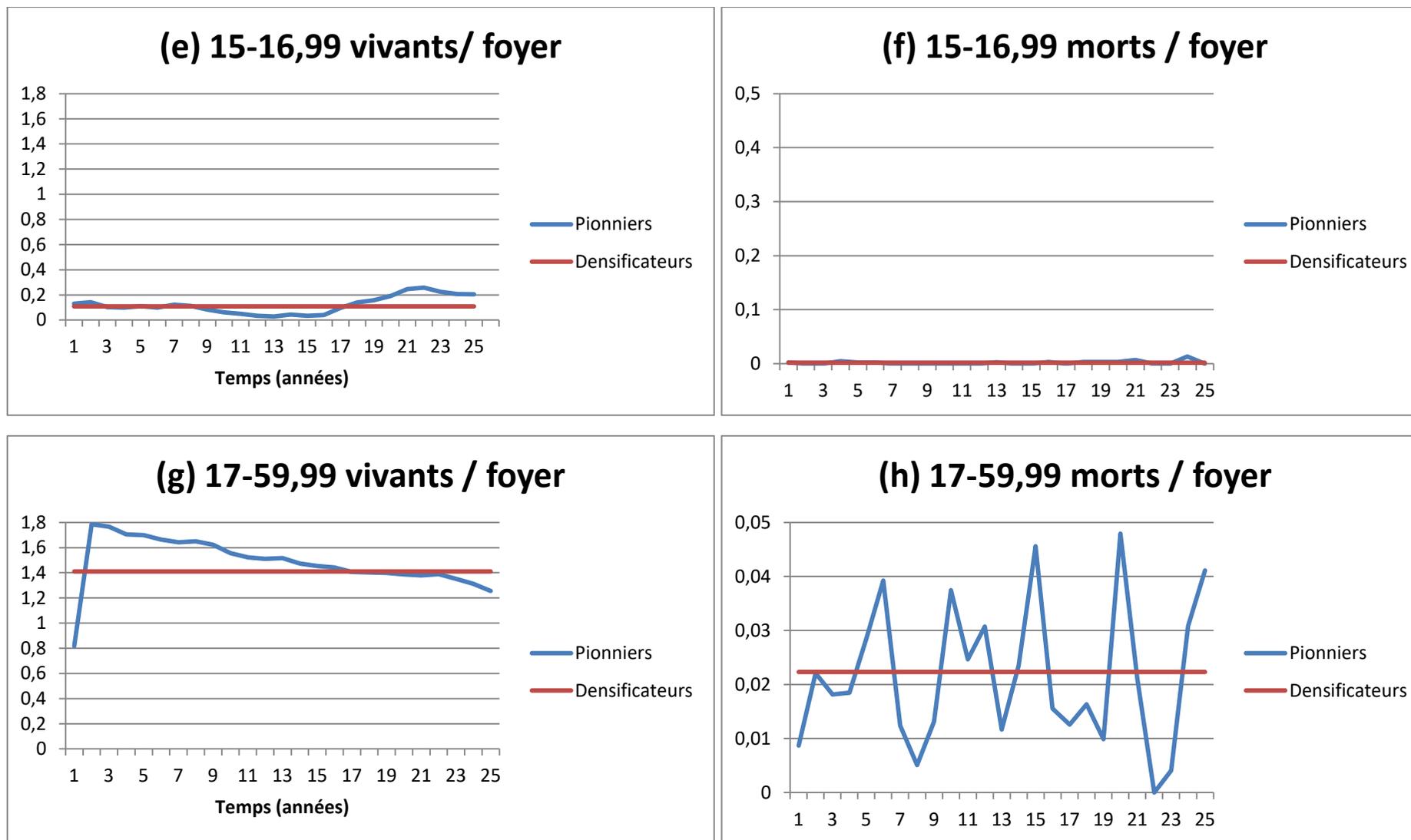


Figure 6.12 : Démographie du front pionnier et des zones de densification.

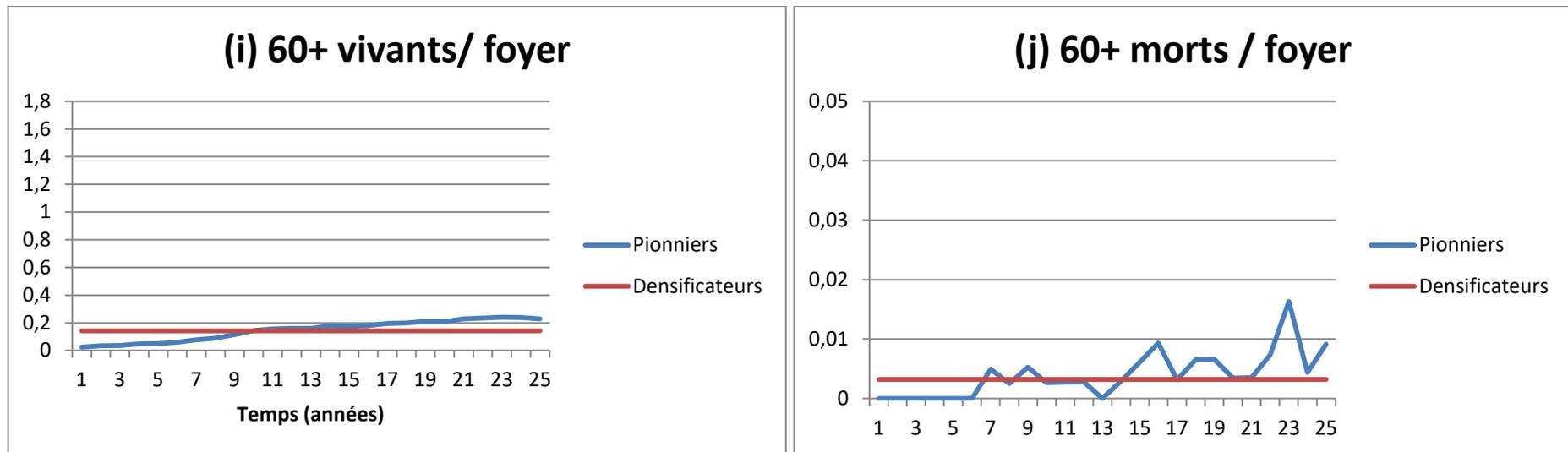


Figure 6.12 : Démographie du front pionnier et des zones de densification.

6.6.2.9 5-14,99 ans

Le nombre d'individus dans la classe 5-14,99 (fig. 6.12c) est légèrement plus élevé que dans la classe 0-4,99. Cependant, cette classe a une ampleur de dix ans, le double que la classe précédente ; donc, en nombres absolus, plus d'enfants âgés de 0-4,99 que de 5-14,99 étaient présents. Un nombre important d'individus n'arrive pas à dépasser la 5^{ème} année d'âge à cause de la mortalité infantile. La distribution de cette classe dans le temps montre que, à l'arrivée sur le front pionnier, environ 0,5 individus âgés de 5 à 14,99 sont présents dans chaque foyer. Ces individus appartiennent au foyer domestique des parents du couple ; les premières années leur nombre décroît, car ils grandissent et sortent de la catégorie pour aller dans celle supérieure. Vers 8 ans à partir du début de la colonisation le nombre d'individus dans cette classe d'âge commence à croître, et après 12 ans le front pionnier dépasse les zones de densification. Il s'agit des enfants des nouveaux couples, nés sur le front pionnier, qui ont grandi et qui peuplent cette catégorie.

6.6.2.10 15-16,99 ans

Très peu d'individus sont présents dans la classe 15-16,99 (fig. 6.12e) : la raison est surtout que cette classe est très courte, comprenant seulement deux années. La même distribution de la classe précédente est observable ; au début certains individus sont présents, faisant partie du foyer domestique des parents. Leur nombre a une réduction initiale, car les individus sortent de cette classe d'âge pour passer à la supérieure ; mais, vers 16-17 ans depuis la colonisation, le front pionnier a une reprise et dépasse les zones de densification. Comme dans le cas précédent, il s'agit des enfants des colonisateurs, nés et grandis sur le front pionnier.

6.6.2.11 17-59,99 ans et 60+ ans

La classe d'âge qui va de 17 à 59,99 (fig. 6.12 g) ans est très large et beaucoup d'individus en font partie. Le nombre d'individus dans cette catégorie est initialement plus élevé sur le front pionnier : le jeune couple marié rentre dans cette catégorie, ainsi que les parents présents dans le foyer domestique qui a suivi ce couple dans la colonisation. Ce nombre décroît rapidement,

surtout à cause de la mortalité des vieux parents, mais aussi car certains individus vieillissent et passent dans la classe d'âge supérieure.

6.6.2.12 60+ ans

Au moment de la colonisation, il n'y a aucun individu de 60 ans et plus (fig. 6.12i) ; il y a une graduelle augmentation dans les années suivantes, car certains des parents dépassent les 60 ans et rentrent dans cette catégorie. Ce nombre reste en tout cas très faible, parmi les colonisateurs comme parmi les *densificateurs* ; avec les règles démographiques utilisées dans OBRESOC-BEAN, provenant de populations préindustrielles réelles, dépasser les 60 ans n'est pas commun.

6.6.2.13 Les morts

La comparaison des morts entre le front pionnier et les zones de densifications n'est pas simple, notamment à cause de l'irrégularité dans le nombre de morts moyens par foyer sur le front pionnier ; cette valeur peut changer fortement d'une année à l'autre. En général, la distribution des morts est liée à celle des vivants, c'est-à-dire que quand les vivants dans une classe d'âge deviennent plus nombreux, aussi le nombre de morts dans cette classe d'âge augmente. Même si la classe d'âge 0-4,99 est relativement petite, le nombre de morts est élevé (fig. 6.12b) : les règles démographiques d'OBRESOC-BEAN prévoient une forte mortalité infantile, comme observé dans les sociétés préindustrielles. Pour les classes d'âge 5-14,99 (fig. 6.12d), 15-16,99 (fig. 6.12f) et 60+ (fig. 6.12j), comme a été dit en précédence, le nombre de morts augmente dans les mêmes années que le nombre de vivants par foyer s'accroît. Les morts sur le front pionnier dans la classe d'âge 17-59,99 (fig. 6.12h) présentent trop d'irrégularités, et il est par conséquent impossible de détecter un patron homogène.

Une comparaison en termes démographiques avec les données archéologiques est très difficile à cause de la pénurie de squelettes dans les Balkans ; en outre, l'absence de sites complètement fouillés et la complexe stratification des sites en *tell* ne permettent pas de détecter le front pionnier dans les vestiges. Cependant, une analyse des sorties du modèle peut donner une idée de la composition démographique, en particulier du nombre de morts ; cela

peut donc suggérer la quantité de squelettes espérée que l'on s'attend à trouver dans les fouilles.

La table 6.3a représente les vivants, les décédés cumulés et les envoyés (à autres foyers domestiques) cumulés dans 25 ans de vie sur le front pionnier ; la table 6.3b montre les vivants, les décédés cumulés et les envoyés cumulés pendant un segment de 25 ans dans l'échantillon des *densificateurs*. Le but est de voir si la structure démographique des morts dans le modèle peut donner des suggestions sur les squelettes qui pourraient être retrouvés dans les fouilles.

(a) Front Pionnier			
Classe d'âge	Vivants	Morts Cumulés	Envoyés Cumulés
0-4,99	105	602	1
5-14,99	197	58	0
15-16,99	45	15	0
17-59,99	275	185	28
60+	50	30	0

(b) Densificateurs			
Classe d'âge	Vivants	Morts Cumulés	Envoyés Cumulés
0-4,99	4723	13673	22
5-14,99	5153	1464	4
15-16,99	989	438	0
17-59,99	14152	4734	1048
60+	1363	655	0

Table 6.3 : Individus vivants, morts cumulés et envoyés cumulés dans le 25 ans de vie du front pionnier (a) et dans 25 ans de vie dans les zones de densifications (b) dans un échantillon de 50 supercarrés.

Une observation des données montre que les individus âgés de 17 à 59,99 sont les plus présents sur le front pionnier comme dans les zones de densifications ; la raison est l'ampleur de la classe, qui est beaucoup plus large que toutes les autres. La classe d'âge avec la quantité plus grand de squelettes est de 0 à 4,99 ans, parmi les pionniers comme parmi les densificateurs, à cause de la mortalité infantile très élevée qui caractérise les sociétés préindustrielles et qui a été injectée dans le modèle. La similarité entre front pionnier et zones de densifications est mesurée avec un test khi-deux (table 6.4). Le nombre d'adoptions étant marginal, seulement les vivants et morts sont ici considérés.

Classe d'âge	Morts Pionniers	Morts Densificateurs	Total
0-4,99	602	13673	14275
5-14,99	58	1464	1522
15-16,99	15	438	453
17-59,99	185	4734	4919
60+	30	655	685
Total	890	20964	21854

Test khi-Deux			
Classe d'âge	Morts Pionniers	Morts Densificateurs	Total
0-4,99	0,73374512	0,03115022	0,76489534
5-14,99	0,25596583	0,0108667	0,26683254
15-16,99	0,64455893	0,02736393	0,67192286
17-59,99	1,17242318	0,04977374	1,22219692
60+	0,15861253	0,00673369	0,16534622
Total	2,9653056	0,12588828	3,09119388

**X-squared = 3.0912, df = 4,
p-value = 0.5427**

Table 6.4 : Test khi-deux entre les morts sur le front pionnier et les morts parmi les *densificateurs* dans un échantillon de 50 supercarrés.

La valeur-p est plus élevée que le seuil de rejet de 0,05 du test d'homogénéité des deux distributions ; donc, la distribution des morts sur le front pionnier n'est pas significativement différente de celle présente dans les zones de densification. Même si au moment initial de la colonisation une quantité très limitée d'individus âgés de 0 à 4,99 est présente, leur nombre s'accroît très rapidement dans les années suivantes. À la fin des 25 ans de vie du front pionnier, le nombre de squelettes des colonisateurs est comparable à ceux qui sont produits par les *densificateurs*. Donc, le modèle suggère qu'il serait très difficile de détecter une effective présence de colonisateurs dans les vestiges, même si des données archéologiques plus robustes étaient présentes.

Tous ces données économiques et démographiques sont un produit du modèle, issues d'un ensemble de paramètres, règles et contraintes que lui ont été donnés. La seule méthode pour savoir dans quelle mesure ces données peuvent être représentatives de la société historique du Néolithique Ancien est de les contraster avec des données archéologiques régionales. Cependant, les problématiques liées aux données archéologiques ont déjà été traitées ; le système économique peut seulement être estimé à partir d'inférences ethnoarchéologiques, et la pénurie de squelettes limite les hypothèses paléo démographiques. En outre, la détection du

front pionnier (premier 25 ans d'occupation d'un site) est difficile dans ce contexte archéologique.

Le modèle permet en tout cas d'avoir des idées et suggestions sur le fonctionnement et la composition d'un front pionnier. En termes économiques, l'activité est strictement dépendante de la taille et composition du foyer domestique. En ce qui concerne la démographie, après quelques ans le nombre d'enfants sur le front pionnier devient plus élevé que dans les zones de densification. Il s'agit de la conséquence au fait que les jeunes couples qui font partie du processus de colonisation auront bientôt des enfants. Cependant, à la fin des 25 ans de vie sur le front pionnier, la structure démographique des colonisateurs ne présente pas des différences significatives de celle des *densificateurs*.

6.7 La chasse dans le modèle et au Néolithique ancien

La comparaison entre le front pionnier et les zones de densification a permis d'identifier un élément qui est très différent : il s'agit de la chasse. Les foyers colonisateurs donnent beaucoup d'importance à la chasse, qui est une activité pratiquée régulièrement et qui fournit un apport substantiel de kilocalories ; au contraire, la chasse est presque totalement absente chez les *densificateurs*. (fig. 6.11f).

Cet écart entre le front pionnier et les zones de densification, qui suggère une réduction progressive de l'importance de la chasse au fur et à mesure que l'hameau vieillit, peut être expliqué par le fonctionnement du modèle. Dans OBRESOC-BEAN la chasse est une activité complémentaire, pratiquée quand les kilocalories obtenues depuis les animaux domestiques ne sont pas suffisantes. Les colons qui arrivent dans une nouvelle région ne sont pas nombreux et ont des troupeaux relativement petits ; ils ne peuvent pas exploiter leurs animaux d'une façon intensive, car cela provoquerait une réduction drastique, et peut être une disparition totale, de leurs troupeaux. Par conséquent, ils ont besoin de chasser avec régularité, afin d'intégrer le régime alimentaire avec les kilocalories nécessaires. Après quelques décennies les agents deviennent plus stables : leurs troupeaux sont plus grands, et ils peuvent se permettre d'abattre les animaux plus ou moins régulièrement (l'apport de la viande dans l'alimentation n'était pas en tout cas abondant) sans affecter la capacité de reproduction

du troupeau. Le modèle suggère donc que, si les agriculteurs peuvent obtenir la viande directement depuis leur troupeau, ils n'ont pas besoin de la chasse, qui demande un majeur effort et qui donne moins de garanties.

Si cette hypothèse était vraie, l'observation des restes archéologiques devrait montrer que le nombre d'animaux sauvages présents dans les vestiges décroît avec le temps. Le front pionnier, c'est-à-dire les 25 premières années d'occupation d'un site, ne peut pas être identifié avec précision ; cependant, il existe plusieurs sites qui ont eu une occupation continue pendant plusieurs siècles, et pour lesquels de différentes phases d'occupation sont connues. Pour chacune de ces phases la proportion d'animaux chassés sur le total des animaux présents, mesurée grâce aux NISP, est connue (fig. 6.13). Ces données ne suggèrent pas une cessation ou une réduction de la chasse : même s'il est impossible de détecter un patron homogène, il n'y a aucun signal d'un abandon de la chasse, qui continue à être pratiquée dans chaque site (Orton 2012). Le modèle OBRESOC-BEAN ne reproduit pas correctement la chasse observée dans les traces du Néolithique Ancien de la région. Cet écart entre les données espérées et le données simulées représente le point de départ pour l'exploration d'une nouvelle problématique : pourquoi les premiers agriculteurs Néolithiques ont-ils continué à pratiquer la chasse, malgré la présence d'animaux dans le troupeau qui auraient pu théoriquement garantir un apport suffisant de viande ?

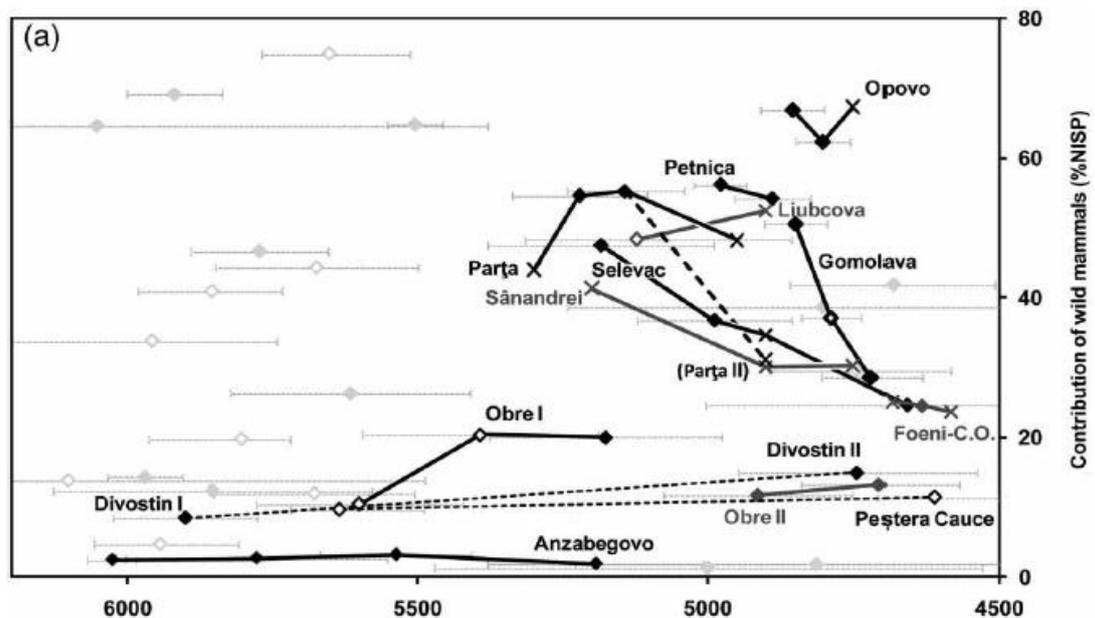


Figure 6.13 : Ratio d'animaux sauvages dans des différentes phases d'occupations en de différents sites. *Source : Orton 2012.*

Dans OBRESOC-BEAN, la chasse est modélisée comme une activité complémentaire, pratiquée par les agents quand ils n'obtiennent pas assez de kilocalories depuis la viande de leur troupeau ; une raison de cet écart pourrait donc être une surestimation de la taille du troupeau, qui fournit trop de viande et rend la chasse non nécessaire. Cependant, cette explication est improbable : d'abord, car la structure du troupeau dans le modèle a été comparée aux traces ethnohistoriques, en résultant adhérente (cf. par. 5.5). En outre, de simulations avec des troupeaux très petits ont été effectuées (sim. 24 et 25) ; les résultats montrent que cette réduction progressive de la chasse se vérifie toujours, même si plus tardivement. Donc, cet écart ne peut pas être dû à une surestimation de la taille du troupeau.

Le rôle de la chasse au Néolithique n'est pas un sujet inédit dans la recherche : le fait qu'une population d'agriculteurs qui possède des animaux domestiqués continue à chasser a déjà été investigué (Orton à paraître). La conclusion est que plusieurs raisons, qui vont au delà du simple besoin de kilocalories, peuvent avoir poussé les agriculteurs néolithiques à chasser. Une de ces motivations a été modélisée dans OBRESOC-BEAN : il s'agit de la réponse aux crises météorologiques. En cas de famines et de disettes, et donc de mortalité du troupeau, les agents sont obligés à donner plus d'importance à la chasse, outre qu'à la cueillette, pour obtenir les ressources nécessaires à leur survie. Cependant, il existe de nombreuses autres raisons pour chasser qui n'ont pas été prises en compte dans le modèle. Une de ces raisons est le rôle sociale de la chasse : être un bon chasseur est un élément de prestige dans beaucoup de sociétés primitives, qui peut être utilisé pour générer et légitimer l'autorité d'une élite (Hamilakis 2003), ainsi que pour justifier le rôle sociale des hommes par rapport aux femmes (Kent 1989). Les premiers agriculteurs pouvaient donc chasser simplement pour accroître leur statut social. En outre, il y a des matières premières qui peuvent être obtenues exclusivement avec la chasse : par exemple la peau, la fourrure, les défenses, les cornes ; plusieurs outils construits avec les restes d'animaux sauvages ont été trouvés dans les assemblages (Russel 1993). Il existe aussi d'animaux qui peuvent ruiner les récoltes, comme les sangliers ; les tuer représentait une forme de protection des cultures (Linares 1976).

La chasse est un exemple emblématique de comment la modélisation multi-agents peut enrichir la recherche ; elle permet un questionnement ouvrant à des hypothèses anthropologiques. Quand le modèle n'adhère pas aux données archéologiques, la raison peut être que certains éléments n'ont pas été pris en compte ou n'ont pas été estimés correctement. En faisant de la modélisation multi-agents on apprend toujours quelque chose, soit quand le modèle reproduit bien la réalité, soit quand un écart est présent. Le modèle

OBRESOC-BEAN, en ne reproduisant pas correctement la chasse au Néolithique Ancien, a permis de tester la validité d'autres hypothèses (Orton à paraître) qui n'avaient pas été prises en compte lors de sa réalisation. Le modèle suggère en effet que la pratique de la chasse ne peut pas être expliquée seulement par la nécessité de viande, pour laquelle les animaux domestiques seraient suffisants ; d'autres explications, comme celles fournies par les sources ethnographiques et anthropologiques, deviennent nécessaires. L'écart observé entre le front pionnier et les zones de densification dans la figure 6.11f peut donc être dû exclusivement à une erreur dans le modèle ; OBRESOC-BEAN ne permet pas de faire des hypothèses sur les différences dans la chasse entre colonisateurs et densificateurs.

6.8 La cueillette dans le modèle

L'exploration du front pionnier a montré que la cueillette a une importance plus grande parmi les *densificateurs* que parmi les colonisateurs. Ce comportement des agents n'est pas immédiatement logique, et ouvre à de nouveaux raisonnements pour arriver à sa compréhension. Une explication peut être la présence de crises météorologiques : si les agents ont une mauvaise récolte agricole, ils sont obligés à exploiter plus intensivement les plantes et les fruits sauvages. Les crises météorologiques se passent plus fréquemment en fin de simulation, et frappent surtout les zones les plus peuplées (cf. par. 6.9) ; par conséquent, les agents *densificateurs* auront plus de probabilités de se trouver dans des situations de crise et de disette et devront donc intensifier la cueillette.

Cette hypothèse peut être vérifiée grâce à l'exploration des données simulées produites par le modèle. Les données globales montrent une corrélation de 0,45 entre les kilocalories moyennes par foyer issues de la cueillette et les individus touchés par une catastrophe ; les deux sorties ne semblent pas fortement corrélées. À une échelle régionale vaste comme celle des Balkans, des changements dus à d'événements locaux sont très difficilement détectables dans les données globales. En effet, les foyers en crise ne dépassent pas quelques dizaines ou centaines, tandis que dans le modèle peuvent vivre des dizaines ou centaines de milliers de foyers ; le poids des foyers en crise sur les sorties globales est donc marginale et presque indétectable.

La manipulation des *big data* permet de vérifier l'hypothèse initiale avec une approche différente, en regardant les sorties liées aux foyers domestiques qui ont été spécifiquement touchés par des crises. Un échantillon de 100 foyers domestiques touchés par une crise a été pris et suivi pendant 5 ans : l'année relative à la crise (t), les deux précédentes et les deux suivantes (script SQL 8 dans le CD-Rom). Les kilocalories moyennes obtenues grâce à la cueillette par les foyers présents dans cet échantillon sont présentées en figure 6.14.

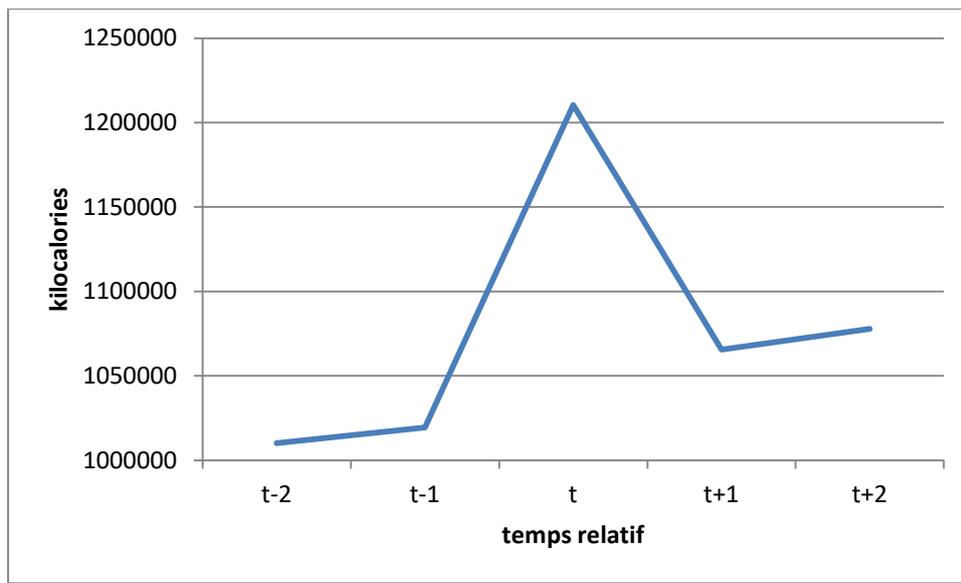


Figure 6.14 : Kilocalories issues de la cueillette pendant des périodes de crise.

L'observation des sorties relatives aux foyers domestiques montre que la quantité de kilocalories issues de la cueillette est plus élevée l'année de crise t que les années précédentes et suivantes : les agents, pour combler la pénurie de céréales due à la mauvaise récolte, recourent à une intensification de la cueillette. Ce comportement des agents explique les variations remarquables dans la cueillette visibles d'une année à l'autre, et aussi le fait que la cueillette a plus d'importance parmi les *densificateurs* : les zones les plus peuplées sont les plus sujettes aux crises, et la plupart des crises se vérifient vers la fin de la simulation (cf. par. 6.9).

L'absence de données archéologiques robustes sur la cueillette, et l'impossibilité d'attribuer ces données à des périodes chronologiques précises, empêche la validation de cette hypothèse à travers la comparaison avec les traces trouvées dans les vestiges. Cependant, l'exploration de ces sorties rentre dans le cadre de la manipulation des *big data* ; la création de procédures informatisées a permis d'expliquer un comportement du modèle qui était autrement partiellement caché.

6.9 Les crises agricoles dans OBRESOC-BEAN

La météorologie, en influençant le rendement du sol, est l'élément qui détermine le déclenchement des disettes et des famines ; ces événements ont un fort impact sur une société agricole et sur son expansion. La météorologie a donc une grande importance dans OBRESOC ; une des raisons principales pour laquelle ce modèle a été bâti est de tester la réactivité des premiers agriculteurs aux événements climatiques (Bocquet-Appel et al. 2015, Bocquet-Appel et al. 2014). Grâce à cette modélisation, qui simule la météorologie à partir d'estimations des précipitations et des températures du passé, l'influence des conditions climatiques sur la vie de la société Rubanée a pu être explorée.

Pour le Néolithique Ancien des Balkans, il n'y a aucun signal d'un possible impact météorologique. L'événement climatique du 8.2k BP a eu une très vaste portée, et peut avoir été à l'origine de l'expansion des premiers agriculteurs vers les Balkans depuis l'Anatolie (Lemmen et Wirtz 2014, Clare et Weninger 2014, Bocquet Appel et al. 2012, Weninger et al. 2007, Budja 2007) ; cependant, à la fin de cette phase d'expansion, la situation de la population dans la région est prospère. Le Néolithique Moyen suit immédiatement le Néolithique Ancien, sans aucune évidence d'une contraction ou d'une réduction de la population. Souvent les crises peuvent se produire sans laisser des traces matérielles ; à cause de l'absence de sources écrites, c'est impossible de connaître l'entité des crises au Néolithique. Cependant, de crises météorologiques se sont produites toujours dans l'histoire ; de nombreuses crises ont été registrées dans les dernières siècles en Europe Centrale (Le Roy Ladurie 2004, Le Roy Ladurie e al. 2003) et plus spécifiquement dans les Balkans (Xoplaki et al. 2001). La présence de crises à des intervalles réguliers dans l'histoire suggère qu'aussi les agriculteurs du Néolithique Ancien des Balkans doivent avoir été touchés par des événements de ce type.

Le modèle permet d'observer dans quelle mesure les crises ont eu un impact sur la population. Dans la figure 6.15 sont présentés les individus touchés par une catastrophe, dans 5 simulations différentes effectuées avec les mêmes paramètres.

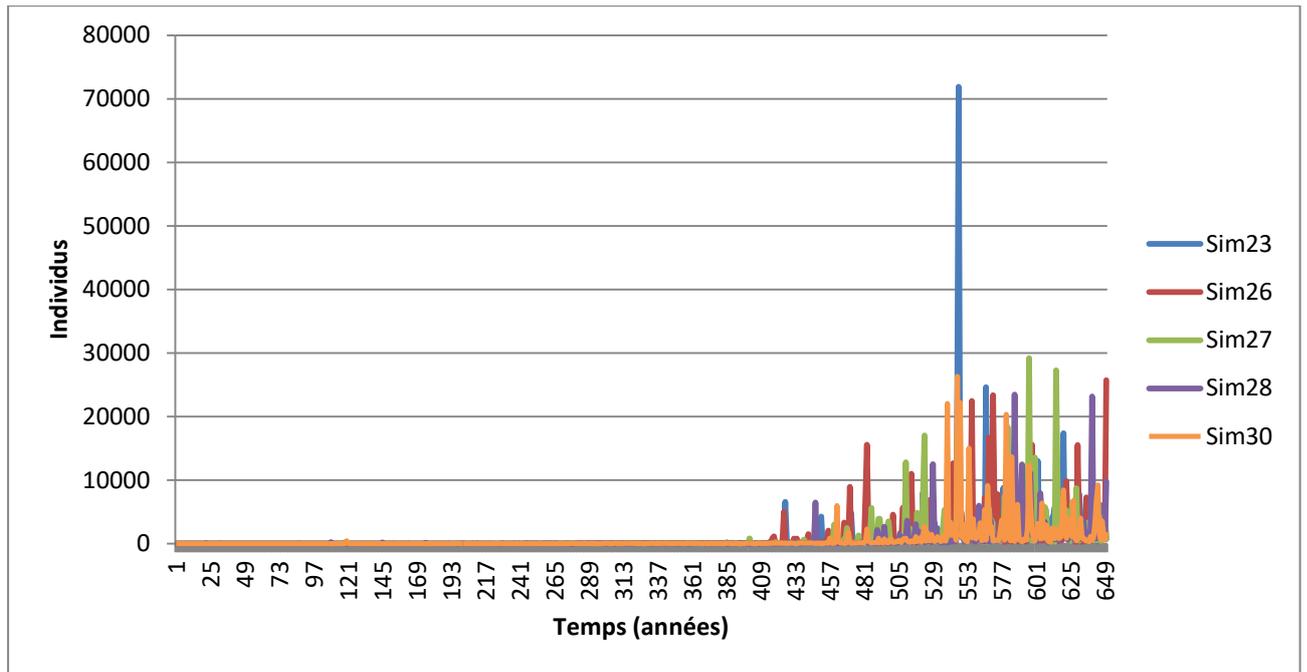


Figure 6.15 : Individus touchés par des crises météorologiques.

Pendant les premiers 400 ans environ, il n'y a presque pas de personnes touchées par des catastrophes. Il ne s'agit pas, en vérité, d'un indicateur de l'absence de crises météorologiques dans toute la région ; la raison est que dans OBRESOC-BEAN les crises se vérifient sur certains pixels, indépendamment de la présence d'agriculteurs. Dans une région presque inhabitée, il est probable que ces zones de crises ne soient pas occupées par les agents ; si une crise se produit, le nombre de personnes concernées n'est pas élevé à cause de la faible densité de la population. Inversement, en fin de simulation, quand un grand nombre d'agents est présent dans la région, il est plus probable que les crises affectent des pixels occupées par les colonisateurs, et qu'elles touchent un grand nombre d'individus.

Les pics des crises météorologiques se produisent généralement dans les mêmes années, car les simulations suivent des reconstitutions basées sur les données polliniques, où certaines saisons sont plus susceptibles de produire une crise. En même temps, de différences dans l'intensité sont présentes : par exemple, la simulation 23 produit une crise qui touche un nombre d'individus extrêmement élevé. La météorologie et ses conséquences sont parmi les éléments les plus stochastiques du modèle ; pourtant, dans le paragraphe 5.1 a été montré que les sorties économiques et démographiques ne sont pas particulièrement stochastiques. La figure 6.16 montre la taille de la population pendant les cinq simulations ; on n'observe pas un

écart remarquable dans le nombre d'individus générés, ni pendant la simulation, ni à la fin. Les simulations où la population s'accroît le plus sont touchées par des crises plus graves (une crise dans la simulation 23 a provoqué la mort de 12% de la population) ; inversement, dans les simulations où la population est plus faible, ces événements n'ont pas une grande portée (décès suite à une crise jamais supérieurs à 2,5 % de la population dans la simulation 28). Donc, le modèle se révèle d'une certaine façon malthusien (Malthus 1798) : quand le nombre d'agents devient trop élevé, les crises sont aussi plus fortes ; si le nombre reste plus faible, les crises ont un impact mineur. Le modèle suggère une sorte de capacité d'accueil régionale qui peut être supportée ; quand cette capacité était dépassée, le nombre d'individus était réduit par des crises.

En termes plus généraux, le modèle suggère que la société du Néolithique Ancien des Balkans était touchée par des crises périodiques, mais sans traces d'événements qui puissent avoir ralenti et bloqué l'expansion, ou provoqué un effondrement du système.

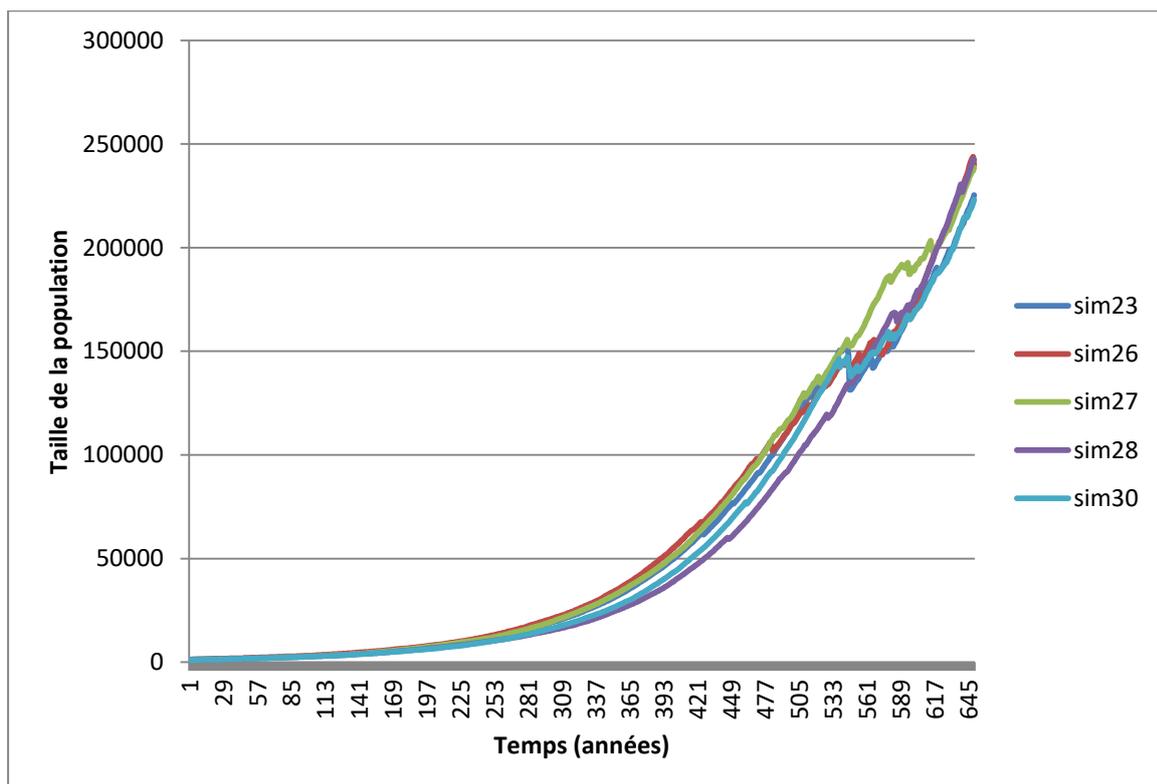


Figure 6.16 : Taille de la population dans 5 simulations différentes.

Le modèle produit surtout des crises de type 1 et 2, et rarement de type 6 (cf. par. 4.3.2). Le premier cas est une disette due à un hiver froid et humide ; le deuxième est une famine, où la

même typologie d'hiver est suivie par un printemps froid et humide. Ces typologies de crises sont les plus fréquentes dans le modèle, et sont aussi les plus citées dans les sources historiques. La région montre donc une grande sensibilité aux crises liées au froid et l'humidité. La crise 6, qui se produit rarement dans la simulation, est une disette due à un hiver humide suivi par un printemps humide. Elle n'est pas très commune dans la réalité non plus : un seul cas est narré dans les archives.

Il y a par contre une totale absence de crises liées aux événements de sécheresse (type 4 et 5), qui sont assez communes dans les sources historiques. La raison se voit dans la reconstruction des précipitations depuis les données polliniques de Tenaghi Philippon (Peyron et al. 2011 ; fig. 3.5). En effet, les précipitations estimées pour le Néolithique Ancien à cet endroit sont toujours largement supérieures aux moyennes actuelles (indiquées par la croix dans la figure). Les précipitations cumulées moyennes actuelles en hiver sont d'environ 215 millimètres, tandis que les reconstitutions pour le Néolithique ne descendent jamais en dessous de 250 millimètres, avec des pics de 300 millimètres. La même chose vaut pour l'été : les précipitations moyennes actuelles mesurent environ 85 millimètres, tandis que la moyenne Néolithique est autour de 125 millimètres. Les données polliniques montrent donc que le Néolithique Ancien a été une période très humide ; le modèle multi-agents, qui utilise des estimations météorologiques faites à partir de ces reconstitutions, suggère que des événements liés à la sécheresse étaient par conséquent improbables dans cette région.

Chapitre 7 : Conclusion

Le modèle de type multi-agents OBRESOC-BEAN a reproduit l'expansion des premiers agriculteurs dans les Balkans d'une façon qui adhère aux données archéologiques. Les agents sont initialisés sur la côte Egéenne, et la simulation commence en 6400 BC ; à cette date, plusieurs sites archéologiques sont attestés dans différentes parties de cette région. Probablement, de différents groupes se sont installés dans la région en même temps ; toutes les zones potentielles d'arrivée sont prises en compte dans le modèle. L'expansion est très limitée pendant les deux siècles suivants ; seulement entre 6200 et 6000 BC les agents sortent de la région d'origine, en colonisant l'actuelle République de Macédoine et la Bulgarie Occidentale, là où les cultures Anzabegovo et Galabnik sont attestées. Après 6000 BC l'expansion devient plus importante, à la fois en termes de vitesse et du nombre d'individus : toute la partie septentrionale des Balkans est occupée entre 6000 et 5.800 BC, avec les agents qui atteignent la Hongrie Méridionale et la Roumanie dans seulement deux siècles, en reproduisant le patron de colonisation observé pour les cultures Starčevo, Körös et Criş. Les Balkans entiers sont désormais colonisés ; entre 5.800 et 5.600 BC seulement une densification de l'occupation est observée, et donc une augmentation du nombre de hameaux simulés, plutôt qu'une vraie expansion géographique.

Le patron des agents simulés reflète assez précisément ce qui est montré par l'emplacement géographique et la chronologie des sites archéologiques. Cette correspondance est due, en premier lieu, à une correcte estimation des variables géo environnementales. La carte de *best patch*, où ces variables sont injectées, a une bonne adhérence avec la réalité archéologique : les zones avec des valeurs de *best patch* élevées sont aussi celles où la majorité de sites archéologiques ont été trouvés. La conséquence est que les agents occupent, de préférence, les régions qui étaient effectivement concernées par la colonisation Néolithique. La possibilité de choisir parmi un grand nombre de paramètres a permis d'ajuster cette expansion, en particulier en termes de vitesse et de densité.

Le résultat de chaque simulation représente un possible scénario de l'expansion des premiers agriculteurs dans la région ; pour identifier quel scénario correspond le mieux à la colonisation des Balkans observée en archéologie, une comparaison entre les données archéologiques et celles simulées a été faite. Les traces archéologiques donnent très peu

d'informations sur la structure sociale et économique d'une société préhistorique ; ce problème est encore plus grave dans le Néolithique Ancien des Balkans, où de sites complètement fouillés sont absents, et où très peu de squelettes ont été retrouvés. À cause de la pénurie des traces, la comparaison entre l'espéré archéologique et l'observé dans les simulations est problématique.

Cependant, un large nombre de sites archéologiques est connu ; même s'ils n'ont pas été fouillés exhaustivement, des informations ont été obtenues à travers de ramassages de surface. Tous ces sites sont géoréférencés et sont placés dans des séquences typo-chronologiques grâce à leur datation au radiocarbone ou à leur attribution culturelle. Une base de données qui inclue tous les sites publiés pour le Néolithique Ancien des Balkans a permis de nombreux tests de caractère géographique : une comparaison géochronologique entre l'expansion des agents produite par le modèle et celle observée en archéologie a montré quels sont les simulations qui adhèrent le mieux aux données archéologiques. La géographie est un élément primordial dans un processus de colonisation, et une bonne correspondance des patrons d'expansion est un important critère de validation.

Le modèle suggère qu'un nombre faible de colonisateurs initiaux aurait été suffisant pour produire l'expansion qui est observée en archéologie ; l'hypothèse est que la région a été occupée par des petits groupes de colonisateurs entre 6.600 et 6.400 BC plutôt qu'être intéressée par une migration de masse, qui aurait produit une colonisation de la région beaucoup plus rapide. Avec 150 couples au départ, environ 260.000 individus vivaient dans la région en 5800 BC, et 350.000 en 5600 BC. La même simulation suggère qu'environ 4.400 hameaux peuvent avoir été produits entre 6600 BC et 5800 BC, et 5.900 hameaux entre 6600 BC et 5600 BC. Ces estimations n'auraient pas pu être formulées à partir de données purement archéologiques ; le modèle de type multi-agents a produit des estimations inédites pour le Néolithique Ancien des Balkans.

Contraster l'expansion simulée avec celle observée dans les données archéologiques aide à mieux comprendre le rôle des contraintes géographiques dans les choix des premiers agriculteurs. Même si les deux patrons sont en général très adhérents, les différences éventuelles peuvent ouvrir à des inférences archéologiques. La tardive présence d'agents dans la Bulgarie Orientale par rapport à l'occupation attestée en archéologie s'explique par la différente origine du Néolithique dans cette région. L'observation de traces culturelles du *paquet Néolithique* suggère que le Néolithique Bulgare n'a pas ses origines dans le

Néolithique grec ; il s'agit d'une Néolithisation plus tardive, arrivée depuis l'Anatolie Septentrionale à travers le Bosphore. Le modèle ne peut pas représenter cette deuxième vague, mais il suggère qu'une expansion qui commence dans la région Egéenne se dirigera plutôt vers les actuelles République de Macédoine et Serbie, en atteignant la Bulgarie centre-oriental seulement dans un deuxième moment. En archéologie cette dernière zone a été probablement occupée plus tôt ; cependant, il ne s'agit pas de la même vague de colonisation simulée dans OBRESOC-BEAN, mais d'une autre avec une origine différente. Cette différente origine du Néolithique Bulgare, qui avait déjà été objet d'hypothèses par les archéologues, est suggérée aussi par le modèle.

La comparaison entre l'expansion géographique réelle et celle produite par le modèle est un élément de grand intérêt, qui a permis de tester la validité de nombreuses estimations et a ouvert à plusieurs réflexions. Cependant, le modèle n'a pas été construit seulement avec l'objectif de reproduire l'expansion géographique des premiers agriculteurs dans les Balkans ; ce modèle de type multi-agents, en utilisant de données provenant de plusieurs disciplines comme l'ethnographie, l'anthropologie et les sciences paléo-environnementales, a permis de modéliser le comportement d'une société agricole préhistorique. Cette approche ne se limite pas à visualiser l'expansion sur la carte, mais permet d'explorer d'éléments qui seraient très difficiles à détecter dans les traces archéologiques : en particulier, les structures sociales et économiques.

Ce qui est produit par le modèle n'est pas la réalité : le comportement des agents est déterminé par les règles du modèle et les paramètres injectés. Il faut donc comprendre dans quelle mesure le modèle peut être explicatif de la réalité ; la seule façon de le faire est à travers une comparaison avec les données archéologiques, qui est souvent problématique. Cependant, grâce aussi à l'aide de sources ethnographiques, cette comparaison a été possible pour certains éléments : un petit écart entre les données simulées et celle ethnoarchéologiques montre que le modèle reproduit correctement l'aspect en question, et lui en donne une possible explication. Au contraire, un écart large est un indicateur d'erreurs dans la structure du modèle ou dans les paramètres utilisés, qui rend nécessaire de reconsidérer les hypothèses à la base de la modélisation.

La différence entre les estimations faites par les archéologues et les données observées dans les simulations a fourni les résultats les plus intéressants, en permettant un questionnement des croyances archéologiques. Cet écart peut en effet suggérer que des estimations

généralement acceptées, mais qui ne sont pas vérifiables avec exactitude en archéologie, peuvent être erronées. Un exemple est l'estimations de 6 ou 7 personnes moyennes vivants dans chaque foyer domestique, faite sur la base de la surface des maisons. Les foyers domestiques produits par le modèle sont, en moyenne, occupés par une quantité plus faible d'individus. Une exploration de la vie des foyers domestiques simulés suggère que la présence de 6 ou 7 individus représente plutôt la taille maximale qui peut être atteinte ; mais, dans un village composé par de nombreux foyers domestiques, seulement certaines familles se trouveront dans leur moment d'expansion maximale, tandis qu'une grande quantité de foyers plus petits seront présents. Le nombre moyen de personnes dans une maison pourrait donc avoir été objet d'une surestimations par les archéologues ; similairement, le modèle suggère que la population d'un village typique Néolithique, souvent estimée à environ 200 individus, pourrait être en vérité de seulement 80 personnes.

L'analyse des sorties du modèle a permis de réfléchir sur un autre élément : le cycle de vie des maisons. Une observation des données simulées montre un nombre de foyers domestiques produits par le modèle largement supérieur aux maisons archéologiques estimées à partir des fouilles. Ce résultat ne supporte pas l'assomption à la base de la modélisation que chaque foyer domestique construit sa propre maison : les maisons archéologiques ne devraient pas être inférieures aux foyers domestiques. Cet écart a permis différentes réflexions, qui vont du questionnement de l'hypothèse de foyers domestiques nucléaires à la possibilité d'erreurs dans le modèle. Une nouvelle idée concerne la possibilité de réoccupation des maisons : les maisons bâties en brique crues et adobe, typiques du sud des Balkans, peuvent avoir une durée de vie longue, et donc théoriquement être occupées par plus qu'une génération. En outre, les robustes fondations en pierre trouvées dans certains sites suggèrent la possibilité d'une reconstruction au même emplacement. Même s'il s'agit seulement d'hypothèses, le modèle a soulevée une problématique inédite et a permis d'ajouter de nouvelles idées à la recherche archéologique de la région.

Grâce au modèle multi-agents a été possible de comparer les structures socio-économiques aussi du point de vu géochronologique, en contrastant les hameaux situés sur le front pionnier d'expansion de la colonisation aux hameaux situés dans des zones d'ancienne occupation, où se produit une augmentation de la densité. Le modèle permet d'observer s'il existe des changements importants dans la structure démographique et économique des foyers dans les différentes phases de l'expansion. Même si comparer les données simulées à l'archéologie est encore une fois compliqué à cause des limites des traces présentes dans les fouilles, le modèle

a permis une exploration inédite de la composition des foyers domestiques et de leur activité productive. Cette observation a permis, par exemple, de questionner le rôle de la chasse dans une société préhistorique. Dans le modèle, la chasse a une progressive perte d'importance au fur et à mesure que le hameaux vieillit, car les agents peuvent obtenir assez de viande depuis leurs troupeaux ; inversement, les traces archéologiques montrent que la chasse continue à être pratiquée dans les mêmes villages pendant plusieurs siècles. L'archéologie suggère donc un rôle de la chasse dans les sociétés agricoles primitives qui va au delà de la nécessité de viande, au contraire de ce qui est modélisé dans OBRESOC-BEAN. Plusieurs autres raisons peuvent expliquer pourquoi les individus continuaient à chasser : accroître leur statut social, obtenir des matières premières, protéger les cultures. Le modèle suggère donc ce qui avait déjà été objet d'hypothèse par d'autres auteurs (Orton à paraître) : la chasse a un rôle complexe dans les sociétés du Néolithique Balkanique, qui n'est pas limité seulement à sa contribution dans l'alimentation.

Ce travail de modélisation a-t-il apporté quelque chose à la connaissance du Néolithique dans cette région ? Les résultats des simulations, difficilement comparables à l'archéologie, ne permettent pas de nouvelles découvertes, mais fournissent de nombreuses suggestions. Tout d'abord, l'ajustement du modèle a permis d'évaluer la validité des paramètres, généralement issues d'estimations ethnoarchéologiques qui ne sont pas vérifiables avec ce qui est trouvé dans les vestiges. Les paramètres qui produisent une expansion géographique qui adhère à celle observée en archéologie représentent une possible estimation de l'élément modélisé, tandis que les paramètres qui donnent des sorties aberrantes - par exemple des expansions trop rapides ou trop lentes - suggèrent que la valeur estimée n'est pas appropriée. L'exploration des sorties socio-économiques, même si problématique, a permis la formulation de nouvelles hypothèses qui ne pourraient pas être faites simplement sur la base de ce qui est trouvé dans les vestiges archéologiques : le modèle a permis le questionnement des croyances archéologiques, en ajoutant de nouvelles idées et perspectives à la recherche. Même quand les sorties sont fausses, c'est-à-dire qu'il existe un large écart entre ce qui est espéré depuis l'archéologie et ce qui est observé dans le modèle, cette approche de modélisation multi-agents ouvre à des nouvelles questions. Quand la simulation n'a pas représenté correctement le phénomène observé, la raison est que certains facteurs n'ont pas été considérés, ou n'ont pas été estimés et modélisés correctement. Il ne s'agit pas forcément de quelque chose de mauvais : contredire les hypothèses à la base de la modélisation implique la recherche de

raisons qui peuvent expliquer cet écart, en ajoutant de nouvelles idées à la compréhension du processus simulé.

Cette thèse ouvre aussi à une nouvelle perspective pour la recherche : l'utilisation et l'analyse des *big data* dans l'archéologie. On dispose de technologies et de moyens qui permettent de produire une quantité énorme d'information, de la stocker et de l'analyser : cette potentialité peut être exploitée aussi dans le cadre de la recherche archéologique. Au-delà des résultats produits pour cette thèse et de leur intérêt archéologique potentiel, une importante partie du travail a été dédiée au développement d'approches pour la manipulation des *big data*. L'exploration d'une grande quantité de données simulées, qui va du front pionnier à l'inspection de certains foyers domestiques spécifiques, a été possible seulement grâce à des procédures, développées en langage SQL, qui ont permis de sélectionner et d'extraire les données dans des marges de temps raisonnables.

Ce travail a aussi mis en évidence de lacunes dans les fouilles de la région. La recherche archéologique a été intense et a donné des résultats importants dans les années passées : beaucoup est désormais connu en ce qui concerne le timing et la direction de l'expansion du Néolithique Ancien dans la région. En même temps, il existe encore de nombreux éléments qui n'ont pas été explorés. Avec de sites archéologiques complètement fouillées, les estimations de la surface occupée et du nombre de maisons seraient beaucoup plus fiables ; avec une quantité plus grande de squelettes d'inférences paléodémographiques pourraient être faites, et la structure par âge de la population simulée être comparée à celle archéologique. L'archéologie se dédie souvent à l'analyse d'éléments purement culturels et de spécificité locales, sans s'intéresser à la recherche d'informations qui pourraient donner des suggestions sur le système socio-économique.

La modélisation multi-agents devient de plus en plus utilisée dans le domaine de l'archéologie : elle permet de formuler de nouvelles hypothèses et d'ajouter de perspectives inédites qui ne pourraient pas être inférées à partir de données purement archéologiques. En même temps, pour faire de la modélisation, de données archéologiques robustes sont nécessaires : d'abord pour construire le modèle et en choisir les paramètres, et après pour valider ses sorties. Pour cette raison, à côté du progrès de la modélisation multi-agents, l'archéologie devrait chercher des centres d'intérêt anthropologique, plutôt que se limiter surtout à des données de type culturel ; une collaboration entre les archéologues et les modélisateurs de type multi-agents permettrait l'avancée des deux disciplines.

Référence

- Alcock, Susan E., John F. Cherry et J. L. Davis. 1994. "Intensive survey, agricultural practice and the classical landscape of Greece". En *Classical Greece: ancient histories and modern archaeologies*, édité par I. Morris : 137–170.
- Aram-Stern Eva. 2005. "The Early Neolithic Settlement in Central and Southern Greece. The actual State of Research". En *Byzas 2. How did Farming reach Europe? Anatolian-European Relations from the second half of the 7th through the first half of the 6th Millennium cal BC. Proceedings of the International Workshop, Istanbul 20-22 may 2004* édité par C. Lichter. Ege Yayınları, Istanbul : 183-194
- Ammerman, Albert J., Nikos Efstratiou, Maria Ntinou, Kosmas Pavlopoulos, Roberto Gabrielli, Kenneth D. Thomas et Marcello A. Mannino. 2008. "Finding the early Neolithic in Aegean Thrace: the use of cores". *Antiquity* 82 (315) : 139-150
- Ammerman, Albert J. et Luigi Luca Cavalli-Sforza 1971. "Measuring the rate of spread of early farming in Europe". *Man New Series* 6 (4) : 674–688
- Ammerman, Albert J. et Luigi Luca Cavalli-Sforza. 1984. *The Neolithic Transition and the Genetics of Populations in Europe*. Princeton University Press, Princeton.
- Andreou, Stelios, Michael Fotiadis et Kostas Kotsakis. 1996. "Review of Aegean Prehistory V: the Neolithic and Bronze Age of Northern Greece". *American Journal of Archaeology* 100 : 537-597.
- Arbuckle, Benjamin S. 2013. "The late adoption of cattle and pig husbandry in Neolithic Central Turkey". *Journal of Archaeological Science* 40 (4) : 1805-1815.
- Axtell, Robert L., Joshua M. Epstein, Jeffrey S. Dean, George J. Gumerman, Alan C. Swedlund, Jason Harburger, Shubha Chakravarty, Ross Hammond, Jon Parker et Miles Parker (2002). "Population Growth and Collapse in a Multi-Agent Model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (3): 7275-7279.
- Bailey, Geoff et Penny Spikins. 2008. *Mesolithic Europe*. Cambridge University Press.
- Bandy, Matthew. 2004. "Fissioning, Scalar Stress, and Social Evolution in Early Village Societies". *American Anthropologist* 106 (2) : 322-333
- Bánffy, Eszter, Tibor Marton et Anett Osztás. 2010. "Early Neolithic settlement and burials at Alsónyék-Bátaszék". En *Neolithization of the Carpathian Basin: Northernmost distribution of the Starcevo/Körös culture*, édité par K. Kozłowski et P. Raczky. Universities, Kraków-Budapest : 37-51.

- Bánffy, Eszter et Pal Sümegei. 2012. "Neolithic Agro-Ecological Barrier in the Carpathian Basin: A Zone for Interaction" en *Archaeological, Cultural and Linguistic Heritage*, édité par Edited by Peter Anreiter, Eszter Bánffy, László Bartosiewicz, Wolfgang Meid et Carola Metzner-Nebelsick. Arcaheolingua Alapitvany, Budapest : 57-69.
- Bacvarov, Krum. 2006. "Early Neolithic jar burials in southeast Europe: a comparative approach". *Documenta Praehistorica XXXIII* : 101-106.
- Bartosiewicz, László. 2005. "Plain Talk: Animals, Environment and Culture in the Neolithic of the Carpathian Basin and Adjacent Areas". En *(Un)settling the Neolithic*, édité par D. Bailey, A.J. Whittle & V. Cummings. Oxbow, Oxford : 51-63.
- Behar, Cem. 1998. "Sources pour la démographie historique de l'empire ottoman : Les tahrirs (dénombrements) de 1885 et 1907". *Population (Edition française)* 53 (1/2) : 161-17
- Benecke Norbert. 2006. "Animal Husbandry and Hunting in the Early Neolithic of South-East Europe – A Review". En *Aegean – Marmara – Black Sea: the Present State of Research on the Early Neolithic. Proceedings of the Session held at the EAA 8th Annual Meeting at Thessaloniki, 28th September 2002*, édité par I. Gatsov et H. Schwarzberg. Beier & Beran, Langenweissbach : 175-186.
- Biagi, Paolo, Stephen Shennan et Michela Spataro. 2005. "Rapid rivers and slow seas? New data for the radiocarbon chronology of the Balkan peninsula". En *Prehistoric Archaeology & Anthropological Theory and Education*, édité par Lolita Nikolova & Jude Higgins. RPRP 6-7 : 43-51.
- Bikoulis, Peter. 2013. "Neolithic Houses and Households in Central Anatolia in multi-regional perspective". *Vis-à-vis: Explorations in Anthropology* 12 (1) : 31-53.
- Blagojević, M, D. Petković et N. Mirković- Marić. 2001. "Izložba Kolubara u praistoriji, priča o dva lokaliteta", *Katalog izložbe*.
- Bocquet-Appel, Jean-Pierre. 1984. "Biological evolution and History in 19th century Portugal". En *Multivariate Statistical Methods in Physical Anthropology*, edité par G. N. Van Vark et W. W. Howells, Reidel Publ. : 289-321.
- Bocquet-Appel, Jean-Pierre. 2008a. "Explaining the Neolithic Demographic Transition". En *The Neolithic Demographic Transition and its Consequences*, édité par JP Bocquet-Appel et O Bar-Yosef. Springer Netherlands : 35-56.
- Bocquet-Appel, Jean-Pierre. 2008b. *La Paléodémographie. 99,99 % de l'histoire démographique des hommes ou la démographie de la Préhistoire*. Hespérides, éd. Errance, Paris.
- Bocquet-Appel, Jean-Pierre, Jérôme Dubouloz , Richard Moussa, Jean-François Berger, Anne Tresset, Elena Ortu, Jean-Denis Vigne, Robin Bendrey, Stéphanie Bréhard, Dominique Schwartz, Aurélie Salavert, Maria Fernanda Sanchez-Goñi, Damien Ertlen, Yoann Gauthier, Gourguen Davtian, Marc Vander Linden, Eva Lenneis, Lorette Noiret, Agnès Guillaumont et Martin O'Connor. 2014. "Multi-agent Modelling of the Trajectory of the LBK Neolithic: A Study in Progress". En *Early Farmers: The View from Archaeology and Science*, édité par Alastair Whittle and Penny Bickle. Proceedings of the British Academy. Oxford University Press, Oxford.

- Bocquet-Appel, Jean-Pierre, Richard Moussa et Jérôme Dubouloz. 2015. "Multi-Agent Modelling of the Neolithic LBK". In *CAA 2014 21st Century Archaeology. Concepts, Methods and Tools. Proceedings of the 42nd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, édité par François Giligny, François Djindjian, Laurent Costa, Laura Moscati, et Sandrine Robert. Archaeopress, Oxford : 611-22..
- Bocquet-Appel, Jean-Pierre, Stephan Naji, Marc Vander Linden et Janusz Kozłowski. 2009. "Detection of diffusion and contact zones of early farming in Europe from the space-time distribution of 14C dates". *Journal of Archaeological Science* 36 : 807-20.
- Bocquet-Appel, Jean-Pierre, Stephan Naji, Marc Vander Linden et Janusz Kozłowski. 2012. "Understanding the Rates of Expansion of the Farming System in Europe". *Journal of Archaeological Science* 39 : 531-545.
- Bogdanović, M. 2004. *Grivac - naselja protostarčevačke i vinčanske kulture*. Centar za naučna istraž. SANU, Serbie.
- Bogaard, Amy. 2004. "The nature of early farming in Central and South-east Europe". *Documenta Praehistorica* XXXI : 49-58.
- Bogaard, Amy. 2005 "'Garden Agriculture' and the Nature of Early Farming in Europe and the near East". *World Archaeology* 37 (2) : 177-196.
- Bogard, Amy, Rebecca Fraser, Tim H.E. Heaton, Michael Wallace, Petra Vaiglova, Michael Charles, Glynis Jones, Richard P. Evershed, Amy K. Styring, Niels H. Andersen, Rose-Marie Arbogast, László Bartosiewicz, Armelle Gardeisen Marie Kanstrup, Ursula Maier, Elena Marinova, Lazar Ninov, Marguerita Schäfer et Elizabeth Stephan. 2013. "Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers". *Proceedings of the National academy of Sciences of United States of America* 110 (31) : 12589–12594
- Böhner, U. and Schyle, D. 2008. "Radiocarbon CONTEXT Database 2002–2006". (<http://context-database.uni-koeln.de/>)
- Bonabeau, Eric. 2002. "Agent-based modeling : methods and techniques for simulating human systems". *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99 (S3) : 7280-7287.
- Bonsall, Clive. 2008. "The Mesolithic of the Iron Gates". En *Mesolithic Europe*, édité par Geoff Bailey et Penny Spikins. Cambridge University Press, Cambridge.
- Borić, Dusan. 2002. *Seasons, life cycles and memory in the Danube Gorges, c. 10000-5500 BC*. Thèse doctorale, Université de Cambridge.
- Borić, Dusan. 2005. "Deconstructing essentialisms: Unsettling frontiers of the Mesolithic-Neolithic Balkans". En *(Un)settling the Neolithic*, édité par D. Bailey, A.J. Whittle et V. Cummings. Oxbow, Oxford : 16-31.

- Borić, Dusan. 2007. " Mesolithic-Neolithic interaction in the Danube Gorges". En *Mesolithic/Neolithic Interactions in the Balkans and in the Middle Danube Basin. Proceedings of the XV World Congress of the International Union for Prehistoric and Protohistoric Sciences, Lisbon, 4-9 September 2006*, édité par Janusz Krzysztof Kozłowski et Marek Nowak. BAR International Series, Oxford : 31-45.
- Borić, Dusan 2008. "*First Households and 'House Societies' in European Prehistory*". En *Prehistoric Europe: Theory and Practice* édité par Andrew Jones Wiley- Blackwell, . Chichester : 109-142.
- Borić, Dusan. 2011. "Adaptations and Transformations of the Danube Gorges Foragers (c.13.000 – 5500 BC): An Overview". En *Beginnings - New Research in the Appearance of the Neolithic between Northwest Anatolia and the Carpathian Basin Istanbul, 8-9 april 2009*, édité par Raiko Krauß. Verlag Marie Leidorf Gmb, Rahden/Westf : 157-203
- Borić Dusan et Vesna Dimitrijević. 2009. "Apsolutna hronologija i stratigrafija Lepenskog Vira". *Starinar LVII/2007* : 9-55.
- Borić, Dusan, Charles French et Vesna Dimitrijević. 2008. "Vlasac revisited: formation process, stratigraphy and dating". *Documenta Praehistorica XXXV*: 261-287.
- Borić, Dusan et Preston Miracle. 2004. "Mesolithic and Neolithic (dis)continuities in the Danube Gorges: new AMS dates from Padina and Hajdučka Vodenica (Serbia)". *Oxford Journal of Archaeology* 23(4) : 341-371.
- Boyadzhiev, Yavor. 2004. "Absolute chronology of the Neolithic and Eneolithic cultures in the valley of Struma". En *The Struma/Strymon River Valley in Prehistory*, édité par Henrieta Todorova, Mark Stefanovich , Georgi Ivanov. Sofia : 309-316.
- Boyadzhiev, Yavor. 2006. "The role of absolute chronology in clarifying the Neolithization of the eastern half of Balkan Peninsula". En *Aegean – Marmara – Black Sea: the Present State of research on the Early Neolithic*, édité par I. Gatsov and H. Schwarzberg. Beier & Beran, Langenweissbach : 7–14.
- Boyadzhiev, Yavor. 2009. "Early Neolithic Cultures on the Territory of Bulgaria". En *The first Neolithic Sites in Central/South-East European Transect, vol. I. Early Neolithic Sites on the Territory of Bulgaria*, édité par I. Gatsov, Y. Boyadzhiev. BAR International Series 2048 : 7-43.
- Boyazoglu, G. et P. Morand-Fehr. 2001. "Mediterranean dairy sheep and goat products and their quality. A critical review". *Small ruminant Research* 40 : 1-11.
- Brami, Maxime. 2014a. "A graphical simulation of the 2,000-year lag in Neolithic occupation between Central Anatolia and the Aegean basin". *Archaeological and Anthropological Science* 7 (3) : 319-327.
- Brami, Maxime. 2014b. "House-related practices as markers of the Neolithic expansion from Anatolia to the Balkans". *Bulgarian e-journal of archaeology* 4 (2) : 161 -176.

- Brami, Maxime et Volker Heyd. 2011. "The origins of Europe's first farmers: the role of Hacilar and Western Anatolia, fifty years on". *Praehistorische Zeitschrift* 86 (2) : 165-206.
- Brami, Maxime et Barbara Horejs, à paraître. "Upscaling the Neolithic House. Trends in House Size and Function in Anatolia and the Balkans".
- Brami, Maxime et Andrea Zanotti. 2015. "Modelling the initial expansion of the Neolithic out of Anatolia". *Documenta Praehistorica* 42 : 103-116.
- Braudel, Fernand. 1958. "Histoire et sciences sociales : la longue durée". *Annales de l'Ecole d'Economie, Société et Civilisation* 13 (4) : 727-731.
- Brondizio ES, SD McCracken, EF Moran, AD Siqueira, DN Nelson, C Rodriguez-Pedraza. 2002. "The colonist footprint: Towards a conceptual framework of land use and deforestation trajectories among small farmers in Frontier Amazonia". En *Land use and deforestation in the Amazon*, édité par C. Wood and R. Porro. University of Florida Press, Gainesville : 133-161.
- Brukner, B.1966. "Die tardenoisienischen Funde von 'Peres' bei Hajdukovo und aus Backa Palanka und das Problem der Beziehungen zwischen dem Mesolithikum und präkeramischen Neolithikum im Donaugebiet". *Archaeologia Jugoslavica* 7 : 1-12
- Burns, John. 2003. "Turnips keep ewes well fed". *Farmer's weekly, October 24-30* : 32
- Budja, Mihael. 2011. "Early Neolithic pots and potters in western Eurasia". *Panonski prapovijesni osviti, Str* : 31-67.
- Carneiro, Robert. 1988. "The Circumscription Theory: Challenge and Response". *American Behavioral Scientist* 31(4) : 497-51.
- Carrignon, Simon, Jean-Marc Montanier et Xavier Rubio-Campillo. 2015. "Modelling the co-evolution of trade and culture in past societies". *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, édité par L. Yilmaz, W. K. V. Chan, I. Moon, T. M. K. Roeder, C. Macal et M. D. Rossetti. IEEE Press Piscataway, NJ : 3949-3960.
- Caskey, John L.1957. "Excavations at Lerna, 1956". *Hesperia* 26 : 142-162.
- Cauvin, Jacques. 1998. *Naissance des divinités, naissance de l'agriculture: la révolution des symboles au néolithique*. CNRS Editions, Paris.
- Cavanagh William G. 2004. "WYSIWYG: settlement and territoriality in Southern Greece during the Early and Middle Neolithic periods". *Journal of Mediterranean Archaeology* 17(2): 165-189.
- Chapman John. 1999. "Deliberate House-burning in the Prehistory of Central and Eastern Europe". En *Glyfer och arkeologiska rum – en vänbok till Jarl Nordblad*, édité par A. Gustafson et H. Karlsson. University of Göteborg Press, Göteborg : 113-126.
- Chayanov, Alexander V. 1923.*The Theory of peasant economy*. P Parey, Berlin. 1986 : The University of Wisconsin Press, Madison.

- Childe, Vere Gordon. 1925. *The dawn of European civilization*. Kegan Paul, Trench, Trubner & Co. London.
- Chohadzhiev, Stefan. 2001. *Vaksevo - praistoricheski selishta*. Faber, Veliko Turnovo.
- Çilingiroğlu, Çiler. 2005. "The concept of 'Neolithic Package': Considering its meaning and applicability". *Documenta Praehistorica XXXII* : 1-13.
- Çilingiroğlu, Çiler. 2009. *Central-west Anatolia at the end of 7th and beginning of 6th millennium BEC in the light of pottery from Ulucak (Izmir)*. Thèse doctorale, Université de Tübingen.
- Clare, Lee et Bernhard Weninger. 2014. "The Dispersal of Neolithic Lifeways: Absolute Chronology and Rapid Climate Change". En *The Neolithic in Turkey. New Excavations and New Research. Volume 6*, édité par M. Özdoğan et P. Kuniholm. Archaeology & Arts Publications, Istanbul.
- Clark G. 1965. "Radiocarbon Dating and the Spread of Farming Economy". *Antiquity* 39 : 45 - 48.
- Coale, Ashley J. et Paul Demeny. 1966. *Regional Model Life-tables and Stable Populations*. Princeton University Press, Princeton.
- Connolly, James, Sue Colledge, Keith Dobney, Jean-Denis Vigne, Joris Peters, Barbara Stopp, Katie Manning et Stephen Shennan. 2011. "Meta-analysis of zooarchaeological data from SW Asia and SE Europe provides insight into the origins and spread of animal husbandry". *Journal of archaeological science* 38 : 538-545
- Coudart, Annick. 1994. Maisons Néolithiques, maisons de la nouvelle Guinée. L'ethnologie comparée sur choix social et technique. En *De la préhistoire aux missiles balistiques. L'intelligence sociale des techniques*, édité par B. Latour et P. Lemonnier. La Découverte, Paris : 228-252.
- Cressie, Noel et Christopher K. Wikle. 2011. *Statistics for spatio-temporal data*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Cullen, Tracey. 1999. "Scattered human bones at Franchthi Cave: remnants of ritual or refuse?". En *Meletemata. Studies in Aegean Archaeology Presented to Malcolm H. Wiener as He Enters His 65th Year* édité par P.P. Betancourt., V.Karageorghis, R. Laffineur et W.D. Niemeier. University Press, Liège/Austin : 165-171.
- Davis, J.L. 1991. "Contributions to a Mediterranean rural archaeology: historical case studies from the Ottoman Cyclades". *Journal of Mediterranean Archaeology* 4 : 131-216.
- Davison, Kate, Pavel Dolukhanov, Graeme R.Sarson, Anvar Shukurov. 2006. "The role of waterways in the spread of the Neolithic". *Journal of Archaeological Science* 33 (5).
- Demoule, Jean-Paul. À paraître. "The Neolithic colonization of Balkanic Europe: chronology and process". En *Times of Change: The Turn from the 7th to the 6th Millennium BC in the Near East and Southeast Europe*, édité par P. Biehl. IEMA Distinguished Monograph Series, University of Buffalo Press.

- Demoule, Jean-Paul et Catherine Perlès. 1993. "The Greek Neolithic: A New Review". *Journal of World Prehistory* 7 (4) : 355-416.
- De Sartre, Xavier Arnaud. 2006. *Les fronts pionniers d'Amazonie. Les dynamiques paysannes au Brésil*. Paris, CNRS Éditions.
- Dinu, Alexandru. 2010. "Mesolithic fish and fisherman of the Lower Danube (Iron Gates)". *Documenta Praehistorica XXXVII* : 299-310.
- Dubouloz, Jérôme. 2014. "Paramétrage climat et « crises » climatiques". Article non publié.
- Drennan, R. D., Dai, X. 2010. "Chiefdoms and states in the Yuncheng Basin and the Chifeng region: A comparative analysis of settlement systems in North China". *Journal of Anthropological Archaeology* 29 : 455–468.
- Easterline, Richard A. 1976. "Population change and farm settlement in the northern United States". *Journal of Economic History* 36 (1) : 45-75.
- Eichmann, William J. 2004. "Mesolithic Hunter–Gatherers in the Carpathian Basin and the Spread of Agriculture in Europe". En *Fulbright Student Conference Papers*, édité par I. Huszár. Hungarian – American Commission for Educational Exchange, Budapest : 161–202.
- Elenski, N. 2006. "Sondazni prouchvaniya na rannoneolitnoto selishte Dzhulyunitsa-Smardesh". *Velikotarnovsko - Arheologia*, 1-4 : 96-117.
- Efstratiou, Nikos. 1985. *Agios Petros, a Neolithic Site in the Northern Sporades : Aegean Relationships During the Neolithic of the 5th Millennium*. B.A.R., Oxford.
- Efstratiou, Nikos, Alexandra Karetsou, Eleni S. Banou and Despina Margomenou. 2004. "The Neolithic settlement of Knossos: new light on an old picture ". En *Knossos: palace, city, state (British School at Athens Studies Vol. 12)*, édité par Gerald Cadogan, Eleni Hatzaki et Adonis Vasilakis. London : 39-49.
- Efstratiou, Nikos, Alexandra Karetsou et Maria Ntinou. 2013. *The Neolithic Settlement of Knossos in Crete: New Evidence for the Early Occupation of Crete and the Aegean Islands*. INSTAP Academic Press, Philadelphia.
- Facoriellis, Yorgos et Yiannis Maniatis. 2013. "Radiocarbon Dates from the Neolithic Settlement of Knossos: An Overview" en *The Neolithic Settlement of Knossos in Crete: New Evidence for the Early Occupation of Crete and the Aegean Islands*, édité par Nikos Efstratiou, Alexandra Karetsou et Maria Ntinou. 2013. INSTAP Academic Press, Philadelphia : 193-200
- Faivre, Robert, Bertrand Iooss, Stéphanie Mahévas, David Makowski et Hervé Monod. 2013. *Analyse de sensibilité et exploration de modèles*. Editions Quae, Versailles.
- Ferber, Jacques. 2005. *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. Inter Editions.
- Fite, Gilbert F. 1976. "The pioneer farmer: A view over three centuries". *Agricultural History* 50 (1), 275-289.

- Flannery Kent V. 2002. "The Origins of the Village Revisited: From Nuclear to Extended Households". *American Antiquity* 67(3) : 417-433.
- Forenbaher, Staso et Preston T. Miracle. 2006. "The spread of farming in the Eastern Adriatic". *Documenta Praehistorica* XXXIII : 89-100.
- Fort, Joaquim. 2015. "Demic and cultural diffusion propagated the Neolithic transition across different regions of Europe". *Journal of the Royal Society Interface* 12 (106).
- Fowler, Kent D. 2004. *Neolithic Mortuary Practices in Greece*. BAR Int. Series 1314, Oxford.
- Epstein, Joshua M. 2006. *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Galanidou, Nena et Catherine Perlès. 2003. *The Greek Mesolithic. Problems and Perspectives*. The British School at Athens, London.
- Gallagher, Elizabeth M., Stephen J. Shennan, Mark G. Thomas. 2015. "Transition to farming more likely for small, conservative groups with property rights, but increased productivity is not essential". *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America* 112 (45) : 14218-14223.
- Gallis, K. 1994 "Results of recent excavations and topographical work in Neolithic Thessaly", en *La Thessalie. Quinze années de recherches archéologiques, 1975-1990, vol. I; Bilans et perspectives*. Ministère de la Culture, Editions Kapon, Athens.
- Gamba, C., Fernández E., Tirado M., Deguilloux M.F., Pemonge M.H., Utrilla P., Edo M., Molist M., Rasteiro R., Chikhi L. and Arroyo-Pardo E. (2011), "Ancient DNA from an Early Neolithic Iberian Population Supports a Pioneer Colonization by First Farmers". *Molecular Ecology* 21 (1) : 45-56.
- Ganetsovski, Giorgi. 2009. *Ohoden. Selishte ot ranniya neolit (Ohoden. An Early Neolithic settlement)*. Craft House Bulgaria Ltd .
- Georgiev, G. 1961. "Glavni rezultati ot razkopkite na Azmashkata selishtna mogila prez 1961 g". *Izvestiya na Arheologicheskiya institut* 26 : 157-176.
- Georgiev, G. 1974. "Stratigrafia I periodizatsiya na neolita I halkolita v dneshnite balgarski zemi". *Arheologia* 4 : 1-18.
- Georgiev, G. I., V. Nikolov, V. Nikolova et S. Cohadziev. 1986. "Die neolithische Siedlung Kremenik bei Sapareva Banja, Bezirk Kjustendil". *Studia Praehistorica* 8 : 108-151.
- Gimbutas, Marija. 1974. "Achilleion: A Neolithic Mound in Thessaly; Preliminary Report on 1973 and 1974 Excavations". *Journal of Field Archaeology* 1 (3/4) : 277-302.
- Gimbutas, Marija. 1976. *Neolithic Macedonia, As reflected by Excavation at Anza, Southeast Yugoslavia*. The regents of the University of California, Los Angeles.

- Ginot, Vincent, Sabrina Gaba, Rémy Beaudouin, Franck Aries et Hervé Monod. 2006. "Combined Use of Local and ANOVA-Based Global Sensitivity Analyses for the Investigation of a Stochastic Dynamic Model: Application to the Case Study of an Individual-Based Model of a Fish Population". *Ecological Modelling*, 193 (3–4) : 479–491.
- Girić, M. 1975. "Koros-Starčevo nalazišta u severnom Banatu". *Materijali* 10 : 169-187.
- Gkiasta Marina, Thembi Russell, Stephen Shennan et James Steele. 2003. "Neolithic transition in Europe: the radiocarbon record revisited". *Antiquity* 77 : 45-62.
- Görsdorf, Jochen et J. Bojadžiev. 1996. "Zur absoluten Chronologie der bulgarischen Urgeschichte". *Eurasia Antiqua*, 2 : 105-172.
- Gower, John C. 1975. "Generalized Procrustes Analysis". *Psychometrika* 40 (1) : 33 - 51.
- Greenfield, Haskel J. 2005. "A Reconsideration of the Secondary Products Revolution in South-eastern Europe: on the Origins and Use of Domestic Animals for Milk, Wool and Traction in the Central Balkans". En "The Zooarchaeology of Fats, Oils, Milk and Dairying", édité par J. Mulville et A.K. Outram. Oxbow, Oxford : 14–31.
- Greenfield, Haskel J. 2008. "Faunal Assemblages from the Early Neolithic of the Central Balkans: methodological Issues in the Reconstruction of Subsistence and Land Use". En *The Iron Gates in Prehistory : New Perspectives*, édité par C. Bonsall, V. Boroneant et I. Radovanovic. Archaeopress, Oxford : 103–14.
- Grimm, Volker, Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J.U., Jørgensen, C., Mooij, W.M., Müller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S.F., Robbins, A.M., Robbins, M.M., Rossmanith, E., Rüger, N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R.A., Vabø, R., Visser, U., DeAngelis, D.L.. 2006. "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models". *Ecological Modelling* 198 (1-2) : 115–126.
- Grimm, Volker, Uta Berger, Donald L. De Angelis, J. Gary Polhill, Jarl Giske, et Steven F. Railsback. 2010. "The ODD protocol: A review and first update". *Ecological modelling* 221 (23) : 2760-8.
- Guest-Papamanoli, Anna. 1978. "L'emploi de la brique crue dans le domaine égéen à l'époque Néolithique et à l'Âge du Bronze". *Bulletin de correspondance hellénique* 102 (1) : 3-24
- Gurova, Maria. 2008. "Towards an understanding of Early Neolithic populations : a flint perspective from Bulgaria". *Documenta Praehistorica* XXXV : 111-129.
- Gurova, Maria. 2011. "Early Neolithic Site of Kovačevo: A Case Study of 'Balkan Flint' Formal Toolkit". *Studia Praehistorica* 14 : 71-81.

- Haak, Wolfgang, Oleg Balanovsky, Juan J. Sanchez, Sergey Koshelev, Valery Zaporozhchenko, Christina J. Adler, Clio S. I. Der Sarkissian, Guido Brandt, Carolin Schwarz, Nicole Nicklisch, Veit Dresely, Barbara Fritsch, Elena Balanovska, Richard Villems, Harald Meller, Kurt W. Alt, Alan Cooper, the Genographic Consortium. 2010. "Ancient DNA from European Early Neolithic Farmers reveals their Near Eastern Affinities". *PLOS Biology* 8 (11).
- Halstead, Paul. 1981. "Counting Sheep in Neolithic and Bronze Age Greece". En *Pattern of the Past Studies in Honour of David Clarke*, édité par I. Hodder, G. Isaac, et N. Hammond. Cambridge : 307-339.
- Halstead, Paul. 1984 "Strategies for Survival: An ecological Approach to social and economic change in the early farming communities of Thessaly, N. Greece". Thèse doctorale, Cambridge.
- Halstead, Paul. 1987. "Man and other animals in later Greek prehistory". *The Annual of the British School at Athens* 82 : 71-83.
- Halstead, Paul. 1989. "Like rising damp? An ecological approach to the spread of farming in southeast and central Europe". En *The Beginnings of Agriculture*, édité par A. Milles, D. Williams and N. Gardner. British Archaeological Reports 496, Oxford : 23-53.
- Halstead, Paul. 2004. "Farming and feasting in the Neolithic of Greece: the ecological context of fighting with food". *Documenta Praehistorica* XXXI : 151-161.
- Halstead, Paul. 2011a. "Farming, Material Culture and Ideology: Repacking the Neolithic of Greece (and Europe)". En *The Dynamics of Neolithisation in Europe. Studies in Honour of Andrew Sherratt*, édité par A. Hadjikoimis, E. Robinson, S. Viner. Oxbow Books, Oxford : 131-151.
- Halstead, Paul 2011b. "Feast, Food and Fodder in Neolithic-Bronze Age Greece: Commensality and the Construction of Value". En *Between Feasts and Daily Meals: Toward an Archaeology of Commensal Spaces*, édité par Susan Pollock. Excellence Cluster Topoi, Berlin : 21-51.
- Halstead, Paul et Valasia Isaakidou. 2013. "Early Stock-Keeping in Greece". En *The origins and spread of domestic animals in Southwest Asia And Europe*, édité par Sue Colledge, James Conolly, Keith Dobney, Katie Manning et Stephen Shennan. Left Coast Press, Walnut, California : 129-144.
- Hamilakis, Yannis. 2003. "The sacred geography of hunting: wild animals, social power and gender in early farming societies". En *Zooarchaeology in Greece: recent advances*, édité par E. Kotjabopoulou, Y. Hamilakis, P. Halstead, C. Gamble et P. Elefanti. British School at Athens, London : 239 - 247.
- Harris D.R., H.E . Gove. et P. Damon. 1987. "The Impact on Archaeology of Radiocarbon Dating by Accelerator Mass Spectrometry [and Discussion]". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 323 : 23-43.

- Hather, J.G. 1994. "A Morphological Classification of Roots and Tubers and its bearing on the Origins of Agriculture in Southwest Asia and Europe". *Journal of Archaeological Science* 21 (6) : 719 - 724.
- Héberger, Karoly et José M. Andrade. 2004. "Procrustes Rotation and Pair-wise Correlation: a Parametric and a Non-parametric Method for Variable Selection". *Croatica Chemica Acta* 77 (1) : 117-124.
- Higgs, E. S. et M.R. Jarman 1969. "The origins of agriculture: a reconsideration". *Antiquity* 43 (169) : 31-41.
- Higham, Tom F. G., Christopher Bronk Ramsey, Fiona Brock, Diane Baker et Peter Ditchfield. 2011 "Radiocarbon Dates from the Oxford AMS system : Archaeometry datelist 32". *Archaeometry* 53 (5) : 1067-1084.
- Hiller, Stefan et Vasil Nikolov. 1997. "Karanovo. Die Ausgrabungen im Südsektor 1984-1992". *Österreichisch-bulgarische Ausgrabungen und Forschungen in Karanovo, Band 1*. Berger, Horn/Wien.
- Hoare, Alexander, David G Regan et David P Wilson. 2008. "Sampling and sensitivity analyses tools (SaSAT) for computational modelling". *Theoretical Biology and Medical Modelling* 5 (4).
- Hoffman, Daniela and Jessica Smyth. 2012. *Tracking the Neolithic House in Europe : Sedentism, Architecture and Practice*. Springer Science & Business Media, New York.
- Horard-Herbin Marie-Pierre, Anne Tresset et Jean-Denis Vigne. 2014. "Domestication and uses of the dog in western Europe from the Paleolithic to the Iron Age". *Animal Frontiers* 4 (3) : 23-31.
- Hourmouziadis, George. 1973. "Burial customs". En *Neolithic Greece*, édité par D. R. Theocharis. National Bank of Greece, Athens : 201-212.
- Huggett, R.J. 1998. "Soil Chronosequences, Soil Development, and Soil Evolution: A Critical Review". *Catena* 32 : 155-172.
- Isaakidou, Valasia. 2011. "Farming regimes in Neolithic Europe: gardening with cows and other models". En *Dynamics of Neolithisation in Europe: Studies in Honour of Andrew Sherratt*, édité par A. Hadzikoumis, E. Robinson et S. Viner. Oxbow, Oxford.
- Ivkovska, A. 2009 "Stočarstvo i lov". En *Neolitskite zaednici vo republika Makedonija*, édité par G. Naumov, Lj. Fidanoski, I. Talevski et A. Ivanoska. Dante, Skopje : 83-107.
- Jacobsen, Thomas W. 1981. Franchti Cave and the beginning of settled villages in Greece. *Hesperia* 50 (4) : 303-319
- Jacobsen, Thomas W. et Tracey Cullen. 1981. "A consideration of mortuary practices in Neolithic Greece: burials from Franchthi Cave". En *Mortality and Immortality: the Anthropology and Archaeology of Death* édité par S. C. Humphreys et H. King. London: Academic Press : 79–101.

- Janssen, Marco A. 2009. "Understanding Artificial Anasazi". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12(4)13.
- Johnson, Gregory A. 1982. "Organizational Structure and Scalar Stress". En *Theory and Explanation in Archaeology*, édité par Colin Renfrew, Michael J. Rowlands et Barbara Seagraves. Academic Press, New York : 389-421.
- Jones, Glynis. 2005. "Garden cultivation of staple crops and its implications for settlement location and continuity". *World Archaeology* 37 (2) : 164-176.
- Jovanovic, Borislav. 2008. "Micro-regions of the Lepoenski Vir Culture: Padina in the Upper Gorge and Hajducka Vodenica in the Lower Gorge of the Danube". *Documenta Praehistorica XXXV* : 289-324.
- Jovanović, M. 2004. "Žitarice u praistoriji u podunavlju i na balkanskom poluostrvu". *Rad muzeja Vojvodine* 46 : 101-127.
- Kaser, Karl. 1996. "Introduction: Household and family contexts in the Balkans". *The History of the Family* 1 (4) : 375-386.
- Kavas, Serap et Arland Thornton. 2013. "Adjustment and Hybridity in Turkish Family Change: Perspectives from Developmental Idealism". *Journal of Family History* 38 (2) : 223-41
- Kent, Susan. 1989. "Cross-cultural perceptions of farmers as hunters and the value of meat". En *Farmers as hunters*, édité par Susan Kent. Cambridge University Press, Cambridge : 1-17.
- Kertész, Róbert. 1996. "The Mesolithic in the Great Hungarian Plain: A Survey of the Evidence". En *At the Fringes of Three Worlds: Hunter-Gatherers and Farmers in the Middle Tisza Valley*, édité par L. Tóth. Damjanich Museum Press, Szolnok : 5-34.
- Kimberling, Kleon V. 1999. "Introductory information on pet goats". (<http://www.goatworld.com/articles/goatspets/petgoats.shtml>).
- Kohler, Tim, George J. Gumerman et Robert G. Reynolds. 2005. " Simulating Ancient Societies". *Scientific American* 293(1) : 76-84
- Kohler, Tim et K. M. Reese, 2014. "Long and spatially variable Neolithic Demographic Transition in the North American Southwest". *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111 (28) : 10101–10106
- Kohler, Tim et Sander Van der Leeuw. 2007. *Model-Based Archaeology of Socionatural Systems*. SAR Press, Santa Fe.
- Kohler, Tim et Mark D. Varien. 2012. *Emergence and Collapse of Early Villages: Models of Central Mesa Verde Archaeology*. University of California Press, Berkeley.
- Kotsakis, Kostas. 1999. "What Tells Can Tell: Social Space and Settlement in the Greek Neolithic". En *Neolithic Society in Greece. Sheffield Studies in Aegean Archaeology* 2, édité par Paul Halstead Sheffield Academic Press, Sheffield : 66-76.

- Kreuter, Marie-Louise. 2005. *Orto e giardino biologico*. Giunti Editore, Firenze.
- Kreuz Angela, Elena Marinova, Eva Schafer et Julian Wiethold. 2005. "A comparison of early Neolithic crop and weed assemblages from the Linearbandkeramik and the Bulgarian Neolithic cultures: differences and similarities". *Vegetation history and archaeobotany* 14 : 237-258
- Laiou, Anegelik. 1977. *Peasant society in the Late Byzantine Empire. A social and demographic study*. Princeton: Princeton University Press.
- Lalouel, J.M. 1980. "Distance Analysis and Multidimensional Scaling". En *Current Developments in Anthropological Genetics. Volume 1 Theory and Methods*, édité par James H. Mielke et Michael H. Crawford. Springer US : 209-250.
- Leković, V. 1988. "Sasinci" En *The Neolithic of Serbia Archaeological research 1948-1988*, édité par D. Srejović. Univ. of Belgrade. Faculty of philosophy Centre for Archaeological Research, Belgrade.
- Lemmen, Carsten. 2011. "Malthusian assumptions, Boserupian response in models of the transitions to agriculture". En *Ester Boserup's Legacy on Sustainability. Human-Environment Interactions 4*, édité par Marina Fischer-Kowalski, Anette Reenberg, Anke Schaffartzik, et Andreas Mayer. Springer, Vienna : 87-97.
- Lemmen, Carsten et Kai W. Wirtz. 2014. "On the sensitivity of the simulated European Neolithic transition to climate extremes". *Journal of Archaeological Science* 51 : 65–72
- Le Roy Ladurie, Emmanuel. (2004). *Histoire humaine et comparée du climat*. Librairie Arthème, Fayard, Paris.
- Le Roy Ladurie, Emmanuel, Daniel Rousseau, Anouchka Vasak (2003). *Les fluctuations du climat de l'an mil à aujourd'hui*. Fayard, Paris.
- Leshtakov, Krassimir. 1997. "Tsiganova mogila. Soundage excavations, 1993" En *Maritsa Project* édité par Krassimir Leshtakov. Roads Agency, Sofia : 15-28.
- Lespez, Laurent, Zoï Tsirtsoni, Pascal Darcque, Haïdo Koukouli-Chryssanthaki, Dimitra Malamidou, René Treuil, Robert Davidson, Georgia Kourtessi-Philippakis et Christine Oberlin. 2013. "The lowest levels at Dikili Tash, Northern Greece: a missing link in the Early Neolithic of Europe". *Antiquity* 86 : 1-16.
- Lichardus-Itten Marion, Jean-Paul Demoule, Liljana Perničeva, Malgorzata Grebska-Kulova et Iljia Kulov. 2002. "The Site of Kovačevo and the Beginnings of the Neolithic Period in Southwestern Bulgaria. The French-Bulgarian excavation". En *Beiträge zu jungsteinzeitlichen Forschungen in Bulgarien*, édité par Marion Lichardus-Itten, Jan Lichardus et Vassil Nikolov. Saarbrücker Beiträge zur Altertumskunde, Bd. 74, Habelt, Bonn : 99-158.
- Linares, Olga F. 1976. "'Garden hunting' in the American tropics". *Human Ecology* 4, : 331-349.
- Livi Bacci, Massimo. 1999. *La popolazione nella storia d'Europa*. Il Mulino, Bologna.

- Lohr, Steve. 2012. "The age of big data". *The New York Times*, Feb 11.
- Luca, Sabin Adrian, Cosmin Ioan Suciu et Florian Dimitrescu-Chioar. 2011. "Catalogue of the Early Neolithic (Starcevo-Cris Culture) settlements in Western part of Romania – Transylvania, Banat, Crisana, Maramures, Oltenia and Western Muntenia". En *The first Neolithic Sites in Central/South-East European Transect. Vol. II*, édité par Sabin A. Luca et Cosmin Suciu. Archaeopress, Oxford : 79-132.
- Malvidier, Christophe. 2004. "Agricultural pioneer fronts, the crest of a far-reaching wave. The social and spatial dimension of lowland colonization in Nicaragua". En *Beyond tropical deforestation. From Tropical Deforestation to Forest Cover Dynamics and Forest Development*, édité par D. Babin. Unesco-Cirad, Montpellier : 185-192.
- Malthus, Thomas R. 1798. "*Malthus: 'An Essay on the Principle of Population'*". Cambridge University Press, édition du 1992, Cambridge.
- Manyika, James, Michael Chui, Brad Brown, Jacques Bughin, Richard Dobbs, Charles Roxburgh et Angela Hung Byers. 2011. "Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity". *McKingsley global institute report*.
- Manning Katie, Barbara Stopp, Sue Colledge, Sean Downey, James Conolly, Keith Dobney et Stephen Shennan. 2013. "Animal exploitation in the Early Neolithic of the Balkans and Central Europe". En *The origins and spread of domestic animals in Southwest Asia And Europe*, édité par Sue Colledge, James Conolly, Keith Dobney, Katie Manning et Stephen Shennan. Left Coast Press, Walnut, California : 237-252.
- Marinova, Elena. 2001. "Vergleichende paläoethno-botanische Untersuchung zur Vegetationsgeschichte und zur Entwicklung der prähistorischen Landnutzung in Bulgarien". Thèse Doctorale, Rheinisch Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- Marinova, Elena. 2006. "Archaeobotanical Studies of the Bulgarian Neolithic. The Current State of Research and Perspectives for Future Studies". En *Aegean – Marmara – Black Sea: the Present State of Research on the Early Neolithic. Proceedings of the Session held at the EAA 8th Annual Meeting at Thessaloniki, 28th September 2002*, édité par I. Gatsov et H. Schwarzberg. Beier & Beran, Langenweissbach : 187-194
- Marinova, Elena. 2007. "Archaeobotanical data from the early Neolithic of Bulgaria". En *The origins and spread of domestic animals in Southwest Asia And Europe* édité par Sue Colledge, James Conolly, Keith Dobney, Katie Manning et Stephen Shennan. Left Coast Press, Walnut, California : 93-109.
- Marinova, Elena et Tzvetana Popova. 2008. "Cicer arietinum (chick pea) in the Neolithic and Chalcolithic of Bulgaria: implications for cultural contacts with the neighbouring regions". *Vegetation History and Archaeobotany* 17 (suppl. 1) : S73-S80.
- McClure, Sarah B. 2013. " Domesticated animals and biodiversity: Early agriculture at the gates of Europe and long-term ecological consequences". *Anthropocene* 4 : 57-68.
- McGlade, James. 2014. "Simulation as Narrative: Contingency, Dialogics, and the Modeling Conundrum". *Journal of Archaeological Methods and Theory* 2 : 288-305.

- McHenry, Paul Graham. 1989. *Adobe and Rammed Earth Buildings, Design and Construction*. The University of Arizona Press, Tucson, AZ.
- McIntosh, Jane. 2006. *Handbook to life in Prehistoric Europe*. Oxford University Press, Oxford.
- McPherron, Alan et Dragoslav Srejski. 1988. "Divostin and the Neolithic of Central Serbia", *Ethnology Monograph 1*. University of Pittsburgh Dept. of Anthropology.
- Medović, A. 2011. "Najbolje iz preistorijske Vojvodine: starčevačka jednozrna pšenica, „kasna“, i južnobanatski proso, „rani“. Fosilni biljni ostaci sa lokaliteta Starčevo – Grad". *Rad Muzeja Vojvodine* 53 : 143-148
- Merkyte, Inga. 2003. "The Mesolithic Syndrome in Southeastern Europe". *Acta Archaeologica* 74 : 307-317.
- Minichreiter, Kornelija et Katarina Botić. 2010. "Early Neolithic burials of Starčevo culture at Galovo, Slavonski Brod (Northern Croatia)". *Documenta Praehistorica XXXVII* : 105-124.
- Nanoglou, Stratos. 2008. "Building biographies and households. Aspects of community life in Neolithic northern Greece". *Journal of Social Archaeology* 8(1) : 139-160.
- Naumov, Goce. 2011. "Otelotvoreni kući: socijalniti i simboličkite komponenti na neolitskakta arhitektura vo Makedonija". *Macedoniae Acta Archaeologica* 20 : 19-24.
- Nikolov, Bogdan et Roza Staneva 1974. *Gradeshnitsa*. Nauka i izkustvo, Sofia.
- Nikolov, Vasil et Elena Docheva. 1992. "Rannoneolitno zhilishte ot Slatina (Sofia)". *Razkopki I prouchvaniya* 25, Izd-vo na Bŭlgarskata akademija na naukite, Sofia.
- Nikolov, Vasil et M. Radeva. 1992. "Sondazhni prouchvaniya na rannoneolitnoto selishte v Dobrinishte, Razlozhko". *Arheologia* 1 : 1-14.
- Oross, Krisztián and Zsuzsanna Siklósi. 2012, "Relative and absolute chronology of the Early Neolithic in the Great Hungarian plain" En *The first Neolithic Sites in Central/South-East European Transect. Vol. III*, édité par Alexandra Anders et Zsuzsanna Siklósi. Archaeopress, Oxford : 129-159.
- Orton, David. 2012. "Herding, settlement, and chronology in the Balkan Neolithic", *European Journal of Archaeology* 15(1) : 5-40
- Orton, David. À paraître. "False dichotomies? Balkan Neolithic hunting in archaeological context" en *A Walk on the Wild Side: Hunting in Farming Societies*, édité par J. Mulville et A.Powell. Oxbow, Oxford.
- Özbaşaran, Mihriban. 1995. "The Historical Background of Researches at the Caves of Yarımburgaz". *Halet Çambel için Prehistorya Yazıları*, Graphis Yayınları, İstanbul : 27-39.

- Özdoğan, Mehmet. 1997. "The beginning of Neolithic economies in Southeastern Europe". *Journal of European Archaeology*, 5 (2) : 1-33.
- Özdoğan, Mehmet. 1999. "Northwestern Turkey: Neolithic Cultures in Between the Balkans and Anatolia. En *Neolithic in Turkey. The Cradle of Civilization. New Discoveries*, édité par Mehmet Özdoğan et Nezih Başgelen. Arkeoloji ve Sanat Yayınları, Istanbul : 203-224.
- Özdoğan, Mehmet. 2008. "An alternative approach in tracing changes in Demographic composition. The Westward expansion of the Neolithic Way of Life". En *The Neolithic Demographic Transition and its Consequences*, édité par Jean-Pierre Bocquet-Appel et Omar Bar-Yosef. Springer Verlaag, New York.
- Özdoğan, Mehmet. 2010. "Westward Expansion of the Neolithic Way of Life: Sorting the Neolithic Package into Distinct Packages". En *Near Eastern Archaeology in the Past, Present and Future. Heritage and Identity*, Vol. 1 (Proceedings of the 6th International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East, May, 5th-10th 2008, "Sapienza" – Università di Roma), édité par Paolo Matthiae, Frances Pinnock, Lorenzo Nigro and Nicolò Marchetti. Harrassowitz Verlag, Wiesbaden : 883-897.
- Özdoğan, Mehmet. 2011. "Archaeological Evidence on the Westward Expansion of Farming Communities from Eastern Anatolia to the Aegean and the Balkans". *Current Anthropology* 52 (4) : 415-430.
- Özdoğan, Mehmet. 2012. "An Anatolian Perspective on the Neolithization Process in the Balkans. New Questions, New Prospects". En *Beginnings - New Research in the Appearance of the Neolithic between Northwest Anatolia and the Carpathian Basin, Istanbul, 8-9 april 2009*, édité par Raiko Krauß. Verlag Marie Leidorf Gmb, Rahden/Westf .
- Papageorgiou, Despoina. 2008. "Sea Routes in the Prehistoric Cyclades". En *Horizon/Oqízov. A Colloquium on the Prehistory of the Cyclades*, édité par N.Brodie, J Doole., G. Gavalas et C. Renfrew. McDonald Institute for Archaeological Research, Exter : 9-12.
- Papathanasiou, Athanasiou. 2003. "Stable Isotope Analysis in Neolithic Greece and Possible Implications on Human Health". *International Journal of Osteoarchaeology* 13: 314-324.
- Pelzer, Karl J. 1945. *Pioneer settlement*. International Secretariat Institute of Pacific Relations Publication Office, New York.
- Perlès, Catherine. 2001. *The Early Neolithic in Greece. The first farming communities in Europe*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Perlès, Catherine. 2005. "From the Near East to Greece: Let's reverse the Focus, Cultural Elements that didn't transfer". En *Byzas 2. How did Farming reach Europe? Anatolian-European Relations from the second half of the 7th through the first half of the 6th Millennium cal BC. Proceedings of the International Workshop, Istanbul 20-22 may 2004*, édité par C. Lichter : 275-290.

- Perlès, Catherine, Anita Quiles and Hélène Valladas. 2013. "Early seventh-millennium AMS dates from domestic seeds in the Initial Neolithic at Franchthi Cave (Argolid, Greece)". *Antiquity* 87 (338) : 1001-1015
- Perlès, Catherine, Turan Takaoğlu et Bernard Gratuze. 2011. "Melian obsidian in NW Turkey: Evidence for early Neolithic trade". *Journal of Field Archaeology* 36(1) : 42-49.
- Perlès, Catherine et Karen D. Vitelli. 1999. "Crafting specialization in the Greek Neolithic. En *Neolithic Society in Greece*, édité par Paul Halstead. Sheffield Academic Press, Sheffield : 96-107.
- Pernicheva-Perec, Liliana, Malgorzata Grebska-Kulow et Ilija Kulov. 2011. Balgartchevo - the prehistoric settlement. Vol. I. Craft House Bulgaria, Sofia.
- Perz, Stephen G. 2002. "Household Demography and Land Use allocation among Small Farms in the Brazilian Amazon". *Human Ecology* 9 (2) : 1-16.
- Pettitt, P.B., W. Davies, C.S. Gamble, M.B. Richards. 2003. "Palaeolithic radiocarbon chronology: quantifying our confidence beyond two half-lives". *Journal of Archaeological Science* 30 : 1685-1693.
- Peykov, A. "Sondazni razkopki na neolitnoto selishte v Kardzhali prez 1972 g". *Ahrida*, 1 : 7-44.
- Peyron, Odile, Simon Goring, Isabelle Dormoy, Ulrich Kotthoff, Jörg Pross, Jacques-Louis De Beaulieu, Ruth Drescher-Schneider, Boris Vanniere et Michel Magny. 2011. "Holocene seasonality changes in the central Mediterranean region reconstructed from the pollen sequences of Lake Accesa (Italy) and Tenaghi Philippon (Greece)". *The Holocene* 21 (1) : 131-146.
- Pinhasi, Ron, Joaquim Fort et Albert J. Ammerman. 2005. "Tracing the origin and spread of agriculture in Europe". *PLoS Biology* 3 (12): 2220-2228.
- Porčić, Marko. 2010. "Arheologija vincanskih kuca: teorijsko-metodoloski osnovi proucavanja demografije i drustvene strukture". Thèse doctorale. Department of Archaeology. Philosophical Faculty. University of Beograd, Beograd.
- Porčić, Marko. 2011. "An exercise in archaeological demography: estimating the population size of Late Neolithic settlements in the Central Balkans". *Documenta Praehistorica* XXXVIII : 323-3322
- Porčić, Marko et Mladeb Nikolić 2015. "The Approximate Bayesian Computation approach to reconstructing population dynamics and size from settlement data: demography of the Mesolithic-Neolithic transition at Lepenski Vir". *Archaeological and Anthropological Sciences* 8 (1) : 169-186.
- Powell, Judith. 1996. *Fishing in the Prehistoric Aegean*. Paul Åströms Förlag, Jonsered.

- Pyke, Gillian et Paraskevi Youni. 1996 "The excavation and the ceramic assemblage" en *Nea Nikomedeia I : the excavation of an Early Neolithic Village in Northern Greece 1961-1964*, édité par R.J. Rodden et K.A. Wardle. The British School of Athens, supplementary volume 25, London.
- Radovanovic, Ivana. 2006. "Further notes on Mesolithic-Neolithic contacts in the Iron Gates Region and the central Balkans". *Documenta Praehistorica* XXXIII : 107-124.
- Raduncheva, Ana, V. Matsanova, I. Gatsov, G. Kovachev, G. Georgiev, E. Chakalova et E. Bozhilova. 2002. "Neolitno selishte do grad Rakitovo". *Razkopki i prouchvania* 29. Izdat, Sofija.
- Railsback, Steven F. et Volker Grimm. 2012. *Agent-Based and Individual-Based modeling. A practical introduction*. Princeton University Press, NJ.
- Reingruber Agathe. 2011. "Rethinking the 'Preceramic Period' in Greece 50 Years after its Definition". En *Beginnings - New Research in the Appearance of the Neolithic between Northwest Anatolia and the Carpathian Basin, Istanbul, 8-9 april 2009*, édité par Raiko Krauß. Verlag Marie Leidorf Gmb, Rahden/Westf : 127-137.
- Reingruber, Agathe. 2015. Preceramic, Aceramic or Early Ceramic? The radiocarbon dated beginning of the Neolithic in the Aegean. *Documenta praehistorica* XLII : 147-158.
- Reingruber, Agathe et Laurens Thissen. 2009. "Depending on 14C data: Chronological Frameworks in the Neolithic and Chalcolithic of Southeast Europe". *Radiocarbon* 51 (2) : 751-70.
- Reingruber, Agathe et Laurens Thissen. 2005. "14C database for the Aegean Catchment (Eastern Greece, Southern Balkans and Western Turkey)". En *How Did Farming Reach Europe? Anatolian-Europaeen Relations from the Second Half of the 7th through the First Half of the 6th Millenium Cal BC. Proceedings of the Internat. Workshop Istanbul, 20-22 May 2004*, édité par Clemens Lichter. Ankara, Byzas 2.
- Revuelta- Acosta, J.D., A. Garcia- Diaz, G.M. Soto-Zarazua and E. Rico- Garcia. 2010. "Adobe as a Sustainable Material: A Thermal Performance". *Journal of Applied Sciences* 10 : 2211-2216.
- Richards, Martin. 2003a. "The Neolithic Invasion of Europe". *Annual Review of Anthropology* 32 : 135-162
- Richards, Martin. 2003b. "The Neolithic transition in Europe: archaeological models and genetic evidence". *Documenta Praehistorica* 30 : 159-167.
- Rodden, R.J. 1962. "Excavations at the Early Neolithic site of Nea Nikomedeia, Greek Macedonia (1961 season). *Proceedings of the Prehistoric Society* 28. 267-288.
- Rodden, R. J. 1965. "An Early Neolithic Village in Greece". *Scientific American* 212 (4) : 82-88.
- Rogerson, Peter A. 2010. *Statistical Methods for Geography. Third Edition*. SAGE publications, London.

- Rowley-Conwy, Peter. 1995. "Making First Farmers Younger : The West European Evidence". *Current Anthropology* 36 : 346-353
- Rosenstock, Eva. 2005. "Höyük, Toumba and Mogila: a settlement form in Anatolia and the Balkans and its ecological determination 6500 - 5500 BC". En *How Did Farming Reach Europe? Anatolian-European relations from the 2nd half of the 7th through the first half of the 6th millennium BC. Proceedings of the International Workshop Istanbul, 20-22 May 2004*, édité par Clemens Lichter. Ege, Istanbul : 221-237.
- Rosenstock, Eva (2006) "Early Neolithic tell settlements of South-East Europe in their natural setting: A study in distribution and architecture." En *Aegean - Marmara - black sea: the present state of research on the Early Neolithic. Proceedings of the Session held at the EAA 8th Annual Meeting at Thessaloniki, 28th September 2002*, édité par I. Gatsov et H. Schwarzberg. Beier und Beran, Langenweißbach : 115-125.
- Runnels, Curtis, Claire Payne, Noam Rifkind, Chantel White, Nicholas Wolff, et Steven LeBlanc. 2009, "Warfare in Neolithic Thessaly: A Case Study". *Hesperia* 78: 165-194.
- Russell, Nerissa. 1993. *Hunting, herding and feasting: human use of animals in Neolithic Southeast Europe*. Rhèse doctorale, University of California, Berkeley.
- Ruzi, Eugen. 2013. Investigating Compositional Variability among Early Neolithic Ceramics from Korça Region, Albania. *Chronika* 3 : 1-15
- Ružić, M. et Pavlović, N. 1988. "Kremenilo-Višesava" En *The Neolithic of Serbia. Archaeological research 1948-1988*, édité par D. Srejovic : 59
- Sahlins, Marshall. 1963. "Poor Man, Rich Man, Big Man, Chief; Political Types in Melanesia and Polynesia". *Comparative Studies in Society and History* 5 (3) : 285-303
- Sampson, Adamantios. 2008. *The Cave of the Cyclops: Mesolithic and Neolithic Networks in the Northern Aegean, Greece* (vol. I et II). INSTAP Academic Press, Philadelphia.
- Sampson, Adamantios, Malgorzata Kaczanowska et Janus K. Kozlowski. 2010. *The prehistory of the island of Kythnos (Cyclades Greece) and the Mesolithic settlement at Maroulas*. The Polish Academy of Arts and Sciences - The University of the Aegean, Cracovie.
- Sanev, V. 1994. " Mlado kameno vreme". *Arheološka karta na republika Makedonija Tom I* : 28
- Schiffer, Michael B. 1986. "Radiocarbon Dating and the 'old wood' problem: the case of the Hohokam Chronology". *Journal of Archaeological Science* 13 (1): 13-30.
- Schmolke, Amelie, Pernille Thorbek, Donald L. DeAngelis et Volker Grimm. 2010. "Ecological Models Supporting Environmental Decision Making: A Strategy for the Future". *Trends in Ecology & Evolution* 25 (8) : 479-486
- Séguy, Isabelle et Luc Buchet, 2011. *Manuel de paléodémographie*. Paris, INED.

- Shresta, Nanda R. "Frontier Settlement and Landlessness among Hill Migrants in Tepal Tarai". *Annals of the association of American Geographers* 79 (3) : 370-389.
- Simoska, D. and V. Sanev. 1975. "Neolitska naselba Veluška Tumba kaj Bitola, izveštaj od zaštitnitate iskopovanja vo 1971 i 1972 god". *Macedoniae Acta Archaeologica* 1 : 25-82
- Sladić, M. 1986. "Kula près de Mihajlovac - un site prehistorique". *Derdapske sveske III* (Cahiers des portes de fer) : 432-434.
- Souvatzi, Stella. 2008. *A Social Archaeology of Households in Neolithic Greece: An Anthropological Approach*. Cambridge, Cambridge University Pres.
- Souvatzi, Stella. 2014. "The Social Dynamics of Everyday Life". *Reviews in anthropology* 43 (4) : 238-259.
- Stalio, B. 1986. "Le site prehistorique Ajmana à Mala Vrbica". *Derdapje sveske III* (Cahiers des portes de fer) : 27-36.
- Stanev, Peter. 2002. *Samovodene - neolitna selishtna mogila (Samovodene Neolithic tell)*. Faber. Veliko Turnovo.
- Stankovic, S. 1986. "Embouchure du ruisseau Kamenički Potok: site du groupe Starčevo", *Derdapje sveske III* (Cahiers des portes de fer) : 467-471.
- Stojić, M. et Jocović, M. 2006. *Niš Kulturna stratigrafija praistorijskih lokaliteta u niškoj regiji (Cultural Stratigraphy of Prehistoric Sites in the Niš Region)*. Arheol.institut - Narodni muz., Belgrade.
- Stratouli, Georgia, Sevi Triantaphyllou, Tasos Bekiaris et Nikos Katsikaridis. 2010. The manipulation of death : a burial area at the Neolithic Settlement of Avgi, NW Greece. *Documenta Praehistorica XXXVII* : 95-104.
- Suciu, Cosmin. 2011. "Early Vinča Culture Dynamic in South-Eastern Transylvania". *En The Lower Danube in Prehistory: Landscape Changes and Human-Environment Interactions*, édité par Steve Mills et Pavel Mirea. Editura Renaissance, Bucharest : 75-86
- Sümeği Pál, Róbert Kertész et Ede Hertelendi. 2002." Environmental change and human adaptation in the Carpathian Basin at the Late Glacial/Postglacial Transition". *British Archaeological Report* 1043 : 171-177.
- Surovell, Todd A. et Jeffrey Brantingham. 2007. "A note on the use of temporal frequency distributions in studies of prehistoric demography". *Journal of Archaeological Science* 34, 1868-1877.
- Surovell, Todd.A., Judson Byrd Finley, Geoffrey M. Smith, P. Jeffrey Brantingham et Robert Kelly. 2009. "Correcting temporal frequency distributions for taphonomic bias". *Journal of archaeological science* 36 : 1715-1724.
- Tasić, Nikola. 1998. "Starčevačka kultura", En *Arheološko blago Kosova i Metohije*. Beograd : Srpska akademija nauka i umetnosti ; U Prištini : Muzej.

- Testart, Alain. 2012. *Avant l'histoire : l'évolution des sociétés, de Lascaux à Carnac*. Gallimard, Paris.
- Theocaris, Demetrios R . 1973. *Neolithic Greece*. National Bank of Greece, Athens.
- Thiele, Jan C., Winfried Kurth et Volker Grimm. 2014. "Facilitating Parameter Estimation and Sensitivity Analysis of Agent-Based Models: A Cookbook Using NetLogo and R". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 17 (3) 11.
- Todorova, Henrietta. 1989. "Das Frühneolithikum Nordostbulgariens im Kontext des Ostbalkanischen Neolithikums". En *Tell Karanovo und das Balkan Neolithikum*, édité par S. Hiller. Institut für Klassische Archäologie der Universität Salzburg, Salzburg : 9-25
- Todorova, Henrietta. 1995 "The Neolithic, Eneolithic and Transitional Period in Bulgarian Prehistory". En *Prehistoric Bulgaria, Monographs in World Archaeology* 22, édité par D.Bailey and I. Panayotov. Madison, Prehistory Press : 79-98.
- Todorova, Maria. 1996. "Situating the family of Ottoman Bulgaria within the European pattern". *The history of family. An International Quarterly* 1 (4) : 443-460
- Tomkins, Peter. 2008. "Time, space and the reinvention of the Cretan Neolithic". En *Escaping the Labyrinth. The Cretan Neolithic in Context*, édité par Valasia Isaakidou et Peter Tomkins. Oxbow, Oxford : 21-48.
- Ucko, Peter. 1969. Ethnography and Archaeological Interpretation of funerary remains. *World Archaeology* 1 (2) : 262-280.
- United Nations. 1983. *Manual X: Indirect techniques for demographic estimation*. United Nations publication, Sales No. E.83.XIII.2.
- Valamoti, Soultana-Maria. 2004. *Plants and People in Late Neolithic and Early Bronze Age Northern Greece: An Archaeobotanical Investigation*. British Archaeological Reports, International Series 1258, Oxford.
- Valamoti, Soultana-Maria et Kostas Kotsakis. 2007. "Transitions to agriculture in the Aegean: the archaeobotanical evidence". En *The Origin and Spread of Domestic Plants in SW Asia and Europe*, édité par S. Colledge and J. Conolly. Institute of Archaeology, London.
- Vanlandingham, Mark et Charles Hirschman. 2001. "Population pressure and fertility in pre-transition Thailand". *Population Studies* 55 (3) : 233-248.
- Van Andel, Tjeerd H. et Curtis N. Runnels. 1995. "The earliest farmers in Europe". *Antiquity* 69 : 481-500.
- Van Andel, Tjeerd H. et Eberhard Zangger. 1990. "Landscape Stability and Destabilization in the Prehistory of Greece," en *Man's Role in the Shaping of the Eastern Mediterranean Landscape*, édité par S. Bottema, G. Entjes-Nieborg, and W. van Zeist. A. A. Balkema, Rotterdam : 139-157.

- Van Andel, Tjeerd H., Eberhard Zangger et Anne Demitrack. 1990. "Land Use and Soil Erosion in Prehistoric and Historical Greece," *Journal of Field Archaeology* 17(4) : 379-396.
- Veljanovska, F. 2006. "Neolitski skeletni naodi od Pista-Novo Selo". *Macedoniae Acta Archaeologica* 17 : 341-350.
- Ventić, S. 1988. "Bukovačka česma - Svetozarevo". En *The Neolithic in Serbia Archaeological research 1948-1988* : 73
- Ventić, S. 1974. "Počeci rada na istraživanju prvih zemljoradnika u srednjem Pomoravlju", *Materijali X* : 141-143
- Verhagen, Philip. 2011. "Integrating Archaeological Theory and Predictive Modeling: a Live Report from the Scene" *Journal of Archaeological Method and Theory* 19 (1) : 49-100.
- Vitelli Karen. 1993. "Franchthi Neolithic Pottery: Classification and Ceramic Phases 1 and 2". En *Excavation at Franchthi Cave, Greece*, édité par Thomas. W. Jacobsen. Indiana University Press, Bloomington et Indianapolis.
- Voskarides, Konstantinos, Stéphane Mazières, Despina Hadjipanagi, Julie Di Cristofaro, Anastasia Ignatiou, Charalambos Stefanou, Roy J. King, Peter A. Underhill, Jacques Chironi et Constantinos Deltas. 2016. "Y-chromosome phylogeographic analysis of the Greek-Cypriot population reveals elements consistent with Neolithic and Bronze Age settlements". *Investigative Genetics* 7 (1).
- Vujević, Pavle. 1931. "Documents historiques sur les variations de climat dans les territoires du Royaume de Yougoslavie et les contrées avoisinantes". Union Géographique Internationale, Comité National du Royaume de Yougoslavie, Belgrade : 23.
- Wang, Chaolong, Zachary A. Szpiech, James H. Degnan, Mattias Jakobsson, Trevor J. Pemberton, John A. Hardy, Andrew B. Singleton et Noah A. Rosenberg. 2010. "Comparing Spatial Maps of Human Population-Genetic Variation Using Procrustes Analysis". *Statistical Applications in Genetics and Molecular Biology* 9 (1) 13.
- Weninger Bernhard. 2014. *CalPal-database*.
(https://www.academia.edu/7138016/Europe.xls_-_CalPal-Format_14C-Database)
- Weninger, Bernard, Eva Alram-Stern, Eva Bauer, Lee Clare, Uwe Danzeglocke, Olaf Jöris, Claudia Kubatzki, Gary Rollefson, Henrieta Todorova, Tjeerd van Andel. 2007. "Abrupt Climate Forcing observed at Early Neolithic sites in South-East Europe and the Near East". En *The Struma/Strymon River Valley in Prehistory. Proceedings of the International Symposium 'Strymon Praehistoricus', Kjustendil-Blagoevgrad-Serres-Amphipolis, 27.09-1.10.2004*, édité par Todorova H., Stefanovich M. and Ivanov G. Gerda Henkel Stiftung, Sofia : 7-27.
- Weninger, Bernhard, O. Jöris et U. Danzeglocke. 2007. *Cal.Pal-2007. Cologne Raidocarbon Calibration & Paleoclimate Research Package*. <http://www.cal.pal.de/>.
- Wernstedt, Frederick L et Paul D. Simkins. 1965. "Migrations and the Settlement of Mindanao". *The Journal of Asian Studies* 25 (1) : 83-103.

- Whitelaw, T. M. 1991. "The ethnoarchaeology of recent rural settlement and land use in Northwestern Keos". En *Landscape Archaeology as Long-term History. Northern Keos in the Cycladic Islands from Earliest Settlement until Modern Times. Monumenta Archaeologica 16* , édité par J.F. Cherry, J.L. Oavis, E. Mantzourani. Los Angeles : 403-454.
- Whittle, Alasdair, László Bartosiewicz, Dusan Borić, Paul Pettitt, Michael Richards. 2002. "In the beginning: new radiocarbon dates for the early Neolithic in Northern Serbia and south-east Hungary", *Antaeus 25* : 63-118.
- Wilkinson T.J. 1992. "Soil development and early land use in the Jazira region, Upper Mesopotamia". *World Archaeology 22* (1) : 87-103.
- Xoplaki, Eleni, Panagiotis Maheras, Juerg Luterbacher. 2001. "Variability of Climate in Meridional Balkans during the Periods 1675–1715 and 1780–1830 and its Impact on Human Life". *Climatic Change 48* (4) : 581-615.
- Zofmann, Z. 2004. "Antropološki pregled populacije starčevačke kulture - Najnoviji osteološki nalazi sa lokaliteta Vizić-Golokut". *Rad muzeja Vojvodine 46* : 143-149.

Annexe A : Base de données radiocarbone

Dans cette annexe la base de données utilisée dans cette thèse est présentée, avec toutes les dates au radiocarbone qui ont été publiées pour le Néolithique Ancien de la région. Les critères d'audit ont été décrits au paragraphe 3.1.1. Dans la base données sont indiqués le nom du site, la date non calibrée BP et sa calibration BC avec son écart-type, le code du laboratoire, le matériau de l'échantillon, la technique utilisée (conventionnelle ou AMS) et la couche du site dont l'échantillon fait partie. Si la technique n'est éte pas mentionnée dans la littérature, elle est considérée comme conventionnelle.

Les dates écrites en italique, même si considérées valides, ne sont pas utilisées dans la thèse : soit il existe d'autres dates plus robustes dans la même couche, soit elles font partie de la région particulière des Gorges du Danube. Les dates en rouge sont rejetées car elles ne respectent pas les critères d'audit. Pour chaque site, si nécessaire, une explication des choix est présente.

Achilleion (Reingruber et Thissen 2005). Les dates publiées pour ce site proviennent des années 1970 et 1980, est sont incluses dans le "*C14 database for the Aegean Catchment*". Seules les dates pour les couches Ia et Ib sont incluses, en excluant les couches IIa et IIb qui font partie d'une occupation plus tardive. L'échantillon LJ-3329 a des dates qui proviennent de deux mensuration différentes. Certaines dates sont rejetées à cause de l'écart-type trop élevé.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Achilleion	7320 ± 50	6170 ± 60	LJ-3184	Charbon de bois	Conventionnelle	Ib
Achilleion	1) 7360 ± 50 2) 7370 ± 50	6230 ± 100 6250 ± 90	LJ-3329	Charbon de bois	Conventionnelle	Ib
Achilleion	7390 ± 45	6280 ± 60	GrN-7438	Charbon de bois	Conventionnelle	Ib
Achilleion	7440 ± 55	6320 ± 60	GrN-7437	Charbon de bois	Conventionnelle	Ib

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Achilleion	7360 ± 155	6230 ± 150	UCLA- 1882B	Charbon de bois	Conventionnelle	Ib
Achilleion	7470 ± 80	6330 ± 80	P-2118	Organique	Conventionnelle	Ia
Achilleion	7490 ± 150	6330 ± 140	LJ-4449	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia
Achilleion	7460 ± 175	6300 ± 170	UCLA- 1896A	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia

Anzabegovo (Gimbutas 1976). Ces dates ont été obtenues pendant les années 1970 ; seulement celles provenant de la couche Ia, la plus ancienne, ont été sélectionnées, en excluant les couches les plus récentes. L'échantillon LJ-2519 est le seul de la région à dater avant le 6100 BC ; il est plus ancien d'environ 300 ans que toutes les autres dates du même horizon chronologique. Etant un échantillon en charbon de bois, l'effet vieux bois ne peut pas être exclus pour expliquer cet écart (Brami 2011). Les autres dates, par contre, s'adaptent parfaitement à la chronologie régionale ; seules les dates avec un écart-type trop élevé sont rejetées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Anzabegovo	7150 ± 70	6020 ± 70	Lj-3186/ 3187	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia
Anzabegovo	7150 ± 50	6020 ± 40	Lj-3183	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia
Anzabegovo	7180 ± 60	6070 ± 60	LJ-2330/ 2331	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia
Anzabegovo	7210 ± 50	6090 ± 70	LJ-3032	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia
Anzabegovo	7560 ± 70	6400 ± 70	LJ-2519	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia
Anzabegovo	7270 ± 140	6160 ± 140	LJ-2181	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia
Anzabegovo	6830 ± 70	5730 ± 70	Lj-3185	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia
Anzabegovo	6700 ± 150	5630 ± 120	LJ-2347	Charbon de bois	Conventionnelle	Ia

Argissa Magoula (Reingruber et Thissen 2005). Ces dates ont été publiées dans le *Aegean Catchment Database*. Les dates de la série H, provenant d'Heidelberg, remontent à 1958 ; elles sont trop vieilles et sont par conséquent exclues. Les dates UCLA (avec l'échantillon UCLA-1657B [5000 ± 110 BP] non inclus ici) appartiennent au même échantillon d'os de mouton, mais présentent des différences très remarquables entre elles. Pour cette raison, elles sont considérées incohérentes et donc refusées. La seule date acceptable est l'échantillon GrN-4145.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Argissa Magoula	7760 ± 100	6630 ± 120	H-889- 3080	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I
Argissa Magoula	7500 ± 90	6350 ± 90	GrN-4145	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I
Argissa Magoula	6700 ± 130	5620 ± 100	UCLA- 1657E	Os	Conventionnelle	EN I
Argissa Magoula	8130 ± 100	7110 ± 170	UCLA- 1657A	Os	Conventionnelle	EN I
Argissa Magoula	7990 ± 95	6890 ± 140	UCLA- 1657D	Os	Conventionnelle	EN I
Argissa Magoula	7740 ± 100	6600 ± 110	H-896- 3082	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I
Argissa Magoula	7520 ± 100	6360 ± 100	H-894- 3081	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I

Aşağı Pınar (Böhner et Schyle 2006). Les dates qui proviennent de semences sont préférées à celles de charbon de bois.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Aşağı Pınar</i>	6625 ± 38	5560 ± 40	Bln-4992	Charbon de bois	Conventionnelle	EN, Karanovo III-IV
Aşağı Pınar	6752 ± 34	5660 ± 30	Bln-5219	gland & grain	Conventionnelle	EN, Karanovo III-IV

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Conventionnelle	Couche
Aşağı Pınar	6765 ± 29	5670 ± 30	Bln-5218	gland	Conventionnelle	EN, Karanovo III-IV
Aşağı Pınar	6781 ± 39	5680 ± 30	Bln-4997	grain	Conventionnelle	EN, Karanovo III-IV
Aşağı Pınar	6909 ± 48	5800 ± 50	Bln-4996	grain	Conventionnelle	EN, Karanovo III-IV

At (Whittle et al. 2002).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
At	6615 ± 70	5560 ± 50	OxA-8594	?	Conventionnelle	Starčevo layer

Azmashka Mogila (Azmak) (Görsdorf et Bojadziev 1996). Seulement la couche I, qui fait partie du Néolithique Ancien, a été prise, en excluant les occupation suivantes. Même si ces dates sont incluses dans des base de données plus récentes, elles ont été obtenues pendant les années 1960. Les critères d'audit ne sont pas respectés ; en outre, l' écart-type est souvent élevé ; toutes les dates sont par conséquent refusées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Azmashka Mogila	7303 ± 150	6190 ± 150	Bln-293	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	7158 ± 150	6040 ± 160	Bln-291	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6878 ± 100	5780 ± 100	Bln-292	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6768 ± 100	5680 ± 90	Bln-294	?	Conventionnelle	I

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Azmashka Mogila	6779 ± 100	5690 ± 90	Bln-296	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6720 ± 100	5630 ± 80	Bln-295	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6870 ± 100	5780 ± 100	Bln-203	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6812 ± 100	5730 ± 90	Bln-299	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6758 ± 100	5670 ± 90	Bln-267	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6650 ± 150	5580 ± 120	Bln-224	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6675 ± 100	5600 ± 80	Bln-297	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6540 ± 100	5490 ± 90	Bln-298	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6426 ± 150	5370 ± 140	Bln-300	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6483 ± 100	5440 ± 90	Bln-301	?	Conventionnelle	I
Azmashka Mogila	6279 ± 120	5220 ± 150	Bln-430	?	Conventionnelle	I

Baciu - Gura Baciului (Luca et al. 2011). Deux dates ont été publiées pour ce site, mais seulement l'échantillon GrA-24137 fait partie du Néolithique Ancien, tandis que l'autre fait partie d'une phase d'occupation plus tardive.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Baciu - Gura Baciului	6400 ± 90	5370 ± 80	Lv-2157	nd	Nd	Starcevo-Cris IIIa-IIIb

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Baciu - Gura Baciului	7140 ± 45	6010 ± 40	GrA- 24137	os	Nd	Starcevo-Cris Ia-b-c

Banja (Böhner et Schyle 2006)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Banja	7048 ± 100	5910 ± 100	BLN-873	?	Conventionnelle	Banja II

Batka "C" (Whittle et al. 2002). Les dates pour ce site ont été publiées à partir de 1975.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Batka "C"	6935 ± 70	5830 ± 80	OxA-8597	?	Conventionnelle	Starčevo layer
Batka "C"	6970 ± 50	5860 ± 70	OxA-8606	?	Conventionnelle	Starčevo layer
Batka "C"	7080 ± 50	5950 ± 50	OxA-8607	?	Conventionnelle	Starčevo layer
Batka "C"	7100 ± 50	5970 ± 50	OxA- 10146	?	Conventionnelle	Starčevo layer
Batka "C"	7145 ± 50	6020 ± 40	OxA-8605	?	Conventionnelle	Starčevo layer

Battonya-Basaraga (Oross 2012). La seule date publiée pour ce site est refusée à cause de l'écart-type élevé. L'auteur informe qu'elle provient de deux mensurations différentes, une desquelles était erronée.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Battonya- Basaraga	6710 ± 110	5630 ± 90	BM- 1862R	Charbon de bois	Conventionnelle	Koros

Blagotin (Budja 2011). Les dates publiées pour ce site sont cohérentes et acceptables au niveau d'audit. Blagotin est ancien pour son contexte chronologique régionale, mais pas nécessairement suspecte ; il peut représenter la première occupation de la Serbie par les agriculteurs Néolithiques.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Blagotin	7230 ± 50	6110 ± 70	OxA-8760	Outil d'os	Conventionnelle	Starčevo layer
Blagotin	7270 ± 50	6140 ± 60	OxA-8609	Os humain	Conventionnelle	Starčevo layer
Blagotin	7480 ± 55	6340 ± 70	OxA-8608	Andouiller de cerf	Conventionnelle	Starčevo layer

Chavdar (Görsdorf et Bojadziev 1996). Le large set de dates disponible pour ce site appartient aux années 1970 ; tous les critères d'audit sont respectés.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Chavdar	7208 ± 52	6090 ± 70	Bln-1583	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	7202 ± 45	6080 ± 60	Bln-1580	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	7195 ± 65	6090 ± 80	Bln-2108	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	7120 ± 80	5990 ± 80	Bln-4261	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	7070 ± 50	5950 ± 50	Bln-1663	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	7020 ± 45	5910 ± 60	Bln-1582	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	7003 ± 45	5890 ± 60	Bln-1579	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	7000 ± 60	5880 ± 80	Bln-1581	Charbon de bois	Conventionnelle	VI

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Chavdar	6994 ± 55	5880 ± 70	Bln-1578	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	6840 ± 50	5730 ± 50	Bln-4106	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	6820 ± 50	5710 ± 40	Bln-2662	Charbon de bois	Conventionnelle	VI
Chavdar	6550 ± 50	5520 ± 40	Bln-2107	Charbon de bois	Conventionnelle	VI

Čuka (Whittle et al. 2002). Les deux dates publiées pour ce site ont un écart-type trop élevé est sont par conséquent refusées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Čuka	7680 ± 160	6580 ± 180	Z-494	?	Conventionnelle	
Čuka	7010 ± 190	5900 ± 170	Z-495	?	Conventionnelle	

Dendra (Otzaki) (Perlès 2001).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Dendra(Otzaki)	7100 ± 90	5960 ± 90	H-905/ 3284	?	Conventionnelle	Area III, Upper level
Dendra(Otzaki)	7060 ± 100	5920 ± 100	H-902/ 3083	?	Conventionnelle	Area III, Upper level

Deszk-Olajkut (Oross 2012). La date OxA-9396 est préférée, étant obtenue avec la technique de l'AMS à partir d'un échantillon d'os.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Deszk-Olajkut</i>	6605 ± 100	5550 ± 80	<i>Bln-581</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	
Deszk-Olajkut	7030 ± 50	5910 ± 60	OxA-9396	Os humain	AMS	

Devavanya-Rehelyi gat (Oross 2012).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Devavanya-Rehelyi gat	6640 ± 60	5570 ± 50	Bln-1379	Charbon de bois	Conventionnelle	

Dikili Tash (Lespez et al. 2012). Un large set de dates a été publié pour le Néolithique Ancien de ce site. L'échantillon Lyon-7923, en os, est considéré le plus fiable ; néanmoins, aussi les autres échantillons, en charbon de bois, respectent les critères d'audit.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Dikili Tash	6530 ± 35	5500 ± 30	Lyon-7633	Charbon de bois	Conventionnelle	
Dikili Tash	6950 ± 35	5830 ± 50	Lyon-7624	Charbon de bois	Conventionnelle	
Dikili Tash	6960 ± 35	5840 ± 50	Lyon-7635	Charbon de bois	Conventionnelle	
Dikili Tash	7040 ± 35	5930 ± 40	Lyon-7629	Charbon de bois	Conventionnelle	
Dikili Tash	7070 ± 35	5950 ± 40	Lyon-7923	Os	Conventionnelle	
Dikili Tash	7115 ± 35	5990 ± 40	Lyon-7625	Charbon de bois	Conventionnelle	
Dikili Tash	7165 ± 40	6030 ± 30	Lyon-7617	Charbon de bois	Conventionnelle	
Dikili Tash	7405 ± 35	6300 ± 50	Lyon-7630	Charbon de bois	Conventionnelle	
Dikili Tash	7495 ± 35	6350 ± 60	Lyon-7626	Charbon de bois	Conventionnelle	

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Dikili Tash	7505 ± 35	6360 ± 60	Lyon-7632	Charbon de bois	Conventionnelle	
Dikili Tash	7560 ± 35	6430 ± 30	Lyon-7631	Charbon de bois	Conventionnelle	

Divostin (McPherron and Srejovic, 1988).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Divostin	6910 ± 100	5810 ± 100	BLN-827	nd	Conventionnelle	Divostin I
Divostin	6935 ± 100	5830 ± 100	BM-573	nd	Conventionnelle	Divostin I
Divostin	6945 ± 100	5840 ± 100	BLN-896	nd	Conventionnelle	Divostin I
Divostin	6945 ± 100	5840 ± 100	BLN-812	nd	Conventionnelle	Divostin I
Divostin	7020 ± 100	5890 ± 100	BLN-823	nd	Conventionnelle	Divostin I
Divostin	7020 ± 100	5890 ± 100	BLN- 866a	nd	Conventionnelle	Divostin I
Divostin	7020 ± 100	5890 ± 100	BLN-826	nd	Conventionnelle	Divostin I
Divostin	7050 ± 80	5920 ± 80	BLN-931	nd	Conventionnelle	Divostin I

Dobrinishte (Nikolov and Radeva 1992).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Dobrinishte	6610 ± 50	5560 ± 50	Bln-3786	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Dobrinishte	6650 ± 60	5580 ± 50	Bln-3785	Charbon de bois	Conventionnelle	I

Donja Branjevina(Whittle et al. 2002).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Donja Branjevina	6775 ± 60	5680 ± 50	OxA-8556	nd	Conventionnelle	Ia-Ib
Donja Branjevina	6810 ± 80	5720 ± 70	GrN- 24609	nd	Conventionnelle	II

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Donja Branjevina	6845 ± 55	5730 ± 60	OxA-8555	nd	Conventionnelle	Ia-Ib
Donja Branjevina	6955 ± 50	5840 ± 70	Grn-19575	?	Conventionnelle	II-III
Donja Branjevina	7080 ± 55	5950 ± 50	OxA-8557	nd	Conventionnelle	Ia-Ib
Donja Branjevina	7140 ± 90	6010 ± 100	Grn-15976	nd	Conventionnelle	III
Donja Branjevina	7155 ± 50	6030 ± 40	Grn-15974	nd	Conventionnelle	III

Dudesti Vechi - Movila lui Deciov (Luca et al. 2011). Seulement les dates de la couche la plus ancienne (IIa-b) sont présentées ici, en excluant les dates qui font partie des occupations plus tardives.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Dudesti Vechi - Movila lui Deciov	6815 ± 70	5720 ± 60	GrN-28876	Charbon de bois	Conventionnelle	IIa-b
Dudesti Vechi - Movila lui Deciov	6845 ± 40	5720 ± 40	GrA-26951	?	Conventionnelle	IIa
Dudesti Vechi - Movila lui Deciov	6930 ± 50	5820 ± 60	GrN-28113	Os	Conventionnelle	IIa
Dudesti Vechi - Movila lui Deciov	6920 ± 80	5820 ± 80	GrA-24115	Os	Conventionnelle	IIa
Dudesti Vechi - Movila lui Deciov	6990 ± 50	5880 ± 70	GrN-28111	Os	Conventionnelle	IIa

Ecsegfalva (Oross 2012). Toutes les dates de ce site ont été obtenues avec la technique de l'AMS et proviennent d'os d'animaux et de semences. L'échantillon OxA-12857 est en fort discussion, en étant très ancien pas seulement pour l'horizon chronologique hongrois, mais

pour tous le Néolithique Ancien balkanique. Oross (2012) suggère que cette date, provenant d'un os d'animal, pourrait appartenir à une phase Mésolithique, où être issue d'une erreur de mensuration ; elle est donc rejetée.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Ecsegfalva	6915 ± 36	5800 ± 50	OxA-11983	Os d'animal	AMS	
Ecsegfalva	6920 ± 50	5810 ± 60	OxA-9335	Grains carbonisés	AMS	
Ecsegfalva	6930 ± 40	5810 ± 50	OxA-11871	Grains carbonisés	AMS	
Ecsegfalva	6950 ± 45	5830 ± 60	OxA-9329	Os d'animal	AMS	
Ecsegfalva	7944 ± 44	6860 ± 120	OxA-12857	Os d'animal	AMS	

Elateia (Reingruber et Thissen 2005). Les dates provenant de ce site, publiées dans *l'Agean Cathment database*, remontent aux années 1960 ; en outre, certaines présentent un écart-type trop élevé. Elles ne respectent pas les critères d'audit et sont par conséquent rejetées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Elateia	7190 ± 100	6080 ± 100	GrN-3041	Charbon de bois	Conventionnelle	EN monochrome
Elateia	7360 ± 90	6230 ± 110	GrN-3037	Charbon de bois	Conventionnelle	EN monochrome
Elateia	7480 ± 70	6340 ± 70	GrN-2973	Charbon de bois	Conventionnelle	EN monochrome
Elateia	8240 ± 110	7280 ± 150	GrN-3039	Charbon de bois	Conventionnelle	EN
Elateia	7040 ± 130	5910 ± 120	GrN-3502	Charbon de bois	Conventionnelle	EN

Eleshnitsa (Görsdorf et Bojadziev 1996). Ces dates ont été publiées pendant les années 1980 et 1990.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Eleshnitsa	6720 ± 70	5630 ± 60	Bln-3244	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Eleshnitsa	6730 ± 90	5640 ± 70	Bln-3245	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Eleshnitsa	6790 ± 50	5690 ± 40	Bln-3237	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Eleshnitsa	6850 ± 50	5740 ± 50	Bln-3940	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Eleshnitsa	6920 ± 60	5810 ± 70	Bln-3239	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Eleshnitsa	6940 ± 50	5820 ± 60	Bln-3242	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Eleshnitsa	6960 ± 60	5850 ± 80	Bln-3241	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Eleshnitsa	7010 ± 60	5890 ± 70	Bln-3238	Charbon de bois	Conventionnelle	I

Endrod (Oross 2012). Plusieurs fouilles ont eu lieu à cet endroit. Endrod 35 et Endrod-Varnyai-tanya sont attribués à la culture *Late Körös* et donc exclus car étant partie d'une période plus tardive que le Néolithique Ancien. Les dates d'Endrod 39 ont un écart-type trop élevé et sont conséquemment rejetées. Les fouilles d'Endrod 119, par contre, ont des dates robustes, obtenues avec la technique AMS à partir d'échantillons en os animal, qui respectent les critères d'audit.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Endrod 119	6825 ± 45	5710 ± 40	OxA- 9582	Os d'animal	AMS	
Endrod 119	6850 ± 45	5730 ± 50	OxA- 9586	Os d'animal	AMS	
Endrod 119	6855 ± 45	5740 ± 50	OxA- 9588	Os d'animal	AMS	
Endrod 119	6895 ± 45	5780 ± 50	OxA- 9583	Os d'animal	AMS	

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Endrod 119	6915 ± 45	5800 ± 50	OxA-9587	Os d'animal	AMS	
Endrod- Varnyai- tanya	6595 ± 50	5550 ± 50	OxA-9395	Os humain	AMS	Late Körös
Endrod 39	6970 ± 110	5860 ± 110	BM- 1868R	Charbon de bois	Conventionnelle	
Endrod 39	6950 ± 140	5840 ± 130	BM- 1863R	Charbon de bois	Conventionnelle	
Endrod 39	6950 ± 120	5840 ± 110	BM- 1870R	Charbon de bois	Conventionnelle	
Endrod 39	6830 ± 120	5750 ± 110	BM- 1871R	Charbon de bois	Conventionnelle	

Foeni (Luca et al. 2011). Trois dates sont disponibles : deux pour Foeni-Salas et une pour Foeni-Gaz. L'échantillon GrN-28455 est objet de débat, étant très ancien pour son horizon culturel. Il est donc mis en discussion, soupçonné de faire partie d'une occupation Mésolithique (Luca et al. 2011).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Foeni - Gaz	6925 ± 45	5810 ± 50	GrA-25621	Os	Conventionnelle	
Foeni - Salas	7080 ± 50	5950 ± 50	GrN-28454	Os	Conventionnelle	
Foeni - Salas	7510 ± 60	6350 ± 70	GrN-28455	Os	Conventionnelle	

Franchti. Seulement les dernières dates AMS sont prises (Perlès et al. 2013). Il s'agit d'un des sites plus étudiés et débattus de la région, pour lequel de nombreuses dates sont disponibles ; les précédentes avaient été publiées dans *l'Aegean Catchment c14 database* (Reingruber et Thissen 2005). Le set "P", qui date vers la fin des années 1960 et le début des années 1970, n'est pas présenté ici. Franchti est un site qui était déjà occupé pendant le Mésolithique ; en outre il s'agit d'un site en grotte, avec une stratigraphie complexe à reconstituer. Seulement les dates qui viennent de semences de plantes domestiquées sont

prises ici ; elles représentent un clair indicateur de la présence d'agriculteurs. Les autres dates sont rejetées, à cause du risque de leur appartenance à la période mésolithique.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Franchti</i>	<i>7555 ± 40</i>	<i>6420 ± 30</i>	<i>GifA 80044 / SacA 10908</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>AMS</i>	
Franchti	7645 ± 50	6500 ± 50	GifA 11456 / SacA 26198	semences	AMS	
Franchti	7740 ± 50	6560 ± 60	GifA 11455 / SacA 26197	semences	AMS	
Franchti	7780 ± 40	6600 ± 50	GifA 11017 / SacA 23625	semences	AMS	
Franchti	7805 ± 40	6630 ± 40	GifA 11016 / SacA 23624	semences	AMS	
<i>Franchti</i>	<i>7910 ± 40</i>	<i>6820 ± 120</i>	<i>GifA 80043 / SacA 10907</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>AMS</i>	
<i>Franchti</i>	<i>7935 ± 40</i>	<i>6850 ± 120</i>	<i>GifA 80046 / SacA 10910</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>AMS</i>	
<i>Franchti</i>	<i>7990 ± 40</i>	<i>6910 ± 90</i>	<i>GifA 80048 / SacA 10945</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>AMS</i>	
<i>Franchti</i>	<i>8025 ± 45</i>	<i>6940 ± 90</i>	<i>GifA 80049 / SacA 10946</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>AMS</i>	

Galabnik (Görsdorf et Bojadziev 1996). Ces dates ont été obtenues pendant les années 1990. Seulement la couche I est prise en compte, la couche II faisant partie d'une phase d'occupation plus tardive. L'échantillon GrN-19786, qui présente un écart-type élevé, est rejeté.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Galabnik	6790 ± 80	5700 ± 70	Bln-3581	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Galabnik	6950 ± 70	5840 ± 80	Bln-3582	Charbon de bois	Conventionnelle	I

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Galabnik	7020 ± 60	5900 ± 70	GrN- 19785	?	Conventionnelle	I
Galabnik	7030 ± 70	5900 ± 80	Bln-3579	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Galabnik	7070 ± 60	5940 ± 60	GrN- 19784	?	Conventionnelle	I
Galabnik	7120 ± 70	5980 ± 70	Bln-3580	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Galabnik	7070 ± 180	5960 ± 180	GrN- 19786	Charbon de bois	Conventionnelle	I

Golokut (Zofmann 2004).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Golokut	6520 ± 50	5470 ± 60	OxA- 8695	nd	AMS	
Golokut	6525 ± 50	5480 ± 50	Oxa-8694	nd	AMS	
Golokut	6550 ± 50	5520 ± 40	OxA-8616	nd	AMS	
Golokut	6550 ± 55	5520 ± 50	OxA-8505	nd	AMS	
Golokut	6590 ± 50	5550 ± 50	OxA-10147	nd	AMS	

Grivac (Bogdanović 2004).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Grivac	7020 ± 100	5890 ± 100	Bln-826		Conventionnelle	I-III

Gyalaret-Szilagyi-major (Oross 2012).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Gyalaret- Szilagyi	7090 ± 100	5950 ± 100	Bln-75	Tesson de poterie	Conventionnelle	

Halai (Reingruber et Thissen 2005). Ce site a été occupé à partir du Mésolithique jusqu'au Néolithique Moyen ; la couche ici présentée est celle Néolithique Ancienne. Néanmoins, ces dates ont un écart-type élevé et ne sont pas acceptables.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Halai	7530 ± 200	6390 ± 210	A-7268	Charbon de bois	Conventionnelle	EN
Halai	7325 ± 160	6200 ± 150	A-7271	Charbon de bois	Conventionnelle	EN

Hoca Çeşme (Ozogan 1997). Seulement la couche la plus ancienne est incluse ici (Phase IV) ; les autres font partie d'une occupation plus tardive.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Hoca Çeşme	7360 ± 90	6230 ± 110	GrN-19779	Charbon de bois	Conventionnelle	Phase IV
Hoca Çeşme	7496 ± 80	6350 ± 80	Hd-16725/ 119145	nd	Conventionnelle	Phase IV
Hoca Çeşme	7637 ± 50	6500 ± 50	Bln-4609	nd	Conventionnelle	Phase IV

Ibrany-Nagyerdo (Luca et al. 2011).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Ibrany- Nagyerdo	6570 ± 40	5530 ± 40	Poz-28214	Os	AMS	
Ibrany- Nagyerdo	6630 ± 40	5570 ± 40	Poz-28216	Arête de poisson	AMS	

Karanovo (Hiller and Nikolov 1997). Ces date on été publiées pendant les années 1980 et 1990. Seulement la couche I, qui représente la première occupation du site, est prise en compte.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Karanovo	6710 ± 55	5620 ± 50	Bln-4335	Charbon de bois	Conventionnelle	I

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Karanovo	6730 ± 80	5640 ± 70	Bln-4178	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Karanovo	6820 ± 50	5710 ± 40	Bln-3942	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Karanovo	6810 ± 65	5710 ± 50	Bln-4337	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Karanovo	6955 ± 45	5840 ± 60	Bln-4338	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Karanovo	7090 ± 90	5950 ± 90	Bln-4339	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Karanovo	7110 ± 50	5980 ± 50	Bln-4336	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Karanovo	7110 ± 50	5980 ± 50	Bln-4177	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Karanovo	7130 ± 70	5990 ± 70	Bln-4179	Charbon de bois	Conventionnelle	I

Knossos. Les dates de la série BM ont été obtenues dans les années 1960 et présentent un écart-type très élevé ; elles sont donc rejetées (Facorellies et Maniatis 2013). La date OxA-9215 est du 2004 et est obtenue avec la technique AMS (Efstratiou et al. 2004) ; elle est donc théoriquement acceptable, même si l'occupation de Knossos ne semble pas liée à la vague de Néolithisation des Balkans (cf. par. 2.6). Toutes les dates qui font partie de phases d'occupations plus tardives sont omises.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Knossos</i>	<i>7965 ± 60</i>	<i>6880 ± 120</i>	<i>OxA-9215</i>	<i>Semences carbonisées</i>	<i>AMS</i>	
Knossos	8050 ± 180	7000 ± 260	BM-124	Bois carbonisé	Conventionnelle	X
Knossos	7910 ± 140	6830 ± 180	BM-278	Bois carbonisé	Conventionnelle	X
Knossos	7740 ± 140	6650 ± 170	BM-436	Semence carbonisée	Conventionnelle	X
Knossos	7570 ± 150	6430 ± 150	BM-272	Charbon de bois	Conventionnelle	IX

Konispol (Forenbaheer et Miracle 2006). Il s'agit du seul site de l'Albanie à avoir des dates publiées pour le Néolithique Ancien Balkanique. Néanmoins, l'écart-type est élevé, et ces dates sont par conséquent refusées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Konispol	6800 ± 140	5720 ± 130	Beta-56416	Charbon de bois	Conventionnelle	
Konispol	7060 ± 110	5920 ± 110	Beta-56415	Charbon de bois	Conventionnelle	

Kovachevo (Lichardus-Itten et al. 2002). Les dates provenant de ce site ont été obtenues au début des années 2000. Toutes les dates respectent les critères d'audit, mais la préférence est donnée à la série OxA. Ces dates proviennent de semences et sont donc considérées meilleures que la série Ly, qui a des échantillons de charbon de bois ou de matériau inconnu.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Kovachevo</i>	6975 ± 50	5860 ± 70	<i>Ly-1439</i>	<i>Charbon de bois</i>	Conventionnelle	<i>I (a-d)</i>
<i>Kovachevo</i>	6980 ± 65	5870 ± 80	<i>Ly-1620</i>	<i>nd</i>	Conventionnelle	<i>I (a-d)</i>
<i>Kovachevo</i>	6990 ± 45	5880 ± 70	<i>Ly-1438</i>	<i>Charbon de bois</i>	Conventionnelle	<i>I (a-d)</i>
<i>Kovachevo</i>	7090 ± 70	5960 ± 70	<i>Ly-1654</i>	<i>nd</i>	Conventionnelle	<i>I (a-d)</i>
<i>Kovachevo</i>	7180 ± 45	6050 ± 40	<i>Ly-1437</i>	<i>nd</i>	Conventionnelle	<i>I (a-d)</i>
Kovachevo	7222 ± 35	6100 ± 60	OxA-20244	Semences carbonisées	Conventionnelle	Ia
Kovachevo	7157 ± 37	6030 ± 30	OxA-20245	Semences carbonisées	Conventionnelle	Ib
Kovachevo	7245 ± 36	6120 ± 60	OxA-20246	Semences carbonisées	Conventionnelle	Ia
Kovachevo	7028 ± 35	5920 ± 50	OxA-20247	Semences carbonisées	Conventionnelle	Ia

Kremenik (Georgiev et al 1986).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Kremenik	6350 ± 60	5340 ± 80	Bln-2549	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6450 ± 100	5410 ± 90	Bln-2551	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6460 ± 60	5420 ± 60	Bln-2552	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6475 ± 40	5430 ± 50	Bln-2106	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6480 ± 60	5430 ± 60	Bln-2556	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6530 ± 50	5490 ± 50	Bln-2105	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6550 ± 60	5520 ± 50	Bln-2550	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6620 ± 100	5560 ± 70	Bln-2554	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6660 ± 60	5580 ± 50	Bln-2553	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Kremenik	6840 ± 60	5730 ± 60	Bln-2555	Charbon de bois	Conventionnelle	I

Krovili (Ammerman et al. 2008).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Krovili	6770 ± 40	5670 ± 30	OxA-14795	Charbon de bois	AMS	
Krovili	6980 ± 65	5870 ± 80	OxA-14353	Charbon de bois	AMS	

Lepenski Vir (Boric and Dimitrijević 2009). Les dates présentées ici proviennent des couches les plus anciennes (I et II) ; la couche III fait partie d'une phase d'occupation plus récente qui n'est pas incluse. Ces dates sont acceptables selon les critères d'audit ; néanmoins, le site de Lepenski Vir fait partie de la région des Gorges du Danube. Le système agricole Néolithique modélisé dans OBRESOC-BEAN n'est pas introduit dans cette zone ; par conséquent, ces dates ne sont pas utilisées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Lepenski Vir</i>	7111 ± 40	5980 ± 50	OxA-15999	Os de cerf	AMS	I-II
<i>Lepenski Vir</i>	7125 ± 40	6000 ± 40	OxA-16073	Os de cerf	AMS	I-II
<i>Lepenski Vir</i>	7170 ± 40	6040 ± 30	OxA16003	Os de cochon	AMS	I-II
<i>Lepenski Vir</i>	7190 ± 40	6050 ± 40	OxA-1606	Os humain	AMS	I-II
<i>Lepenski Vir</i>	7205 ± 40	6070 ± 50	OxA-16010	Os humain	AMS	I-II
<i>Lepenski Vir</i>	7280 ± 45	6140 ± 60	OxA-15998	Os de cerf	AMS	I-II

Limba (Luca et al. 2001)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Limba	6580 ± 60	5540 ± 50	GrN-28457	Os de bovin	Conventionnelle	
Limba	6620 ± 60	5560 ± 50	GrN-29052	??	Conventionnelle	

Ludaš-Budžak (Whittle et al. 2002).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Ludaš-Budžak	6705 ± 55	5620 ± 50	OxA- 8553	nd	Conventionnelle	Koros
Ludaš-Budžak	6725 ± 60	5630 ± 60	Oxa-8552	nd	Conventionnelle	Koros
Ludaš-Budžak	6875 ± 55	5770 ± 60	OxA-8554	nd	Conventionnelle	Koros

Magareći Mli (Leković, 1988).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Magareći Mlin	6910 ± 45	5800 ± 50	Grn-15971	nd	Conventionnelle	
Magareći Mlin	7015 ± 90	5890 ± 90	Grn-15972	nd	Conventionnelle	
Magareći Mlin	7130 ± 60	5990 ± 60	Grn-15973	nd	Conventionnelle	

Magura Buduiasca (Luca et al. 2011)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Magura Buduiasca	6784 ± 56	5680 ± 40	Wk-14437	nd	Conventionnelle	
Magura Buduiasca	6833 ± 53	5720 ± 50	Wk-14436	nd	Conventionnelle	
Magura Buduiasca	6896 ± 61	5790 ± 70	Wk-14435	nd	Conventionnelle	

Makri. Les première dates publiées pour Makri suggéraient que ce site ne faisait pas partie du Néolithique Ancien, mais plutôt du Néolithique Moyen Grec. La situation est changée avec la date obtenue par Efstratiou en 2007 (publiée par Ammerman et al. 2008), qui anticipe la création de ce site de plusieurs siècles, en le plaçant dans la chronologie du Néolithique Ancien de la région. Cette date est publiée seulement comme date calibrée BC ; donc, une calibration avec CalPal n'a pas été possible.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Makri	??	6400-6010 2σ	GrA-34389	?	?	

Maroslele Pana. Cinq dates ont été publiées pour ce site (Oross 2012). Néanmoins, deux dates (Deb-2733 et OxA-9403) sont considérée très suspectes, étant plusieurs siècles plus anciennes par rapport à l'horizon chronologique hongrois. Elles font probablement partie d'une contamination Mésolithique (Borić 2005), et sont par conséquent rejetées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Maroslele-Pana	6780 ± 50	5680 ± 40	OxA-9401	Os humain	AMS	
Maroslele-Pana	6845 ± 50	5730 ± 50	OxA-10149	Os humain	AMS	
Maroslele-Pana	6965 ± 50	5850 ± 70	OxA-9399	Os humain	AMS	
Maroslele-Pana	7497 ± 56	6350 ± 70	Deb-2733	Os	Conventionnelle	
Maroslele-Pana	7765 ± 55	6580 ± 60	OxA-9403	Os humain	AMS	

Maroulas/Kythnos (Sampson et al. 2010). Ce site a été exclu car la majorité de dates le placent dans le Mésolithique ; les dates qui pourraient être attribuées au Néolithique Ancien ne respectent pas les critères d'audit.

Mavropigi (Weninger 2014)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Mavropigi	7758 ± 60	6580 ± 60	DEM-1685	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7660 ± 30	6500 ± 40	DEM-1680	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7448 ± 35	6320 ± 60	DEM-1723	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7430 ± 35	6310 ± 50	DEM-1717	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7377 ± 35	6270 ± 60	DEM-1724	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7363 ± 30	6240 ± 70	DEM-1752	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7353 ± 35	6210 ± 80	OxA-19741	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7340 ± 33	6180 ± 60	OxA-19742	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7324 ± 36	6170 ± 60	OxA-19743	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7314 ± 30	6160 ± 50	DEM-1716	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7288 ± 30	6150 ± 50	DEM-1679	Nd	Conventionnelle	
Mavropigi	7216 ± 30	6070 ± 40	DEM-1715	Nd	Conventionnelle	

Methelek-Nadas (Oross 2012)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Mehtelek- Nadas	6625 ± 50	5560 ± 50	GrN-6897	Charbon de bois	Conventionnelle	
Mehtelek- Nadas	6655 ± 60	5580 ± 50	Bln-1332	Charbon de bois	Conventionnelle	
Mehtelek- Nadas	6835 ± 60	5730 ± 60	Bln-1331	Charbon de bois	Conventionnelle	

Miercurea Sibului-Petris (Luca et al. 2011). Seulement la couche la plus ancienne, qui fait partie de la culture Starčevo-Criș, est présentée ici.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Miercurea Sibiului - Petris	7010 ± 40	5910 ± 60	GrN-29954	Os	Conventionnelle	Starcevo- Cris Ia-b-c
Miercurea Sibiului - Petris	7050 ± 70	5920 ± 70	GrN-28520	Os	Conventionnelle	Starcevo- Cris Ia-b-c
Miercurea Sibiului - Petris	7050 ± 33	5940 ± 40	OxA- 19738	Grain	Conventionnelle	Starcevo- Cris Ia-b-c
Miercurea Sibiului - Petris	7131 ± 34	6010 ± 30	OxA-19739	Grain	Conventionnelle	Starcevo- Cris Ia-b-c

Nagykoru - TSZ Gyumolcsos (Oross 2012)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Nagykoru-TSZ Gyumolcsos	6890 ± 35	5780 ± 40	VERA-3474	Os animal	AMS	
Nagykoru-TSZ Gyumolcsos	6940 ± 40	5820 ± 50	Poz-26327	Charbon de bois	AMS	
Nagykoru-TSZ Gyumolcsos	6970 ± 40	5850 ± 60	Poz-26328	Charbon de bois	AMS	
Nagykoru-TSZ Gyumolcsos	7040 ± 40	5930 ± 50	Poz-23460	Coquille	AMS	
Nagykoru-TSZ Gyumolcsos	7065 ± 35	5950 ± 40	VERA-3476	Os animal	AMS	

Nea Nikomedeia (Pyke and Yiouni 1996). De nombreuses dates sont disponibles pour ce site. Beaucoup d'échantillons remontent aux années 1960 et sont par conséquent exclus ; la série OxA a été publiée entre 1988 et 1993 et est acceptable. Les échantillons de semences et d'os sont considérés comme plus fiables par rapport à l'échantillon P-1202, en charbon de bois.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Nea Nikomideia	7050 ± 80	5920 ± 80	OxA-1603	Semence	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7100 ± 90	5960 ± 90	OxA-4281	Semence	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7260 ± 90	6140 ± 90	OxA-4283	Semence	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7280 ± 90	6150 ± 90	OxA-3875	Os de cochon	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7300 ± 80	6170 ± 90	OxA-3873	Os de mouton	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7340 ± 90	6220 ± 110	OxA-1604	Semence	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7370 ± 80	6240 ± 110	OxA-3874	Os de chèvre	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7370 ± 90	6240 ± 110	OxA-3876	Os de bovin	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7400 ± 100	6260 ± 110	OxA-1606	Semence	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7400 ± 90	6260 ± 110	OxA-1605	Semence	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7400 ± 90	6260 ± 110	OxA-4282	Semence	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7557 ± 91	6400 ± 100	P-1202	Charbon de bois	Conventionnelle	
Nea Nikomideia	7050 ± 80	5920 ± 80	OxA-1603	Semence	Conventionnelle	

Nosa-Biserna Obala (Whittle et al. 2002)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Nosa- Biserna obala	6740 ± 75	5640 ± 60	OxA-8540	nd	AMS	Koros- Starčevo

Ocna Sibiului (Luca et al. 2011)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Ocna Sibiului	7120 ± 60	5980 ± 60	GrN-28110	Os	Conventionnelle	

Ohoden - Valoga (Ganetsovski 2009).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Ohoden - Valoga	6830 ± 45	5710 ± 40	KN 5655	Nd	Conventionnelle	I

Ovcharovo (Todorova 1989). Les échantillons d'os sont considérés comme plus fiables que ceux de charbon de bois, et sont donc choisis de préférence.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Ovcharovo- Gorata</i>	6125 ± 45	5080 ± 90	<i>Bln-2030</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	<i>I</i>
<i>Ovcharovo- Gorata</i>	6463 ± 50	5420 ± 50	<i>Bln-1620</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	<i>I</i>
Ovcharovo- Gorata	6500 ± 40	5450 ± 50	Poz-16986	Os	Conventionnelle	I
<i>Ovcharovo- Gorata</i>	6555 ± 70	5520 ± 60	<i>Bln-2032</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	<i>I</i>
Ovcharovo- Gorata	6640 ± 40	5570 ± 40	Poz-18484	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6640 ± 40	5570 ± 40	Poz-18493	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6660 ± 40	5590 ± 40	Poz-18487	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6690 ± 40	5600 ± 40	Poz-18494	Os	Conventionnelle	I
<i>Ovcharovo- Gorata</i>	6688 ± 60	5600 ± 50	<i>Bln-1544</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	<i>I</i>
Ovcharovo- Gorata	6750 ± 40	5660 ± 40	Poz-18483	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6750 ± 40	5660 ± 40	Poz-18489	Os	Conventionnelle	I

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Ovcharovo- Gorata	6780 ± 40	5680 ± 30	Poz-18490	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6810 ± 40	5690 ± 30	Poz-18491	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6890 ± 40	5780 ± 50	Poz-16984	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6890 ± 40	5780 ± 50	Poz-16985	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6900 ± 40	5790 ± 50	Poz-18480	Os	Conventionnelle	I
Ovcharovo- Gorata	6900 ± 40	5790 ± 50	Poz-18486	Os	Conventionnelle	I
<i>Ovcharovo- Platoto I</i>	<i>6480 ± 60</i>	<i>5430 ± 60</i>	<i>Bln-1356</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	

Padina (Jovanovic 2008). La couche présentée ici fait partie du Néolithique ; une occupation était déjà attestée pendant le Mésolithique, mais les dates relatives à cette période ne sont pas incluses. Même si ces dates sont considérées comme valides selon les critères d'audit, ce site se trouve dans la région des Gorges du Danube, et ne fait pas partie du contexte Néolithique modélisé.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Padina</i>	<i>6790 ± 55</i>	<i>5690 ± 40</i>	<i>OxA-9054</i>	<i>Os</i>	<i>AMS</i>	<i>Padina B</i>
<i>Padina</i>	<i>6965 ± 60</i>	<i>5850 ± 80</i>	<i>OxA-9052</i>	<i>Os</i>	<i>AMS</i>	<i>Padina B</i>
<i>Padina</i>	<i>7315 ± 55</i>	<i>6170 ± 70</i>	<i>OxA-11103</i>	<i>nd</i>	<i>AMS</i>	<i>Padina B</i>

Parta Asezarea 5 (Luca et al. 2011).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Parta Asezarea 5	6860 ± 60	5750 ± 70	GrN-28460	Os de cerf	Conventionnelle	

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Parta Asezarea 5	6860 ± 60	5750 ± 70	GrN-28459	Os de bovin	Conventionnelle	

Pitvaros (Oross 2012).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Pitvaros	6885 ± 50	5780 ± 60	OxA-9392	Os animal	AMS	
Pitvaros	6940 ± 50	5820 ± 60	OxA-9393	Os animal	AMS	
Pitvaros	7060 ± 45	5940 ± 50	OxA-9336	Charbon de bois	AMS	

Polyanitsa (Todorova 1989). Ce site est objet de débat parmi les archéologues : certaines dates sont plus vieilles que tous les autres sites de la région. Néanmoins, ces dates respectent les critères d'audit, et, même si suspectes, sont considérées valides par certains archéologues (Todorova 1995).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Polyanitsa- Platoto	7140 ± 80	6010 ± 80	Bln-1512	Poterie	Conventionnelle	
Polyanitsa- Platoto	7247 ± 60	6120 ± 70	Bln-1613A	Poterie	Conventionnelle	
Polyanitsa- Platoto	7380 ± 60	6250 ± 90	Bln-1613	Poterie	Conventionnelle	
Polyanitsa- Platoto	7535 ± 80	6370 ± 80	Bln-1571	Poterie	Conventionnelle	

Porodinska Tumba (Jovanovic 2004). L'écart-type de ces dates est très élevé ; elles sont conséquemment rejetées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Porodinska Tumba	6760 ± 110	5670 ± 100	Tx-1787	Nd	Conventionnelle	Neolithic layer

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Porodinska Tumba	7110 ± 140	5990 ± 150	H-1486/ 987	Nd	Conventionnelle	Neolithic layer

Ramnicul Valcea (Luca et al. 2011).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Ramnicul Valcea	6480 ± 75	5440 ± 70	KN-I.102	Nd	Conventionnelle	

Ribnjak (Whittle et al. 2002).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Ribnjak	6750 ± 65	5660 ± 50	OxA-8564	Nd	Conventionnelle	

Roszke-Ludvar (Oross 2012)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Roszke- Ludvar	6972 ± 59	5860 ± 80	Deb-2730	Os	Conventionnelle	

Sajan-Dombos (Whittle et al 2002).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Sajan-Domboš	6780 ± 70	5680 ± 50	OxA- 8567	nd	AMS	Starčevo layer
Sajan-Domboš	6815 ± 55	5700 ± 50	OxA- 8566	nd	AMS	Starčevo layer

Šašinci (Leković, 1988).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Šašinci	6770 ± 60	5670 ± 50	OxA-8558	nd	AMS	Starčevo layer

Servia (Reingruber et Thissen 2005). L'échantillon BM-1885R, relatif aux fouilles de Servia, est des années 1980 et n'est pas acceptable à cause de l' écart-type élevé. La date de Servia-Vartymetes est des années 1990 et est au contraire acceptée.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Servia- Varytimides	6905 ± 87	5800 ± 90	BM-1157	Charbon de bois	Conventionnelle	EN
Servia	6570 ± 210	5490 ± 190	BM-1885R	Os de bovin	Conventionnelle	EN

Sesklo (Thissen et Reingruber 2005). De nombreuses dates ont été publiées pour ce site. Ici sont présentées seulement les dates relatives aux couches les plus anciennes (couche Précéramique - si existe - et couche I). Les dates ont été publiées entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 ; elles se trouvent très proches au seuil d'acceptation. En considérant que la chronologie de Sesklo est acceptée consensuellement par les archéologues, les dates sont considérées come valides et donc acceptées. Ils restent des doutes si une période acéramique a vraiment existé pour ce site (Brami 2011), mais cela n'affecte pas la fiabilité des dates.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Sesklo	7300 ± 93	6180 ± 100	P-1680	Charbon de bois	Conventionnelle	Preceramic
Sesklo	7400 ± 50	6290 ± 60	GrN- 16846	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I
Sesklo	7427 ± 78	6300 ± 80	P-1678	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I
Sesklo	7483 ± 72	6340 ± 70	P-1682	Charbon de bois	Conventionnelle	Preceramic
Sesklo	7530 ± 60	6370 ± 70	GrN- 16844	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Sesklo	7520 ± 30	6400 ± 30	GrN- 16841	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I
Sesklo	7560 ± 25	6430 ± 20	GrN- 16845	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I
Sesklo	7611 ± 83	6480 ± 80	P-1679	Charbon de bois	Conventionnelle	EN I
Sesklo	7755 ± 97	6620 ± 110	P-1681	Charbon de bois	Conventionnelle	Preceramic

Seusa (Luca et al. 2011)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Seusa	7070 ± 60	5940 ± 60	GrN- 28114	Os de bovin	Conventionnelle	

Sidari (Perlès 2001). Les dates de la série GXO ont un écart-type trop élevé et sont rejetées. L'échantillon OxA-3401 appartient à la période Mésolithique ; Sidari est un site en grotte déjà occupé pendant le Mésolithique, avec une stratigraphie confuse. Cette date est complètement en dehors de la chronologie du Néolithique Balkanique et ne peut pas être acceptée.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Sidari	7670 ± 120	6530 ± 110	GXO-771		Conventionnelle	
Sidari	7340 ± 180	6210 ± 170	GXO-772		Conventionnelle	
Sidari	8840 ± 85	7970 ± 180	OxA-3401		Conventionnelle	

Slatina (Nikolov 1992)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Slatina	6840 ± 60	5730 ± 60	Bln 3436	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Slatina	6840 ± 60	5730 ± 60	Bln 3443	grain	Conventionnelle	I
Slatina	6890 ± 60	5780 ± 70	Bln 3434	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Slatina	6940 ± 60	5830 ± 70	Bln 3439	grain	Conventionnelle	I
Slatina	6960 ± 60	5850 ± 80	Bln 3438	grain	Conventionnelle	I
Slatina	6960 ± 60	5850 ± 80	Bln 3441	grain	Conventionnelle	I
Slatina	6970 ± 60	5860 ± 80	Bln 3504	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Slatina	6860 ± 50	5750 ± 60	Bln 3435	Charbon de bois	Conventionnelle	
Slatina	6840 ± 60	5740 ± 60	Bln 3440	Charbon de bois	Conventionnelle	
Slatina	6830 ± 60	5730 ± 60	Bln 3555	Charbon de bois	Conventionnelle	
Slatina	6810 ± 50	5700 ± 40	Bln 3439	Charbon de bois	Conventionnelle	
Slatina	6780 ± 60	5680 ± 40	Bln 3442	Charbon de bois	Conventionnelle	

Stara Zagora-Okrazhna bolnitsa (Görsdorf et Bojadziev 1996). Ces dates ont été publiées pendant les années 1990. Les dates de la couche II sont chronologiquement très similaires à celles de la couche I ; par conséquent, les deux premières couches sont ici présentées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	6723 ± 100	5640 ± 80	Bln-1164	Charbon de bois	Conventionnelle	II
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	6744 ± 100	5650 ± 80	Bln-1164A	Charbon de bois	Conventionnelle	II

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	6750 ± 60	5660 ± 50	Bln-1588	Charbon de bois	Conventionnelle	II
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	6814 ± 65	5710 ± 60	Bln-1586	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	6820 ± 100	5730 ± 90	Bln-1250	Charbon de bois	Conventionnelle	II
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	6844 ± 100	5750 ± 100	Bln-1252	Charbon de bois	Conventionnelle	II
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	6918 ± 45	5800 ± 50	Bln-1589	Charbon de bois	Conventionnelle	II
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	7139 ± 65	6000 ± 60	Bln-1587	Charbon de bois	Conventionnelle	I
Stara Zagora- Okrazhna bolnitsa	6688 ± 150	5620 ± 120	Bln-1163	Charbon de bois	Conventionnelle	II

Starčevo (Whittle et al. 2002)

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Starčevo-Grad	6480 ± 55	5430 ± 60	OxA- 8560	nd	Conventionnelle	Starčevo layer
Starčevo-Grad	6565 ± 55	5530 ± 50	OxA- 8559	nd	Conventionnelle	Starčevo layer
Starčevo-Grad	6730 ± 60	5640 ± 60	OxA- 8562	nd	Conventionnelle	Starčevo layer

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Starčevo-Grad	6765 ± 55	5670 ± 40	OxA- 8563	nd	Conventionnelle	Starčevo layer
Starčevo-Grad	6785 ± 55	5680 ± 40	OxA- 8617	nd	Conventionnelle	Starčevo layer
Starčevo-Grad	6975 ± 60	5860 ± 80	OxA-8561	nd	Conventionnelle	Starčevo layer

Szajol-Felsőfold (Oross 2012). L'échantillon Deb-473 a un écart-type très élevé et n'est pas acceptable. Les échantillons VERA sont d'os et sont obtenus avec la technique de l'AMS ; ces dates sont par conséquent acceptées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Szajol- Felsőfold	6620 ± 35	5560 ± 40	VERA-3534	Os de sanglier	AMS	
Szajol- Felsőfold	6725 ± 35	5640 ± 40	VERA- 3051	Os humain	AMS	
Szajol- Felsőfold	6805 ± 35	5690 ± 30	VERA- 3531	Os d'auroch	AMS	
Szajol- Felsőfold	7100 ± 230	5990 ± 220	Deb-473	Os humain	Conventionnelle	

Szakmar-Kisulés (Orsoss 2012). La seule date disponible pour ce site a un écart-type trop élevé et est donc rejetée.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Szakmar- Kisulés	6960 ± 220	5860 ± 190	Deb-413	Charbon de bois	Conventionnelle	

Szarvas (Oross 2012). Deux dates proviennent des fouilles de Szarvas 23 et une de Szarvas 56. Deux parmi ces trois dates ont un écart-type très élevée, et ne sont pas acceptables ; pour

l'échantillon BM-1866R, Oross (2012) parle de possibles erreurs de mensuration. Seulement la date OxA, obtenue avec la technique de l'AMS, est acceptée.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Szarvas 23	6855 ± 55	5750 ± 60	OxA-9375	Charbon de bois	AMS	
Szarvas 23	6780 ± 110	5690 ± 100	BM-1866R	Os humain	Conventionnelle	
Szarvas 56	7050 ± 200	5940 ± 190	Deb-396	Charbon de bois	Conventionnelle	

Szentpeterszeg-Korvelyes (Oross 2012).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Szentpeterszeg- Korvelyes	6800 ± 60	5690 ± 50	Bln- 2578	Charbon de bois	Conventionnelle	

Szolnok-Szanda (Oross 2012). Cinq dates sont disponibles pour ce site. Les deux dates obtenues avec la technique de l'AMS, provenant d'échantillons d'os, sont préférées à celles de la série Bln, qui utilise une technique conventionnelle sur des échantillons de charbon de bois.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Szolnok-Szanda	6859 ± 34	5740 ± 40	OxA- 23754	Os humain	AMS	
Szolnok-Szanda	6910 ± 40	5800 ± 50	Poz- 37861	Os animal	AMS	
<i>Szolnok-Szanda</i>	<i>6940 ± 60</i>	<i>5830 ± 70</i>	<i>Bln- 2576</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	
<i>Szolnok-Szanda</i>	<i>7005 ± 80</i>	<i>5880 ± 90</i>	<i>Bln- 1938</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	
<i>Szolnok-Szanda</i>	<i>7005 ± 80</i>	<i>5880 ± 90</i>	<i>Bln- 1946</i>	<i>Charbon de bois</i>	<i>Conventionnelle</i>	

The Cyclopes cave (Sampson 2008). De nombreuses dates sont présentes pour ce site, mais la plupart ont été obtenues avant les années 1970 et ne sont pas incluses dans cette base de données. Seulement deux dates ont été obtenues pendant les années 1990 et 2000 et sont donc acceptables. Même si la stratigraphie des sites en grotte est toujours problématique, ces dates respectent tous le critères d'audit.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
The Cyclopes cave	7120 ± 80	5990 ± 80	Beta-?	Os de chevre/ mouton	Conventionnelle	,Upper level'
The Cyclopes cave	7060 ± 80	5930 ± 80	Beta-?	Os de chevre/ mouton	Conventionnelle	,Upper level'

Theopetra Cave. Ce site n'a pas été inséré dans la base de données. La raison est que la stratigraphie est bruitée est non claire (Brami 2011). Il s'agit d'un site en grotte qui a une séquence continue qui commence à partir du Mésolithique mais, à la différence de Franchti, il n'y a pas de dates prises sur des échantillons de grains domestiqués, et il n'est pas possible de savoir quelles sont les dates qui font partie de l'occupation Néolithique. Pour cette raison, le site a été complètement exclu.

Tiszaszolos-Domahazapuszta (Oross 2012). Cinq dates ont été publiées pour ce site. La priorité est donnée aux dates de la série OxA, qui ont été obtenues avec la technique de l'AMS.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Tiszaszolos-Domahazapuszta	6775 ± 40	5680 ± 30	OxA- 20239	semence	AMS	
Tiszaszolos-Domahazapuszta	6776 ± 34	5680 ± 30	OxA- 20237	semence	AMS	
<i>Tiszaszolos-Domahazapuszta</i>	<i>6780 ± 65</i>	<i>5680 ± 50</i>	<i>Deb- 11902</i>	<i>Os d'animal</i>	<i>Conventionnelle</i>	
Tiszaszolos-Domahazapuszta	6789 ± 37	5680 ± 30	OxA- 20238	semence	AMS	

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Tiszaszolos- Domahazapuszta</i>	6920 ± 50	5810 ± 60	Deb- 11890	Os d'animal	Conventionnelle	

Topole- Bač (Borić 2002). La seule date publiée pour ce site respecte *a priori* les critères d'audit; néanmoins, elle pose des problématiques. Le même auteur, dans une publication plus tardive (Borić à paraître) observe que ce site est plus ancien que les autres sites de la région ; à l'état actuel de la recherche, ce n'est pas possible d'exclure qu'il s'agit d'une contamination Mésolithique.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Topole- Bač	7170 ± 50	6040 ± 40	OxA- 8693		AMS	

Tumba I - sred selo (Whittle 2002). L' écart-type de cet échantillon est trop élevé ; la date est donc rejetée.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Tumba I - sred selo	7010 ± 190	5900 ± 170	Z-498		Conventionnelle	I

Veluska tumba (Simoska and Sanev 1975). Trois dates ont été publiées pour ce site, mais deux ont un écart-type très élevé et sont rejetées. Seulement l'échantillon Tx-1809 est accepté.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Veluška Tumba	6900 ± 90	5800 ± 90	Tx-1809	Nd	Conventionnelle	II
Veluška Tumba	6890 ± 140	5800 ± 130	Tx-1786	Nd	Conventionnelle	II
Veluška Tumba	6950 ± 120	5840 ± 110	Tx-1785	Nd	Conventionnelle	IV

Vinogradi- Bečej (Whittle et al. 2002).

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Vinogradi- Bečej	7120 ± 55	5990 ± 60	OxA-8565	Nd	AMS	Starčevo layer

Vlasac (Boric et al. 2008). L'occupation de ce site est déjà attestée pendant le Mésolithique ; seulement la couche Néolithique est incluse ici. Les dates respectent les critères d'audit ; cependant, ce site fait partie de la région des Gorges du Danube et n'est pas pris en compte dans cette thèse.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
<i>Vlasac</i>	7035 ± 40	5930 ± 50	OxA-16544	Charbon de bois	AMS	EN
<i>Vlasac</i>	7261 ± 60	6130 ± 70	OxA-16542	Os humain	AMS	EN
<i>Vlasac</i>	7425 ± 39	6310 ± 50	OxA-16539	Os d'animal	AMS	EN
<i>Vlasac</i>	7764 ± 38	6580 ± 50	OxA-16540	Os	AMS	EN

Yarimburgaz (Özbaşaran 1995). Les dates provenant de la couche Mésolithiques ne sont pas incluses dans la base des données. Parmi les dates Néolithiques, celles avec un écart-type trop élevé sont rejetées.

Site	Date C14 uncalBP	Date C14 calBC	Lab	Matériau	Technique	Couche
Yarimburgaz	6880 ± 90	5780 ± 90	GrN-15528	Charbon de bois	Conventionnelle	3
Yarimburgaz	7130 ± 90	6000 ± 90	GrN-18744	Charbon de bois	Conventionnelle	2
Yarimburgaz	7330 ± 60	6190 ± 80	GrN-15529	Charbon de bois	Conventionnelle	5 or 4a
Yarimburgaz	5930 ± 110	4820 ± 140	GrN-15534	Charbon de bois	Conventionnelle	2
Yarimburgaz	6640 ± 280	5550 ± 270	GrN-18745	nd	Conventionnelle	4

Annexe B: Simulations effectuées

Cette annexe montre les combinaisons des paramètres qui ont été utilisées dans les simulations produites pour cette thèse. Il s'agit seulement des simulations finales effectuées avec la version du modèle OBRESOCBEAN30112015 ; toutes les simulation expérimentales faites avec les versions intermédiaires du modèle ne sont pas comprises. Tous les paramètres qui ne sont pas présents dans cette table ont été fixés à la valeur indiquée dans le paragraphe 4.4.

Les valeurs de la table sont les suivantes:

NumSim : Numéro assigné à la simulation

NbAgents : nombre d'agents (couples) au départ

DuréeSim : durée totale de la simulation (en saisons)

TailleCarré : taille du supercarré (en Kilomètres carrés)

DensNorm : ratio de la surface du supercarré maximale occupée par les agents en conditions normales

DensBM: ratio de la surface du supercarré maximale occupée par les agents en conditions de *Big Man*

CarryingPixel : nombre de foyers domestiques simultanés maximales présentes au hameau en conditions normales

MaxProd : production maximale par hectare

CarryBM: nombre de foyers domestiques simultanés maximales présentes au hameau en conditions de *Big Man*

RadExp: rayon de perception des agents lors de l'expansion (en kilomètres)

Mariage : patri/matrilocalité du mariage (0 = matrilocale, 1 = patrilocale)

RatioBov : nombre de bovins par individu

PropCap : proportion des caprins sur le nombre de bovins

ProcPorc : proportion des porcins sur le nombre de bovins

NumSim	NbAgents	DuréeSim	TailleCarré	DensNorm	DensBM	CarryingPixel	MaxProd	CarryBM	RadExp	Mariage	RatioBov	PropCap	PropPorc
1	200	2600	20x20	0,04	0,07	30	600	40,95	250	0,5	1	2	0,4
2	200	2600	20x20	0,04	0,07	30	400	40,95	250	0,5	1	2	0,4
3	200	2600	20x20	0,04	0,07	30	400	40,95	200	0,5	1	2	0,4
4	100	2600	20x20	0,04	0,07	30	400	40,95	200	0,5	1	2	0,4
5	100	2600	20x20	0,04	0,07	30	600	40,95	250	0,5	1	2	0,4
6	100	2600	20x20	0,03	0,06	20	600	28,94	250	0,5	1	2	0,4
7	200	2600	20x20	0,03	0,06	20	600	28,94	250	0,5	1	2	0,4
8	200	2600	20x20	0,04	0,07	20	600	28,94	250	0,5	1	2	0,4
9	200	2600	20x20	0,04	0,07	25	600	35	250	0,5	1	2	0,4
10	100	2600	20x20	0,02	0,04	25	600	35	250	0,5	1	2	0,4
11	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	1	2	0,4
12	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,75	1	2	0,4
13	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,25	1	2	0,4
14	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,25	1	2	0,4
15	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,6	1	2	0,4
16	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	1	2	0,4
17	250	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	1	2	0,4
18	200	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	1	2	0,4
19	200	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	1	2	0,4
20	200	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17
21	250	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17
22	250	3600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17
23	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	1	2	0,4
24	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,2	2	0,4
25	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,05	2	0,4
26	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17
27	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17
28	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17

NumSim	NbAgents	DuréeSim	TailleCarré	DensNorm	DensoBM	CarryingPixel	MaxProd	CarryBM	RadExp	Mariage	RatioBov	PropCap	PropPorc
29	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17
30	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17
31	150	3200	20x20	0,03	0,06	25	600	35	250	0,5	0,6	2,24	0,17
32	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	225	0,5	0,5	2	0,4
33	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	225	0,5	0,75	2	0,4
34	150	2600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	200	0,5	0,5	2	0,4
35	300	2600	20x20	0,03	0,06	20	600	28,94	200	0,5	0,5	2	0,4
36	300	2600	20x20	0,03	0,06	20	600	28,94	100	0,5	0,5	2	0,4
38	200	2400	20x20	0,03	0,06	20	600	28,94	100	0,5	0,5	2	0,4
40	200	2400	20x20	0,03	0,06	20	600	28,94	100	0,5	0,5	2	0,4
41	200	2400	20x20	0,03	0,06	20	600	28,94	150	0,5	0,5	2	0,4
42	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	200	0,5	0,5	2	0,4
43	150	3200	20x20	0,03	0,06	25	600	35	200	0,5	0,5	2	0,4
44	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,5	2	0,4
45	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	100	0,5	0,5	2	0,4
46	150	3200	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,5	2	0,4
47	150	3200	20x20	0,03	0,06	25	600	35	100	0,5	0,5	2	0,4
48	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,5	2	0,4
49	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
50	100	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
51	200	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
52	50	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
53	250	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
54	200	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
55	150	3200	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
56	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
57	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
58	150	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3

NumSim	NbAgents	DuréeSim	TailleCarré	DensNorm	DensoBM	CarryingPixel	MaxProd	CarryBM	RadExp	Mariage	RatioBov	PropCap	PropPorc
59	250	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
60	300	2400	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
61	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	100	35	150	0,5	0,75	2	0,3
62	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	1	35	150	0,5	0,75	2	0,3
63	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
64	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
65	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
66	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
67	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
68	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
69	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
70	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
71	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3
72	150	1600	20x20	0,03	0,06	25	600	35	150	0,5	0,75	2	0,3

Annexe C : Simulations pour l'Analyse de Sensibilité

Dans cette annexe est publiée la liste des simulations utilisées pour l'analyse de sensibilité du modèle ObresocBEAN, comme décrit dans le paragraphe 5.2.

Sim : numéro assigné à la simulation

Ag. Init : nombre d'agents au départ

BigMan : interrupteur ou 1 = *Big Man* activé, 0 = *Big Man* désactivé

FumHa : nombre de vaches nécessaires pour cultiver un hectare

MaxProd : rendement maximale per hectare (en kilogrammes)

PropGrain : proportion grains consommés parmi les grains récoltes

RadExp : rayon de perception des agents lors de l'expansion (en kilomètres)

RatioBov : nombre de bovins par personne

NbHouse : nombre foyers domestiques présents simultanément au hameau en conditions normales.

N.B. : le nombre foyers domestiques présents simultanément au hameau en conditions de *Big Man* ($NbHouseBM$) est aussi changé, en suivant la règle $NbHouseBM = 2 \times \sqrt{(NbHouse)}$

Sim	Ag. Init	BigMan	FumHa	MaxProd	Propgrain	RadExp	RatioBov	NbHouse
101	150	0	1	600	0,75	125	0,5	25
102	300	0	1	600	0,75	125	0,5	25
103	150	1	1	600	0,75	125	0,5	25
104	300	1	1	600	0,75	125	0,5	25
105	150	0	3	600	0,75	125	0,5	25
106	300	0	3	600	0,75	125	0,5	25
107	150	1	3	600	0,75	125	0,5	25
108	300	1	3	600	0,75	125	0,5	25
109	150	0	1	1000	0,75	125	0,5	25
110	300	0	1	1000	0,75	125	0,5	25
111	150	1	1	1000	0,75	125	0,5	25
112	300	1	1	1000	0,75	125	0,5	25
113	150	0	3	1000	0,75	125	0,5	25
114	300	0	3	1000	0,75	125	0,5	25
115	150	1	3	1000	0,75	125	0,5	25
116	300	1	3	1000	0,75	125	0,5	25
117	150	0	1	600	0,85	125	0,5	25
118	300	0	1	600	0,85	125	0,5	25
119	150	1	1	600	0,85	125	0,5	25
120	300	1	1	600	0,85	125	0,5	25
121	150	0	3	600	0,85	125	0,5	25
122	300	0	3	600	0,85	125	0,5	25
123	150	1	3	600	0,85	125	0,5	25
124	300	1	3	600	0,85	125	0,5	25
125	150	0	1	1000	0,85	125	0,5	25
126	300	0	1	1000	0,85	125	0,5	25
127	150	1	1	1000	0,85	125	0,5	25
128	300	1	1	1000	0,85	125	0,5	25
129	150	0	3	1000	0,85	125	0,5	25
130	300	0	3	1000	0,85	125	0,5	25
131	150	1	3	1000	0,85	125	0,5	25
132	300	1	3	1000	0,85	125	0,5	25
133	150	0	1	600	0,75	250	0,5	25
134	300	0	1	600	0,75	250	0,5	25
135	150	1	1	600	0,75	250	0,5	25
136	300	1	1	600	0,75	250	0,5	25
137	150	0	3	600	0,75	250	0,5	25
138	300	0	3	600	0,75	250	0,5	25
139	150	1	3	600	0,75	250	0,5	25
140	300	1	3	600	0,75	250	0,5	25
141	150	0	1	1000	0,75	250	0,5	25
142	300	0	1	1000	0,75	250	0,5	25
143	150	1	1	1000	0,75	250	0,5	25
144	300	1	1	1000	0,75	250	0,5	25
145	150	0	3	1000	0,75	250	0,5	25

Sim	Ag. Init	BigMan	FumHa	MaxProd	Propgrain	RadExp	RatioBov	NbHouse
146	300	0	3	1000	0,75	250	0,5	25
147	150	1	3	1000	0,75	250	0,5	25
148	300	1	3	1000	0,75	250	0,5	25
149	150	0	1	600	0,85	250	0,5	25
150	300	0	1	600	0,85	250	0,5	25
151	150	1	1	600	0,85	250	0,5	25
152	300	1	1	600	0,85	250	0,5	25
153	150	0	3	600	0,85	250	0,5	25
154	300	0	3	600	0,85	250	0,5	25
155	150	1	3	600	0,85	250	0,5	25
156	300	1	3	600	0,85	250	0,5	25
157	150	0	1	1000	0,85	250	0,5	25
158	300	0	1	1000	0,85	250	0,5	25
159	150	1	1	1000	0,85	250	0,5	25
160	300	1	1	1000	0,85	250	0,5	25
161	150	0	3	1000	0,85	250	0,5	25
162	300	0	3	1000	0,85	250	0,5	25
163	150	1	3	1000	0,85	250	0,5	25
164	300	1	3	1000	0,85	250	0,5	25
165	150	0	1	600	0,75	125	1	25
166	300	0	1	600	0,75	125	1	25
167	150	1	1	600	0,75	125	1	25
168	300	1	1	600	0,75	125	1	25
169	150	0	3	600	0,75	125	1	25
170	300	0	3	600	0,75	125	1	25
171	150	1	3	600	0,75	125	1	25
172	300	1	3	600	0,75	125	1	25
173	150	0	1	1000	0,75	125	1	25
174	300	0	1	1000	0,75	125	1	25
175	150	1	1	1000	0,75	125	1	25
176	300	1	1	1000	0,75	125	1	25
177	150	0	3	1000	0,75	125	1	25
178	300	0	3	1000	0,75	125	1	25
179	150	1	3	1000	0,75	125	1	25
180	300	1	3	1000	0,75	125	1	25
181	150	0	1	600	0,85	125	1	25
182	300	0	1	600	0,85	125	1	25
183	150	1	1	600	0,85	125	1	25
184	300	1	1	600	0,85	125	1	25
185	150	0	3	600	0,85	125	1	25
186	300	0	3	600	0,85	125	1	25
187	150	1	3	600	0,85	125	1	25
188	300	1	3	600	0,85	125	1	25

Sim	Ag. Init	BigMan	FumHa	MaxProd	Propgrain	RadExp	RatioBov	NbHouse
189	150	0	1	1000	0,85	125	1	25
190	300	0	1	1000	0,85	125	1	25
191	150	1	1	1000	0,85	125	1	25
192	300	1	1	1000	0,85	125	1	25
193	150	0	3	1000	0,85	125	1	25
194	300	0	3	1000	0,85	125	1	25
195	150	1	3	1000	0,85	125	1	25
196	300	1	3	1000	0,85	125	1	25
197	150	0	1	600	0,75	250	1	25
198	300	0	1	600	0,75	250	1	25
199	150	1	1	600	0,75	250	1	25
200	300	1	1	600	0,75	250	1	25
201	150	0	3	600	0,75	250	1	25
202	300	0	3	600	0,75	250	1	25
203	150	1	3	600	0,75	250	1	25
204	300	1	3	600	0,75	250	1	25
205	150	0	1	1000	0,75	250	1	25
206	300	0	1	1000	0,75	250	1	25
207	150	1	1	1000	0,75	250	1	25
208	300	1	1	1000	0,75	250	1	25
209	150	0	3	1000	0,75	250	1	25
210	300	0	3	1000	0,75	250	1	25
211	150	1	3	1000	0,75	250	1	25
212	300	1	3	1000	0,75	250	1	25
213	150	0	1	600	0,85	250	1	25
214	300	0	1	600	0,85	250	1	25
215	150	1	1	600	0,85	250	1	25
216	300	1	1	600	0,85	250	1	25
217	150	0	3	600	0,85	250	1	25
218	300	0	3	600	0,85	250	1	25
219	150	1	3	600	0,85	250	1	25
220	300	1	3	600	0,85	250	1	25
221	150	0	1	1000	0,85	250	1	25
222	300	0	1	1000	0,85	250	1	25
223	150	1	1	1000	0,85	250	1	25
224	300	1	1	1000	0,85	250	1	25
225	150	0	3	1000	0,85	250	1	25
226	300	0	3	1000	0,85	250	1	25
227	150	1	3	1000	0,85	250	1	25
228	300	1	3	1000	0,85	250	1	25
229	150	0	1	600	0,75	125	0,5	20
230	300	0	1	600	0,75	125	0,5	20
231	150	1	1	600	0,75	125	0,5	20

Sim	Ag. Init	BigMan	FumHa	MaxProd	Propgrain	RadExp	RatioBov	NbHouse
232	300	1	1	600	0,75	125	0,5	20
233	150	0	3	600	0,75	125	0,5	20
234	300	0	3	600	0,75	125	0,5	20
235	150	1	3	600	0,75	125	0,5	20
236	300	1	3	600	0,75	125	0,5	20
237	150	0	1	1000	0,75	125	0,5	20
238	300	0	1	1000	0,75	125	0,5	20
239	150	1	1	1000	0,75	125	0,5	20
240	300	1	1	1000	0,75	125	0,5	20
241	150	0	3	1000	0,75	125	0,5	20
242	300	0	3	1000	0,75	125	0,5	20
243	150	1	3	1000	0,75	125	0,5	20
244	300	1	3	1000	0,75	125	0,5	20
245	150	0	1	600	0,85	125	0,5	20
246	300	0	1	600	0,85	125	0,5	20
247	150	1	1	600	0,85	125	0,5	20
248	300	1	1	600	0,85	125	0,5	20
249	150	0	3	600	0,85	125	0,5	20
250	300	0	3	600	0,85	125	0,5	20
251	150	1	3	600	0,85	125	0,5	20
252	300	1	3	600	0,85	125	0,5	20
253	150	0	1	1000	0,85	125	0,5	20
254	300	0	1	1000	0,85	125	0,5	20
255	150	1	1	1000	0,85	125	0,5	20
256	300	1	1	1000	0,85	125	0,5	20
257	150	0	3	1000	0,85	125	0,5	20
258	300	0	3	1000	0,85	125	0,5	20
259	150	1	3	1000	0,85	125	0,5	20
260	300	1	3	1000	0,85	125	0,5	20
261	150	0	1	600	0,75	250	0,5	20
262	300	0	1	600	0,75	250	0,5	20
263	150	1	1	600	0,75	250	0,5	20
264	300	1	1	600	0,75	250	0,5	20
265	150	0	3	600	0,75	250	0,5	20
266	300	0	3	600	0,75	250	0,5	20
267	150	1	3	600	0,75	250	0,5	20
268	300	1	3	600	0,75	250	0,5	20
269	150	0	1	1000	0,75	250	0,5	20
270	300	0	1	1000	0,75	250	0,5	20
271	150	1	1	1000	0,75	250	0,5	20
272	300	1	1	1000	0,75	250	0,5	20
273	150	0	3	1000	0,75	250	0,5	20
274	300	0	3	1000	0,75	250	0,5	20

Sim	Ag. Init	BigMan	FumHa	MaxProd	Propgrain	RadExp	RatioBov	NbHouse
275	150	1	3	1000	0,75	250	0,5	20
276	300	1	3	1000	0,75	250	0,5	20
277	150	0	1	600	0,85	250	0,5	20
278	300	0	1	600	0,85	250	0,5	20
279	150	1	1	600	0,85	250	0,5	20
280	300	1	1	600	0,85	250	0,5	20
281	150	0	3	600	0,85	250	0,5	20
282	300	0	3	600	0,85	250	0,5	20
283	150	1	3	600	0,85	250	0,5	20
284	300	1	3	600	0,85	250	0,5	20
285	150	0	1	1000	0,85	250	0,5	20
286	300	0	1	1000	0,85	250	0,5	20
287	150	1	1	1000	0,85	250	0,5	20
288	300	1	1	1000	0,85	250	0,5	20
289	150	0	3	1000	0,85	250	0,5	20
290	300	0	3	1000	0,85	250	0,5	20
291	150	1	3	1000	0,85	250	0,5	20
292	300	1	3	1000	0,85	250	0,5	20
293	150	0	1	600	0,75	125	1	20
294	300	0	1	600	0,75	125	1	20
295	150	1	1	600	0,75	125	1	20
296	300	1	1	600	0,75	125	1	20
297	150	0	3	600	0,75	125	1	20
298	300	0	3	600	0,75	125	1	20
299	150	1	3	600	0,75	125	1	20
300	300	1	3	600	0,75	125	1	20
301	150	0	1	1000	0,75	125	1	20
302	300	0	1	1000	0,75	125	1	20
303	150	1	1	1000	0,75	125	1	20
304	300	1	1	1000	0,75	125	1	20
305	150	0	3	1000	0,75	125	1	20
306	300	0	3	1000	0,75	125	1	20
307	150	1	3	1000	0,75	125	1	20
308	300	1	3	1000	0,75	125	1	20
309	150	0	1	600	0,85	125	1	20
310	300	0	1	600	0,85	125	1	20
311	150	1	1	600	0,85	125	1	20
312	300	1	1	600	0,85	125	1	20
313	150	0	3	600	0,85	125	1	20
314	300	0	3	600	0,85	125	1	20
315	150	1	3	600	0,85	125	1	20
316	300	1	3	600	0,85	125	1	20
317	150	0	1	1000	0,85	125	1	20

Sim	Ag. Init	BigMan	FumHa	MaxProd	Propgrain	RadExp	RatioBov	NbHouse
318	300	0	1	1000	0,85	125	1	20
319	150	1	1	1000	0,85	125	1	20
320	300	1	1	1000	0,85	125	1	20
321	150	0	3	1000	0,85	125	1	20
322	300	0	3	1000	0,85	125	1	20
323	150	1	3	1000	0,85	125	1	20
324	300	1	3	1000	0,85	125	1	20
325	150	0	1	600	0,75	250	1	20
326	300	0	1	600	0,75	250	1	20
327	150	1	1	600	0,75	250	1	20
328	300	1	1	600	0,75	250	1	20
329	150	0	3	600	0,75	250	1	20
330	300	0	3	600	0,75	250	1	20
331	150	1	3	600	0,75	250	1	20
332	300	1	3	600	0,75	250	1	20
333	150	0	1	1000	0,75	250	1	20
334	300	0	1	1000	0,75	250	1	20
335	150	1	1	1000	0,75	250	1	20
336	300	1	1	1000	0,75	250	1	20
337	150	0	3	1000	0,75	250	1	20
338	300	0	3	1000	0,75	250	1	20
339	150	1	3	1000	0,75	250	1	20
340	300	1	3	1000	0,75	250	1	20
341	150	0	1	600	0,85	250	1	20
342	300	0	1	600	0,85	250	1	20
343	150	1	1	600	0,85	250	1	20
344	300	1	1	600	0,85	250	1	20
345	150	0	3	600	0,85	250	1	20
346	300	0	3	600	0,85	250	1	20
347	150	1	3	600	0,85	250	1	20
348	300	1	3	600	0,85	250	1	20
349	150	0	1	1000	0,85	250	1	20
350	300	0	1	1000	0,85	250	1	20
351	150	1	1	1000	0,85	250	1	20
352	300	1	1	1000	0,85	250	1	20
353	150	0	3	1000	0,85	250	1	20
354	300	0	3	1000	0,85	250	1	20
355	150	1	3	1000	0,85	250	1	20
356	300	1	3	1000	0,85	250	1	20

Annexe D : Contenus du CD-Rom

Un CD-Rom est fourni joint à cette thèse. Trois dossiers sont présents :

-databaseC14 : ce dossier contient le tableau avec toutes les dates au radiocarbone qui ont été publiées dans l'annexe A, avec la possibilité de sélection, tri et géo-localisation des données.

-databaseBEAN : ce dossier contient le tableau qui comprend tous les 787 sites archéologiques du Néolithique Ancien des Balkans et leur couches différentes, pour un total de 1454 entrées. Les coordonnées géographiques X et Y des sites archéologiques sont présentes, ainsi que toutes les informations complémentaires décrites dans le paragraphe 3.1.

-scriptsSQL : des scripts SQL sont présents dans ce dossier. Ces scripts sont numérotés et commentés, et ont été utilisés pour l'extraction des données en sortie produites par les simulations, comme décrit dans la thèse.

Résumé :

La thématique de l'expansion du système agricole depuis l'Anatolie vers les Balkans est depuis longtemps un important sujet de recherche. Les approches archéologiques classiques ont permis de mieux comprendre le parcours et le temps de cette expansion, mais ils n'expliquent rien de ce qui n'est pas observable dans les traces archéologiques : notamment, la structure socio-économique d'une société agricole préhistorique.

Dans cette thèse, un modèle de type multi-agents a été utilisé pour explorer ces éléments qui sont invisibles en archéologie. Ce modèle, appelé BEAN (Bridging European and Anatolian Neolithic), consiste en une adaptation du modèle OBRESOC (Un OBservatoire RETrospectif d'une SOCiété archéologique). OBRESOC avait été créé pour simuler l'expansion des agriculteurs rubanées en Europe Centrale, et a été modifié pour s'adapter au contexte archéologique balkanique.

L'expansion des premiers agriculteurs Balkaniques est simulée en combinant des données archéologiques avec des inférences ethnohistoriques et paléodémographiques. Un environnement réaliste a été modélisé, où les zones d'optimum agricole sont déterminées par des estimations de la météorologie et de la fertilité des sols. Chaque agent correspond à un foyer domestique ; les agents interagissent dans cet environnement en suivant des modèles partiels intermédiaires socioéconomiques qui déterminent les règles de leur comportement. Par exemple : maisons avec des familles nucléaires ; système agricole intensif sur des petits champs avec chasse et cueillette complémentaires ; expansion déterminée par le *scalar stress* villageois ; réseaux de solidarité entre apparentés ; disettes et famines causées par des événements météorologiques. De cette façon, le modèle simule le fonctionnement et l'expansion géographique d'une société agricole Néolithique.

De nombreuses simulations ont été effectuées, en faisant varier les paramètres les plus importants, identifiés grâce à une analyse de sensibilité. L'adhérence entre les données archéologiques et les données simulées a été mesurée principalement avec des critères géographiques : la simulation qui produit le patron d'expansion simulé qui coïncide le mieux avec l'expansion archéologique est considérée la meilleure.

Des procédures spécifiques ont été créées pour manipuler la grande quantité de données simulées produites par le modèle. L'observation de ces données a permis l'exploration de certains aspects qui sont invisibles en archéologie ; par exemple, le modèle a aidé à questionner des croyances archéologiques basées sur des hypothèses qui n'étaient pas vérifiables autrement. Le modèle a permis aussi l'exploration d'autres sujets, comme la comparaison entre le front pionnier de colonisation et les

zones d'ancienne occupation, ainsi que l'influence de la météorologie sur l'expansion du système agricole.

Le modèle a produit des patrons d'expansion qui adhèrent, géographiquement et chronologiquement, à l'expansion suggérée par les traces archéologiques. L'exploration des sorties socio-économiques a permis la formulation de nouvelles hypothèses qui ne pourraient pas être faites simplement sur la base de ce qui est trouvé dans les vestiges archéologiques. Même quand il y a un large écart entre ce qui est observé en archéologie et ce qui est produit par le modèle, cette approche de modélisation multi-agents ouvre à des nouvelles questions, en ajoutant de nouvelles idées et perspectives à la recherche actuelle.

Title : Agent-based modelling in archaeology : the expansion of the first Balkan farmers.
Adaptation of the OBRESOC model ; manipulation and exploration of the simulated data.

Abstract :

A topic of great importance in archaeological research throughout the last decades concerns the expansion of the first farmers from Anatolia through the Balkans. The standard archaeological approaches allowed the understanding of the path and timing of this expansion; however, they lack explanation of what is unobservable in the archaeological record: in particular, the socio-economic structure of a prehistoric farming society.

Throughout this thesis, an agent-based model was built in order to explore those elements which are hidden in archaeology. This model, called BEAN (Bridging European and Anatolian Neolithic), is an adaptation of the OBRESOC model (*Un OBservatoire RETrospectif d'une SOCIété archéologique*). OBRESOC was created to simulate the expansion of the LBK farmers in central Europe, and was adapted to the Balkan archaeological context.

The expansion of the first Neolithic farmers in the Balkans was simulated by combining the archaeological records to ethnohistoric and paleodemographic inferences. A realistic environment has been modelled where the areas of optimum farming are determined by meteorology and soil fertility estimates. An agent corresponds to a household; agents interact on this landscape, following socioeconomic partial intermediate models. For instance: households composed of a nuclear family; intensive farming system on small plot completed by hunting-gathering; expansion determined by *scalar stress* at the hamlet scale; family clan solidarity; shortages and famines caused by

meteorological events). Thus, the model simulates the functioning of the Neolithic farming society and its geographic expansion.

Several simulations have been executed, testing different combinations of the key parameters, identified through a sensitivity analysis. The goodness of fit of simulated data to the archaeological data is measured mostly on geographic criteria : the best simulation is the one that produces the expansion pattern that better fits to the archaeological data.

Specific procedures have been developed in order to process the large amount of data produced by the model. The observation of this data permitted to explore some aspects that are invisible in archaeological record : for example, the model helped to investigate some archaeological beliefs, based on assumptions that could not be verified. The model also permitted the exploration of other topics, such as the comparison between the pioneer front of colonization and the zones of previous occupation, as well as the effect of meteorology on the expansion of the farming system.

The model produced an expansion pattern that corresponds geographically and chronologically to the expansion suggested by the archaeological evidence. The exploration of socio-economic outputs permitted the formulation of new hypothesis that could not be made using purely archaeological record. Even when there's a large gap between what is found in archaeology and what is produced by the model, this agent-based modelling approach helps to raise new questions, adding new ideas and perspective to the actual state of research.

Mots-clés :

Archéologie ; Anthropologie ; Ethnographie ; Géographie ; Modèle multi-agents ; Néolithique Ancien balkanique ; premiers agriculteurs ; Modèle économique ; Modèle démographique ; estimations géo environnementales ; Big data

Keywords :

Archaeology; Anthropology; Ethnography; Geography; Agent-based modelling; Balkans Early Neolithic; First Farmers; Economic Model; Demographic Model; Geo-environmental estimates ; Big data