

Faculté des bioingénieurs

Réévaluation du rôle potentiel de l'éruption de Santorin au XVII^e siècle ACN dans l'effondrement de la civilisation minoenne en Crète : une focalisation sur la vulnérabilité agraire

Auteur : MALHERBE Sophie

Promoteur(s) : Pr. DELMELLE Pierre, Pr. DRIESSEN Jan

Lecteur(s) : Pr. BARET Philippe, Pr. LETESSON Quentin

Année académique 2020-2021

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes promoteurs, les professeurs Pierre Delmelle et Jan Driessen, de m'avoir accordé leur confiance et m'avoir permis de travailler sur un sujet si passionnant. Je veux en particulier remercier le Pr. Delmelle de m'avoir accompagnée, conseillée et aidée tout au long de la réalisation de ce mémoire. Je remercie également les Pr. Philippe Baret et Quentin Letesson pour avoir accepté d'être membres de mon jury.

Merci également au Dr. Benoît Pereira de m'avoir apporté ses connaissances en matière de modélisation et m'avoir encouragée avec enthousiasme dans mon travail.

Je voudrais ensuite remercier mes proches : mes amis Lauranne Alaerts, Nadia Benaïche, Aymeric Conet, Savannah Eeckhout et Maud Henrion, et mon compagnon Matthieu Croo, pour leur soutien infaillible durant toute cette année. Enfin, merci à mes parents de m'avoir aidée dans la relecture de ce travail, et à mes frères pour leur présence discrète et réconfortante.

Résumé

La raison du déclin de la civilisation minoenne, qui s'est installée en Crète en 3000 ACN et a s'est effondrée aux alentours de 1450 ACN, est une question qui taraude la communauté scientifique depuis des décennies. L'une des hypothèses est que l'éruption de Santorin, au XVII^e siècle ACN, fut un élément dévastateur et catalyseur de changements qui, à terme, menèrent au déclin de cette société. Dans ce travail, nous cherchons à évaluer l'impact de cette éruption sur l'agriculture minoenne, puisque l'agriculture est un élément-clef de la subsistance de toute société. Pour ce faire, nous avons représenté le système agraire minoen, comprenant non seulement les cultures et le bétail de l'époque mais aussi les acteurs du système comme l'élite et les paysans minoens, sous forme de réseau grâce au logiciel de visualisation « Gephi ». Le but de cet exercice est de comprendre les relations qui existent au sein de ce système afin d'évaluer, suite à l'éruption de Santorin, les impacts qu'un dépôt de téphra a pu avoir sur ses différents éléments, et donc de comprendre la vulnérabilité de l'agriculture minoenne. Une fois les impacts identifiés, l'analyse réseau a permis de mettre en évidence non seulement les dommages subis par les éléments du système agraire pris séparément, mais aussi les répercussions indirectes de ces dégâts sur l'ensemble du système. L'épaisseur réelle du dépôt de téphra en Crète étant inconnue, nous avons envisagé deux scénarios, l'un d'une épaisseur d'un millimètre et l'autre, de dix millimètres. Nous avons pu déduire que les dégâts aux niveau végétal et animal deviennent rapidement catastrophiques, avec une perte de près de toute la production végétale et d'environ 20 % du cheptel suite à un dépôt de dix millimètres de téphra. De telles diminutions de la quantité de nourriture l'année de l'éruption, avec de probables répercussions les années subséquentes, ont pu engendrer des problèmes de famine et participer à une réforme de la mentalité et de la société minoenne, la faisant basculer vers un mode de gouvernance plus fractionné et un mode de vie plus individualiste. Dans ce cas, la fragilisation du tissu sociétal aurait pu ouvrir la porte à des invasions et, après 1450 ACN, à la soumission des Minoens aux Mycéniens.

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	État de l’art	3
2.1.	La civilisation minoenne et son déclin	3
2.2.	L’éruption de Santorin	6
2.2.1.	Une date controversée	7
2.2.2.	Chronologie de l’éruption	9
2.2.3.	La dispersion du nuage de téphra dans l’atmosphère	11
2.3.	Systèmes agraires et retombées de téphra	13
2.3.1.	Les impacts d’un dépôt de téphra sur la végétation	14
2.3.2.	Les impacts du téphra sur le bétail	17
2.3.3.	Les impacts du téphra sur les infrastructures	18
3.	Objectif du travail	18
4.	Matériel et méthode	19
5.	Résultats	24
5.1.	Le modèle du système agricole	24
5.1.1.	Les ressources en eau	26
5.1.2.	Le bétail	29
5.1.3.	Les acteurs et les productions agricoles	34
5.1.4.	Les cultures	41
5.2.	Les plantes cultivées à la fin de l’Âge du Bronze en Crète	46
5.3.	Impact du téphra sur le système agricole : deux scénarios	50
5.3.1.	Premier scénario : 1 mm de téphra atteint l’île	50
5.3.2.	Deuxième scénario : 10 mm de téphra atteignent l’île	52
6.	Discussion	55
6.1.	Les impacts du téphra sur l’agriculture minoenne	55
6.1.1.	L’eau et les infrastructures	55
6.1.2.	Le bétail	55
6.1.3.	Les cultures	56
6.1.4.	L’épaisseur du dépôt de téphra ayant atteint l’île, et ses implications	59
6.2.	Les changements notables sur les sites archéologiques après l’éruption	61

6.3.	Un rôle pour l'éruption dans le déclin de la civilisation minoenne ?	62
6.4.	Validité de la représentation du système agraire	63
6.5.	Pour aller plus loin	64
6.5.1.	Évaluation de l'épaisseur du dépôt de téphra et de sa remobilisation	64
6.5.2.	Les courbes de fragilité des espèces végétales cultivées à l'époque.....	65
6.5.3.	Les impacts du téphra sur le réseau d'approvisionnement en eau	65
6.5.4.	Une étude multidisciplinaire.....	66
7.	Conclusion	67
8.	Annexes	69
	Annexe 1 : Carte présentant la dispersion du nuage de téphra de l'éruption de Santorin obtenue par krigeage (Athanasas et al., 2017).	69
	Annexe 2 : Modélisation d'isopaques pour une éruption plinienne, coignimbrite et la combinaison des deux, en été et au printemps (Johnston et al., 2012) et isopaques présentés dans des études antérieures.....	70
	Annexe 3 : Tableaux reprenant la nature et l'ampleur des dégâts (1%, 20% et 90% de pertes) causés par le dépôt de différentes épaisseurs de téphra sur les secteurs agricoles de la production de bétail (bœuf et moutons), les biens agricoles (par exemple, le matériel, les terres...) et les cultures (aussi bien la diminution de production que les dégâts causés aux plantes) d'après Wilson et al., 2007.	72
	Annexe 4 : Présentation des sites utilisés pour la modélisation, et itérations de la modélisation du réseau de commerce en mer Egée avant l'éruption de Santorin, immédiatement après, et à long terme, de Knappett et al. (2011).	76
9.	Bibliographie.....	81

Table des figures

Figure 2.1 : Est de la Méditerranée. La flèche noire pointe vers Santorin, présentée en détails à droite (Athanasas et al., 2017).	3
Figure 2.2 : Carte de Crète et localisation des sites archéologiques majeurs. En rouge, ceux où un dépôt de téphra non négligeable a été découvert (voir sections 2.2.3, 5.3 et 6.1), en violet les sites ayant fait l'objet d'une étude palynologique (voir sections 5.1.4, 5.2 et 6.1.3) et en vert le plateau de Lassithi (voir section 5.1.1) (Bottema and Sarpaki, 2003; Driessen et al., 2013; Driessen and Jusseret, 2019; Siart and Eitel, 2013a).	5
Figure 2.3 : Reconstruction de la forme de Santorin avant l'éruption Minoenne. Le symbole de l'arbre représente l'endroit où les oliviers ont été retrouvés (voir section 2.2.1), les lignes épaisses définissent la zone volcanique active (Friedrich and Heinemeier, 2009a)	7
Figure 2.4 : Carte actuelle de Santorin (Friedrich and Heinemeier, 2009a).	7
Figure 2.5 : Carte de l'Est de la Méditerranée illustrant les larges variations dans les épaisseurs de téphra des dépôts terrestres, lacustres et marins de l'éruption de l'Âge du Bronze de Santorin. Lorsqu'une fourchette de valeurs a été fournie, l'épaisseur maximale a été retenue. Le volcan de Santorin est marqué par un triangle noir (Johnston et al., 2012).	10
Figure 2.6: « Graphe semi-logarithmique montrant la relation qui lie l'épaisseur T du dépôt de téphra en fonction de l'aire enclose au sein de la courbe d'iso-épaisseur correspondante. Les deux segments de droite illustrent les comportements distincts des dépôts proximal (pente k_p) et distal (pente k_d). A_{ip} est l'aire totale occupée par le dépôt proximal, elle correspond au point de rupture de pente qui définit les deux segments de droite. T_0 est l'épaisseur maximum du dépôt (Paque, 2019) ».	12
Figure 2.7 : Isopaques modélisées de la dispersion du téphra produit pour (a) une éruption plinienne en été et (b) une éruption plinienne au printemps (Johnston et al., 2012).	13
Figure 2.8 : Téphra déposé à la surface de feuilles suite à une éruption en 2009 du volcan Dukuno, Indonésie (Ayris and Delmelle, 2012). Les rayons du soleil n'atteignent presque plus la surface des feuilles, réduisant la photosynthèse.	14
Figure 2.9 : Dégâts causés à des piments par un dépôt de téphra riche en sels. Eruption du Merapi, Indonésie, 2006 (Jenkins et al., 2014b).	15
Figure 2.10 : Cycle de vie d'une plante (Quinte, 2020).	16
Figure 4.1 : Interface utilisateur de l'outil Gephi (Bastian et al., 2009).	21
Figure 4.2 : Exemple de réseau construit avec l'outil Gephi.	22
Figure 5.1 : Modèle du système agraire minoen à la fin de l'Âge du Bronze.	25
Figure 5.2 : (a) Canalisations d'eau minoenne en terre cuite (Angelakis, 2017) et (b) Citerne minoenne (Angelakis et al., 2013).	27
Figure 5.3 : La place de l'eau souterraine dans le système agraire minoen.	28
Figure 5.4 : La place de l'eau de surface dans le système agraire minoen.	28
Figure 5.5 : La place des précipitations dans le système agraire minoen.	29
Figure 5.6 : La place des bovins dans le système agraire minoen.	32

Figure 5.7: La place des moutons dans le système agraire minoen.	33
Figure 5.8 : La place des chèvres dans le système agraire minoen.....	33
Figure 5.9 : La place des cochons dans le système agraire minoen.....	33
Figure 5.10 : La place des chevaux et ânes dans le système agraire minoen.	34
Figure 5.11 : La place des élites dans le système agraire minoen.	37
Figure 5.12 : La place du stockage dans le système agraire minoen.	37
Figure 5.13 : La place de la population dans le système agraire minoen.	38
Figure 5.14 : La place des pays voisins dans le système agraire minoen.	38
Figure 5.15 : La place du travail agricole dans le système agraire minoen.....	39
Figure 5.16 : La place du fumier dans le système agraire minoen.....	40
Figure 5.17 : La place des productions animales dans le système agraire minoen.	40
Figure 5.18 : Carte des sites archéologiques crétois de l'Âge du Bronze présentant des trouvailles liées aux vignes, vin, olives et à l'huile d'olive (Hamilakis, 1996).	42
Figure 5.19 : La place des arbres fruitiers, céréales, légumineuses et légumes (espèces potagères) dans le système agraire minoen.....	44
Figure 5.20 : La place du lin dans le système agraire minoen.....	44
Figure 5.21 : La place des oliviers dans le système agraire minoen.....	45
Figure 5.22 : La place des vignes dans le système agraire minoen.....	45
Figure 5.23 : La place des pâturages dans le système agraire minoen.	46
Figure 5.24 : Modèle du système agraire minoen à la fin de l'Âge du Bronze, présentant l'explicitation des espèces végétales cultivées, reprises précédemment sous leurs simples familles « Arbres Fruitiers », « Céréales » et « Légumineuses » (Figure 5.1).....	48
Figure 5.25 : Impacts sur le système agraire minoen suite au dépôt d'un millimètre de téphra après l'éruption de Santorin.	51
Figure 5.26 : Impacts sur le système agraire minoen suite au dépôt de dix millimètres de téphra après l'éruption de Santorin.	53
Figure 6.1 : Exemple d'une itération de modélisation du réseau de commerce en Egée avant l'éruption de Santorin. La taille des nœuds reflète leurs populations respectives, et l'épaisseur des liens reflète le trafic annuel entre les sites. L'importance de Théra en tant que lien entre la Crète et le reste de l'Egée est clairement visible (Knappett et al., 2011).	61
Figure 6.2 : Exemple d'une itération de modélisation du réseau de commerce en Egée à long terme, après l'éruption de Santorin (Knappett et al., 2011).	61
Figure 9.1 : Geostatistical prediction map for the dispersion of Minoan tephra over the Eastern Mediterranean, as derived from ordinary kriging. Predicted tephra thicknesses are shown as filled color-graded contours. Coordinate system is WGS84. Filled circles correspond to sites where Minoan tephra has been identified on land, while empty circles correspond to 'absence' sites. 'x' marks the marine spots. Santorini is marked by the solid rectangle. Dashed lines correspond to isopachs of 1 and 10 cm, respectively (Athanasas et al., 2017).	69
Figure 9.2 : Isopaques modélisées de la dispersion du téphra produit pour (a) une éruption plinienne en été et (b) une éruption plinienne au printemps (Johnston et al., 2012).....	70

Figure 9.3 : Isopaques modélisées de la dispersion du téphra produit pour (a) une éruption coignimbrite en été et (b) une éruption coignimbrite au printemps (Johnston et al., 2012)...	70
Figure 9.4 : Isopaques modélisées de la dispersion du téphra produit pour (a) une éruption en été et (b) une éruption au printemps, sur base des données de dépôts marins (Johnston et al., 2012).....	71
Figure 9.5 : Cartes d'isopaques publiées (en cm) : (a) Ninkovich and Heezen (1965), (b) Watkins et al. (1978), (c) Sigurdsson et al (1990), (d) Pyle (1990). La figure 8.5(a) ne montre que la distribution générale du téphra, la publication originale ne contenant pas de valeur d'isopaque (Johnston et al., 2012).	71
Figure 9.6 : La mer Egée, avec les 39 sites sélectionnés pour la génération du réseau de commerce maritime : 1. Knossos, 2. Malia, 3. Phaistos, 4. Kommos, 5. Ayia Triadha, 6. Palaikastro, 7. Zarkos, 8. Gournia, 9. Chania, 10. Thera, 11. Phylakopi, 12. Kastri, 13. Naxos, 14. Kea, 15. Karpathos, 16. Rhodes, 17. Kos, 18. Miletus, 19. Iasos, 20. Samos, 21. Petras, 22. Rethymnon, 23. Paroikia, 24. Amorgos, 25. Ios, 26. Aegina, 27. Mycenae, 28. Ayios Stephanos, 29. Lavrion, 30. Kasos, 31. Kalymnos, 32. Myndus, 33. Cesme, 34. Akbuk, 35. Menelaion, 36. Argos, 37. Lerna, 38. Asine, 39. Eleusis.	76
Figure 9.7 : Deux exemples d'itération du modèle pour des valeurs identiques de paramètres. La taille des nœuds reflète les populations respectives des sites, l'épaisseur des liens reflète le trafic annuel entre les sites. Dans les deux cas, l'importance de Théra et le reste de l'Egée est clairement visible.....	77
Figure 9.8 : Deux exemples d'itération du modèle pour des valeurs identiques de paramètres lorsque Théra est retirée du modèle. La population totale et le commerce sont essentiellement inchangés par rapport à avant l'éruption.	78
Figure 9.9 : Trois exemples d'itération du modèle dans lesquels, en commençant avec les valeurs des paramètres de la Figure 8.8, les coûts de maintien des liens sont augmentés.....	80

Table des Tableaux

Tableau 4.1 : Quantité de téphra occasionnant 1%, 20% et 90% de pertes dans les secteurs agricoles de Nouvelle Zélande d'après Wilson et al. (2007). Les pertes peuvent se présenter aussi bien au niveau de la production, qui est en partie perdue suite au dépôt de téphra (par exemple, la perte de l'entièreté des raisins produits dans le cas d'un dépôt de 50 mm), que des biens agricoles qui peuvent être endommagés (par exemple, une perte d'environ 20% des pieds de vignes dans le cas d'un dépôt de 50 mm, affectant donc la production viticole l'année de l'éruption, mais aussi par la suite).	23
Tableau 5.1 : Technologies utilisées pour l'approvisionnement en eau et pour le drainage (* probable) (Gorokhovich et al., 2011).....	26
Tableau 5.2 : Proportion des ossements animaux retrouvés à Palaikastro pour la période du MR (Livarda et al., 2021), production de fumier par un individu de chaque espèce (Halstead, 2014; Texier et al., 2004) et calcul de la part de fumier totale produite par chaque espèce. MinAU = Minimum Number of Anatomical Units, le nombre minimum d'unités anatomiques.	32
Tableau 5.3 : Plantes cultivées en Crète minoenne, attestées par l'archéologie et la palynologie.	47
Tableau 5.4 : Calendrier des cultures exploitées à l'époque minoenne avant l'éruption de Santorin.	49
Tableau 5.5 : Synthèse des impacts directs du téphra sur les différentes entités de notre modèle touchées pour nos deux scénarios : 1 mm et 10 mm de téphra se déposant sur la Crète. Forces de l'impact : faible (1 à 19% de pertes), moyen (20 à 49% de pertes), fort (50 à 100% de pertes) et non quantifié.	54
Tableau 9.1 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur la production de bœufs.	72
Tableau 9.2 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur la production de moutons et de gibier (cervidés).	72
Tableau 9.3 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les biens agricoles.....	73
Tableau 9.4 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les légumes à feuilles.....	73
Tableau 9.5 : Ratios et justification des dégâts au téphra sur les fruits.....	73
Tableau 9.6 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les légumes racines.....	74
Tableau 9.7 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur la production des arbres fruitiers.	74
Tableau 9.8 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur la production des vignes....	74
Tableau 9.9 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les biens liés aux plantes annuelles.....	75
Tableau 9.10 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les biens liés aux plantes pérennes.....	75
Tableau 9.11 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les vignes	75

1. Introduction

La civilisation minoenne, l'une des plus sophistiquées de l'histoire antique, a fait son apparition en Crète vers 3000 ACN et s'est effondrée aux alentours de 1450 ACN pour être supplantée par la civilisation mycénienne. La raison de ce déclin, qui intrigue les sciences dures comme les sciences humaines depuis plusieurs décennies, reste à ce jour un sujet controversé (Athanasas et al., 2017; Driessen, 2019; Driessen and Macdonald, 1997; Druitt et al., 2019; Knappett et al., 2011). L'une des hypothèses est que l'éruption du volcan Santorin, sur l'île de Théra (ou Santorin) située à une centaine de km au Nord de la Crète, constitua un événement suffisamment dévastateur pour catalyser le déclin des Minoens (Marinatos, 1939). La date de l'éruption, l'une des plus violentes de l'histoire de l'humanité (Druitt et al., 2019; Friedrich and Heinemeier, 2009a), n'est pas connue avec exactitude ; elle oscille selon les sources entre 1627 et 1510 ACN (Friedrich, 2006; Friedrich and Heinemeier, 2009a; Heinemeier et al., 2009; Höflmayer, 2012, à paraître; Manning et al., 2014; Warren, 2009). Toutefois, il semble bien établi que plusieurs générations séparent la catastrophe volcanique de la chute de la civilisation minoenne. Est-il dès lors plausible d'attribuer le déclin des minoens à l'éruption de Santorin ?

Les fouilles archéologiques attestent de nombreux changements en Crète après l'éruption, comme des abandons de sites, l'apparition de nouveaux objets ou encore un changement de divinité. Il semble donc légitime de penser que l'éruption a apposé son empreinte sur plusieurs aspects de la société minoenne (notamment Bottema and Sarpaki, 2003; Driessen, 2015; Driessen and Macdonald, 1997; Soles, 2009). Le Santorin a émis des quantités phénoménales de téphra (les pyroclastes ou fragments solides produits par la rupture du magma éjecté au cours d'une éruption volcanique), estimées à environ $XX \text{ km}^3$. La dispersion et le dépôt de ces matériaux peut engendrer des impacts sur les écosystèmes et les infrastructures conséquents et à grande échelle (plusieurs dizaines à centaines de milliers de km^2) (Ayrís and Delmelle, 2012; Jenkins et al., 2014b). L'agriculteur est très souvent le secteur le plus touché par les retombées de téphra, menant à des pertes financières colossales (Bosi and MIAVITA Group, 2012; Craig, 2015a). La sécurité alimentaire de régions entières peut être menacée pour des périodes plus ou moins longues. Il est très vraisemblable que des chutes de téphra émis durant l'éruption de Santorin ont affecté la Crète minoenne, à tout le moins la partie orientale de l'île (Driessen, 2019). Nous pouvons donc supposer des impacts négatifs sur l'agriculture, en ce compris les cultures et le bétail.

Les études archéologiques et anthropologiques nous apprennent aujourd'hui qu'il n'y a pas de catastrophe naturelle, mais plutôt un risque constitué par la relation entre un aléa et une vulnérabilité. L'aléa naturel existe, mais c'est le contexte social qui va le transformer en catastrophe ou en simple gêne (Oliver-Smith, 1996a; Oliver-Smith and Hoffman, 2002a). La catastrophe peut prendre du temps à émerger au sein de la société qui a été exposée à l'aléa et elle peut perdurer durant des décennies après l'évènement déclencheur. L'agriculture est la

base de toutes les sociétés et il est indubitable que la vulnérabilité de l'agriculture face aux retombées de téphra conditionne fortement la réponse à court et long terme de la société qui a été impactée. Ceci est encore plus vrai dans le contexte des sociétés anciennes, comme le démontrent des travaux réalisés en Amérique Latine et en Océanie (Blong, 1984; Chester, 1993). Dans ce contexte, la question centrale qui se pose a trait à la vulnérabilité de l'agriculture crétoise face à l'aléa volcanique au temps des minoens. À ce jour, aucune étude n'a envisagé cet aspect comme un élément explicatif de l'effondrement de la société minoenne après l'éruption du volcan Santorin.

Pour les éruptions anciennes, il est difficile de corréler des enregistrements géologiques des retombées de téphra (notamment l'épaisseur du dépôt) directement avec des impacts sur l'agriculture. Les recherches archéologiques offrent ici des informations utiles, puisqu'elles peuvent révéler la présence de certaines plantes cultivées, le type d'animaux élevés, l'utilisation de certaines pratiques agricoles à des périodes données. Malheureusement, ces informations sont souvent morcelées... (Halstead, 2014). Or, l'agriculture doit être vue comme un ensemble, un système où chaque élément a sa place et où ces éléments sont reliés les uns aux autres (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018). Nous postulons que pour espérer mieux comprendre la vulnérabilité de l'agriculture crétoise au temps des minoens, la première tâche à accomplir est d'établir le système agraire qui prévalait à l'époque. Pour cela, il faut identifier de manière rigoureuse les différentes composantes de celui-ci et leurs interdépendances. Une telle approche devrait nous permettre d'anticiper les impacts potentiels des retombées de téphra sur les composants spécifiques du système et comment ceux-ci ont pu s'étendre à son ensemble au travers de réactions et rétroactions.

Dans notre travail, nous tâchons de reconstruire le système agraire de la société minoenne. Pour ce faire, une grande variété de données vont être recensées à partir d'études existantes et émanant de disciplines variées (archéologie, volcanologie, agronomie, anthropologie). Cette information sera ensuite traitée en vue de représenter visuellement le système agraire sous forme d'un réseau. Cette représentation dynamique devrait nous permettre, pour la première fois, de poser des hypothèses réalistes quant aux impacts des chutes de téphra de Santorin sur l'agriculture minoenne, et par là sur sa vulnérabilité. Nous évaluons ensuite les répercussions potentielles sur la société crétoise et si de fait, l'éruption de Santorin aurait pu fragiliser celle-ci dans les décennies qui ont suivi la catastrophe et ainsi contribuer éventuellement à son déclin et à son effondrement.

2. État de l'art

2.1. La civilisation minoenne et son déclin

La Crète est habitée au moins depuis ca. 7500 ACN et la civilisation minoenne y est apparue aux alentours de 3000 ACN (Sarpaki, 2009). Depuis 2000 ACN ou peut-être encore avant, cette société florissante développa une culture palatiale, centrée sur des bâtiments publics monumentaux (les « palais »). Ceux-ci revêtaient plusieurs fonctions, en particulier celle d'améliorer la cohésion sociale par le biais d'une série de pratiques rituelles, fêtes et festivals, mais aussi d'assurer la production et le stockage de denrées (Driessen and Jussieret, 2019; Hamilakis, 1999; Roberts, 2019). Il subsiste néanmoins de nombreuses zones d'ombre quant à l'organisation sociale des minoens et l'archéologie ne nous permet pas, à ce jour, de déterminer à quel point ces palais avaient une force d'autorité sur les villages alentours, si les habitants leur devaient des taxes, ou encore s'ils étaient hiérarchisés les uns par rapport aux autres. Si une hiérarchie existait, Cnossos se serait trouvée à sa tête (Driessen, 2019). Il semblerait, quoi qu'eût été l'organisation sociale de l'époque, que les palais contrôlaient les échanges maritimes (Roberts, 2019). La Figure 2.1 présente une carte de l'Est de la Méditerranée, incluant la Crète et Santorin.

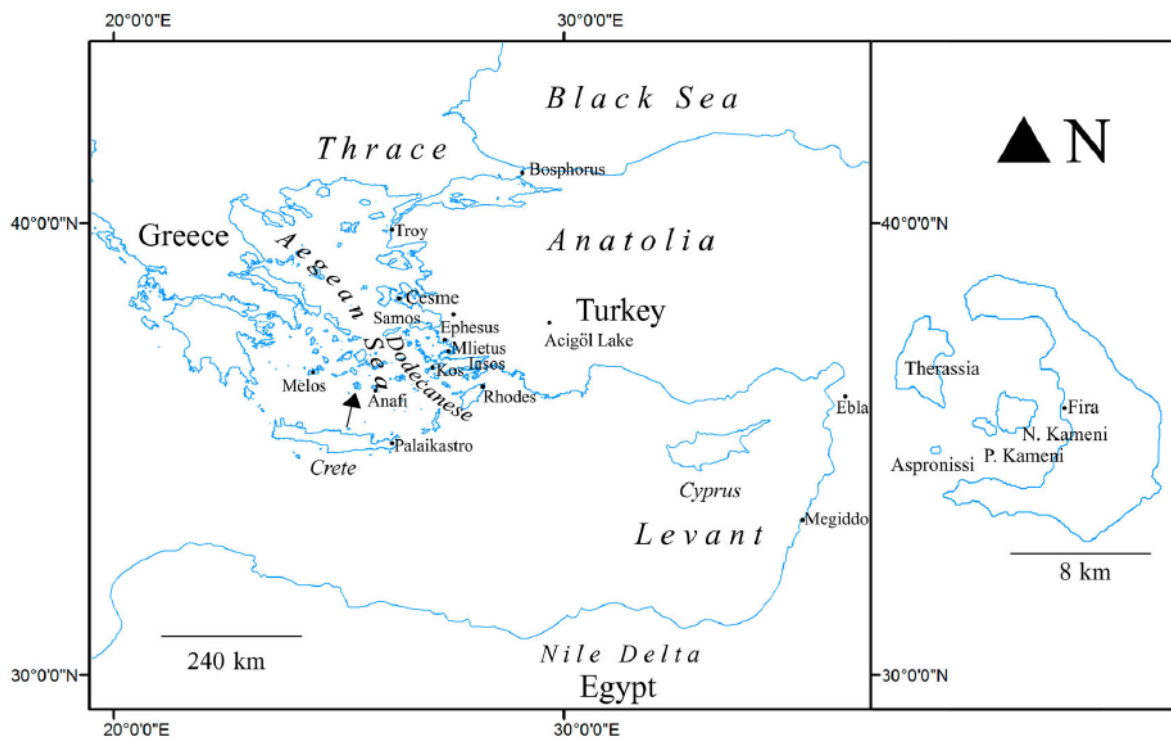


Figure 2.1 : Est de la Méditerranée. La flèche noire pointe vers Santorin, présentée en détails à droite (Athanassas et al., 2017).

La civilisation minoenne, alors florissante, s'est effondrée à la fin du Minoen Récent IB (ou MR IB, une datation de périodes culturelles basées sur des découvertes archéologiques, notamment des styles de poteries), soit aux alentours de 1450 ACN (Driessen, 2019). La majorité des sites crétois furent détruits par des incendies, vraisemblablement à la suite d'une crise interne, d'invasions ou de guerres, peut-être menées par les Mycéniens (Driessen, 2019;

Driessen and Jussereet, 2019; Roberts, 2019). En effet, à la période suivante, le MR II, l'île bascule sous la domination des Mycéniens, qui s'installent au palais de Cnossos et en font la capitale de l'île. Les causes de la disparition de cette société hautement sophistiquée demeurent à ce jour inconnues. À quelques 100 km de la Crète, l'île de Théra (ou Santorin) est dévastée, *grosso modo* à la même période, par une des plus grandes éruptions de l'Holocène (les dix milles dernières années). Cette éruption, connue comme l'éruption du Bronze Récent du volcan Santorin, a été très souvent considérée comme responsable du déclin de la civilisation minoenne Driessen and Macdonald (1997) ; Driessen and Jussereet (2019) ; Siart and Eitel (2013a) ; Druitt et al. (2019) ; Höflmayer (à paraître). Cependant, la date à laquelle cette éruption eut lieu fait toujours débat, mais il semblerait qu'elle précéda de plusieurs générations (voir section 2.2.1) l'effondrement du système palatial en Crète, l'éruption pouvant remonter jusqu'aux alentours de 1630 ACN (Driessen, 2003; Friedrich and Heinemeier, 2009a).

Le décalage temporel entre l'éruption de Santorin et le déclin de la société minoenne est vu par beaucoup comme un argument suffisant pour écarter un quelconque lien de causalité entre les deux événements. Il semble toutefois que certains sites aient été détruits, ou abandonnés, au moment de l'éruption, et peut-être déjà avant celle-ci. En effet, des fouilles archéologiques ont révélé des sites abandonnés immédiatement après l'éruption, où la fin de l'occupation est marquée par le dépôt de téphra. C'est le cas de Sissi, Priniatikos Pyrgos et une partie de Palaikastro, sur la côte Nord-Est de la Crète (Fig. 2.2) L'examen d'autres sites archéologiques ne permet pas de déterminer si l'abandon a eu lieu pendant le MR IA ou à la fin de cette période, qui correspond à l'éruption de Santorin (Driessen, 2019; Driessen and Jussereet, 2019; Driessen and MacDonald, 2000). Des 54 sites occupés pendant le MR IA, seuls 32 restent habités pendant le MR IB, nombre qui chute à environ dix sites au MR II, avant d'augmenter à nouveau (Driessen and MacDonald, 2000).

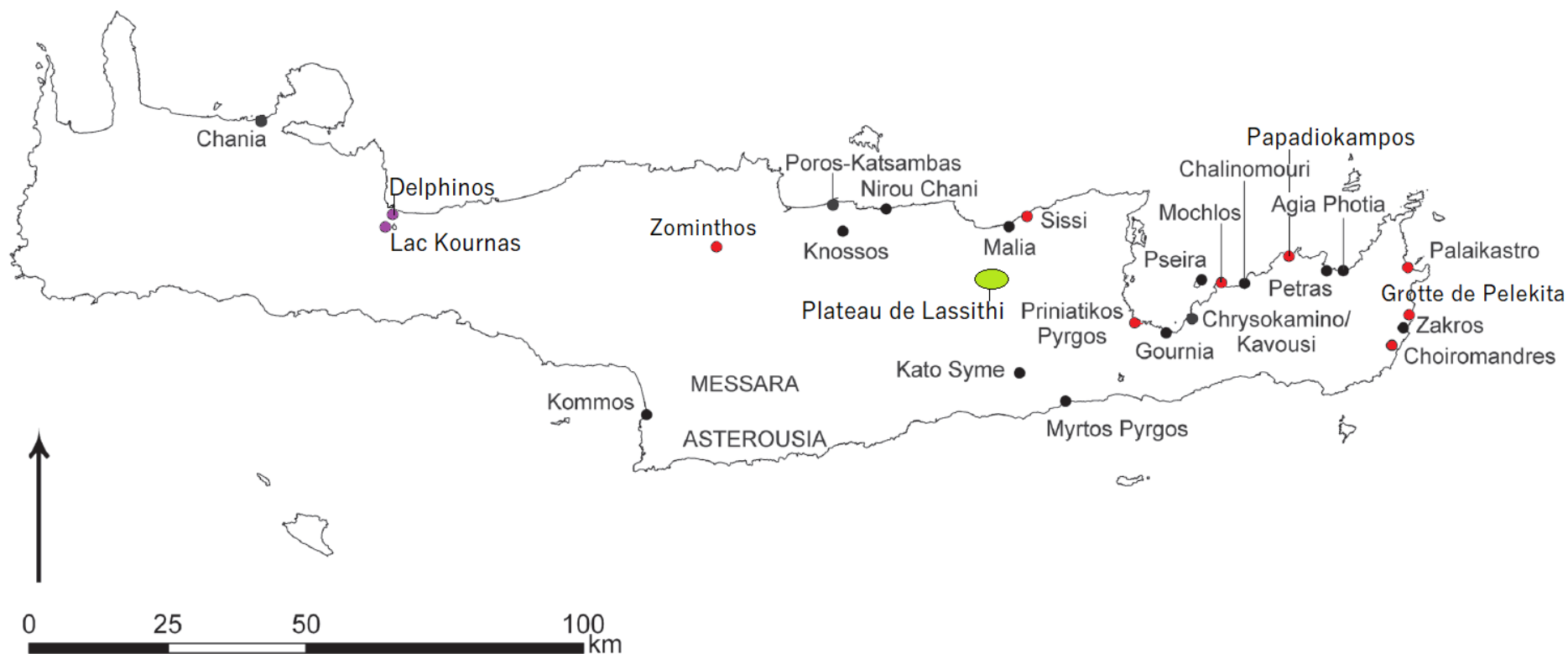


Figure 2.2 : Carte de Crète et localisation des sites archéologiques majeurs. En rouge, ceux où un dépôt de téphra non négligeable a été découvert (voir sections 2.2.3, 5.3 et 6.1), en violet les sites ayant fait l'objet d'une étude palynologique (voir sections 5.1.4, 5.2 et 6.1.3) et en vert le plateau de Lassithi (voir section 5.1.1) (Bottema and Sarpaki, 2003; Driessen et al., 2013; Driessen and Jusseret, 2019; Siart and Eitel, 2013a).

Ces données archéologiques suggèrent un impact de l'éruption sur la population crétoise de l'époque, mais n'indiquent pas son effondrement. La question émergeante est de comprendre si avec le temps, un impact (l'évènement volcanique) peut éventuellement conduire à un désastre (la société qui répond à cet impact). On navigue ici à la confluence entre les sciences naturelle et humaines. Selon Oliver-Smith (1996), un désastre se définit comme « un évènement qui combine un (ou plusieurs) agent(s) potentiellement destructif(s) provenant de l'environnement (...) et une population dans une position de vulnérabilité » (Oliver-Smith, 1996b). Un désastre témoigne donc d'une société qui n'a pas su s'adapter à certains aspects de son environnement, et lorsqu'un tel désastre frappe, il a tendance à affecter la plupart des aspects de la vie de la communauté affectée, de telle sorte que les fonctions essentielles de cette société se retrouvent interrompues ou détruites. C'est bien l'aspect exceptionnel de l'évènement naturel qui en fait un désastre (Oliver-Smith, 1999).

Dans le cas de la Crète et de l'éruption de Santorin, les tremblements de terre qui ont accompagné l'éruption n'ont pas eu d'impact fort au niveau sociétal étant donné leur caractère routinier, caractère que l'éruption-même, amenant du téphra, d'éventuels tsunamis, un assombrissement du ciel et un bruit retentissant, ne partageait pas (Driessen, 2019; Driessen and Jusseret, 2019). En outre, la vulnérabilité n'est pas distribuée de manière égale au sein d'une population donnée (Oliver-Smith, 2015). Les anthropologues s'accordent de plus en plus sur le fait qu'après un désastre, la société impactée ne va pas seulement subir des changements immédiats, mais aussi être influencée par ce désastre dans son évolution à long terme (Oliver-Smith and Hoffman, 2002b). C'est pourquoi il n'est pas impossible que l'éruption de Santorin ait eu un rôle à jouer dans la disparition de la civilisation minoenne, même si plusieurs générations ont vu le jour entre ces deux moments de l'histoire.

2.2. L'éruption de Santorin

L'éruption de Santorin de l'Âge du Bronze, aussi appelée éruption Minoenne ou encore éruption de Théra, est l'une des éruptions volcaniques les plus violentes auxquelles les humains aient été confrontés (Friedrich and Heinemeier, 2009a). Sa magnitude était environ dix fois supérieure à celle de l'éruption du célèbre volcan indonésien Krakatoa en 1883 (Johnston et al., 2014; McCoy, 2009). Avant l'éruption, les îles Théra, Thérasia et Aspronisi formaient un grand ensemble, ne laissant qu'une seule entrée pour la mer entre Aspronisi et l'Ouest d'Akrotiri, et Palea Kameni et Nea Kameni ne formaient qu'une seule île (Fig. 2.3). La configuration actuelle (Fig. 2.4), bien différente, résulte de l'éruption de Santorin qui nous occupe.



Figure 2.3 : Reconstruction de la forme de Santorin avant l'éruption Minoenne. Le symbole de l'arbre représente l'endroit où les oliviers ont été retrouvés (voir section 2.2.1), les lignes épaisses définissent la zone volcanique active (Friedrich and Heinemeier, 2009a).



Figure 2.4 : Carte actuelle de Santorin (Friedrich and Heinemeier, 2009a).

La magnitude d'une éruption volcanique est donnée, à l'instar de l'échelle de Richter pour les tremblements de terre, par son VEI (Index d'Explosivité Volcanique (Newhall and Self, 1982)), une valeur numérique estimée sur base du volume total de débris volcaniques éjectés par l'éruption. Dans le cas de Santorin, les quantités de débris volcaniques retrouvés aussi bien sur la terre ferme qu'au fond de la mer conduisent à estimer un VEI supérieur à 7. À titre de comparaison, l'éruption du Mont Saint Helens en 1980 aux USA avait un VEI de 5, et celle du Krakatoa, de 6 (Siebert et al., 2010).

2.2.1. Une date controversée

Les dates proposées pour l'éruption Minoenne de Santorin recouvrent près d'un siècle d'histoire. Alors que des datations au carbone 14 pointent vers les alentours de 1627-1600 ACN, les archéologues estiment, sur bases de données archéologiques et historiques, une éruption autour de 1510 ACN. La datation d'une branche d'un olivier enfoui vivant dans les débris volcaniques place l'éruption en 1613 +/- 13 ACN (Friedrich, 2006; Friedrich and Heinemeier, 2009a; Heinemeier et al., 2009). La découverte en 2007 d'un deuxième olivier, situé à neuf mètres de distance du premier laisse penser que ces arbres faisaient partie d'une oliveraie appartenant à un village situé au bord de la caldera.

Si cette mesure constitue à ce jour pour certains une preuve solide de la date de l'éruption (Friedrich, 2006; Friedrich and Heinemeier, 2009a; Heinemeier et al., 2009; Höflmayer, à paraître), elle n'en demeure pas moins critiquée par d'autres. Par exemple, Wiener (2009) met en avant les différents biais qui peuvent affecter la teneur en carbone 14 dans les tissus d'une

plante. Cet auteur souligne aussi que la datation d'un même échantillon par deux laboratoires ne donne pas la même date et que l'erreur, en prenant en compte la déviation standard, est de 68.1 ans. Il attire de plus l'attention sur les défaillances des courbes de calibration de la datation au carbone 14, en citant notamment une expérience de datation au Japon sur un arbre daté, par dendrochronologie, de l'an 389 PCN, qui aurait retourné une date erronée de 72 ans. Outre les limitations générales de la datation au carbone 14, Wiener (2009) apporte également un grain de scepticisme au sujet de la branche d'olivier retrouvée sur Théra. Il remet en question le fait que cette branche était bien vivante au moment de l'éruption. Si l'arbre lui-même était peut-être en vie lorsqu'il a été enfoui sous les débris volcaniques, il est possible que des branches étaient déjà mortes bien avant l'enfouissement. Sur base d'autres sources, Wiener (2009) évoque que de nombreux oliviers portent des branches et fragments de branches mortes, certains pouvant rester attachés à l'arbre durant un siècle après leur mort.

Les études archéologiques sèment aussi le trouble quant à la date précise de l'éruption majeure de Santorin. La méthode standard de datation d'un événement tel que celui-ci est de démontrer des liens clairs et séquentiels entre plusieurs cultures pour établir la chronologie relative entre ces cultures, puis d'y appliquer une date absolue basée sur la culture qui est datée de manière absolue. Au Santorin, ce travail a été fait sur base de poteries, en prenant l'Égypte comme culture de référence en matière de datation absolue par Warren (2009). En analysant différents artefacts retrouvés à Mycènes, en Grèce continentale, à Akrotiri et en Égypte, l'auteur tisse une toile de liens chronologiques entre la Grèce continentale (Helladique Récent I et IIA), les Cyclades (Cycladique Récent I), la Crète (MR IA et IB) et Chypre (Chypriote Récent IA), ayant tous été établis de manière indépendante, et montre que ces liens apparaissent tous durant le début de la période égyptienne du Nouveau Royaume (ca. 1540 ACN. Warren (2009) place le début de la période du MR IB autour de 1520-1510 ACN et l'éruption de Santorin peu après le début du Nouveau Royaume en Égypte, vers 1530 ACN. L'auteur souligne par ailleurs que sa conclusion s'appuie sur des séquences d'objets répétées dans le même ordre dans plusieurs cultures parallèles. Notons cependant que la validité de ces liens archéologiques a été contestée (Höflmayer, 2012, à paraître; Manning et al., 2014).

En datation relative, c'est-à-dire en termes de périodes culturelles basées sur des découvertes archéologiques, notamment des styles de poteries, périodes que l'on sait être successives peu importe leur datation absolue, l'éruption de Santorin a eu lieu à la fin du MR IA (Betancourt, 2009; Soles, 2009). En effet, plusieurs sites archéologiques présentent de la poterie datant du MR IA en contact avec, ou directement sous, le téphra de Santorin, alors que de la poterie de style MR IB se trouve directement au-dessus, comme c'est le cas de l'aile Est de la maison C.1 à Mochlos (Soles, 2009) et dans l'aire D du site archéologique de Papadiokambos (Brogan and Sofianou, 2009).

L'éruption de Santorin a rejeté dans l'atmosphère une quantité gigantesque de débris volcaniques, et notamment de téphra, qui se sont dispersés sur l'Est de la Méditerranée (Athanassas et al., 2017; McCoy, 2009). Le dépôt de téphra ainsi généré constitue un excellent marqueur temporel pour cette région. En effet, tous les objets retrouvés sur des sites archéologiques en contact direct – et sans avoir été dérangés – avec les téphra sont contemporains de l'éruption (Friedrich and Heinemeier, 2009a). C'est pourquoi la présence de ce matériau a une importance inégalable en ce qui concerne les datations de l'Egée, de l'Égypte et du Levant (Friedrich and Heinemeier, 2009a), où du téphra provenant de l'éruption de Santorin a été déposé.

2.2.2. Chronologie de l'éruption

La chronologie de l'éruption de Santorin a été décrite dans de nombreux articles et ouvrages scientifiques. Ce qui suit est essentiellement tiré des études qui font référence dans le domaine, notamment (Friedrich and Heinemeier, 2009a) ; (McCoy, 2009) ; (Cioni et al., 2000) ; (Athanassas et al., 2017) ; (Johnston et al., 2014) ; (Druitt et al., 2019).

Différents phénomènes annoncent l'arrivée imminente d'une éruption volcanique. Ceux-ci peuvent durer plusieurs semaines, voire plusieurs mois, et témoignent de l'intrusion de magma frais dans l'édifice volcanique. Il est cependant difficile d'estimer le délai entre les intrusions de magma et l'éruption elle-même, les mécanismes de déclenchement n'étant pas encore bien compris. À Santorin, McCoy (2009) suggère que les habitants de l'île aient pu faire face, pendant les mois précédant l'éruption, à ces signes avant-coureurs. Des émanations diffuses de CO₂ ont pu s'accumuler dans les dépressions topographiques, causant l'asphyxie des plantes et des animaux, et peut-être de quelques personnes. Des tremblements de terre de faible magnitude (cinq ou moins sur l'échelle de Richter) devaient se répéter, favorisant les glissements de terrain. Le remplissage de la chambre magmatique sous le volcan aurait causé un soulèvement de plusieurs centimètres de l'île entière, engendrant l'apparition de nouvelles manifestations hydrothermales de surface, comme les sources chaudes et les fumerolles, et le développement de fractures dans les sols. L'odeur âcre de soufre devait être omniprésente. Une éruption de faible ampleur aurait précédé de quelques mois l'éruption principale. Le téphra déposé par celle-ci sur l'île n'aurait pas excédé quelques millimètres. Ces événements auraient précipité les habitants à s'enfuir de l'île avant que d'y revenir pour entamer les réparations des bâtiments endommagés par les tremblements de terre et le nettoyage des rues d'Akrotiri. Contrairement au destin des habitants de Pompéi lors de l'éruption du Vésuve en 79 PCN, il semblerait que les habitants d'Akrotiri aient fui la cité avant que l'éruption ne fasse rage. En effet, jusqu'à ce jour, seule la dépouille d'une personne âgée a été découverte sous le téphra en 1866 (Driessen and Jusseret, 2019; Evans and McCoy, 2020; Höflmayer, à paraître; McCoy, 2009).

La première phase de l'éruption majeure de Santorin a pris place sur l'antique île de Kameni (aujourd'hui séparée en Nea Kameni et Palea Kameni, Fig. 2.3). Elle a probablement débuté par un tremblement de terre puissant qui a endommagé les bâtiments sur Santorin, à Akrotiri, mais aussi en Crète, notamment à Cnossos, Palaikastro, et Mochlos (Fig. 2.2). S'en est suivi la phase explosive principale de cette éruption, de type plinien, avec l'expulsion violente dans l'atmosphère de pierres ponce, de téphra et de gaz volcaniques (notamment du dioxyde de soufre), enterrant l'île de Théra sous une couche de débris de onze mètres d'épaisseur. La colonne éruptive (le panache volcanique), formée d'un mélange hautement turbulent de gaz et de téphra, aurait atteint une altitude de 40 km. Les vents troposphériques dans la première couche de l'atmosphère ont poussé une partie du panache volcanique vers l'Est et le Sud-Est, alors que les vents stratosphériques au-delà de 10 km d'altitude ont dispersé les matériaux vers l'Est et le Nord-Est. Des dépôts de téphra ont ainsi été retrouvés sur une zone allant de la Mer Noire au Delta du Nil (Fig. 2.5) (Friedrich and Heinemeier, 2009a; Jarriel, 2020; Johnston et al., 2012; McCoy, 2009). Les estimations du volume d'« équivalent de roche dense » (DRE en Anglais) éjecté varient entre 30 et 86 km³ (Driessen and Jusseret, 2019; Johnston et al., 2014).

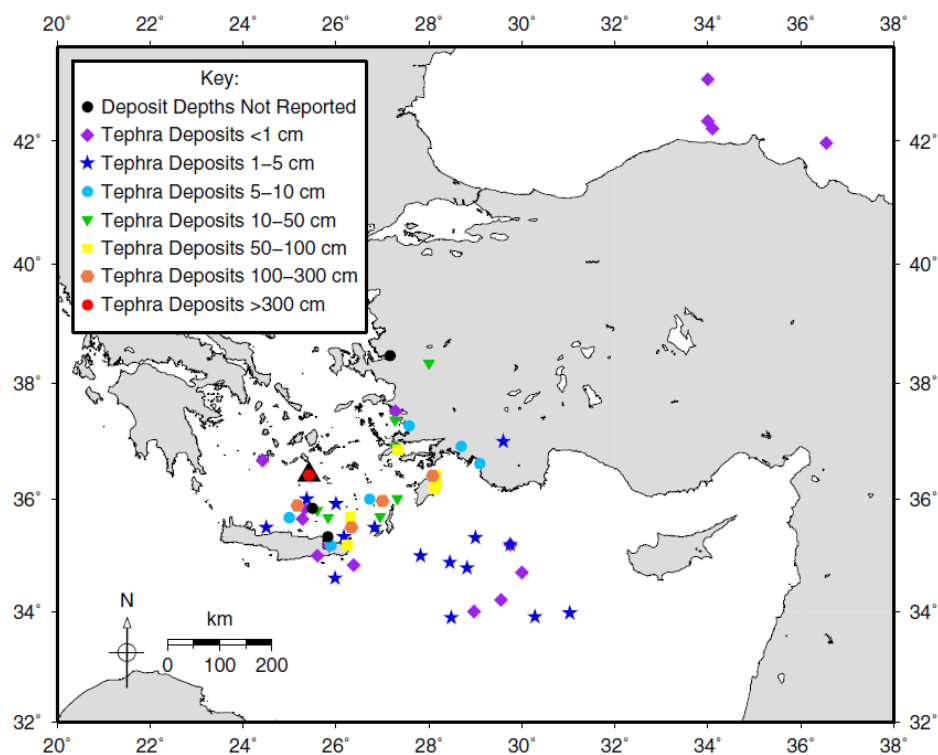


Figure 2.5 : Carte de l'Est de la Méditerranée illustrant les larges variations dans les épaisseurs de téphra des dépôts terrestres, lacustres et marins de l'éruption de l'Âge du Bronze de Santorin. Lorsqu'une fourchette de valeurs a été fournie, l'épaisseur maximale a été retenue. Le volcan de Santorin est marqué par un triangle noir (Johnston et al., 2012).

La deuxième phase de l'éruption de Santorin est caractérisée par l'entrée de l'eau de mer dans le conduit volcanique, ce qui va mener à la génération d'écoulements pyroclastiques (un flux dense de téphra et de gaz pouvant atteindre des températures > 600 °C) extrêmement destructeurs et qui se propagent radialement à grande vitesse (plusieurs centaines de km/h) à partir du volcan. Ces écoulements seront la source de panaches secondaires, nommés nuages

coignimbrites, qui se sont élevés dans la stratosphère et ont été dispersés vers le Nord et le Nord-Est. Par analogie avec des éruptions modernes, comme celle du Krakatoa en 1883, l'entrée des écoulements pyroclastiques dans la mer a probablement engendré des tsunamis, qui se seraient propagés dans toutes les directions depuis Théra. D'immenses « radeaux » de pierres ponce, d'une densité inférieure à 1, se formèrent à la surface de la mer. Lors de l'éruption du Krakatoa, ces accumulations de matériaux volcaniques flottants mesuraient jusqu'à 20 km de long et 3 m d'épaisseur. Ils peuvent dériver durant des mois, voire des années (Friedrich and Heinemeier, 2009a; Friedrich and Sigalas, 2009; McCoy, 2009). Des débris volcaniques sous cette forme ont pu atteindre la Crète, apportés par les vagues. De la pierre ponce a notamment été découverte sur l'île de Pseira, dans le golfe de Mirabello, et à Papadiokampos, près de Petras (Fig. 2.1) (Betancourt, 2009; Brogan and Sofianou, 2009). Werner et al. (2019) et Bruins et al. (2008) passent en revue les connaissances sur le(s) tsunami(s) qui auraient atteint la Crète suite à l'éruption de Santorin. Ce sujet ne fait pas l'objet de notre travail.

Au cours de la troisième phase de l'éruption, le toit de la chambre magmatique s'est effondré et l'eau de mer s'est engouffrée dans l'édifice volcanique. Une ou deux coulées pyroclastiques massives s'en sont suivies et des quantités phénoménales de matériaux se sont accumulées sous la mer ; les dépôts peuvent avoir une épaisseur supérieure à 50 m. La quatrième et dernière phase de l'éruption a vu le retour des écoulements pyroclastiques plus modérés, à l'instar de ceux de la deuxième phase. Des pluies torrentielles auraient emporté une grande partie des téphra déposés sur les flancs de l'île de Santorin, générant ainsi des coulées de boue.

2.2.3. La dispersion du nuage de téphra dans l'atmosphère

La dispersion d'un panache volcanique dans l'atmosphère est régie essentiellement par des facteurs météorologiques et volcaniques (Sparks et al., 1997). L'altitude à laquelle la colonne éruptive est injectée, la stratification des vents, leur direction et leur vitesse, dans la troposphère et la stratosphère vont fortement influencer sur le transport latéral des téphra et des gaz volcaniques. Par ailleurs, le volume de téphra et leur granulométrie vont aussi dicter les distances de transport et leur sédimentation dans l'atmosphère. De manière générale, on observe une décroissance exponentielle de l'épaisseur du dépôt de téphra en fonction de l'éloignement au cratère volcanique. La taille des particules diminue aussi avec la distance (Fig. 2.6) (Pyle, 1989).

Le panache de téphra éjecté lors l'éruption de Santorin a dispersé des téphra sur une grande partie de l'Est de la Méditerranée (Athanassas et al., 2017; McCoy, 2009). L'épaisseur d'origine des dépôts de téphra sur toute cette surface est cependant difficile à estimer, au vu du grand laps de temps qui nous en sépare, et de l'effet de l'érosion sur le matériau. Si un dépôt de téphra est formé dans un paysage vallonné, une partie de celui-ci pourra être remobilisée par

le vent et transportée sur des distances considérables, ou encore être emportée par des précipitations et s'accumuler dans les fonds de vallée.

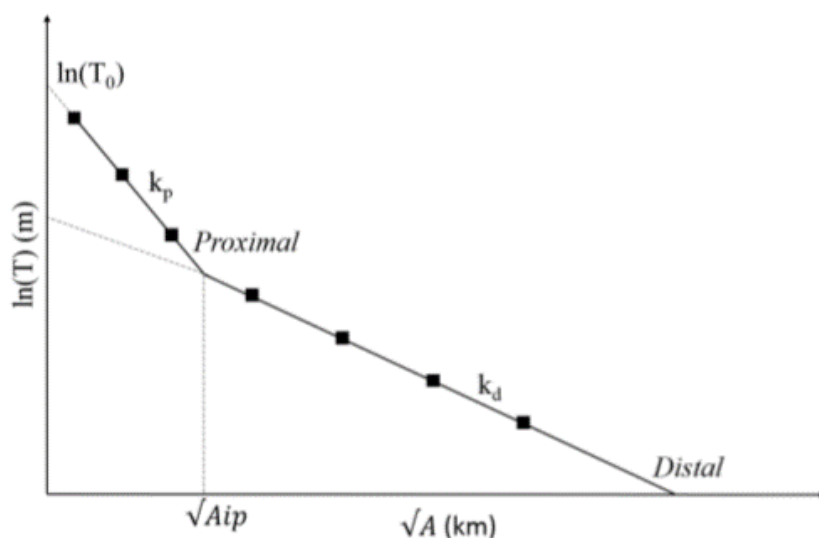


Figure 2.6: « Graphe semi-logarithmique montrant la relation qui lie l'épaisseur T du dépôt de téphra en fonction de l'aire enclose au sein de la courbe d'iso-épaisseur correspondante. Les deux segments de droite illustrent les comportements distincts des dépôts proximal (pente k_p) et distal (pente k_d). A_{ip} est l'aire totale occupée par le dépôt proximal, elle correspond au point de rupture de pente qui définit les deux segments de droite. T_0 est l'épaisseur maximum du dépôt (Paque, 2019) ».

En ce qui concerne les retombées de téphra en Crète, située à une centaine de kilomètres de l'île de Santorin, celles-ci devaient correspondre à un matériau relativement fin (inférieur à quelques centaines de μm). Seules les parties orientale et centrale de l'île auraient été affectées par les dépôts volcaniques (Driessen, 2019). Les nombreux avis sur la question de l'épaisseur du dépôt ainsi que sur son étendue divergent. McCoy (2009) suggère que le dépôt a pu dépasser les 15 cm d'épaisseur, en précisant que la majeure partie se serait rapidement mélangée ou sol d'une part, et aurait été érodée et redéposée dans des dépressions et sur les fonds marins d'autre part.

Quelques tentatives de modélisation spatiale des dépôts ont aussi été réalisées. Nous citerons les deux principales. Athanassas *et al.* (2017) ont tenté de reconstituer la dispersion du panache volcanique en se basant sur des découvertes archéologiques de téphra sur différents sites de la méditerranée et en appliquant une méthode de krigeage (« une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui prévoit la valeur d'un phénomène naturel en des sites non échantillonnés par une combinaison linéaire sans biais et à variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins » (Baillargeon, 2005)) (la carte des dépôt obtenue est reprise à l'Annexe 1). Cependant, il convient de ne pas donner trop de valeur à cette carte car le krigeage est basé sur un nombre de trouvailles limité.

Une autre étude (Johnston *et al.* 2012) a simulé la dispersion et la sédimentation du téphra de l'éruption de Santorin à l'aide du modèle semi-analytique TEPHRA2, prenant en compte

notamment la hauteur de la colonne éruptive, le volume de matériaux émis et la direction des vents dominants. La modélisation a été réalisée pour des vents de printemps et d'été, et pour trois types d'éruption (plinienne, coignimbrite et les deux types combinés). Comme discuté à la section suivante, la période la plus probable pour l'éruption de Santorin est le début de l'été. Bien qu'il faille rester prudent quant aux résultats des simulations numériques, qui sont affectés par de nombreuses incertitudes, la modélisation est en accord avec cette hypothèse, puisqu'elle prédit la formation d'un dépôt de téphra (quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres) en Crète en été mais pas au printemps. La Figure 2.7 montre les résultats de modélisation d'une éruption plinienne de Santorin en été. L'ensemble des cartes d'isopaques (« ligne stratigraphique correspondant au lieu de tous les points d'épaisseur égale, notamment d'une couche sédimentaire » (Encyclopædia Universalis France, 2021)) obtenues sont présentées à l'Annexe 2, ainsi que les isopaques d'études précédentes reprises dans l'article de Johnston et al. (2012).

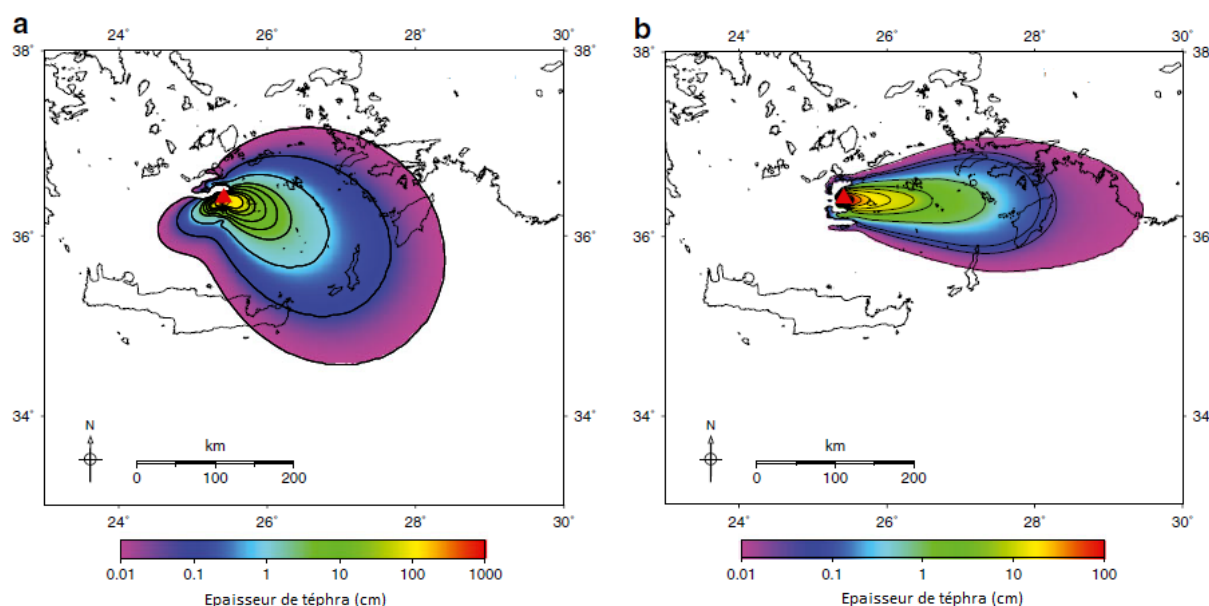


Figure 2.7 : Isopaques modélisées de la dispersion du téphra produit pour (a) une éruption plinienne en été et (b) une éruption plinienne au printemps (Johnston et al., 2012).

2.3. Systèmes agraires et retombées de téphra

« Un système agraire désigne le fonctionnement d'un type d'agriculture en lien avec une société humaine dans un environnement donné. La taille et la forme des parcelles, la répartition de la propriété foncière, le poids respectif des cultures et de l'élevage, le type d'irrigation, ou encore le choix des productions, sont des composantes du système agraire et résultent des séries de décisions collectives des sociétés qui l'ont mis en place et fait évoluer (et des rapports de force entre groupes sociaux) (Bouron, 2019). »

2.3.1. Les impacts d'un dépôt de téphra sur la végétation

Un dépôt de téphra, quelle que soit son épaisseur, peut engendrer différents impacts sur la végétation qu'il atteint. Au niveau de son intégrité physique, l'accumulation de téphra sur une plante entraîne des dommages structurels. On assiste à l'abscission prématurée de feuilles et de fruits (Ayrís and Delmelle, 2012) et, si le dépôt s'avère trop lourd, à la cassure de branches, dans le cas d'arbres, arbustes et buissons, ou la verse dans le cas de plantes herbacées (Ayrís and Delmelle, 2012; Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2007). La morphologie d'une plante donnée modifie la quantité de téphra retenues sur ses feuilles. L'éruption du Mont Sant Helens en 1980 a montré que les feuilles et fruits pubescents favorisent cette rétention (Cook et al., 1981). À l'inverse, des feuilles lisses et cireuses présentent la tendance opposée (Smith and Staskawicz, 1977). Les plantes dont la hauteur est inférieure à l'épaisseur du dépôt de téphra risquent d'être étouffées (Ayrís and Delmelle, 2012; Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2007).

Le dépôt de téphra sur le feuillage réduit l'efficacité de la photosynthèse, non seulement en causant l'abscission de certaines feuilles, mais aussi en réduisant la quantité de radiation solaire atteignant les feuilles encore en place (Fig. 2.8) (Ayrís and Delmelle, 2012; Craig, 2015b; Wilson et al., 2007). De plus, le téphra étant abrasif, il peut endommager la cuticule des feuilles et la peau des fruits (Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2007). Le téphra peut également porter des sels, notamment de l'halite (chlorure de sodium), qui se dissolvent lors d'un contact avec de l'eau. Dans ce cas, des brûlures chimiques et des nécroses peuvent apparaître sur les feuilles et fruits sur lesquels le téphra est présent (Fig. 2.9) (Ayrís and Delmelle, 2012; Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b). En général, les plantes qui ont été exposées à des retombées de téphra montrent une croissance réduite et, dans le cas des cultures, une diminution de rendement pouvant aller jusqu'à la perte totale de la récolte.



Figure 2.8 : Téphra déposé à la surface de feuilles suite à une éruption en 2009 du volcan Dukuno, Indonésie (Ayrís and Delmelle, 2012). Les rayons du soleil n'atteignent presque plus la surface des feuilles, réduisant la photosynthèse.



Figure 2.9 : Dégâts causés à des piments par un dépôt de téphra riche en sels. Eruption du Merapi, Indonésie, 2006 (Jenkins et al., 2014b).

Un dépôt de téphra sur les sols peut modifier leurs propriétés physiques. La cimentation et l'encroustement des téphra réduisent l'infiltration et affectent les transferts de gaz, d'eau et de chaleur (Ayrès and Delmelle, 2012; Craig, 2015b; McCoy, 2009). La couche de téphra augmente souvent l'albédo du sol. À l'inverse, le dépôt de téphra peut être à terme bénéfique pour la croissance de la plante. En agissant comme un mulch, il limite l'évapotranspiration et favorise la rétention d'eau (Craig, 2015b). Par le biais de l'altération chimique, il est aussi une source de nutriments essentiels comme le potassium et le phosphore.

Notons enfin que les conditions climatiques ont un rôle important dans l'impact d'un dépôt de téphra (Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2007). En effet, une pluie suffisamment importante après un dépôt de faible épaisseur peut laver les plantes (Craig, 2015b; Wilson et al., 2007) et limiter les effets de réduction de photosynthèse et d'abrasion. À l'inverse, une pluie modérée – voire la simple rosée matinale – peut amener à une cimentation du téphra sur les sols et les feuilles et aggraver le problème, comme ce fut le cas au Mont St. Helens en 1980 (Ayrès and Delmelle, 2012; Craig, 2015b). Enfin, la remobilisation du téphra par le vent et les précipitations peut également influencer les impacts à long terme d'un dépôt de téphra volcaniques (Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b).

La saison à laquelle une éruption se produit dicte une grande partie des impacts sur la végétation (Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2007). En effet, comme l'illustre la Figure 2.10, le développement d'une plante comporte différents stades. Selon Wilson et al. (2007), pour un dépôt de téphra inférieur à 100 mm, la réduction de productivité sera plus marquée si l'éruption se produit pendant le stade reproductif ou lors de la récolte des fruits. À l'inverse, l'impact sera moindre à d'autres stades de développement des plantes – ou, dans le cas de plantes annuelles, si elles n'ont même pas encore été plantées. Au-delà de cette épaisseur, les auteurs considèrent que l'impact du téphra ne dépendra plus de la saisonnalité de l'éruption.

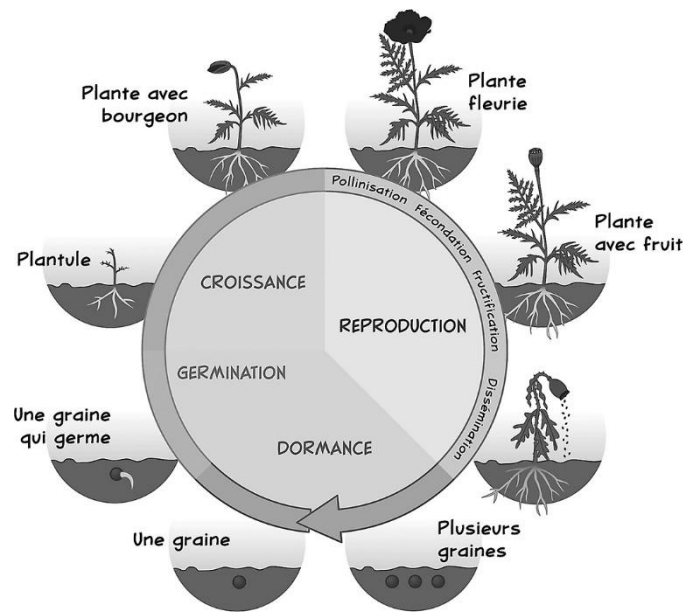


Figure 2.10 : Cycle de vie d'une plante (Quinte, 2020).

Un dépôt de téphra au moment de la floraison est plus susceptible de causer des dégâts à la récolte qu'aux autres stades de développement de la plante (Craig, 2015b). En effet, si les fleurs sont endommagées, la pollinisation sera fortement affectée (Ayrís and Delmelle, 2012). En outre, selon le type de fruit ou de légume produit, l'effet du téphra sur la récolte sera différent (Bosi and MIAVITA Group, 2012; Wilson et al., 2007). C'est pourquoi les études portant sur ces impacts séparent les plantes en groupes, par exemple : légumes racines (carottes, pommes de terre...), légumes feuilles (laitue...), fruits (pois, fraises...), arbres fruitiers et raisins (Wilson et al., 2007).

Alors que la date absolue de l'éruption de Santorin de l'Âge de Bronze est toujours controversée (voir section 2.2.1), il y a paradoxalement un consensus sur le fait qu'elle a dû se produire au début de l'été (Höflmayer, à paraître; McCoy, 2009). Des cadavres de coléoptères (*Bruchus rufipes*) ont été retrouvés dans des jarres de stockage contenant de la vesce espagnole à Akrotiri, sur l'île de Santorin (Panagiotakopulu et al., 2013). L'assemblage d'insectes inclut la plupart de ses stades de vie (larve, pupes et adultes) et présente des signes irréfutables d'une mort simultanée de tous les individus, donc due à l'éruption. En outre, ces insectes ayant un cycle de vie s'effectuant entièrement à l'extérieur, ils ne peuvent se développer sur des plantes stockées, ce qui amène Panagiotakopulu et al. (2013) à conclure que les jarres avaient été stockées récemment avant que l'éruption ne frappe. Or la vesce espagnole étant récoltée en mai et battue début juin, les auteurs en déduisent que l'éruption a dû avoir lieu au début de l'été, probablement en juin, ou peut-être au début juillet.

2.3.2. Les impacts du téphra sur le bétail

Au niveau des animaux, un dépôt de téphra peut engendrer de nombreux effets néfastes. En effet, si le téphra contamine la nourriture destinée aux animaux, qu'il s'agisse de pâturages ou de fourrage, ceux-ci peuvent refuser de la manger. S'ensuit une malnutrition, voire la mort (Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b). Bien entendu, les animaux mis au pâturage sont davantage exposés au téphra que ceux nourris au fourrage, si celui-ci a été stocké et en partie épargné. En outre, lorsque du bétail ingère du téphra, il peut souffrir de blocages gastrointestinaux et, s'il s'agit de ruminants, de blocages du rumen. Ceci peut mener à des blessures internes, ou même amener les animaux à mourir de faim (Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b; Riede and Kierdorf, 2020; Wilson et al., 2007). Dans certains cas, un blocage du rumen peut entraîner un gonflement au niveau intestinal, ce qui induit à son tour une pression sur les poumons et cause l'asphyxie de l'animal (Craig, 2015b).

Par ailleurs, le téphra étant abrasif, son ingestion entraîne une érosion plus ou moins importante des dents des animaux, en particulier ceux qui broutent (Craig, 2015b; Riede and Kierdorf, 2020; Wilson et al., 2007). Il en résulte une incapacité de se nourrir efficacement. Les animaux peuvent également souffrir d'une abrasion au niveau de leurs sabots (Wilson et al., 2007), ainsi que d'irritations et d'infections oculaires et dermatologiques (Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2007). Notons enfin qu'en fonction de l'épaisseur du dépôt de téphra se déposant sur les pâturages, ceux-ci peuvent s'avérer inaccessibles et, dès lors, il faudra prévoir davantage de fourrage pour palier à ce manque de nourriture (Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2007).

En ce qui concerne l'approvisionnement en eau des animaux, le téphra déposé dans les eaux de surface peut les contaminer et en rendre le goût peu appétissant, ainsi qu'en augmenter la turbidité. En fonction de la sévérité de cette contamination, les animaux peuvent refuser de boire et subir différents degrés de déshydratation (Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2010, 2007). Notons aussi que si le téphra contient du fluor, un élément potentiellement toxique si ingéré de manière chronique et sur une longue période de temps, le bétail peut également souffrir de fluorose dentaire, et si l'exposition se prolonge le squelette peut être aussi atteint (Ayris and Delmelle, 2012; Weinstein and Davison, 2004). Bien que l'empoisonnement du bétail et des eaux par le fluor volcanique présent sur le téphra a été évoqué en relation avec la catastrophe minoenne (Driessen and Macdonald, 1997; Molloy et al., 2014), il n'existe aucune information tangible quant au contenu en fluor biodisponible dans le téphra déposé par l'éruption de Santorin (Bruins et al., 2019; Kulick and Westgate, 2021; Siart et al., 2010; Siart and Eitel, 2013a; Soles et al., 1995). Il est dès lors aujourd'hui impossible de tirer une quelconque conclusion quant à la toxicité potentielle du téphra de Santorin.

2.3.3. Les impacts du téphra sur les infrastructures

Un dépôt de téphra peut avoir des conséquences négatives sur les infrastructures qu'il touche. Notamment, une masse trop importante de téphra déposé sur un bâtiment peut en causer l'effondrement, bien que ce ne fût vraisemblablement pas le cas en Crète minoenne, l'épaisseur de téphra déposée n'ayant pas été assez importante et les bâtiments étant solides (Bosi and MIAVITA Group, 2012; Jenkins et al., 2014a, 2014b; Wilson et al., 2007). Dans le cadre de notre travail, nous développerons l'impact que ces dépôts peuvent avoir sur le réseau de collecte et de transport de l'eau. En effet, l'eau est un élément crucial dans tout système agraire, nécessaire non seulement à la croissance des plantes mais aussi à la survie du bétail et des personnes. Sous un climat sec, comme celui de la Crète, et en particulier l'Est de l'île, le réseau d'approvisionnement en eau est d'autant plus important. C'est pourquoi nous avons choisi de nous pencher sur les impacts qu'un dépôt de téphra peut avoir sur ce réseau. Si l'eau vient à manquer, le système agraire s'en retrouve fragilisé.

Les infrastructures comme les canalisations peuvent se retrouver bouchées par le téphra qui s'y accumule, ou abimées par le passage de téphra abrasif, et dès lors requérir des réparations (Jenkins et al., 2014b; Wilson et al., 2010).

Enfin, le téphra peut également avoir un impact au niveau des eaux de surface (donc avant leur arrivée dans les infrastructures qui les exploitent, voire dans les infrastructures à ciel ouvert tels les aqueducs et puits). Ces effets comportent une plus grande turbidité, l'acidification, l'assèchement de points d'eau peu profonds et différents degrés de contamination (Wilson et al., 2010).

3. Objectif du travail

L'objectif de ce travail est d'évaluer les impacts potentiels de l'éruption de Santorin à la fin du MR IA sur l'agriculture minoenne. De fait, cette éruption fût un évènement destructeur extraordinaire auquel la société minoenne fut exposée. Puisqu'elle n'était pas équipée pour faire face à l'éruption – étant habitués aux tremblements de terre, mais pas aux autres aspects d'une éruption volcanique comme de possibles tsunamis, un dépôt de téphra, un assombrissement du ciel ou un bruit retentissant (Driessen, 2019; Driessen and Jusseret, 2019) –, les Minoens pouvaient y être vulnérables. Cette éruption pouvant dès lors être considérée comme un désastre (Oliver-Smith, 1996, section 2.1), il est probable qu'elle ait eu des impacts à long terme sur cette société, qui s'est effondrée quelques générations plus tard, à la fin du MR IB. L'identification et la description de ces impacts et leurs possibles implications dans le déclin de la civilisation crétoise de l'époque représente une tâche immense. Ne pouvant nous atteler à la question dans son ensemble, nous avons choisi de nous focaliser plus précisément sur les effets du dépôt de téphra sur le système agraire minoen de la fin de l'Âge du Bronze. L'agriculture est en effet un élément-clé de toute société humaine, étant non seulement la base de toute alimentation mais permettant également le commerce à l'intérieur de la société

et avec les sociétés voisines. Elle permet ainsi de tisser des liens avec d'autres civilisations et de se procurer des biens que l'environnement direct ne peut fournir. La question de l'impact de l'éruption sur le système agraire minoen n'a jusqu'à présent pas été étudiée en détails, or il est clair que l'agriculture jouait un rôle on ne peut plus important en Crète. Or un dépôt de téphra, même s'il est peu épais, peut l'impacter fortement, au niveau de la végétation, du bétail et des ressources en eau. Il nous semble important de nous pencher sur cet aspect des impacts de l'éruption sur la société minoenne, puisqu'un affaiblissement du système agraire ne peut que se traduire en un déséquilibre sociétal.

Pour ce faire, nous avons commencé par reconstruire le système agraire de la Crète minoenne, sur base des découvertes archéologiques et d'analogies avec des agriculteurs méditerranéens d'avant la mécanisation. Ensuite, nous avons envisagé un dépôt de téphra sur la Crète et investigué ses conséquences. Nous visons à identifier les impacts potentiels et l'ampleur des dégâts occasionnés par un tel dépôt sur les différentes composantes de ce système, notamment les cultures, le bétail et les ressources en eau, ainsi que leur durée. Ceci vise à évaluer si le téphra a pu jouer un rôle dans la fragilisation de la civilisation minoenne, et à quel(s) niveau(x). Si ce fût effectivement le cas, il devient pertinent de s'interroger sur le rôle potentiel de cette fragilisation dans l'effondrement de cette société.

4. Matériel et méthode

Pour la réalisation de ce travail, nous avons choisi la méthode de l'analyse réseau visuelle (Visual Network Analysis, ou VNA, en anglais), qui permet d'analyser qualitativement une situation en construisant, analysant et interprétant des réseaux visuels basés sur des données d'observations ou de mesures et/ou des résultats d'interviews (Decuyper, 2020). Ce type de réseau permet de comprendre la nature multidimensionnelle de la situation ou de l'objet étudié, ici un système agraire, ainsi que les interactions entre ses acteurs (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018). Jusqu'à aujourd'hui, les impacts qu'un dépôt de téphra peut avoir sur l'agriculture ont été approchés point par point : quel est l'impact sur les cultures, sur le bétail, sur les infrastructures, chaque objet pris de manière isolée (notamment, Wilson et al., 2007). Or un système agraire est plus que la somme de ses composantes, il est indispensable de regarder le problème dans son ensemble : oui, le téphra aura un impact sur le bétail, mais s'agira-t-il d'un problème isolé ou, plus probablement, en résultera-t-il une réaction en chaîne qui affectera d'autres aspects du système agraire ? Si le téphra aura vraisemblablement un impact propre sur plusieurs acteurs du système agraire, tout dégât occasionné entraînera également une réponse de la part de ses plus proches voisins. C'est ici que l'approche « réseau » nous semble appropriée pour la question qui nous intéresse, et c'est afin de comprendre ces relations et ces jeux de dominos que nous l'avons choisie. Nous avons reconstruit le système agraire minoen sous la forme d'un réseau représentant ses différentes composantes ainsi que les liens entre ces composantes. Notre sujet porte sur une

civilisation s'étant éteinte il y a plus de trois millénaires et dès lors, la majeure partie des données nécessaires en vue d'établir les multiples composantes, et leurs interactions, du système agraire de l'époque sont d'origine archéologique. Elles sont par essence parcellaires et en partie sujettes à l'interprétation et. En outre, il nous est impossible de quantifier de manière adéquate les différents éléments de ce réseau. Ainsi, vu le manque d'informations, nous ne sommes pas en mesure de déterminer la taille de la population minoenne, ni l'importance du cheptel que les habitants s'élevaient, et encore moins la surface cultivée et les quantités de nourriture qu'elle offrait annuellement. C'est pourquoi nous avons dû opter pour une analyse de réseau qualitative et non quantitative.

Les informations que nous avons utilisées pour reconstruire le système agraire minoen proviennent de l'analyse exhaustive d'études qui rapportent les résultats des fouilles archéologiques portant sur la société minoenne et son organisation. Nous avons tâché d'investiguer tous les aspects liés à l'agriculture et nous sommes donc penchés sur les recherches concernant les différentes plantes cultivées à l'époque (déterminées sur base de résidus de plantes carbonisés et par palynologie), le bétail qui était élevé et ses fins (production de denrées animales, mais aussi le travail agricole), l'outillage utilisé ainsi que les infrastructures de stockage et d'approvisionnement en eau. Lorsque l'archéologie ne suffisait pas à répondre à nos interrogations, nous nous sommes appuyés sur des documents décrivant l'agriculture méditerranéenne du XX^e siècle, avant la mécanisation, en vue de compléter l'information ou confirmer certaines hypothèses. En effet, les spécialistes affirment que les pratiques agricoles ont peu évolué entre l'époque minoenne et la nôtre. Les contraintes environnementales, comme la pluviométrie, et technologiques, comme l'utilisation actuelle de charrues « primitives » en bois, laissent penser que les méthodes antiques pouvaient ressembler fortement aux techniques plus récentes (Halstead, 2014). Comme le souligne Allbaugh (1953), « si ce n'est pour la culture de certains fruits et légumes récemment importés sur l'île, la production agricole actuelle et les techniques utilisées (non mécanisées) ne sont pas bien différentes de celles de l'époque minoenne ». Il est rejoint dans cet avis par Halstead (2014), qui s'inspire de ses recherches en Méditerranée auprès des paysans non mécanisés afin d'inférer des techniques agricoles de l'époque minoenne. La plupart de ces techniques sont d'ailleurs attestées par la présence d'outils sur les sites archéologiques, comme des araires, jougs, faucilles, houes et traîneaux. De même, l'utilisation d'animaux de traction est attestée par des déformations typiques au niveau d'ossements découverts sur plusieurs sites, notamment à Cnossos.

Le logiciel Gephi (<https://gephi.org/>) (Fig. 4.1), open source et open access, développé pour l'analyse de graphiques et de réseaux (Bastian et al., 2009), a été utilisé en vue de construire le réseau représentant le système agraire en Crète minoenne (présenté à la section 5). Cet outil permet de créer plusieurs espaces de travail, sur lesquels il est possible de dessiner des réseaux présentant des entités (ou nœuds), reliées entre elles par des liens, qui peuvent être dirigés

(aller d'un point A à un point B, avec une flèche) ou non. Tous les aspects du réseau (nœuds et liens) peuvent être codifiés par une couleur ou une taille, manuellement ou automatiquement (par exemple, Gephi propose une fonctionnalité qui attribue à chaque nœud une taille en fonction du nombre de liens que celui-ci présente avec les autres nœuds). De même, chaque nœud et lien peut être doté d'un label qui l'identifie, et ce label peut être affiché sur le réseau. Lorsque l'utilisateur positionne son curseur sur un nœud, Gephi mettra ce nœud ainsi que ceux qui lui sont liés en surbrillance, permettant à l'utilisateur de visualiser facilement les liens entre les différentes entités du réseau. Gephi propose également de nombreuses autres fonctionnalités, notamment l'algorithme « ForceAtlas2 », qui permet de réarranger les différents nœuds les uns par rapport aux autres de telle sorte que, si deux nœuds sont proches l'un de l'autre dans le réseau, cela implique qu'ils soient reliés. Decuyper (2019) présente l'utilisation de Gephi dans le cadre de VNA pour de la recherche prenant en compte des entités humaines et non humaines, ainsi que leurs relations, dans les pratiques sociales. Gephi a été utilisé dans de nombreux contextes, notamment pour une étude visant à définir la résilience urbaine (Meerow et al., 2016), pour explorer les tendances de co-occurrence dans les communautés microbiennes dans les sols (Barberán et al., 2012) ou encore pour effectuer de l'analyse bibliométrique (Fahimnia et al., 2015).

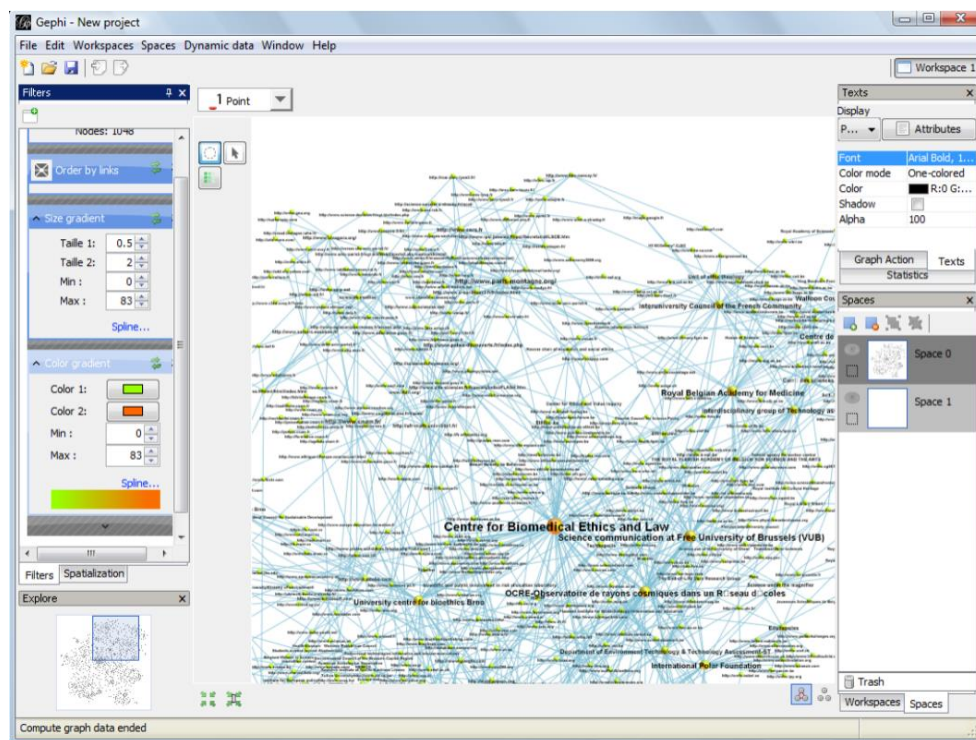


Figure 4.1 : Interface utilisateur de l'outil Gephi (Bastian et al., 2009).

Dans Gephi, chaque composante, ou entité, du système a été représentée par un cercle, ou « nœud ». L'« entité » représente les éléments constitutifs du système, comme les différentes catégories de bétail que sont les « Moutons » et les « Bovins », les acteurs représentés par la « Population » et les « Elites », ou encore les cultures de « Céréales » et de « Vignes ». Les

entités peuvent également représenter des concepts comme le « Travail Agricole », qui n'est pas un élément tangible mais est toutefois essentiel à tout système agraire. L'importance de chaque composante, tel que définie par le nombre de liens (entrants et sortants) avec les autres entités, est soulignée par la taille du nœud qui la représente. Les liens entre les entités sont dirigés (et dès lors représentés sous forme de flèches) et montrent les connections logiques entre deux nœuds (par exemple, pour le bétail fournissant du fumier, le lien qui les relie prend sa source aux nœuds représentant le bétail et pointe vers le nœud du fumier), comme l'illustre la Figure 4.2. Malgré la possibilité d'attribuer à chaque lien un « poids » différent, c'est-à-dire une épaisseur représentant l'importance relative des liens, nous n'avons pas utilisé cette fonctionnalité puisqu'il n'est malheureusement pas possible de quantifier tous les liens que nous avons identifiés. Attribuer un poids à certains liens mais pas à d'autres aurait compromis la lecture aisée du réseau, basée sur une analyse visuelle. Les quantifications adéquates seront, le cas échéant, discutées dans les sections ultérieures.

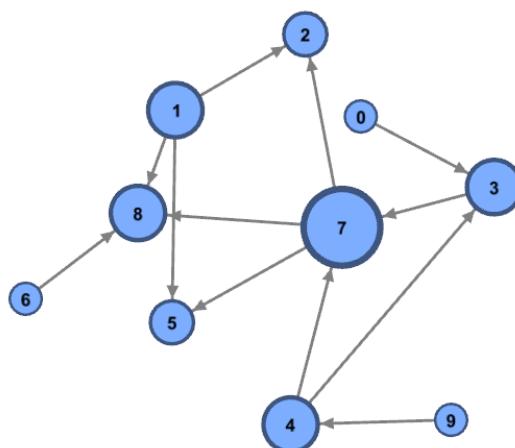


Figure 4.2 : Exemple de réseau construit avec l'outil Gephi.

Une fois notre modèle du système agraire établi et représenté dans Gephi, nous nous sommes penchés sur les impacts qu'un dépôt de téphra, généré par l'éruption du volcan sur l'île de Santorin, a pu avoir sur l'agriculture minoenne.

Pour commencer, nous avons cherché à quantifier les conséquences d'un dépôt de téphra volcaniques sur la production agricole. Une étude menée en Nouvelle Zélande sur les dépôts de téphra et leur impact sur le bétail, les cultures et la foresterie présente les dégâts occasionnés à ces différents secteurs en fonction de l'épaisseur du dépôt de téphra (Wilson et al., 2007). Elle donne les épaisseurs de dépôts de téphra qui entraînent des dégâts de 1%, 20% et 90% ; cependant, afin de prendre en compte l'incertitude liée à ces valeurs, trois épaisseurs pouvant entraîner 90% de dégâts sont systématiquement présentées (faible, moyenne et élevée), dont la probabilité d'entraîner ce niveau de dégâts va en augmentant. L'incertitude relève notamment de la composition du téphra et des conditions dans lesquelles l'agriculteur opère (par exemple, une année particulièrement sèche ou une faible quantité de réserves de

fourrage). Cette étude sépare également les dégâts au niveau de la production (de lait, de viande...) et au niveau des biens qui permettent la production (un arbre, une vigne...). Le Tableau 4.1 présente un résumé de ces résultats, repris intégralement à l'Annexe 3.

Tableau 4.1 : Quantité de téphra occasionnant 1%, 20% et 90% de pertes dans les secteurs agricoles de Nouvelle Zélande d'après Wilson et al. (2007). Les pertes peuvent se présenter aussi bien au niveau de la production, qui est en partie perdue suite au dépôt de téphra (par exemple, la perte de l'entièreté des raisins produits dans le cas d'un dépôt de 50 mm), que des biens agricoles qui peuvent être endommagés (par exemple, une perte d'environ 20% des pieds de vignes dans le cas d'un dépôt de 50 mm, affectant donc la production viticole l'année de l'éruption, mais aussi par la suite).

	Secteur agricole	Quantité de téphra sec (mm)		
		1% de dégâts	20% de dégâts	90% de dégâts
PRODUCTION	Lait	1	5	100/125/200
	Bœuf (viande)	1	10	100/175/300
	Moutons (viande)	1	7	90/150/250
	Légumes "feuilles"	1	2	5/10/30
	Légumes "fruits"	1	3	5/10/20
	Légumes "racines"	5	30	50/100/150
	Arbres fruitiers (fruits)	1	3	10/20/50
	Viticulture (raisin)	1	2	1/5/20
BIENS	Animaux	?	70	200/300/400
	Arbres fruitiers (arbre)	3	75	250/350/1000
	Viticulture (vignes)	10	50	100/250/400
	Sol	?	100	200/300/400
	Pâturage	?	70	200/300/400

Notons que Wilson et al. (2007) séparent l'élevage de bœufs de celui des moutons. En effet, ils considèrent que les bœufs sont plus résilients aux retombées de téphra que les moutons. En effet, alors que les ovins broutent l'herbe au ras du sol, les bovins ont plutôt tendance à arracher la partie supérieure des brins d'herbe, sans aller contre la terre, et ingèrent donc une plus faible quantité de téphra. L'importance des dégâts causés à la culture du raisin, particulièrement plus importants que pour les autres fruits, tient au fait que leur formation en grappes les rend particulièrement difficiles à nettoyer après un dépôt de téphra, ce qui conduit à une perte marquée dans la production.

Ensuite, nous nous sommes penchés sur les autres types d'impacts directs que le téphra peut avoir sur les différentes entités du système agraire que nous avons réalisé. Comme cela a été présenté à la section 2.3.3, le dépôt de téphra peut également présenter un effet néfaste sur les réserves en eau et les infrastructures liées à la collecte et au transport de l'eau. Notons aussi

que le fin téphra volcanique peut s'infiltrer partout et peut dès lors contaminer les denrées alimentaires stockées.

Une fois ces informations récoltées, deux scénarios de dépôt de téphra sur la Crète sont envisagés. En effet, nous ne connaissons pas l'épaisseur originale du dépôt de téphra à la suite de l'éruption. Dans un premier scénario, nous avons décidé de considérer un dépôt peu important, à savoir 1 mm de téphra, afin de déterminer l'impact d'une très faible quantité de téphra, puisque nous savons que, dans tous les cas, un dépôt a eu lieu. Le second scénario fait l'hypothèse d'une épaisseur de dépôt plus importante, à savoir 10 mm, qui est toujours une épaisseur plausible (voir section 2.2.3) Les impacts potentiels associés aux deux scénarios retenus seront ensuite discutés. Notons que, dans les deux cas, nous considérons que le dépôt de téphra se concentre sur les parties orientale et centrale de l'île, la partie occidentale semblant, d'après les fouilles archéologiques, avoir été épargnée.

Sur base des quantifications d'impacts sur la végétation et le bétail présentés dans l'étude néo-zélandaise (Wilson et al., 2007), nous avons retenu trois classes pour décrire la sévérité des dégâts. Ces classes sont : impact faible (1 à 19%), impact moyen (20 à 49%) et impact fort (50 à 100%). Nous visons ainsi à prendre au mieux en compte l'incertitude de quantification de Wilson et al. (2007) mise en lumière dans cette étude. Cette classification ne s'applique bien entendu qu'aux impacts que nous sommes en mesure de quantifier. Nos deux scénarios, à savoir un dépôt d'un millimètre et de dix millimètres de téphra, comportent également des impacts que nous ne sommes pas en mesure de quantifier faute de données, mais qui ne doivent pas pour autant être négligés.

5. Résultats

5.1. Le modèle du système agraire

Dans ce modèle, nous avons séparé les différents éléments, représentés par les cercles de couleur, en quatre grandes catégories d'éléments, que nous expliquerons plus en détails dans la suite de ce chapitre. Tous les sites archéologiques auxquels nous faisons référence dans cette section sont présentés à la figure 2.2.

La Figure 5.1 représente sous forme de réseau visuel le modèle du système agraire de l'époque minoenne à la fin de l'Âge du Bronze. Nous détaillons ci-dessous chacun de ses éléments.

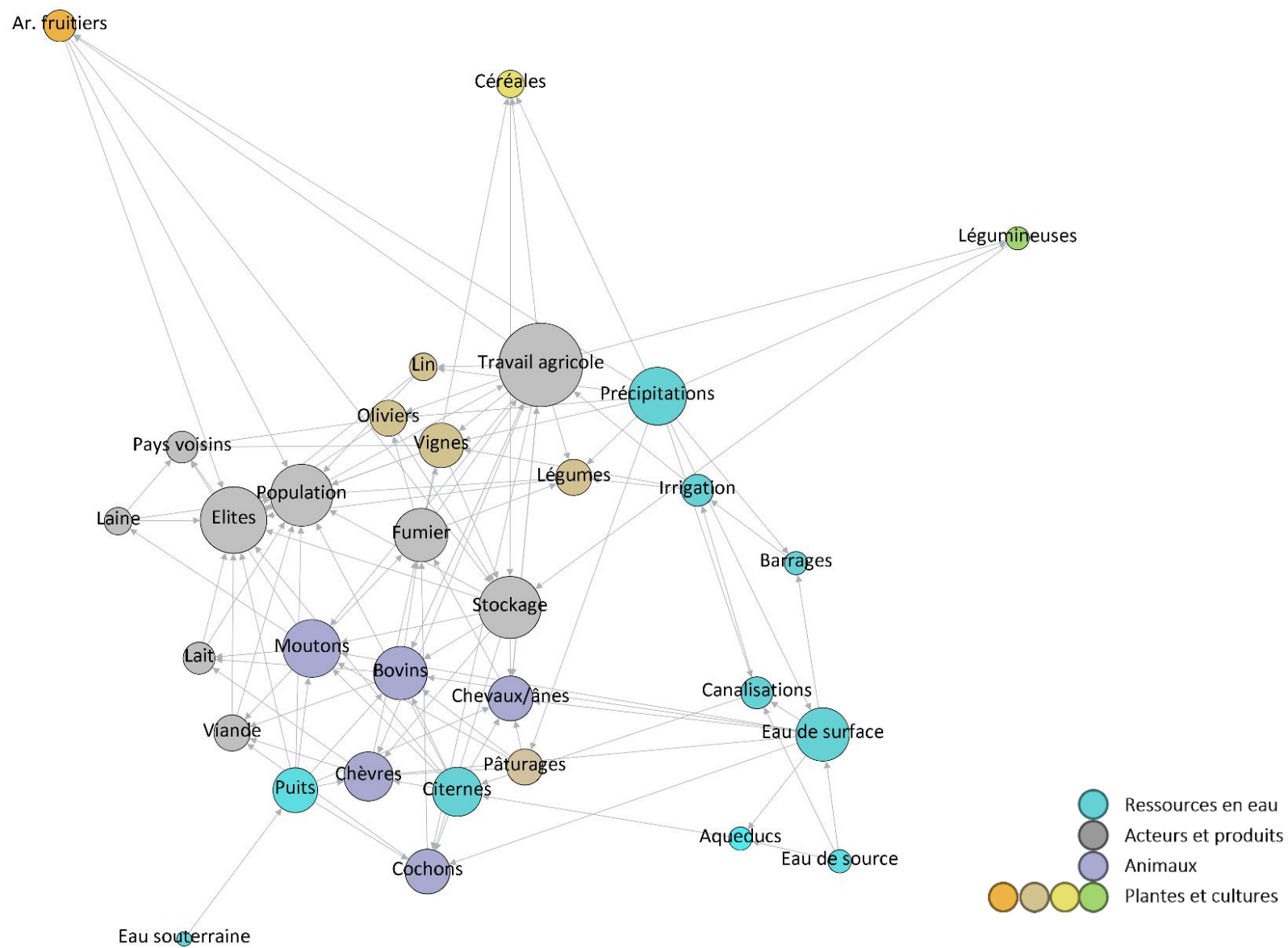


Figure 5.1 : Modèle du système agricole minoen à la fin de l'Âge du Bronze.

5.1.1. Les ressources en eau

Les entités reprenant les ressources en eau sont représentées en turquoise (Fig. 5.1, 5.3 à 5.5). Les précipitations en Crète étant très hétérogènes spatialement, allant de 1800 mm par an dans les montagnes à l'Ouest de l'île à seulement 300 mm par an sur les côtes Sud-Est (Nikolaou et al., 2017), l'eau est une ressource cruciale. Par ailleurs, la majorité des sites Minoens, et donc des sites cultivés, se trouvait sur la moitié Est de l'île (voir section 2.1) qui est aussi la partie qui fut vraisemblablement affectée par les retombées de téphra de Santorin. L'occupation des régions montagneuses, moins exposées à des pénuries d'eau, semble limitée à quelques « villas » ayant certes une fonction agricole, mais probablement limitée à l'approvisionnement de ses propres habitants. Il est donc impératif d'inclure l'eau et les infrastructures qui y sont liées dans notre modèle.

La composition géologique de l'île a permis, au fil des millénaires, le développement de karst – c'est-à-dire des vides et cavernes résultant de la dissolution de roches carbonatées – et est favorable à la présence d'aquifères perchés (Gorokhovich et al., 2011). La surface totale de karst sur l'île est d'environ 2730 km² (Nikolaou et al., 2017), soit un tiers de la superficie de la Crète, ce qui fait de l'exploitation des eaux souterraines et des sources un élément-clef de la civilisation minoenne.

De nombreuses technologies de gestion de l'eau ont été retrouvées au cours des fouilles archéologiques de l'île (Tableau 5.1.) : des systèmes de récupération d'eau de pluie, des citernes (parfois précédées de bassins de sédimentation), des puits, des canaux, des aqueducs et des réseaux de canalisations (Fig. 5.2) (Angelakis et al., 2013; Gorokhovich et al., 2011).

Tableau 5.1 : Technologies utilisées pour l'approvisionnement en eau et pour le drainage (* probable) (Gorokhovich et al., 2011).

Site	Source	Aqueduc	Citerne(s)	Collecte d'eau de pluie	Puits	Bassins de sédimentation	Canaux	Drainage
Cnossos	X*	X*	X	X	X	X	X	X
Malia	X*	X*	X*				X	X
Palaikastro					X		X	X
Phaistos			X	X	X		X	X
Tylissos	X	X	X	X		X	X	
Kato Zakros			X		X		X	X
Agia Triada	X	X	X	X		X	X	X
Chamaizi			X	X	X*			
Kommos			X		X			
Myrtos								
Pygros			X	X				
Kato Syme	X							

Les canalisations étaient constituées de tuyaux coniques imbriqués en terre cuite. Les citernes pouvaient contenir de 5 à 100 m³ d'eau et stockaient non seulement l'eau de pluie récoltée mais aussi l'eau de source et de surface acheminée par des aqueducs en pierre (Angelakis, 2017).

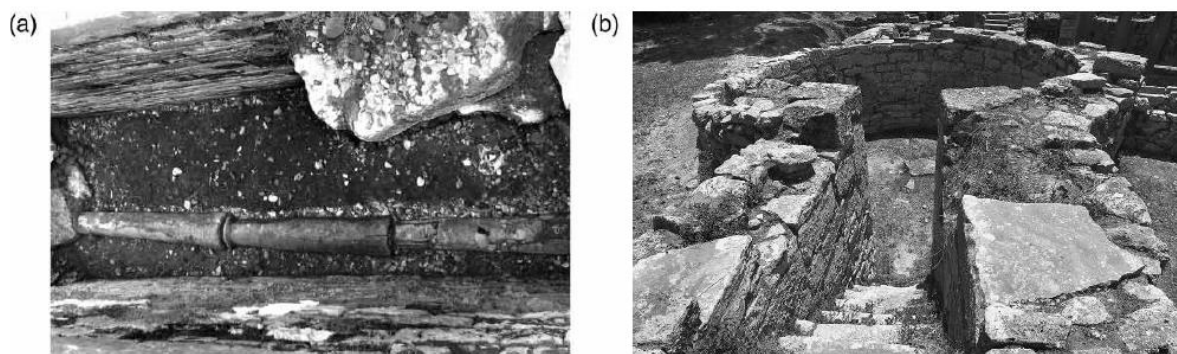


Figure 5.2 : (a) Canalisations d'eau minoenne en terre cuite (Angelakis, 2017) et (b) Citerne minoenne (Angelakis et al., 2013).

Bien que la Crète ne soit pas drainée par de grandes rivières, il convient de noter la présence de barrages sur de modestes cours d'eau à Pseira et à Choiromandres. À Choiromandres, deux barrages avaient été érigés afin de réguler le flux d'eau du torrent dans le but de protéger le sol de l'érosion lors d'épisodes pluvieux, mais aussi d'irriguer les champs alentours (Angelakis, 2017). Cette même étude souligne un seul autre lieu possible de pratiques d'irrigation sur le plateau de Lassithi, au sud de Malia (Fig 2.2), dont il reste aujourd'hui le système de drainage et d'irrigation vénitien, largement postérieur. Alors qu'Angelakis (2017) postule son origine au temps des Minoens, Gorokhovich (2011) souligne à juste titre que les reconstructions et restaurations des technologies minoennes au fil des siècles rendent complexe l'analyse des infrastructures d'origine. En outre, alors que les fermiers méditerranéens du XX^e siècle n'hésitaient pas à arroser leurs petits potagers et certains vergers, il était rare qu'ils irriguent des champs de céréales à grande échelle, malgré les faibles quantités de précipitations (Halstead, 2014). De même, l'intensité d'irrigation diminue avec la distance entre la parcelle irriguée et l'implantation agricole. Il est donc envisageable que l'irrigation, à l'époque minoenne, ait été un élément relativement anecdotique.

Sur base de ces informations, nous avons sélectionné et représenté dans le modèle du système agraire minoen les entités en lien avec les ressources en eau. Il y a trois sources d'eau en Crète minoenne : l'eau souterraine, l'eau de surface et les précipitations. L'eau souterraine était exploitée au moyen de puits (Angelakis et al., 2013; Angelakis, 2017; Driessen and Macdonald, 1997; Gorokhovich et al., 2011), qui alimentaient la population – aussi bien la population générale que les élites – ainsi que les bêtes, comme le montre la Figure 5.3.

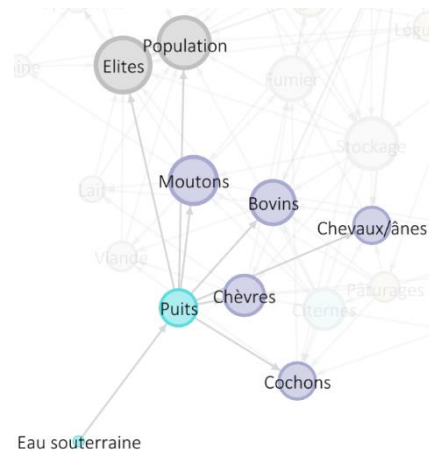


Figure 5.3 : La place de l'eau souterraine dans le système agraire minoen.

L'eau de surface (Fig. 5.4) est séparée dans le modèle en « Eau de surface » et « Eau de source » afin de distinguer les cours d'eau de l'eau captée directement à la source par les différentes infrastructures minoennes. L'eau de surface à proprement parler alimente les canalisations et aqueducs, et donc indirectement la population et le bétail par le biais des citernes. Elle alimente également ce dernier directement lorsque les bêtes s'abreuvent dans les rivières. L'eau de surface est aussi, contrôlée par des barrages sur certains sites. L'eau de source, quant à elle, alimente directement les aqueducs et canalisations, alors-que l'eau qui n'est pas captée à la source part dans les eaux de surfaces. Les barrages et canalisations sont en partie destinés à l'irrigation. Cependant, au vu de l'incertitude liée à cette pratique à l'époque qui nous intéresse ainsi qu'aux difficultés techniques d'alimenter des grandes parcelles de culture, sujettes au labour, au moyen de tuyaux en terre cuite, nous supposons ici que si l'irrigation était utilisée, elle l'était principalement dans le cadre des légumes de potagers, et peut-être des vignes. De fait, Allbaugh (1953) souligne que les céréales et les oliviers, en Crète contemporaine, n'étaient jamais trouvés sur des champs irrigués, réservés aux légumes et aux fruits. L'irrigation est également liée à l'entité du « Travail agricole » afin de tenir compte de son installation et de sa maintenance.

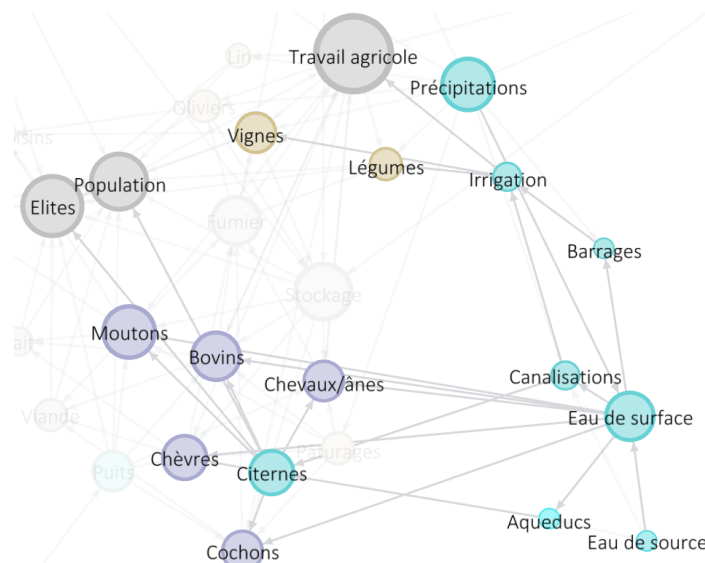


Figure 5.4 : La place de l'eau de surface dans le système agraire minoen.

Enfin, les précipitations (Fig. 5.5) ont un lien direct avec les cultures et sont dès lors connectées aux arbres fruitiers, céréales, légumineuses, légumes, vignes, oliviers, au lin et aux pâturages. Elles sont également récoltées en partie par des canalisations et amenées aux citernes, alimentent les eaux de surface et interagissent avec les barrages qui régulent les flux d'eau.

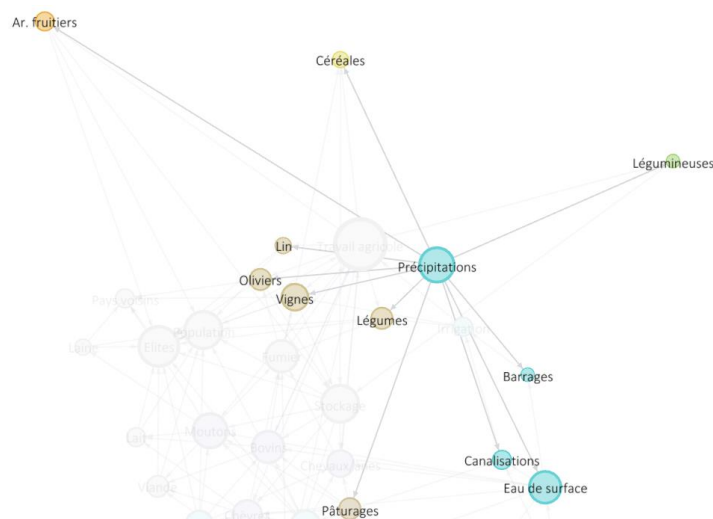


Figure 5.5 : La place des précipitations dans le système agricole minoen.

Ainsi, les Minoens avaient développé de nombreux systèmes pour pallier les faibles précipitations de l'île et tiraient parti de toutes les ressources en eau à leur disposition. L'eau étant un facteur primordial dans le système agricole, non seulement pour les plantes mais aussi pour la population minoenne et les bêtes.

5.1.2. Le bétail

Le bétail, comprenant les moutons, chèvres, bovins, cochons, chevaux et ânes, sont représentés en bleu foncé dans le modèle du système agricole (Fig. 5.1, Fig. 5.6 à 5.10). Ces animaux représentent une part importante du système agricole minoen, non seulement par leurs productions respectives, mais aussi par leur production de fumier et leur participation au travail agricole. Les informations que nous possédons au sujet des bêtes proviennent, au niveau archéologique, de découvertes d'ossements. Nous avons également incorporé dans le modèle des détails provenant de fermiers du XX^e siècle avant la mécanisation. Le modèle ne comprend pas d'animaux sauvages. En effet, leur présence dans les assemblages d'ossements retrouvés sur les sites archéologiques est rare et il n'est pas avéré qu'ils aient été consommés, pouvant avoir simplement été chassés pour leur cuir (Livarda et al., 2021).

Des fouilles archéologiques sur le site de Palaikastro ont révélé que les ovins et caprins représentaient la plus grande proportion du bétail à l'époque du MR (ca. 1700-1050 ACN) : 88% des ossements retrouvés, contre 6.8% de bovins et 4.8% de cochons (les 0.42% restants appartenant aux animaux sauvages mentionnés *supra*). Ces proportions étaient déjà de rigueur à l'époque précédente, le Minoen Moyen (ca. 2100-1700 ACN), selon ces mêmes fouilles : 85% de moutons et de chèvres, 12.5% de bovins et 2.5% de cochons (Livarda et al., 2021). Livarda

(2021) souligne également que ces hauts pourcentages sont comparables à ceux retrouvés à Mochlos et Pseira et conclut que les données indiquent une spécialisation dans ce type de bétail à Palaikastro et, peut-être, plus largement dans l'Est de la Crète. Ceci s'inscrit dans la continuité du Néolithique (VII^e-IV^e millénaire ACN) où les moutons étaient l'espèce d'élevage dominante (Isaakidou, 2008).

Les ossements d'ovins et caprins retrouvés à Palaikastro ont été étudiés afin de déterminer l'âge auquel les animaux en question avaient été abattus (Livarda et al., 2021). De fait, lorsque l'élevage est tourné vers la production de lait, les agneaux mâles doivent être tués très tôt dans la lactation de la mère, alors que pour la production de viande ils sont abattus lorsqu'ils sont presque des adultes. Enfin, lorsque le but est la production de laine – voire la traction –, les mâles (castrés) sont écartés dans leur vieil âge (Halstead and Isaakidou, 2011). Au vu des ossements retrouvés, il semble que ces bêtes aient été élevées pour leur viande, mais aussi pour leur lait et, dans le cas des moutons, leur laine (Livarda et al., 2021). Il en va de même pour les animaux élevés à Cnossos du Néolithique à l'Âge du Bronze (Isaakidou, 2006; Roberts, 2019). De même, à Mochlos, les assemblages d'ossements de moutons, chèvres et bovins indiquent qu'ils étaient abattus à un âge avancé et donc élevés aussi bien pour leur viande que pour les produits secondaires, alors que les cochons n'étaient élevés que pour leur viande (Christakis, 2019). À Pseira, seuls des os d'ovins et caprins ont été retrouvés (Christakis, 2019).

Les bovins jouaient également un rôle important dans le système agraire par leur participation au travail agricole. Dans le climat sec crétois, les sécheresses d'été rendent le sol impénétrable. Il faut donc attendre que les pluies d'automne ramollissent et humidifient le sol, puis que le sol ne soit plus détrempé avant de pouvoir labourer uniformément un champ et le semer. En outre, les cultures semées trop tard ne dépendront que des pluies printanières, dont l'arrivée est peu fiable, sans bénéficier des pluies hivernales. La fenêtre de temps pour effectuer ce travail est donc serrée (Halstead, 2014; Isaakidou, 2008). L'utilisation d'animaux de labour, qui est deux à quinze fois plus rapide que le travail manuel de la terre (Isaakidou, 2011), permet de réduire le risque de semer trop tard ou trop peu et est donc un atout (Isaakidou, 2008).

Des assemblages d'ossements retrouvés à Cnossos permettent d'y suivre l'évolution de l'élevage de bétail depuis le Néolithique et arborent, depuis cette époque, ce qu'on appelle des « pathologies de traction » (Isaakidou, 2011, 2008, 2006), c'est-à-dire des déformations sur les os démontrant que l'animal a été utilisé pour tirer des objets lourds, comme une charrue, des chariots ou des luges de transport. Ces pathologies ont été mises en évidence aussi bien sur des bœufs que sur des vaches (Isaakidou, 2011). Cette découverte nous est expliquée par les pratiques agricoles récentes en Grèce. En effet, le coût d'achat et d'entretien des bovins est un frein à leur utilisation comme animaux de labour (Halstead, 2014; Isaakidou, 2011). En particulier, alors que les bœufs n'offrent que leur puissance, et leur viande après un temps, les vaches, bien qu'elles soient moins efficaces dans le champ, produisent également

du lait et des veaux (Isaakidou, 2011, 2008). Cependant, ces découvertes datent du Néolithique ; à l'Âge du Bronze, le ratio d'ossements mâles et femelles se stabilise et semble indiquer l'utilisation de davantage de bœufs comme animaux de labour au palais de Cnossos (Halstead and Isaakidou, 2011; Isaakidou, 2008, 2006). Les agriculteurs du XX^e siècle utilisaient également les animaux de labour pour battre le grain, en les faisant piétiner la récolte sur le sol de battage, ainsi que pour couper la paille en morceaux facilement stockables en leur faisant traîner des luges aux patins tranchant sur ce même sol de battage (Halstead, 2014).

Le bétail élevé était nourri de paille et de grains lorsqu'il n'était pas dans les pâturages. Ceci correspond aux mois d'hiver, où il est gardé en étables, ainsi que lorsqu'il est utilisé pour la traction et n'a donc pas le temps de paître et requiert beaucoup d'énergie pour travailler (Halstead, 2014; Halstead and Isaakidou, 2011; Isaakidou, 2011, 2008). Une paire de bovins nourris au fourrage pendant la période de labour consomme ainsi autant de grain qu'un à quatre humains adultes annuellement (selon l'intensité du travail requis) (Halstead and Isaakidou, 2011). Le bétail était également une source de fumier, aussi bien lorsqu'il était mis en pâture et fertilisait le sol *in situ* (Halstead, 2006; Isaakidou, 2008) que dans les étables, où le fumier était récolté pour être épandu ensuite (Isaakidou, 2011, 2008). Toutefois, cette dernière technique implique le transport du fumier, qui n'est pas aisé même par traction animale, et les fermiers du XX^e siècle soulignent dès lors qu'ils limitaient ces épandages à un rayon d'environ 500 m autour de l'étable d'où le fumier est récolté (Isaakidou, 2008). Enfin, sur le plan socio-politique, Halstead (2014) souligne que le bétail permettait à ceux qui le possédaient de gagner un certain prestige et de créer des dettes commensales, lorsqu'il était prêté à ceux qui n'en possédaient pas.

Sur base de ces informations, nous avons représenté dans le modèle du système agraire les différentes classes de bétail mentionnées ci-dessus (Fig. 5.1 et 5.6 à 5.10). Certains liens représentés dans le modèle sont spécifiques à une ou plusieurs espèce(s) et seront donc expliqués séparément ci-dessous. D'autres liens sont présents pour tous les types de bétail et seront dès lors expliqués seulement sur base de la Figure 5.6, associée aux bovins, bien qu'ils s'appliquent à toutes les bêtes. La Figure 5.6 représente la place qu'occupait les bovins dans le système agraire minoen de la fin de l'Âge du Bronze. Les bovins et le reste du bétail sont liés aux puits, citernes et à l'eau de surface puisqu'il s'agit de leurs sources d'eau. Ensuite, l'ensemble du bétail est lié au fumier, puisque c'est lui qui le fournit. Le Tableau 5.2 présente les proportions de chaque espèce de bétail élevée à Palaikastro ainsi que la part de fumier produite par chacune. Les bêtes sont également toutes liées à l'entité « Stockage », d'où provient une partie – ou l'ensemble, dans le cas des cochons – de sa nourriture (le grain et la paille récoltés et stockés). De même, le bétail – ici, sauf les cochons – est lié aux pâturages, dont il bénéficie également comme source de nourriture. Enfin, nous avons dessiné un lien depuis l'entité « Travail agricole » vers chacune des entités représentant du bétail, étant donné qu'il faut fournir un travail de plus ou moins grande ampleur pour les nourrir, les abreuver, les

soigner, les déplacer, assurer leur descendance, en tirer des produits secondaires (lait, laine) et les abattre.

Tableau 5.2 : Proportion des ossements animaux retrouvés à Palaikastro pour la période du MR (Livarda et al., 2021), production de fumier par un individu de chaque espèce (Halstead, 2014; Texier et al., 2004) et calcul de la part de fumier totale produite par chaque espèce. MinAU = Minimum Number of Anatomical Units, le nombre minimum d'unités anatomiques.

Ossements retrouvés à Palaikastro			Production de fumier (kg/jour)		
Espèce	MinAU	%	Un animal	Total	%
Bovin	113	6,8	30	3390	20,3
Cochon	80	4,8	1	80	0,5
Mouton	295	17,8	4,5	1327,5	8,0
Chèvre	87	5,2	4,5	391,5	2,3
Chèvre ou mouton	1086	65,1	4,5	4887	29,3
Total chèvres et moutons	1468	88	4,5	6606	39,6

Nous avons lié les bovins aux entités « Lait » (représentant aussi bien le lait proprement dit que ses produits dérivés, comme le fromage) et « Viande ». Enfin, le modèle représente le lien important que nous avons vu entre les bovins et le travail agricole qu'ils fournissent sous forme de traction animale pour le labour, le battage ou encore le transport.

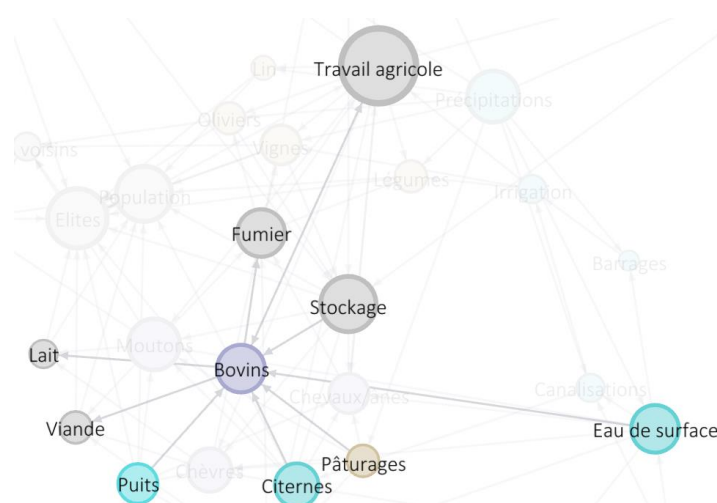


Figure 5.6 : La place des bovins dans le système agraire minoen.

Les moutons (Fig. 5.7) produisent également du lait et de la viande, mais aussi de la laine. En outre, cette laine est destinée à être utilisée par la population locale, c'est pourquoi nous l'avons reliée aux entités « Elites » et « Population », ainsi qu'au commerce (Roberts, 2019) : elle est dès lors liée à l'entité « Pays Voisins ». Les moutons eux-mêmes étant aussi destinés au commerce, ils sont également rattachés à cette dernière entité.

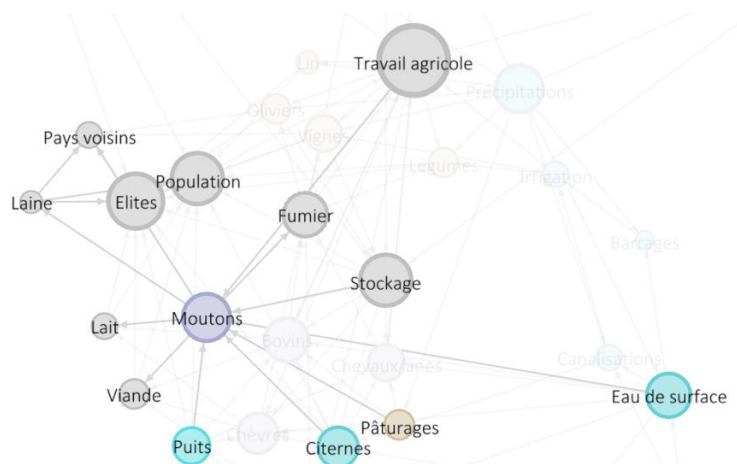


Figure 5.7: La place des moutons dans le système agraire minoen.

Comme illustré à la Figure 5.8, les chèvres présentent les mêmes liens avec les entités « Viande » et « Lait » que les bovins, mais ne participent pas au travail agricole. La Figure 5.9 montre que les cochons avaient pour seule production (outre le fumier) la viande.

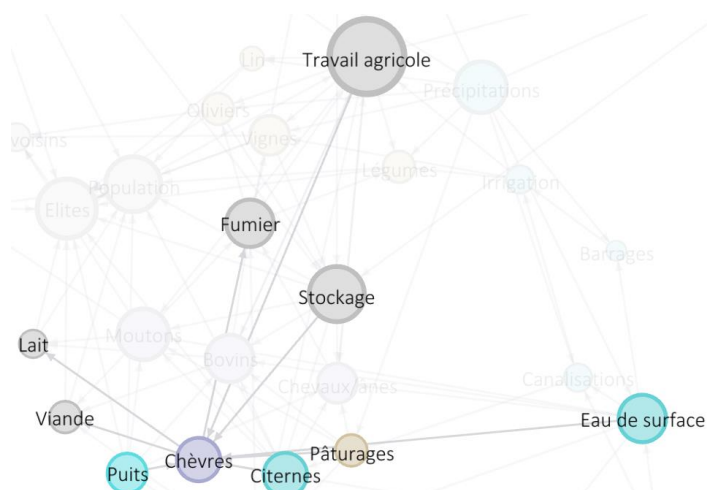


Figure 5.8 : La place des chèvres dans le système agraire minoen.

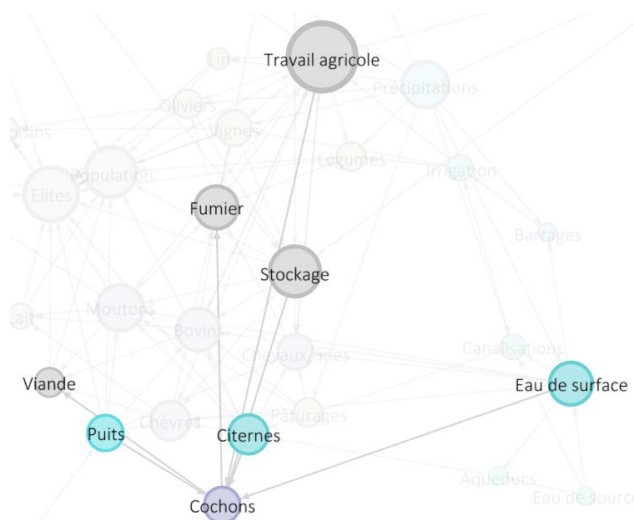


Figure 5.9 : La place des cochons dans le système agraire minoen.

Bien que nous n'ayons pas trouvé de rapport de fouille archéologique soulignant la présence d'ossements d'ânes ou de chevaux avant l'éruption de Santorin, leur utilisation en Europe depuis la fin du III^e millénaire pour le transport et la traction de chariots (Halstead and Isaakidou, 2011) et la mention d'environ 500 chariots et chevaux dans des tablettes en linéaire B du palais de Cnossos (donc postérieures à l'éruption) (Driessen and Macdonald, 1997) nous poussent à les inclure dans notre modèle. En outre, des ossements de chevaux datant du MR II ont été retrouvés à Cnossos (Driessen and Macdonald, 1997). Encore une fois, cette période est postérieure à l'éruption qui a, elle, eu lieu entre le MR IA et IB. Au vu de ces incertitudes, ils ne sont liés dans notre modèle qu'à l'entité « Travail agricole » (Fig. 5.10), pour le transport, puisqu'ils n'auraient en aucun cas été élevés pour une production de viande, et que l'utilisation de leur carcasse en fin de vie ne représenterait qu'un apport mineur à cette production.

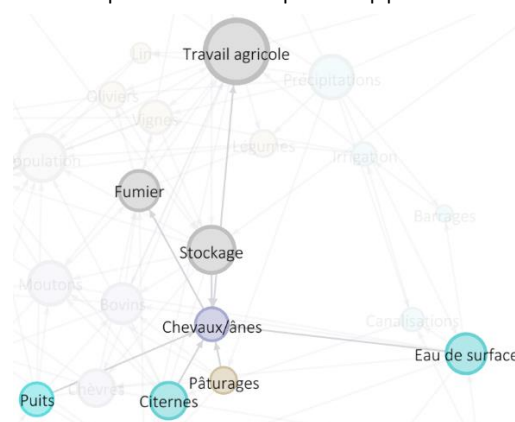


Figure 5.10 : La place des chevaux et ânes dans le système agraire minoen.

5.1.3. Les acteurs et les productions agricoles

Les acteurs humains (la population générale, les élites et les pays voisins), le stockage des denrées, le travail agricole et les productions animales (section 5.1.2) sont représentés en gris dans le modèle du système agraire minoen de la fin de l'Âge du Bronze (Fig. 5.1 et 5.11 à 5.17). Nous distinguons la population générale des élites puisque leur rôle dans le système agraire est totalement différent. Bien que nous ne sachions pas exactement comment les communautés rurales interagissaient avec les centres urbains (Christakis, 2019), il est clair qu'une partie de la population travaillait dans le secteur agricole et non l'élite. Christakis (2019) suggère, pour la Baie de Mirabello (qui comprend les villes de Gournia, Pseira et Mochlos, Fig. 2.2), que la terre avoisinante ne pouvait suffire à entretenir la population urbaine, et que le secteur rural devait lui apporter de quoi combler sa demande en denrées alimentaires.

Alors que l'aspiration des agriculteurs d'avant la mécanisation était de produire assez de surplus pour subvenir à leurs besoins pour un an (Christakis, 2019; Halstead, 2014), ce n'était pas le cas pour la majorité des foyers du MR. Ces foyers ne possédaient pas de quoi stocker assez de denrées afin de se nourrir pendant une année, ce qui a pu créer des relations de dépendance envers l'élite (Christakis, 2019). De fait, selon certains, une partie des différents

produits étaient soumis à un système de redistribution coordonné par les centres de pouvoir (Driessen and Macdonald, 1997; Halstead, 2014; Hamilakis, 1999; Livarda and Kotzamani, 2013; Siart and Eitel, 2013a). Néanmoins, Christakis (2019) doute de l'implication des palais dans la distribution des biens alimentaires de base entre les différents foyers et propose que de tels échanges eurent eu lieu via des marchés, bien qu'il n'en connaisse ni la taille ni l'organisation. Quoi qu'il en soit, les palais et villas occupés par l'élite comprenaient des installations de stockage des denrées (Driessen and Macdonald, 1997; Hamilakis, 1999; Livarda and Kotzamani, 2013; Roberts, 2019).

Trois niveaux de stockage des denrées sont identifiés : central, communautaire et domestique, en fonction du mode d'acquisition des biens qui y sont entreposés et de leur redistribution. Le système central tire ses denrées notamment du commerce et des taxes et sont administrés par l'élite. Le stockage communautaire sert à entreposer les biens destinés au paiement des taxes et du surplus en cas de famine. Enfin, le stockage domestique est utilisé au niveau du foyer (Christakis, 2008; Driessen and Macdonald, 1997; Halstead, 2014). Certaines grottes, comme celle dite d'Ourania, à Zakros (Fig. 2.2) étaient également utilisées à des fins de stockage (Kopaka, 2011; Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013; Platon, 2013). Outre des pièces qui y étaient dédiées, le stockage se présentait également sous la forme de puits, parfois plâtrés, fermés (Christakis, 2019; Halstead, 2014). Parmi les maisons ayant fait l'objet de fouilles archéologiques dans la Baie de Mirabello, seules quelques-unes présentent des preuves de stockage de denrées alimentaires de base (Christakis, 2019). L'un des modes de stockage le plus fréquent est l'utilisation de pithoi, qui sont des jarres profondes. De telles jarres dont le volume varie typiquement entre 200 et 800 litres, mais pouvant parfois aller jusqu'à 2000 litres, appartenant peut-être à l'élite, ont été retrouvées dans des bâtiments à Mochlos et Pseira (Christakis, 2019). Des plus petites jarres ainsi que des amphores étaient également utilisées à des fins de stockage, ainsi que des contenants périssables tels des paniers, sacs en tissu, etc. (Christakis, 2019; Halstead, 2014).

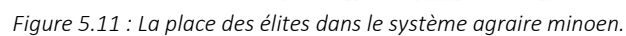
En ce qui concerne ses relations avec les pays voisins, la Crète exportait du vin, de l'huile d'olive, ainsi que de la laine et des moutons (voir section 5.1.2) mais n'importaient pas de denrées alimentaires pour la subsistance de sa population, seulement les articles de luxe étaient introduits de l'extérieur (Roberts, 2019). De nombreuses autres denrées non-alimentaires faisaient l'objet d'imports et d'exports, mais ne feront pas l'objet de notre étude. Le commerce avec les pays voisins était bien entendu maritime (Jarriel, 2020; Knappett et al., 2011, 2008; Roberts, 2019), et requérait des bateaux, mais aussi l'installation de ports et de greniers et infrastructures de stockage à proximité du point de déchargement (Roberts, 2019).

Enfin, le travail agricole consistait en premier lieu au travail des champs. Celui-ci commence par le labour, à la main ou à l'aide d'animaux de trait (Halstead, 2014; Isaakidou, 2011, 2006). Les agriculteurs n'ayant pas les moyens d'entretenir un animal de trait pouvaient s'allier avec un

voisin dans la même position et subvenir ensemble aux besoins de l'animal (Isaakidou, 2011) ou emprunter la bête d'un voisin en échange de main-d'œuvre ou de denrées alimentaires (Halstead, 2014). Après le labour viennent le semis, le désherbage, la récolte, le battage et le vannage (dans le cas de céréales), voire le tamisage, ainsi que le transport et le stockage des récoltes (Halstead, 2014). Les agriculteurs employaient divers outils pour ces tâches, comme l'araire et le joug (Halstead, 2014; Halstead and Isaakidou, 2011; Roberts, 2019), la faucille et la houe (Allbaugh, 1953; Halstead, 2014), des bâtons et des traîneaux pour le battage (à la main ou par traction animale, respectivement) (Halstead, 2014; Halstead and Isaakidou, 2011) ainsi que des traîneaux et chariots de transport (Halstead and Isaakidou, 2011; Isaakidou, 2008). L'épandage de fumier faisait également partie des tâches des agriculteurs. Ils se livraient également à la construction de terrasses dans les paysages vallonnés pour la culture de céréales, probablement de l'orge, plus résistante aux conditions sèches, et de légumineuses, ainsi que de quelques oliviers (Halstead, 2014; Livarda et al., 2021).

Les vignes faisaient également partie du paysage crétois. Le travail agricole consiste dans un premier temps à la préparation du terrain et à la plantation des pieds de vignes. Après quelques années, le travail des vignes requiert l'entretien des plantes et les vendanges, ainsi que le pressage d'une partie du grain pour la fabrication de vin (Hamilakis, 1999, 1996; Livarda et al., 2021) (voir section 5.1.4), alors que l'autre partie était consommée sous forme de fruits (Livarda et al., 2021). Dans le cadre de la culture d'oliviers, il s'agit également de planter les arbres et, des années plus tard, d'en récolter les fruits et, au moins en partie, d'en faire de l'huile d'olive (Hamilakis, 1999, 1996; Livarda et al., 2021; section 5.1.4). Enfin, les arbres fruitiers font l'objet d'une récolte et du stockage des fruits.

Sur base de ces informations, nous avons représenté dans le modèle du système agraire les différentes entités discutées ci-dessus. La Figure 5.11 représente la place qu'occupent les élites dans le modèle. Les entités « Puits » et « Citernes » assuraient approvisionnement de ceux-ci en eau (section 5.1.1). Les élites sont également liées aux productions agricoles et animales, qui leur servent de source de nourriture, d'huile, de vin, de laine et de lin. Notons que nous avons lié les arbres fruitiers directement aux élites, puisque certains fruits se consomment rapidement après la récolte, alors que les entités « Céréales » et « Légumineuses » n'arrivent jusqu'aux élites (et à la population générale) que *via* l'entité « Stockage ». Bien entendu, une partie de la production fruitière passe également par le stockage. Les élites présentent également un lien avec l'entité « Population » puisqu'ils devaient, d'une certaine manière encore méconnue, exercer un pouvoir sur elle. Enfin, nous avons utilisé un lien entre les élites et les pays voisins pour représenter le commerce exercé entre ceux-ci.



37

Comme l'illustre la Figure 5.13, la population est, à l'instar des élites (Fig. 5.11), liée aux entités « Puits » et « Citernes » ainsi qu'aux différentes productions animales et végétales. Contrairement aux élites, l'entité « Oliviers » n'est pas liée à celle de la « Population » car il semblerait que l'utilisation de l'huile d'olive eut été réservée aux élites (voir section 5.1.4). La population est également liée au « Travail agricole » puisque c'est précisément elle qui l'effectue.

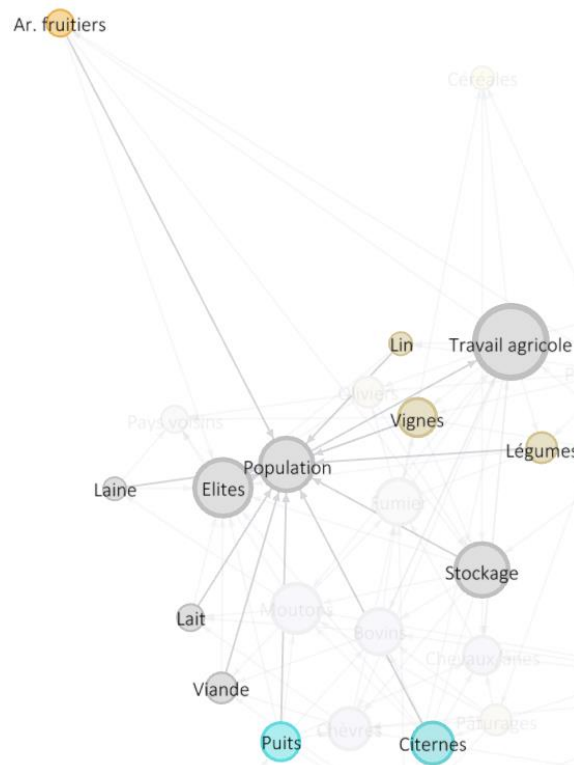


Figure 5.13 : La place de la population dans le système agraire minoen.

La Figure 5.14 présente l'entité des « Pays voisins », reliés aux entités qui faisaient l'objet de commerce à l'époque (huile d'olive, vin, laine et moutons) ainsi qu'aux élites, avec lesquels ces échanges avaient lieu.

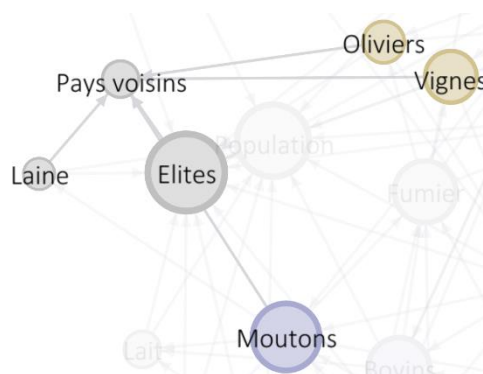


Figure 5.14 : La place des pays voisins dans le système agraire minoen.

La Figure 5.15 montre l'importance du travail agricole dans le système agraire. Il est lié à l'irrigation (voir section 5.1.1) et aux différentes classes de bétail (voir section 5.1.2), mais aussi

au fumier puisque le fait de récolter le fumier en étable et de le répandre sur les champs, de même que celui de déplacer des animaux en enclos afin de les faire paître et fertiliser le champ *in situ* requiert du travail agricole. Rappelons que les « Bovins » et « Chevaux et âne » fournissent également du travail agricole et n'en sont pas seulement l'objet. Les différentes entités représentant des productions végétales sont également liés au travail agricole afin de rendre compte du travail de labour, semis, désherbage, récolte, battage, vannage et stockage dont s'accompagnent ces cultures.

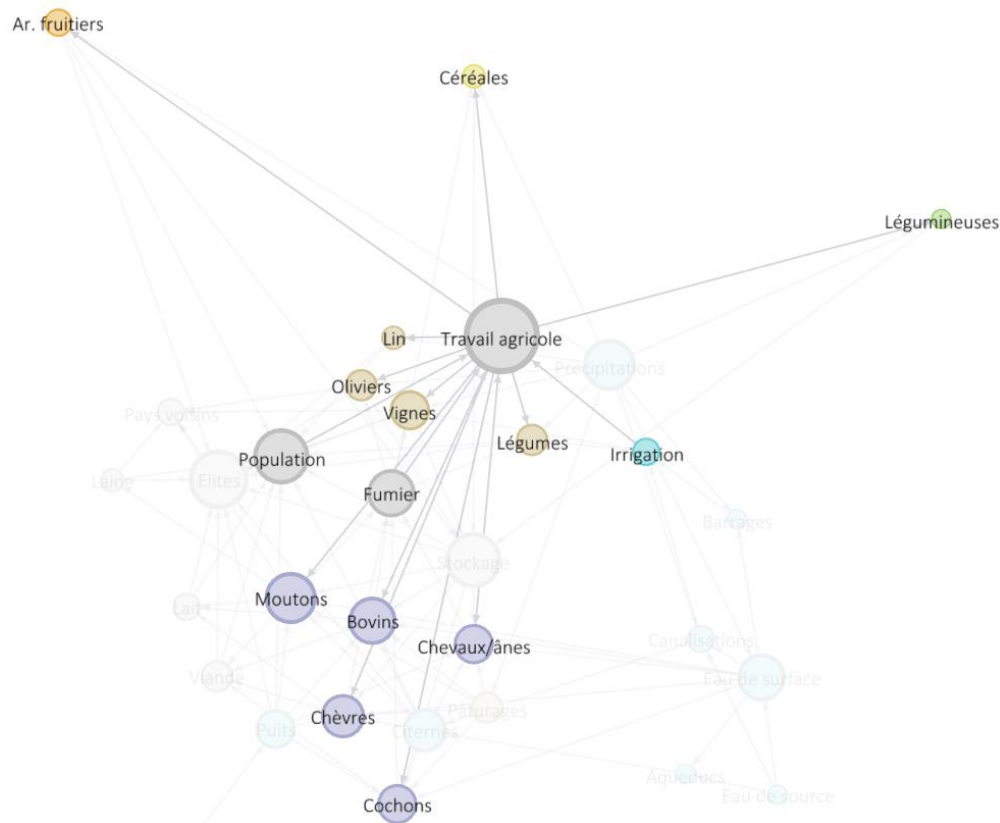


Figure 5.15 : La place du travail agricole dans le système agraire minoen.

Comme le montre la Figure 5.16, le bétail produit le fumier, qui est ensuite utilisé pour fertiliser en azote (Halstead, 2014) les oliviers, vignes, légumes et céréales. Par « Légumes », nous entendons les espèces potagères cultivées à petite échelle, proche des habitations, par opposition aux espèces végétales cultivées en champ. Nous considérons que le fumier n'était pas utilisé pour fertiliser les arbres fruitiers, car c'est une méthode peu commune et peu pratique, surtout lorsque les vergers sont situés loin des étables où le fumier est récolté. De même, nous ne présentons pas de lien entre le fumier et l'entité des « Légumineuses » puisque, par leur capacité à s'associer à des bactéries spécifiques qui produisent de l'azote assimilable par la plante, cette catégorie de végétaux n'a fondamentalement pas besoin d'être fertilisée.

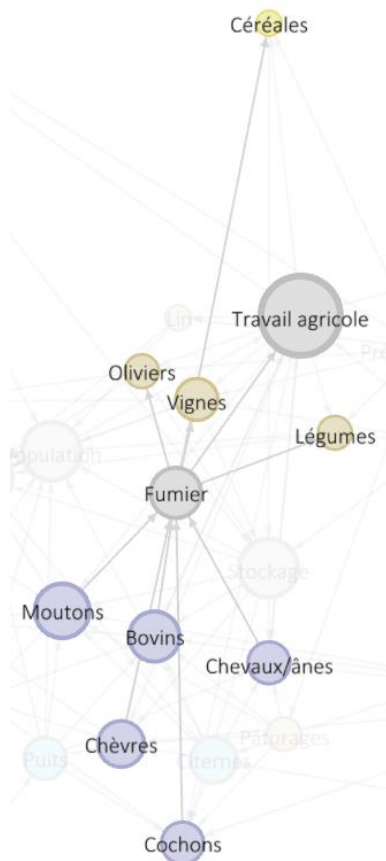


Figure 5.16 : La place du fumier dans le système agraire minoen.

Finalement, la Figure 5.17 présente les différentes entités de productions animales : la « Laine », le « Lait » et la « Viande », qui sont reliées aux espèces animales qui en sont les sources respectives, ainsi qu'à la population et aux élites, qui les consommaient. Dans le cas de la laine, nous avons également présenté le lien avec les pays voisins puisqu'elle faisait l'objet de commerce.

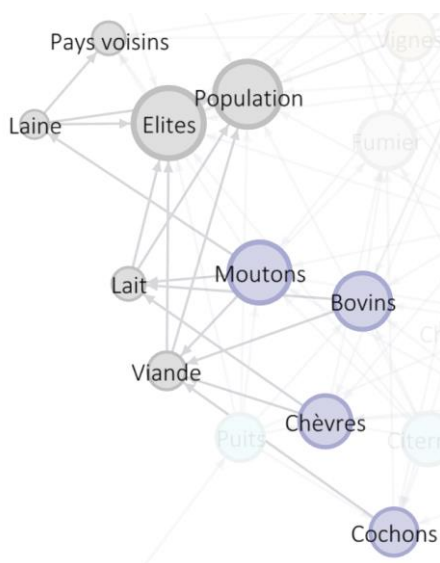


Figure 5.17 : La place des productions animales dans le système agraire minoen.

5.1.4. Les cultures

Les cultures et le pâturage sont indiquées par les autres couleurs dans le modèle (Fig. 5.1 et 5.19 à 5.23) : les arbres fruitiers en orange, les céréales en jaune, les légumineuses en vert, le lin, les oliviers, les vignes, les légumes (c'est-à-dire les espèces potagères) et les pâturages en marron clair. La détermination du types de plantes présentes en Crète à cette époque se base, d'une part, sur les découvertes de résidus carbonisés sur les différents sites archéologiques et, d'autre part, sur l'étude de pollens retrouvés dans des carottes de sols crétois (Bottema and Sarpaki, 2003; Hamilakis, 1996; Livarda and Kotzamani, 2013).

Alors que les arbres fruitiers étaient vraisemblablement destinés à la consommation humaine, les céréales et légumineuses servaient aussi bien à nourrir la population que le bétail. En effet, les animaux de trait, n'ayant pas le temps de paître, sont nourris de fourrage (voir section 5.1.2). De même, lorsque le bétail est gardé en étable pendant l'hiver, il ne peut que se nourrir de foin, de paille et de fourrage. La paille provenait du traitement des céréales : après le battage et le vannage, elle était récupérée et stockée (Halstead, 2014). Si le battage était réalisé par traction animale à l'aide de traîneaux, ces traîneaux pouvaient être équipés de lames afin de couper la paille en morceaux plus faciles à transporter et stocker (Halstead, 2014; Halstead and Isaakidou, 2011). Les terres agricoles pouvaient également être fauchées à la fin du printemps pour la production de foin. Quant au grain, il est de plus en plus évident qu'il était largement utilisé pour nourrir le bétail pendant la préhistoire (Halstead, 2006). De plus, les agriculteurs méditerranéens non mécanisés du XX^e siècle expliquent que, selon la réussite de la récolte, une partie du grain destiné aux humains pouvait être redirigé vers le bétail, et vice-versa (Halstead, 2014, 2006). Si l'année a été trop sèche, les céréales n'étant pas arrivées à maturité étaient coupées et utilisées comme fourrage. Enfin, les céréales et légumineuses pouvaient être récoltées vertes, avant la production de grain (et donc à une autre période que leurs comparses mûres, ce qui présente l'avantage d'allonger la saison de récolte) pour servir de fourrage (Halstead, 2014). Contrairement au vin et à l'huile d'olive (voir *infra*), les légumineuses et les céréales ont été retrouvées dans de nombreux contextes élités et populaires et ne faisaient donc pas l'objet d'une différenciation sociale ou spatiale particulière (Livarda and Kotzamani, 2013). Le lin était cultivé pour ses fibres, dans le cadre de la fabrication de tissus (Christakis, 2019; Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013; Sarpaki, 2009), et possiblement pour ses graines pour la production d'huile (Sarpaki, 2009). Les espèces d'arbres fruitiers, de céréales et de légumineuses cultivées à l'époque minoenne seront explicitées à la section 5.2.

Bien que la culture d'oliviers et de vignes remonte au Néolithique (Bottema and Sarpaki, 2003; Livarda and Kotzamani, 2013), leur utilisation intensive pour la production d'huile et de vin n'est observée que pour le MR (Hamilakis, 1999, 1996; Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013). Notons aussi que ces deux denrées étaient également utilisées dans des contextes religieux (Roberts, 2019). La culture de l'olive a permis aux Minoens d'exploiter des terres

agricoles marginales à des fins de production (Riley, 2012). Les oliviers leur apportaient le fruit, ainsi que l'huile qui en est tirée et le bois, aussi bien pour la construction de charpentes que pour la cuisine et le chauffage (Riley, 2012). Dans le cadre de la culture des oliviers et la production d'huile d'olive, les informations archéologiques sont abondantes (Bottema and Sarpaki, 2003; Hamilakis, 1996; Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013; Roberts, 2019; Sarpaki, 2009). Si l'étude des pollens atteste de la présence d'oliviers dans les régions de Kournas et Delphinos, à l'Ouest de la Crète, ils semblent être plus abondants dans la région de Palaikastro (entre 30% et 40% contre 19% et 6% du pollen total) (Bottema and Sarpaki, 2003). Ceci suggère une spécialisation de la culture d'oliviers à l'Est de l'île (Livarda et al., 2021). Au niveau des résidus de plantes révélant la présence d'olives, les plus communs sont les noyaux, qui ont de bonnes chances d'être conservées à travers le temps. En outre, leur utilisation en tant que combustible permet leur préservation sous forme de résidu carbonisé (Hamilakis, 1996; Livarda et al., 2021). Notons également que la découverte de noyaux d'olives brisés peut indiquer la fabrication d'huile d'olive, puisque celle-ci requiert le pressage des olives contre des surfaces dures (Hamilakis, 1996).

La production d'huile d'olives requérait l'utilisation de presses et de bassins de séparation, servant à dissocier l'eau de l'huile. De tels artefacts ont été découverts sur de nombreux sites archéologiques, répartis à l'Est et au Centre de la Crète (Hamilakis, 1996; Riley, 2012). Alors que certains (Riley, 2012) prêtent à l'huile des fins culinaires et d'éclairage, d'autres soulignent son utilisation dans le cadre de la production de parfums, utilisés par l'élite et pour le commerce (Hamilakis, 1996; Roberts, 2019). On soulignera que la plupart des résidus végétaux et des outils dédiés à la fabrication d'huile ont été découverts dans des contextes élités (Fig. 5.18) : des palais, des bâtiments destinés à l'élite et de grandes villes où habitaient vraisemblablement une forme d'élite dans sa hiérarchie (Hamilakis, 1996).



Figure 5.18 : Carte des sites archéologiques crétois de l'Âge du Bronze présentant des trouvailles liées aux vignes, vin, olives et à l'huile d'olive (Hamilakis, 1996).

De nombreuses instances de pollen attestent la présence de viticulture (Bottema and Sarpaki, 2003). Les résidus de plantes retrouvés le plus fréquemment sont leurs pépins, et la production

de vin requiert des pressoirs et des jarres (Christakis, 2008; Hamilakis, 1996; Livarda and Kotzamani, 2013; Sarpaki, 2009). Comme dans le cas des olives, la majorité des trouvailles viennent de contextes élites (Fig. 5.18), à savoir des palais, grandes villes et « villas » de hauts rangs (Hamilakis, 1996). Selon Hamilakis (1996), le vin aurait pu être un objet réservé aux élites au vu de ces trouvailles et des tablettes en Linéaire B (postérieures à l'éruption de Santorin) attestant de son utilisation par les personnes de haut rang dans les palais. Il souligne également que le vin aurait pu être l'objet d'échanges intra-élites et consommé dans le cadre de fêtes et de banquets, jouant ainsi un rôle important dans la légitimation des élites et la consolidation de leur pouvoir (Hamilakis, 1999, 1996). Cependant, Livarda et al. (2021) notent que, dans le cas de Palaikastro, des presses ont été découvertes à travers la ville, de même que de nombreuses coupes et contenants destinés à verser du liquide (qui n'était pas nécessairement du vin) et rejoignent l'idée de Christakis (2008) selon laquelle le vin n'était pas réservé à l'élite. Quoi qu'il en soit, le vin était à la fois une denrée destinée au commerce et à la consommation (Roberts, 2019).

Sur base de l'ensemble des informations présentées *supra*, nous avons intégré dans notre modèle les différentes entités représentant les espèces végétales cultivées ainsi que les pâturages. La Figure 5.19 montre les entités des « Arbres fruitiers », « Céréales », « Légumineuses » et « Légumes ». Toutes les entités sont liées au travail agricole, dont elles sont l'objet, et aux précipitations qui les approvisionnent en eau. Les légumes représentent, quant à eux, la seule de ces quatre entités à être liée à « l'irrigation » (voir section 5.1.1). Le fumier n'est utilisé pour fertiliser que les légumes et les céréales (voir section 5.1.3). Alors que les produits des arbres fruitiers, céréales et légumineuses sont stockés (voir section 5.1.3), l'entité des « Légumes » représente les végétaux produits pour une consommation directe dans des potagers privés et ne sont dès lors pas stockés.

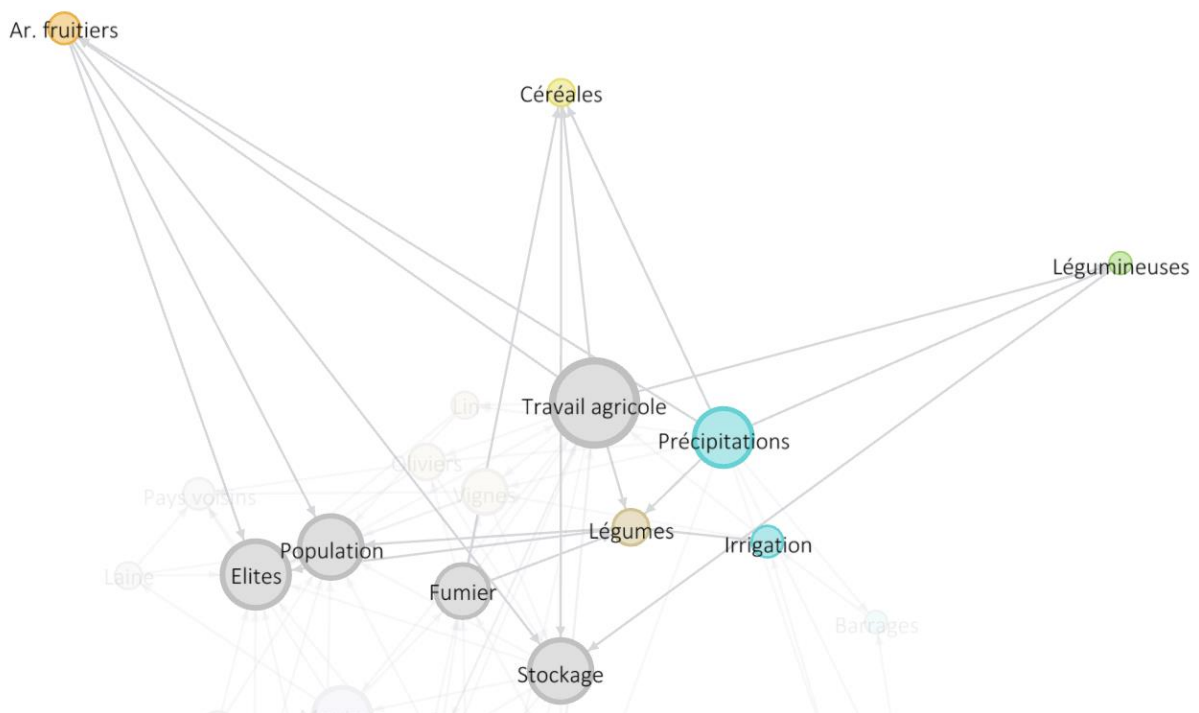


Figure 5.19 : La place des arbres fruitiers, céréales, légumineuses et légumes (espèces potagères) dans le système agraire minoen.

La Figure 5.20 illustre la place du lin dans le modèle du système agraire. Il bénéficie également des précipitations et du travail agricole et est directement lié aux différents membres de la population dans le cadre de son utilisation comme source de fibres de tissu.

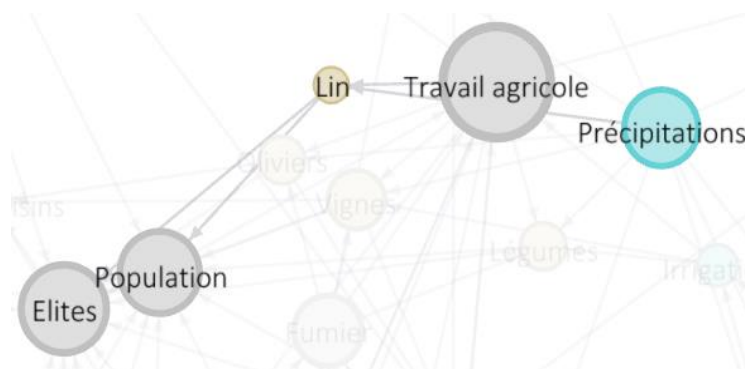


Figure 5.20 : La place du lin dans le système agraire minoen.

La Figure 5.21 présente l'entité des « Oliviers » et ses connections aux entités des « Précipitations », « Fumier », « Travail agricole » et au « Stockage » (principalement sous forme d'huile). Au vu de son utilisation, semble-t-il, majoritaire par les élites, que ce soit sous forme d'huile ou de parfum, nous avons décidé de ne pas la relier à l'entité de « Population » mais seulement à celle des « Elites », ainsi qu'aux « Pays voisins » afin d'en attester le commerce.

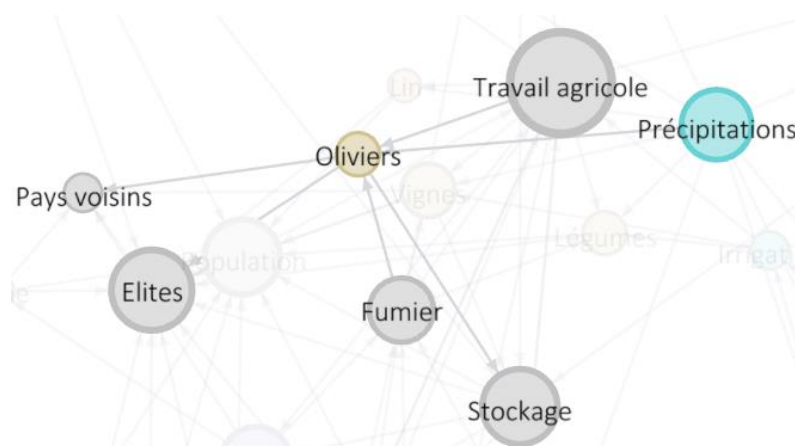


Figure 5.21 : La place des oliviers dans le système agraire minoen.

La Figure 5.22 présente l'entité des « Vignes » et ses connections. Elle présente les mêmes liens que l'entité des « Oliviers », à deux exceptions près. Premièrement, elle est également reliée à l'irrigation (voir section 5.1.1). Deuxièmement, au vu de sa consommation répandue sous forme de fruit et de la possibilité d'une utilisation étendue du vin dans la population générale et pas seulement au niveau des élites, nous avons relié les « Vignes » à l'entité de la « Population ».

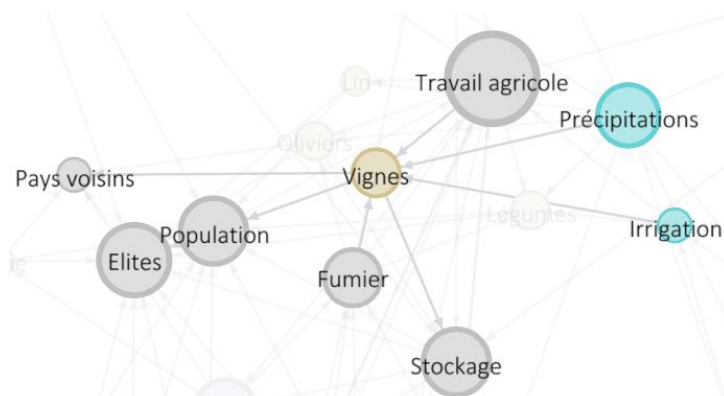


Figure 5.22 : La place des vignes dans le système agraire minoen.

Enfin, la Figure 5.23 montre la place des pâturages dans notre modèle. Ces terres bénéficient d'un apport d'eau venant des précipitations et servent à l'alimentation des moutons, chèvres, bovins, chevaux et ânes.

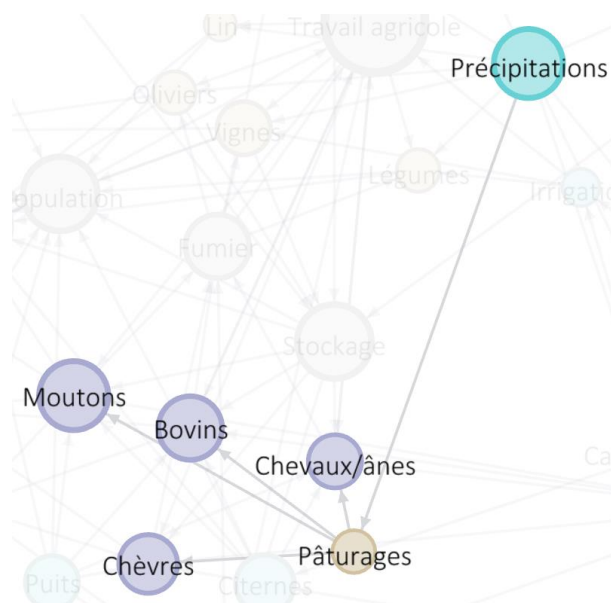


Figure 5.23 : La place des pâtures dans le système agricole minoen.

5.2. Les plantes cultivées à la fin de l'Âge du Bronze en Crète

Au vu de l'importance de la saison comme un facteur contrôlant la sévérité de l'impact sur les cultures d'un dépôt de téphra (Wilson et al., 2007), et en rappelant que l'éruption de Santorin a probablement eu lieu au début de l'été (voir section 2.2.4), nous avons décidé d'expliciter dans notre modèle les plantes qui étaient cultivées à l'époque minoenne afin de pouvoir prendre en compte le calendrier des cultures dans les effets du dépôt de téphra sur l'île. La détermination des espèces de plantes cultivées se base sur des résidus de plantes carbonisés et sur la palynologie (voir section 5.1.4).

Le Tableau 5.3 présente les plantes cultivées et consommées en Crète minoenne, telles que le confirment l'archéologie et la palynologie. Dans le cas de l'olivier, il s'agit d'un arbre qui produit de façon bisannuelle : une année sur deux, l'olivier produit de nouvelles branches et le feuillage associé, et l'année suivante il produit des fruits sur ces nouvelles branches (Hamilakis, 1999). Au niveau des céréales, le blé offrant une plus grande facilité au battage est le blé à glume (l'amidonnier et l'engrain) et ce dernier se prête donc mieux à une agriculture extensive, puisqu'un traitement plus simple de gros volumes permet un stockage de grains propres pour la consommation immédiate (c'est-à-dire ne devant plus être traité une fois sorti du stockage avant d'être consommé) et le transport (Livarda and Kotzamani, 2013; Sarpaki, 2009). Bien qu'il soit moins adapté à des environnements pauvres que le blé à glume et l'orge, il a de bonnes qualités nutritives et de panification (Livarda et al., 2021). Le millet semble apparaître à l'époque du Néopalatial et est attesté à Zominthos, Malia, Chania et Cnossos.

Tableau 5.3 : Plantes cultivées en Crète minoenne, attestées par l'archéologie et la palynologie.

	Plante	Source
Arbres fruitiers	Amande	(Christakis, 2019; Livarda and Kotzamani, 2013; Sarpaki, 2009)
	Baie de sureau	(Livarda and Kotzamani, 2013)
	Caroube	(Bottema and Sarpaki, 2003)
	Figue	(Allbaugh, 1953; Christakis, 2019; Livarda and Kotzamani, 2013; Roberts, 2019; Sarpaki, 2009)
	Grenade	(Allbaugh, 1953; Livarda and Kotzamani, 2013)
	Olive	Notamment (Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013; Riley, 2012)
	Poire	(Roberts, 2019)
	Raisin	Notamment (Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013; Riley, 2012)
	Térébinthe	(Bottema and Sarpaki, 2003; Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013)
Céréales	Amidonier (<i>Triticum turgidum</i>)	(Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013; Sarpaki, 2009)
	Blé dur (<i>Triticum durum</i>)	<i>Idem</i>
	Engrain (<i>Triticum dicoccum</i>)	<i>Idem</i>
	Orge enrobé à deux rangs	<i>Idem</i>
	Orge enrobé à six rangs	<i>Idem</i>
	Orge nu	<i>Idem</i>
	Millet	(Livarda and Kotzamani, 2013)
Légumineuses	Ervillier	(Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013)
	Fève	(Christakis, 2019; Livarda and Kotzamani, 2013; Sarpaki, 2009)
	Gesse commune	(Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013)
	Lentille	(Christakis, 2019; Livarda et al., 2021; Livarda and Kotzamani, 2013; Sarpaki, 2009)
	Pois	(Allbaugh, 1953; Christakis, 2019; Livarda et al., 2021; Sarpaki, 2009),
	Pois chiche	(Halstead, 2014; Roberts, 2019)
	Radis sauvage	(Livarda and Kotzamani, 2013; Sarpaki, 2009),
	Vesce de Chypre	(Livarda and Kotzamani, 2013; Panagiotakopulu et al., 2013)
	Vesce espagnole	(Livarda and Kotzamani, 2013; Panagiotakopulu et al., 2013)

Ces informations nous permettent de préciser notre modèle en y ajoutant les espèces de plantes cultivées, comme le montre la Figure 5.24.

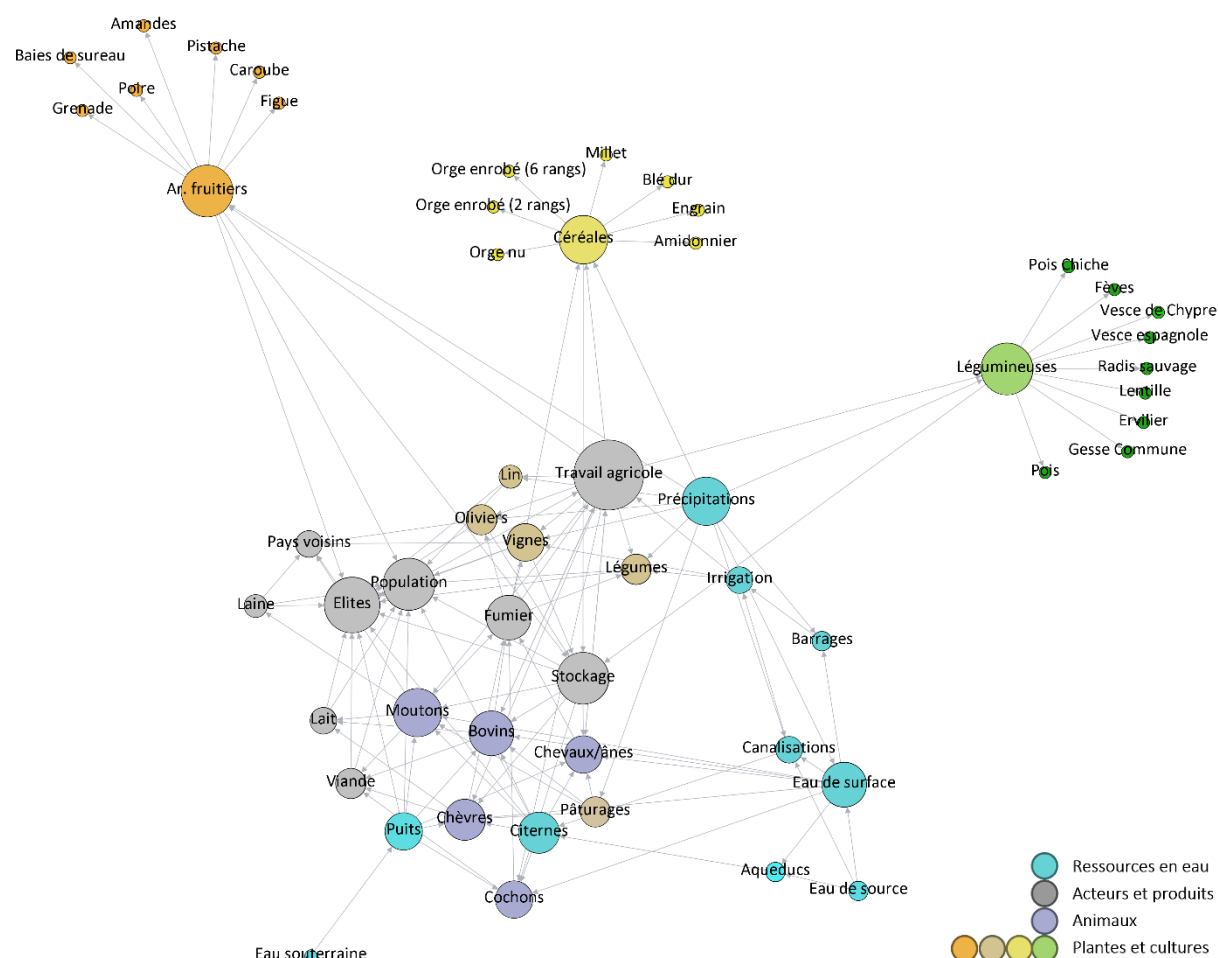


Figure 5.24 : Modèle du système agraire minoen à la fin de l'Âge du Bronze, présentant l'explicitation des espèces végétales cultivées, reprises précédemment sous leurs simples familles « Arbres Fruitiers », « Céréales » et « Légumineuses » (Figure 5.1).

Une fois le modèle du système agraire actualisé en tenant compte des types de plantes cultivées à l'époque minoenne en Crète, nous avons réalisé un calendrier agricole (Tableau 5.4), spécifique à chaque culture, et dans lequel les périodes de semis, de floraison et de récolte sont représentées. Le calendrier des cultures est essentiel dans l'évaluation des impacts potentiels liés aux retombées de téphra de Santorin sur l'île (voir section 5.3).

Tableau 5.4 : Calendrier des cultures exploitées à l'époque minoenne avant l'éruption de Santorin.

	Culture	Semis	Floraison	Récolte
Céréales	Amidonnier	A ou P	Mai	Juin
	Engrain	A ou P	Mai	Juin
	Blé dur	A ou P	Mai	Juin
	Orge nu	A ou P	Mai	Juin
	Orge enrobé (à deux rangs)	A ou P	Mai	Juin
	Orge enrobé (à six rangs)	A ou P	Mai	Juin
	Millet	A ou P	Mai	Juillet
Légumineuses	Lentille	Fin A - début H ou P	Juin	Juillet
	Fèves	Fin A - début H ou P	Mars-avril	Juillet
	Vesce espagnole	Fin A - début H ou P	Février-avril	Mai
	Vesce de Chypre	Fin A - début H ou P	Février-avril	Mai
	Pois Chiche	P	Juin	Juillet
	Radis sauvage	Toute l'année	Toute l'année	Toute l'année
	Ervilier	Fin A - début H ou P	Mars-avril	Mai
	Gesse Commune	Fin A - début H ou P	Mars-avril	Mai
	Pois	Fin A - début H ou P	Mars-avril	Mai
Arbres fruitiers	Raisin	N/A	Juin	Septembre
	Olive	N/A	P	Fin A - début H
	Figue	N/A	P-E	E
	Poire	N/A	P	Sept. - octobre
	Pistache	N/A	P	Septembre
	Amandes	N/A	Février-mars	Août – sept.
	Baies de sureau	N/A	Mai-juin	E
				Fin août-
	Grenade	N/A	Mai-août	novembre
	Caroube	N/A	A	Juillet-août
	Noix	N/A	Mai-juin	Octobre
	Lin	Mars-avril	Juin	Juillet-août

Pour les périodes où le mois n'est pas précisé, c'est la saison (printemps (P), été (E), automne (A) ou hiver (H) qui est indiquée). Sources : (Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB), 2018; "Fructification des oliviers : de la fleur au fruit," n.d.; "Lentille, Lens culinaris," n.d.; "Les sureaux (Sambucus sp.)," n.d.; "Pois chiche, Cicer arietinum," n.d.; Halstead, 2014; Panagiotakopulu et al., 2013; Phrygana, 2021, 2020; Roberts, 2019; SUDEXPE, n.d.)

5.3. Impact du téphra sur le système agraire : deux scénarios

5.3.1. Premier scénario : 1 mm de téphra atteint l'île

Dans ce premier scénario, nous considérons qu'un millimètre de téphra venant de Santorin se dépose en Crète. La Figure 5.25 montre tous les impacts directs du téphra sur le système agraire que nous avons répertoriés. Les impacts quantifiables ont été divisés en trois classes de sévérité (voir section 4) : impact faible (1 à 19%), impact moyen (20 à 49%) et impact fort (50 à 100%).

Nous considérons que les plantes étant en floraison en juin, au moment de l'éruption, subissent un impact fort : c'est le cas des baies de sureau, des grenades, des pois chiches, des lentilles, du lin et des vignes. Les autres arbres fruitiers, n'étant pas en fleurs, ne subissent que des dégâts mineurs ; il en va de même pour les fèves et les espèces potagères. En ce qui concerne le reste des légumineuses, nous n'avons pas représenté d'impact direct étant donné qu'elles sont récoltées en mai, soit avant l'éruption : elles sont donc impactées via l'entité du « Stockage ». Enfin, les dégâts sur les céréales sont considérés comme « non quantifiés » car, d'une part, l'étude de Wilson et al. (2007) n'en parle pas et, d'autre part, le mois de juin est le mois de récolte de ces cultures. Dès lors, il ne s'agirait pas ici seulement de l'impact du téphra sur la croissance de la plante ou de sa contamination sur pied, mais aussi des impacts au niveau des plantes qui sont coupées, posées au sol, battues, vannées, transportées et stockées. La quantification devient dès lors très complexe.

En ce qui concerne l'impact des retombées de téphra sur le bétail, les informations fournies par Jenkins et al. (2015) et Wilson et al. (2007) suggèrent qu'un dépôt d'un millimètre ne devrait pas avoir trop de conséquences néfastes. Nous avons choisi de présenter les impacts du téphra directement sur les animaux en question (les bovins, les moutons, les chèvres, les chevaux et les ânes), et non sur leurs productions respectives, car il s'agit ici en grande partie de perte de production suite à la mort du bétail : nous considérons dès lors que les diminutions de la quantité de laine, viande, lait et fumier produits sont proportionnelles à la perte d'animaux. Notons que ceci peut s'avérer inexact dans le cas de la laine : si l'éruption survient avant la tonte, la laine peut être contaminée et impossible à laver, et la tonte peut être plus complexe et lente à cause du caractère abrasif du téphra, qui va abîmer les outils (Craig, 2015b).

Enfin, l'arrivée de téphra sur l'île aura également un impact sur les infrastructures liées aux ressources en eau (voir section 2.2.6) et les eaux de surfaces, mais nous ne sommes pas en mesure de quantifier cet impact. De même, le téphra peut, dans une certaine mesure, s'infiltrer dans les différentes constructions destinées au stockage et contaminer une partie de la récolte qui y est entreposée. Cependant, ne disposant pas d'un relevé complet des différents types de stockage (pièces de stockage, silos, trous aménagés sous les maisons... (Christakis, 2008; Driessen and Macdonald, 1997; Halstead, 2014)), de leurs contenances ni de leurs vulnérabilités à une infiltration de téphra, nous en sommes pas en mesure de quantifier la perte de ressources due à cette contamination.

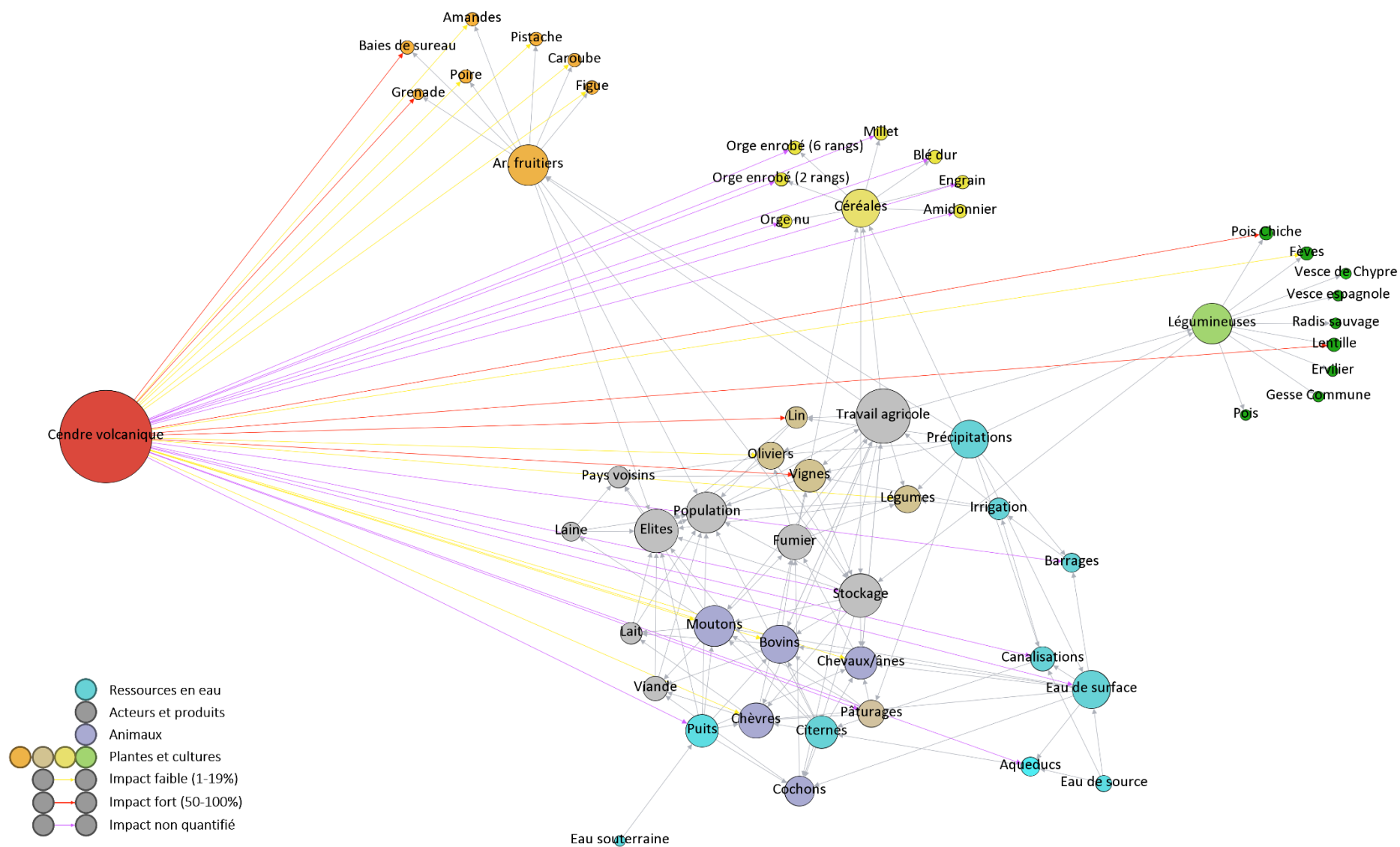


Figure 5.25 : Impacts sur le système agricole minoen suite au dépôt d'un millimètre de téphra après l'éruption de Santorin.

5.3.2. Deuxième scénario : 10 mm de téphra atteignent l'île

Dans le deuxième scénario, 10 mm de téphra sont déposés sur la partie orientale de la Crète. Comme le présente la Figure 5.26, les plantes en floraison au moment de l'éruption sont toujours soumises à un impact fort, mais cette fois-ci même les cultures qui ne sont pas à ce même stade de développement voient leur production chuter drastiquement : les dégâts sont considérés supérieurs à 50%.

Au niveau de la production animale, encore une fois, l'accroissement de l'épaisseur du dépôt de téphra entraîne des conséquences plus importantes, bien qu'ici les dégâts n'atteignent qu'un niveau moyen (20 à 49% de pertes).

Concernant les impacts que nous ne sommes pas en mesure de quantifier, la Figure 5.26 les représente de la même façon que la Figure 5.25. Il est cependant utile de noter que, bien que non quantifiables, le bon sens veut qu'ils soient également plus marqués dans le scénario présentant le dépôt de téphra le plus épais.

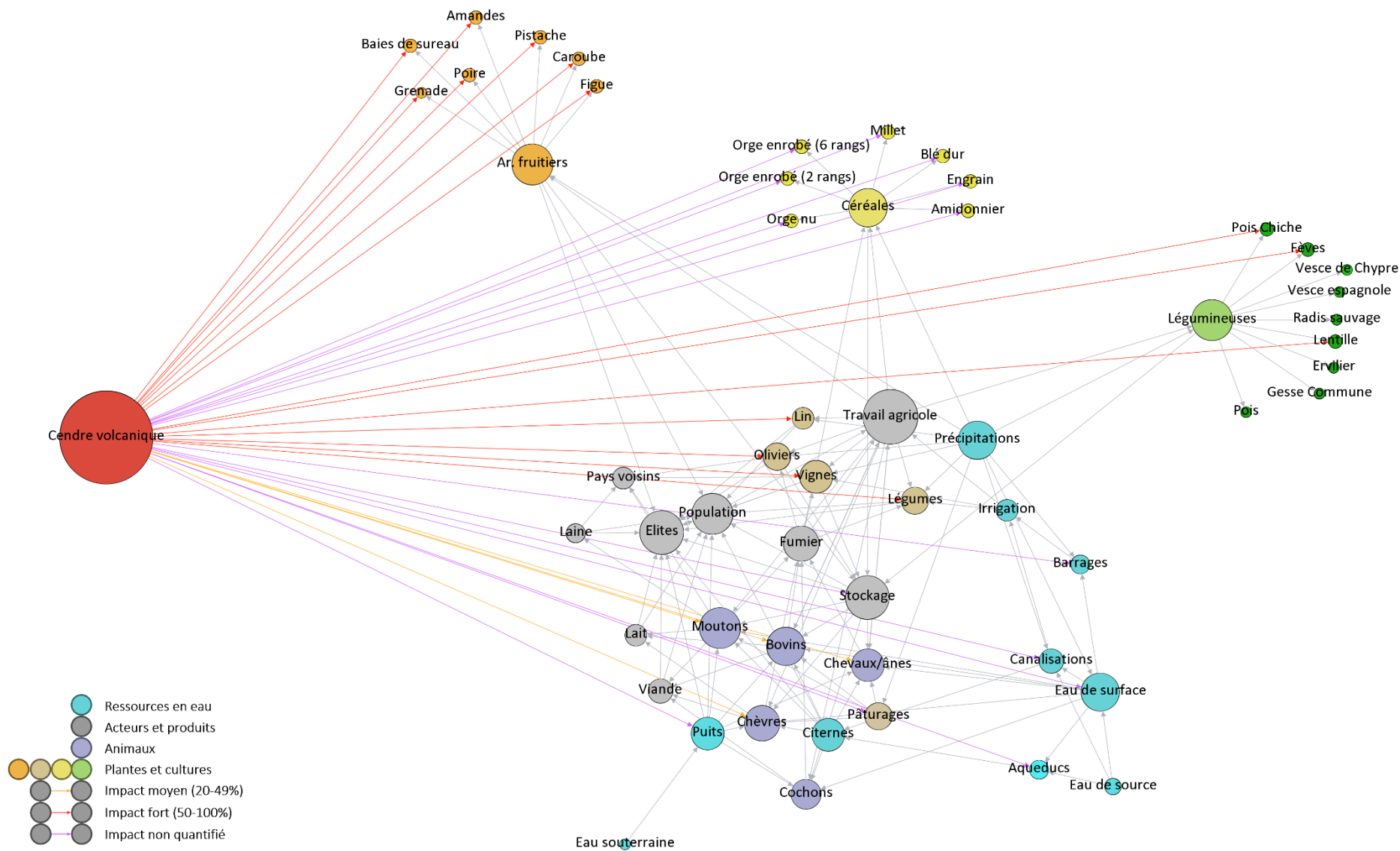


Figure 5.26 : Impacts sur le système agricole minoen suite au dépôt de dix millimètres de téphra après l'éruption de Santorin.

Le Tableau 5.5 présente une synthèse de l'importance des impacts que nous avons recensés sur les différentes entités de notre modèle suite à l'éruption de Santorin et un dépôt de téphra d'un millimètre (premier scénario) et de dix millimètres (deuxième scénario).

Tableau 5.5 : Synthèse des impacts directs du téphra sur les différentes entités de notre modèle touchées pour nos deux scénarios : 1 mm et 10 mm de téphra se déposant sur la Crète. Forces de l'impact : faible (1 à 19% de pertes), moyen (20 à 49% de pertes), fort (50 à 100% de pertes) et non quantifié.

	Entité	Force de l'impact	
		Dépôt d'1 mm de téphra	Dépôt de 10 mm de téphra
Eau et infrastructures	Puits	Non quantifié	Non quantifié
	Aqueducs	Non quantifié	Non quantifié
	Canalisations	Non quantifié	Non quantifié
	Barrages	Non quantifié	Non quantifié
	Eau de surface	Non quantifié	Non quantifié
	Stockage	Non quantifié	Non quantifié
Cultures	Céréales	Non quantifié	Non quantifié
	Pâturages	Non quantifié	Non quantifié
	Baies de sureau	Fort	Fort
	Grenade	Fort	Fort
	Poire	Faible	Fort
	Amande	Faible	Fort
	Pistache	Faible	Fort
	Caroube	Faible	Fort
	Figue	Faible	Fort
	Oliviers	Faible	Fort
	Vignes	Fort	Fort
	Légumes	Faible	Fort
	Lin	Fort	Fort
	Pois chiche	Fort	Fort
	Lentille	Fort	Fort
	Fève	Faible	Fort
Bétail	Moutons	Faible	Moyen
	Bovins	Faible	Moyen
	Chevaux/ânes	Faible	Moyen
	Chèvres	Faible	Moyen

6. Discussion

6.1. Les impacts du téphra sur l'agriculture minoenne

6.1.1. L'eau et les infrastructures

Un dépôt de téphra sur un territoire peut avoir des impacts au niveau des ressources en eau et des infrastructures qui y sont liées (Ayris and Delmelle, 2012; Jenkins et al., 2014b; Riede and Kierdorf, 2020; Stewart et al., 2006) : contamination des eaux de surface, augmentation de la turbidité, érosion et blocages au niveau des canalisations et aqueducs. Rappelons que la Crète est soumise au climat sec méditerranéen, et que la majorité de la population minoenne était concentrée sur la partie Est de l'île, qui est non seulement la plus sèche, mais également celle pour laquelle un dépôt de téphra a été attesté archéologiquement (Betancourt, 2009; Driessen and Jussieret, 2019; Siart and Eitel, 2013a; Soles et al., 1995). À Palaikastro, les fouilles montrent l'abandon de certains puits après l'éruption et le forage de nouveaux puits, attestant peut-être d'une pollution de l'eau (Driessen and Macdonald, 1997). De même, un dépôt de téphra a été retrouvé dans le système de drainage de la ville, qui a dès lors dû subir des modifications considérables. À Choiromandres, le barrage a été reconstruit après l'éruption, et du téphra, probablement récolté intentionnellement, a servi de matériau de construction pour ses fondations (Driessen and Jussieret, 2019). Bien qu'il ne soit pas possible de quantifier tous ces impacts (étant donné l'incertitude quant à la quantité et à la composition du téphra), il est clair qu'une diminution des ressources en eau, au début de l'été, sur une île au climat sec, n'a pu qu'avoir des conséquences néfastes sur le système agraire minoen. Au vu des travaux de réparation au qu'ont dû subir plusieurs éléments du réseau d'alimentation en eau, comme les modifications du système de drainage de Palaikastro (laissant supposer que d'autres canalisations, apportant de l'eau plutôt que la faisant quitter la ville, ont pu être endommagées également), la réparation du barrage à Choiromandres, ou encore le forage de nouveaux puits, nous voyons que ce réseau a été perturbé. Il est donc possible que la population, le bétail, voire les cultures irriguées, aient souffert d'un manque d'eau pendant un certain temps. Le téphra peut également endommager des bâtiments, comme ce fut peut-être le cas à Mochlos, où des toits se sont effondrés, peut-être en partie à cause du téphra (Soles, 2009; Soles et al., 1995).

6.1.2. Le bétail

La perte d'une partie du bétail suite au dépôt de téphra sur la Crète a dû avoir des conséquences négatives à plusieurs niveaux. Premièrement, la diminution de la production de bien d'origine animale : la viande, le lait et la laine. Ceci participe donc à une diminution des ressources alimentaires, à plus ou moins long terme selon l'ampleur de la mortalité animale et du temps requis pour reformer des troupeaux de taille semblable à avant l'éruption. Ce n'est cependant pas le seul effet négatif d'une perte de bétail. En effet, moins d'animaux signifie moins de fumier, et donc une fertilisation moins importante pour les cultures. Or l'apport de fumier sur une terre donnée a des effets fertilisants à long terme (Halstead, 2014) et un

manque d'engrais, même sur un laps de temps relativement court, pourrait donc induire une diminution de la production végétale pendant une durée plus importante. De plus, les bovins, les chevaux et les ânes sont un atout immense pour le travail agricole, comme le labour, le battage et le transport. Ici encore, une diminution des effectifs entraîne donc une diminution de la production végétale, puisqu'une terre non labourée (ou labourée à la main et donc non seulement moins profondément, mais aussi moins vite, ce qui veut dire que certains plots ne seront pas labourés) produit moins et est plus encline à l'apparition de plantes adventices, qui peuvent entrer en compétition avec les cultures pour l'accès à la lumière, à l'eau et aux nutriments, augmenter le risque de verse, rendre la récolte plus complexe et se mélanger aux grains et, si l'adventice est toxique, le contaminer (Halstead, 2014). Le travail que les paysans doivent fournir augmente alors et il ne sera pas possible d'accomplir toutes les tâches comme il se doit par manque de temps ; de plus, la population aura moins de temps à allouer à d'autres tâches que l'agriculture, ce qui peut avoir des répercussions à d'autres niveaux dans la société. Enfin, soulignons que les familles et les villages pauvres qui ne possèdent que peu d'animaux de labour seront davantage touchés s'ils perdent leurs quelques bêtes que ceux qui possèdent des troupeaux plus grands. Un dépôt de téphra a donc, au niveau du bétail, des conséquences non seulement nombreuses mais aussi socialement hétérogènes, et l'écart entre riches et pauvres peut s'en voir creusé.

6.1.3. Les cultures

Au niveau des cultures, un dépôt de téphra au début de l'été n'affecte pas les différents végétaux et leurs productions de la même manière. En ce qui concerne les céréales, l'importance de la perte de production est très difficile à quantifier dans notre cas. En effet, si l'éruption a bien eu lieu au mois de juin, il s'agit précisément de la période où les céréales sont récoltées (voir section 5.2, Tableau 5.4). L'impact du téphra ne se limitera alors pas simplement à une perte de rendement au niveau de la plante (qui est déjà difficile à déterminer puisqu'il dépend de nombreux paramètres morphologiques de la plante, mais aussi climatiques comme le vent ou les précipitations (Bosi and MIAVITA Group, 2012; Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014a; Wilson et al., 2007)). En effet, si les céréales sont en pleine récolte, le téphra causera une perte de production au niveau de la plante sur pied qui, même si elle est mûre et n'a plus besoin de photosynthèse, devra être lavée s'il s'agit de céréales nues ; dans le cas des céréales à glumes, le téphra se sera déposé sur l'enveloppe du grain et, une fois battu, celui-ci devrait donc être moins contaminé. De plus, certaines céréales auront déjà été fauchées et mais seront toujours sur le champ, ce qui implique que le dépôt de téphra se fera différemment que lorsque l'épi est encore vertical. En ce qui concerne le battage, il pouvait se faire soit sur un sol de battage en pierre, qui est donc relativement facile à balayer en cas d'arrivée de téphra, ou en terre (Halstead, 2014) : en fonction de la région et des pratiques agricoles, la contamination des céréales pendant le battage n'aura pas la même ampleur. Enfin, une partie des céréales aura déjà été apportée au stockage, dont nous reparlerons plus bas. Dans tous les cas, les céréales

constituant la base de l'alimentation de l'époque, une diminution de la récolte ne peut qu'avoir des effets néfastes sur la population et le bétail. Notons également que bien que le téphra n'ait, il semble, pas atteint la partie Ouest de l'île, l'éruption semble s'y être fait ressentir malgré tout. À Delphinos (Fig 2.2), le moment de l'éruption est marqué dans les profils de sol par la présence de pierre ponce amenée de Santorin par la mer. Après l'éruption, cette zone ne présente plus de pollen de céréales, suggérant l'absence de fermiers (Bottema and Sarpaki, 2003). Si les fermiers en question n'ont ici probablement pas été atteints par le dépôt de téphra, et que la pierre ponce ne doit pas être la raison de leur retrait vers l'intérieur des terres, il est cependant légitime de se demander si la disparition de la culture de céréales directement après la date de l'éruption ne témoigne pas d'un impact sur la population qui, suite à la catastrophe, semble avoir quitté la zone pour une raison qui nous échappe.

Les arbres fruitiers, le lin, les espèces potagères et les légumineuses subiront également des pertes de rendement suite à l'arrivée de téphra de Santorin, en fonction de leurs stades de développement respectifs (la récolte est presque intégralement perdue si la plante est en floraison même pour une épaisseur minime de téphra, comme pour les lentilles et les grenades (Craig, 2015b)) et de leur période de récolte (de nombreuses légumineuses sont déjà stockées au mois de juin). Encore une fois, des pertes au niveau de la production de denrées alimentaires ne peut qu'affaiblir la population : le manque de nourriture peut mener à une forme de malnutrition, la cohésion sociale peut diminuer et la communauté se tourner vers l'individualisme et les liens commerciaux peuvent changer. Le bétail qui requiert du fourrage se verra également privé – du moins en partie – de nourriture, d'autant plus que le dépôt de téphra est important et rend l'accès aux pâturages impossible. Il est donc possible qu'une partie du bétail n'ayant pas été affectée directement par l'ingestion de téphra sera sacrifiée, par manque de ressources : les céréales et les légumineuses ayant été produites en trop petites quantités, elles seront réservées aux humains. Cette pratique est observée les années où la récolte est mauvaise (Halstead, 2014), et ne peut qu'être accrue dans le cas de pertes massives de cultures. Dans ce cas, les conséquences de la perte de bétail (voir section 6.1.2) seront exacerbées.

Bien entendu, une partie des récoltes se trouvait dans les infrastructures de stockage au moment de l'éruption : des pièces dédiées au stockage, des grottes mais aussi des silos et des puits fermés, contenant des en majorité des pithoi remplis de denrées. Le téphra ayant atteint se sera probablement introduit dans toutes ces infrastructures et aura donc contaminé une partie des denrées stockées. Tout comme les denrées contaminées directement dans les champs et sur les plantes, elles devront être lavées avant d'être consommées, ce qui peut représenter un travail considérable et consommer de l'eau, qui est déjà une denrée relativement rare à l'Est de la Crète. Cependant, les pratiques de stockage étant variées, il est impossible de déterminer l'ampleur des pertes engendrées.

Comme nous l'avons présenté à la section 5.1.4, il est probable que les oliviers et les vignes aient eu des fonctions autres que la simple subsistance. L'olivier, qui est une plante qui ne produit que bisannuellement (ce qui peut aussi refléter des pertes importantes si une oliveraie entière était dans son année de production lors de l'éruption), permet la production d'huile, qui était utilisée pour la cuisine mais aussi l'éclairage et la production de parfum (Hamilakis, 1996; Riley, 2012; Roberts, 2019). L'huile et ses produits dérivés étaient donc des denrées de luxe et faisaient l'objet de commerce entre les villes crétoises et avec les pays voisins, jouant donc un rôle important dans la dynamique du pouvoir. Encore une fois, l'Ouest de l'île ne semble pas avoir été épargné par les répercussions de l'éruption : alors que l'olivier y était déjà moins cultivé qu'à l'Est (voir section 5.1.4), les niveaux de pollen baissent après l'éruption dans la région du Lac Kournas (Fig. 2.2), de 19 à 3%, et à Delphinos, de 6 à 1%, suggérant un abandon des habitations sur les côtes et un retrait vers l'intérieur des terres ou une négligence des oliveraies (Bottema and Sarpaki, 2003). Il s'agit peut-être ici d'une modification des habitudes de la population engendrée par l'éruption, bien qu'ici elle ne découle vraisemblablement pas d'un dépôt de téphra.

Le rôle du vin à l'époque est plus controversé, alors que certains pensent qu'il était réservé à l'élite et aux festivals, d'autres pensent que sa consommation était plus répandue à travers la population. Quoi qu'il en soit, son commerce était lui aussi régi par les élites, et un manque de vin a pu avoir des conséquences au niveau de la légitimation du pouvoir, de la célébration de cultes, mais aussi au niveau de la santé. Soulignons qu'aux époques antiques, la consommation de bière et de vin était répandue car elle était plus hygiénique que la consommation d'eau qui pouvait être porteuse de maladies. La perte de production au niveau des oliviers et des vignes a donc pu avoir des conséquences importantes au niveau du tissu social de l'île et de la hiérarchisation. Il est alors possible qu'on ait assisté à une dislocation économique sévère, qui aurait amené des centres locaux à s'affranchir des palais, engendrant une fragmentation politique et des conflits internes (Driessen, 2019; Driessen and Macdonald, 1997).

Il ne fait donc aucun doute qu'un dépôt de téphra en Crète aurait eu un impact détrimentaire sur la production de nourriture d'origines animale et végétale et sur le système agraire dans son ensemble. Les minoens ont été sujets à une réduction de la quantité de nourriture disponible, au moins l'année de l'éruption et probablement pendant les années qui suivirent. De fait, la diminution de la taille du cheptel implique non seulement une baisse de production animale (lait, viande), mais aussi de moindres quantités de fumier et d'animaux de labour, ce qui aura un impact détrimentaire au niveau de la production végétale. Ces impacts ont également pu s'étendre au fonctionnement-même de la civilisation minoenne. Tout ceci est, notamment, fonction de l'épaisseur du dépôt de téphra qui a atteint l'île.

6.1.4. L'épaisseur du dépôt de téphra ayant atteint l'île, et ses implications

Commençons par parler de l'année de l'éruption elle-même. Comme le présente la Figure 2.2, des dépôts de téphra de différentes épaisseurs ont été retrouvés sur plusieurs sites archéologiques : de 10 cm à Priniatikos Pyrgos, de 5 à 20 cm à Mochlos, de 10 à 16 cm à Papakiokambos, 15 à 20 cm à Palaikastro, de 6 à 9 cm dans la grotte de Pelekita, mais aussi à Sissi, Choiromandres et Zominthos et Zakros (Athanassas et al., 2017; Brogan and Sofianou, 2009; Bruins et al., 2019; Driessen, 2019; Driessen and Jusseret, 2019; Molloy et al., 2014; Siart and Eitel, 2013b; Soles, 2009; Soles et al., 1995). L'origine de ces dépôts n'est cependant pas toujours claire : s'agit-il de dépôts primaires, amenés par le vent, comme cela semble être le cas pour la grotte de Pelekita, ou d'une remobilisation de téphra par l'eau, accumulé dans des dépressions ? Il est dès lors compliqué d'estimer l'épaisseur du dépôt d'origine, que ce soit par des découvertes archéologiques ou par la modélisation (pour rappel, l'Annexe 2 présente le résultat de la simulation de la dispersion et de la sédimentation du téphra, sous forme de prédiction d'isopaques, par Johnston et al. (2014) qui vont d'un millimètre à plusieurs dizaines de centimètres !).

C'est pourquoi nous avons choisi de présenter dans ce travail deux scénarios de retombées de téphra sur l'Est de la Crète : le premier donnant lieu à un dépôt d'un millimètre de téphra, le deuxième, de dix millimètres. Nous avons montré qu'un dépôt minime (1 mm) de téphra engendrait de faibles pertes au niveau du bétail et des cultures – si ce n'est pour les cultures en floraison, qui sont perdues. Dans ce cas, bien que la production de nourriture soit diminuée lors de l'année de l'éruption et que diverses infrastructures aient été endommagées, il est possible que les effets de l'éruption (du moins, au niveau de l'agriculture) ne se soient pas fait ressentir de manière trop importante dans les décennies suivantes. Dans notre deuxième cas de figure, 10 mm de téphra atteignent l'Est de la Crète, et les conséquences sur le système agraire au cours de l'année-même de l'éruption sont nettement plus prononcées : presque l'intégralité des cultures sur pied est perdue, ainsi qu'environ 20% du bétail, et la population est contrainte de se rabattre sur les denrées alimentaires stockées avant la catastrophe et possiblement contaminées. Dans un tel cas de figure, des problèmes de famine deviennent probables non seulement au niveau de la population, mais aussi du bétail, qui ne peut être nourri adéquatement, voire est abattu pour subvenir aux besoins des hommes. Se pose ici la question de l'organisation sociétale à l'époque du MR IA, qui n'est toujours pas claire. Il convient de se demander si les élites des palais percevaient des taxes auprès de la population sous forme de nourriture, et si les palais redistribuaient les denrées alimentaires auprès de leurs « sujets ». De fait, si les paysans ne devaient rien aux palais, il est alors concevable d'imaginer que le peu de nourriture qu'ils auraient réussi à produire cette année leur soit réservée, et que la population des villes et des palais se trouve en plus grande situation de précarité alimentaire. A l'inverse, si le système était tel que les paysans devaient verser leurs maigres récoltes aux palais, qui auraient ensuite peiné à satisfaire les besoins de tous et,

probablement, commencé par nourrir les citoyens, alors la population se retrouverait dans une situation très précaire, avec un risque de diminution des paysans, donc de la production, entraînant à son tour une réduction de denrées alimentaires à destination des villes et, peut-être, une révolte paysanne qui refuseraient, pour survivre, de livrer quelque nourriture que ce soit aux villes. De nombreux autres cas de figure entre ces deux extrêmes peuvent être envisagés, avec des conséquences qui s’y ajustent. Il est cependant clair que la population – dans son ensemble ou en partie – a dû faire face à une faible récolte et tout ce qui en découle l’année de l’éruption. Si la remobilisation du téphra fait d’une maigre récolte un problème récurrent, les tensions sociales n’ont pu que s’accroître.

Ces deux scénarios, un et dix millimètres de téphra, ont été choisis afin de montrer que même un dépôt qui semble dérisoire peut avoir des conséquences considérables au moment de l’éruption. Ce n’est pas pour autant que l’épaisseur réelle du dépôt d’origine n’a pas d’importance. D’une part, plus la couche est imposante, plus les impacts négatifs immédiats seront exacerbés. D’autre part, un dépôt de téphra plus épais accroît la possibilité de remobilisation de ce téphra par l’eau et par le vent pendant les années, ou les décennies, qui suivent l’éruption, et donc faire perdurer les impacts de la retombée de téphra (Jenkins et al., 2014b). Dans notre cas, la famine aura donc pu s’installer en Crète pour des années et laisser une empreinte indélébile sur sa société : comme le souligne Driessen (2019), « La famine est un accélérateur de changements historiques ».

Bien entendu, il est possible que les Minoens aient répondu à ce manque de ressources alimentaires par l’import de nourriture, ce qu’ils ne faisaient pas avant l’éruption. Cependant, d’une part, la diminution de la production d’huile, de vin, de moutons et de laines, que nous savons être des produits de commerce, a pu entraver cet import par manque de ressources à échanger. D’autre part, les pays voisins, du moins ceux à l’Est de Santorin, ont également été subis un dépôt de téphra (Athanassas et al., 2017; Jarriel, 2020; Johnston et al., 2012) et on peut dès lors en déduire qu’eux aussi ont pu manquer de ressources alimentaires à échanger. De plus, il a été montré par modélisation que la présence d’Akrotiri, et de la route de commerce entre Santorin et le nord de la Crète, est primordiale afin de maintenir la connectivité du réseau de commerce de la mer Egée de l’époque (Knappett et al., 2008) (Fig. 6.1). L’éruption, et donc la disparition d’Akrotiri, ne semble pas avoir d’effet notable immédiat sur l’activité générale de ce réseau. Cependant, après la destruction de Santorin, les coûts liés au commerce augmentent au fil du temps : il faut davantage de navires, de marins, d’investissement. Finalement, la situation semble être devenue instable, et le système commercial s’est effondré (Knappett et al., 2011) (Fig. 6.2). L’effondrement du système de commerce est également attesté archéologiquement par Driessen et Jusseret (2019) ainsi que Driessen et MacDonald (2000). Le commerce, qui aurait pu être une bouée de sauvetage pour l’approvisionnement alimentaire des Minoens, n’a donc pas pu être une solution viable à long terme. L’Annexe 4 présente les

différentes itérations de cette modélisation avant l'éruption, immédiatement après, et à long terme.

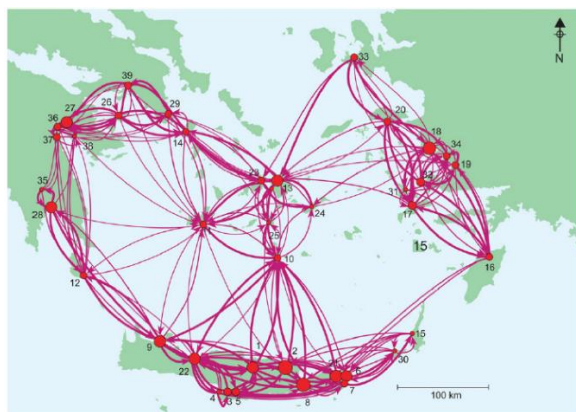


Figure 6.1 : Exemple d'une itération de modélisation du réseau de commerce en Egée avant l'éruption de Santorin. La taille des nœuds reflète leurs populations respectives, et l'épaisseur des liens reflète le trafic annuel entre les sites. L'importance de Théra en tant que lien entre la Crète et le reste de l'Egée est clairement visible (Knappett et al., 2011).

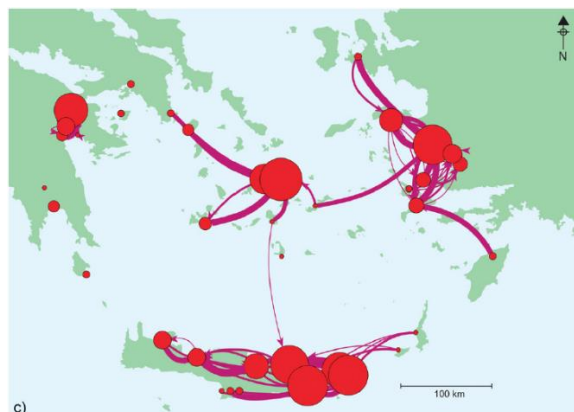


Figure 6.2 : Exemple d'une itération de modélisation du réseau de commerce en Egée à long terme, après l'éruption de Santorin (Knappett et al., 2011).

6.2. Les changements notables sur les sites archéologiques après l'éruption

Après l'éruption de Santorin, de nombreux sites archéologiques présentent des changements notoires. Certains sites sont abandonnés (voir section 2.1), notamment des villas, qui semblaient posséder un lien de vassalité avec les palais, comme celle de Zominthos qui était un centre de production agricole, indiquant une possible perte d'autorité des palais (Siart and Eitel, 2013b). A d'autres endroits, l'espace occupé sur les sites diminue, et on note une réduction – voire une absence – de nouvelles constructions et de nouveaux villages sur la majorité de l'île. Cette diminution dans l'occupation de l'île pourrait témoigner d'un déclin de la population, peut-être causé par la famine, l'émigration ou la maladie (Driessen and MacDonald, 2000). À l'inverse, on assiste à un afflux de population seulement à Mochlos, ainsi qu'à la construction de nouveaux bâtiments : des fermes, un quartier d'artisans, une carrière de pierre et un lieu de culte. Cet accroissement semble être dû à un arrivage de rescapés de Théra, comme l'indique des objets retrouvés sur place ainsi que l'architecture de ces nouveaux bâtiments, typique de Théra, qu'on ne retrouve pas ailleurs en Crète au même moment (Soles, 2009).

À la fin du MR IB, de nombreux bâtiments voient leur circulation interne modifiée et deviennent plus difficiles d'accès ; à la campagne, plusieurs villages érigent des murs d'enceinte. Outre l'avènement de cette architecture de crise, on retrouve plusieurs caches d'objets précieux et de ressources économiques. De plus, on assiste à une attention accrue portée à la production agricole et au stockage : de larges pièces publiques, dotées à l'origine de fonctions prestigieuses, sont converties en espaces de stockage et de production de nourriture, aussi bien dans les grandes maisons que dans les palais, notamment à Petras, Malia, Zakros et

Phaistos. Si les palais avaient effectivement un rôle dans la redistribution des denrées alimentaires, il est possible qu'après l'éruption les autorités locales aient été forcées d'accroître leurs capacités de stockage car les palais n'étaient plus en mesure de s'acquitter de cette tâche. On assiste alors encore une fois à une décentralisation du pouvoir (Driessen, 2019; Driessen et al., 2013; Driessen and MacDonald, 2000; Driessen and Macdonald, 1997). Driessen (2019) souligne qu'une réduction de production agricole mène fréquemment à une diminution de la population, une modification dans la distribution des groupes et leur mobilité et à une conversion de nourriture en stockage direct et indirect, qui sont tous présents au MR IB (MR IB).

Ces changements semblent témoigner d'une grande insécurité dans la mentalité collective minoenne. Assiste-t-on réellement à une diminution de la population, ou bien les habitants se sont-ils rassemblés sur des surfaces plus petites ? L'absence d'ensevelissements au MR IB, contrairement au *continuum* de pratiques funéraires attesté depuis le début de l'Âge du Bronze jusqu'au MR IA (Driessen, 2003) ne permet pas de conclure à une mort massive, ni d'ailleurs à une mortalité inchangée par rapport au MR IA. Si l'île comptait effectivement moins d'habitants après l'éruption, cela aurait évidemment des implications sur la quantité de nourriture à produire pour satisfaire les besoins de toute la population. Une explication possible serait que la diminution de la population ait permis le stockage de davantage de denrées alimentaires, et que les Minoens, loin de décider de cultiver de plus petites quantités, proportionnellement à ces besoins, aient été poussés par la peur à faire le plus de provisions possibles. En effet, à l'époque, une éruption volcanique, surtout de cette ampleur, était quelque chose d'inconnu, et ils ne pouvaient donc pas prédire quand cette catastrophe les frapperait à nouveau. De plus, si la remobilisation du téphra était effectivement un problème, il est encore une fois compréhensible qu'ils décident de produire autant que possible quand ils le peuvent pour pallier les difficultés que la remobilisation peut impliquer.

6.3. Un rôle pour l'éruption dans le déclin de la civilisation minoenne ?

L'éruption de Santorin a-t-elle, finalement, joué un rôle dans le déclin de la civilisation minoenne, par le biais de son impact sur son système agraire ? Nous avons montré que le dépôt de téphra sur la Crète a pu avoir un impact fort sur la production végétale et animale, au moins l'année de l'éruption. Si le dépôt a donné lieu à une remobilisation les années suivantes, le problème de la diminution des ressources alimentaires se sera fait ressentir à long terme. Selon l'organisation sociale de l'époque, la famine aura pu toucher différentes fractions de la population. Dans tous les cas, on semble assister à une diminution de nombre d'habitants sur l'île. Le pouvoir des élites se retrouve également diminué et fractionné à cause du manque de produits commerciaux (le vin, l'huile et ses produits dérivés, la laine) et, peut-être, de l'impossibilité que les palais ont rencontrée en matière de distribution de nourriture sur leur territoire, facilitant la montée en pouvoir d'élites plus locales. Cet affaiblissement du tissu sociétal entre les villes minoennes a pu mener au besoin de chaque petite colonie de stocker

des denrées séparément, plutôt que de rassembler de grandes quantités de nourritures dans les palais. Cet esprit plus individualiste aurait, à son tour, fragilisé l'île et la civilisation minoenne en général, ce qui aurait pu ouvrir la porte, à la fin du MR IB, à des invasions mycéniennes, ou en tout cas à des destructions par le feu de la plupart des sites minoens, presque certainement d'origine anthropique, suivie de l'arrivée d'une élite mycénienne ayant pris le contrôle de l'île et ayant installé sa capitale à Cnossos.

6.4. Validité de la représentation du système agraire

Notre modèle étant basé sur les découvertes archéologiques faites jusqu'à aujourd'hui ainsi que sur des analogies avec d'autres civilisations ou encore avec l'agriculture Méditerranéenne du XX^e siècle avant la mécanisation, il pourrait être sujet à des améliorations et ajustements futurs. Nous sommes cependant confiants qu'il représente un état fidèle des connaissances actuelles.

De fait, la palynologie et l'étude de résidus de plantes carbonisés retrouvés sur les sites archéologiques donne une idée cohérente des plantes cultivées à l'époque minoenne, puisque les différents sites de l'île attestent des mêmes espèces végétales. Il en va de même pour le bétail, dont les ossements remontent pour la plupart au Néolithique, ce qui montre que ces animaux étaient élevés sur l'entièreté de l'île depuis des millénaires, même si des spécialisations en l'une ou l'autre bête a pu être présente dans certaines régions. En outre, les spécialistes s'accordent sur le fait que, outre l'arrivée de nouveaux fruits et légumes cultivés sur l'île, les pratiques agricoles ont peu changé entre la Crète minoenne et la Méditerranée du XX^e siècle avant la mécanisation (voir section 4) (Allbaugh, 1953; Halstead, 2014).

Le point sur lequel notre modèle pourrait bénéficier le plus d'un affinement des connaissances est, à notre sens, l'organisation de la société minoenne, que le déchiffrement de leur écriture – le linéaire A – pourrait éventuellement mettre en lumière. Les relations entre la population générale et les élites étant mal comprises, elles laissent place à de nombreuses questions même au niveau agricole (par exemple, existait-il des taxes entre la population et les palais, quels étaient la place exacte du vin et de l'huile d'olive, les vignes et les oliveraies appartenaient-elles aux élites, aux paysans, ou un savant mélange des deux ?). En fonction du système de hiérarchie entre les paysans et les élites, mais aussi entre les plus petites colonies (telles les « villas ») et les palais, ou même entre les différents palais, une fragilisation de l'agriculture et de la production de nourriture n'aura, à notre sens, pas le même impact sur le système agraire dans son ensemble. Les répercussions au niveau de l'approvisionnement des différentes classes sociales ne seraient pas les mêmes, puisque selon le cas de figure les paysans ou les élites pourraient se retrouver en situation plus précaire que l'autre classe, ou, à l'inverse, si la société se voulait égalitaire, le manque de denrées alimentaires pourrait se faire sentir à travers toute la population. Il semble d'après nos connaissances que les élites souffrent davantage d'une baisse de production d'huile et de vin, mais nous ne savons pas exactement à quel point, ni précisément dans quelle mesure un manque de ces ressources a pu affecter la

balance de pouvoirs sur l'île et changer la manière dont la population était régie. De même, puisque le commerce maritime avec les pays voisins semblait être l'apanage des élites, il faudrait comprendre quelles étaient les relations de pouvoir en Crète minoenne pour pouvoir inférer des conséquences d'un ralentissement des imports et exports. Enfin, il nous paraît essentiel d'établir si les élites palatiales avaient un rôle à jouer dans la distribution des denrées alimentaires. Si tel était le cas, une baisse de la quantité de nourriture distribuée par les autorités aurait pu être vue comme un signe de faiblesse par la population, mener à l'avènement d'élite plus locales, et fragiliser l'unité de la civilisation minoenne. Toutes ces questions restent encore à élucider. Les réponses qui pourront être fournies dans des études ultérieures devraient permettre d'améliorer notre compréhension des impacts à long terme de l'éruption sur le système agraire pris dans son ensemble, c'est-à-dire en ce compris sur la société dans laquelle il s'inscrit.

6.5. Pour aller plus loin

6.5.1. Évaluation de l'épaisseur du dépôt de téphra et de sa remobilisation

L'épaisseur réelle du dépôt de téphra en Crète par l'éruption de Santorin à la fin du MR IA n'a que peu d'importance quant aux dégâts sur le système agraire l'année-même de l'éruption, dès lors qu'un centimètre de téphra suffit à provoquer la perte totale des cultures et d'environ 20% du cheptel. Bien que de telles conséquences auraient des répercussions sur plusieurs années, il est clair que la plus grande menace vis-à-vis du système agraire et de la société minoenne à long terme est la remobilisation de ce téphra au cours des années ou décennies suivant l'éruption, faisant perdurer les dommages subis et installant un climat d'incertitude, de famine et d'individualisme. C'est pourquoi nous considérons qu'un des sujets à approfondir afin de pouvoir analyser les effets de l'éruption sur l'agriculture plus en profondeur est la détermination de l'épaisseur du dépôt d'origine, qui est l'un des facteurs qui dicte l'importance des impacts de l'éruption sur le système agraire minoen. De fait, une couche plus épaisse de téphra aura des effets néfastes sur le système agraire minoen non seulement au moment du dépôt (mortalité plus élevée des animaux, ensevelissement plus ou moins important des terres, les rendant impossibles à cultiver ou rendant le labour plus intensif et d'autant plus nécessaire, impacts plus lourds au niveau du réseau d'approvisionnement en eau...) mais engendre également la possibilité de la remobilisation du téphra par l'eau et le vent pendant des années.

L'une des approches que nous avons envisagées pour ce faire serait de partir des dépôts retrouvés sur les sites archéologiques remobilisés par l'eau et accumulés dans des dépressions. En traçant les limites des différents bassins versants de la Crète, nous pourrions connaître la surface de ruissellement amenant le téphra à chaque fond de vallée suite à des précipitations. De là, en tenant compte du fait qu'une partie du téphra aura été érodée par le vent et amenée dans la mer, ainsi que du fait qu'une partie aura également été enfouie dans le sol, il serait possible d'estimer avec un peu plus de précisions l'épaisseur de la couche d'origine. Bien

entendu, la découverte de dépôts primaires, amenés par le vent lors de l'éruption et n'ayant pas été dérangés, sur la Crète (comme c'est peut-être le cas dans la grotte de Pelekita) peut également aider à cette estimation.

Une fois l'épaisseur du dépôt d'origine estimée avec plus de précision qu'elle ne l'est aujourd'hui, il deviendrait plus réalisable d'en évaluer les possibilités de remobilisation, critique pour notre cas d'étude. L'éruption ayant eu lieu au début de l'été, très sec en Crète habituellement, il est concevable que le téphra n'ait pas été directement érodé par la pluie et mis hors d'état de nuire par cimentation dans les cuvettes. Si la société minoenne a effectivement été exposée à une remobilisation du téphra pendant les années suivant l'éruption, le système agraire aura subi des dégâts pendant un laps de temps plus important, fragilisant dès lors davantage la société que si les pertes agricoles avaient été palliées rapidement.

6.5.2. Les courbes de fragilité des espèces végétales cultivées à l'époque

Le nombre d'études estimant les pertes engendrées sur différents types de cultures est, à ce jour, trop faible pour nous permettre de quantifier adéquatement les dégâts causés aux plantes cultivées à l'époque minoenne. Puisque les espèces agricoles de l'époque sont bien connues grâce à l'archéologie et à la palynologie, il serait envisageable d'effectuer des tests sur ces plantes en particulier, aussi bien en environnement contrôlé comme des serres qu'en plein champ, afin de déterminer l'effet de plusieurs épaisseurs de dépôt de téphra sur chacune d'entre elles. Nous savons que les traits morphologiques d'une plante (des feuilles pubescentes ou cirées, par exemple) dictent la rétention du téphra sur celle-ci : il est donc imprécis de mettre tous les végétaux « d'une même catégorie » (légume à feuilles, légume racine, légumes à fruits...) sur un même pied d'égalité quand il s'agit de déterminer leurs réponses à un dépôt volcanique. À notre sens, déterminer des courbes de fragilité vis-à-vis du téphra pour chaque espèce cultivée à l'époque minoenne nous permettrait d'évaluer plus précisément les dégâts causés aux récoltes au moment de l'éruption et par une possible remobilisation du téphra, et donc au système agraire dans son ensemble.

6.5.3. Les impacts du téphra sur le réseau d'approvisionnement en eau

Plusieurs observations après des éruptions récentes ont montré les dégâts que le téphra peut occasionner aux infrastructures, notamment au réseau d'approvisionnement en eau (Bosi and MIAVITA Group, 2012; Craig, 2015b; Jenkins et al., 2014a; Stewart et al., 2006; Wilson et al., 2010), qui nous intéresse dans le cas du système agraire minoen. L'archéologie nous apportant des preuves de dommages causés à un système de drainage, peut-être à un barrage, et l'abandon de certains puits, il semble probable que le dépôt de téphra de Santorin ait bel et bien eu des conséquences indésirables sur ce réseau. Il serait dès lors intéressant de pouvoir les quantifier, pour déterminer à quel point l'eau, ressource déjà rare en Crète orientale, fut une source de préoccupations après l'éruption. Des canalisations, aqueducs, citernes et autres

puits minoens ayant été découverts dans des états remarquables de conservation, il serait tout à fait envisageable de reconstituer ces infrastructures (c'est-à-dire, en recréer des sections avec les mêmes matériaux et techniques, sans conduire des expériences sur des vestiges archéologiques). Nous pourrions alors effectuer des tests de dépôt de téphra, voire d'apports de téphra par l'eau dans le cas des canalisations, et évaluer l'érosion, les blocages, et autres problèmes engendrés par le téphra, qui auraient pu fragiliser l'approvisionnement en eau et nécessiter des réparations ou modifications, perturbant ainsi l'accès à l'eau pour la population pendant un certain temps.

6.5.4. Une étude multidisciplinaire

L'objet de ce travail était bien d'évaluer l'impact de l'éruption de Santorin sur le système agraire minoen afin de déterminer si le volcan a pu, par ce biais, participer au déclin de la civilisation minoenne qui s'est éteinte quelques générations plus tard. La question des conséquences de l'éruption est cependant largement plus vaste que le seul système agraire. De fait, des études ont montré un effondrement du commerce maritime à long terme suite à la disparition d'Akrotiri, point central de la mer Egée. D'autres perturbations au niveau de la Crète minoenne ont été notées, notamment au niveau de la religion : on remarque un abandon presque systématique des sanctuaires naturels, ainsi que l'apparition d'un dieu masculin, alors que la divinité était féminine avant l'éruption (Driessen, 2015). Certains sites sont abandonnés, d'autres réduits, d'autres encore, fortifiés. Tous ces changements appellent à une étude multidisciplinaire de la question : quels ont été les conséquences de l'éruption sur l'agriculture, certes, mais aussi sur la religion, l'architecture, la société, son organisation, son rapport à la nature ? Bien entendu, l'archéologie constituant une large partie des données sur lesquelles nous nous basons pour répondre à toutes ces questions, nous serons toujours limités par ce que le temps a daigné – ou non – conserver pour la postérité. Cependant, une vision englobante de tous les aspects de la civilisation minoenne et de toutes les lignes de faille par lesquelles l'éruption aurait pu l'attaquer nous semble être la direction à prendre afin de pouvoir répondre au mieux à la sempiternelle question : l'éruption de Santorin, plusieurs générations avant l'effondrement des Minoens, l'a-t-elle causé ?

7. Conclusion

Au terme de ce travail, nous pouvons dire que la société minoenne était bel et bien vulnérable face à l'aléa volcanique et que son système agraire a souffert du dépôt de téphra amené par l'éruption de Santorin. La reconstitution du système agraire minoen de l'Âge du Bronze nous a permis de réfléchir au fonctionnement de l'agriculture dans son ensemble, plutôt que point par point comme cela avait été fait jusqu'à présent. Nous avons dès lors pu proposer une vision globale des impacts d'un dépôt de téphra venant de Santorin, mettant en évidence non seulement les dégâts subis directement par certaines composantes du système agraire, mais aussi les conséquences sur les composantes voisines, qui sont facilement négligées quand les éléments sont pris un par un. Bien que des incertitudes persistent au sujet de l'épaisseur d'origine du dépôt de téphra, les impacts néfastes l'année-même de l'éruption ont dû être importants, et ont pu persister durant les années qui suivirent, en particulier en cas de remobilisation du téphra. D'une part, sur base de notre modèle du système agraire, nous avons déduit une perte probable de l'ensemble des cultures exposées aux retombées de téphra, et vraisemblablement d'une partie du bétail, ainsi que des difficultés au niveau de l'approvisionnement en eau. D'autre part, l'archéologie nous rapporte une importance accrue accordée au stockage de denrées alimentaires après l'éruption. Ceci nous mène à penser que de sérieux problèmes au niveau de l'approvisionnement de la population en nourriture ont dû émerger, accompagnés sans doute d'une forme de trauma quant à sa subsistance. De plus, si une remobilisation du téphra a eu lieu pendant plusieurs années après l'éruption, exacerbant non seulement le besoin en nourriture mais aussi la détresse psychologique d'une population affamée, il n'est plus possible d'évoquer les conséquences du dépôt de téphra de Santorin comme anecdotiques dans l'histoire minoenne.

Nous avons également pu souligner que le commerce maritime, qui jusqu'alors ne participait pas à l'approvisionnement des Minois en nourriture, a fini par s'effondrer suite à la disparition de Santorin, et n'a donc pas pu leur être d'un grand secours pour pallier leur manque de denrées alimentaires. Ajoutons à cela que la baisse de production d'huile d'olive et de vin, denrées de commerce par excellence, suite au dépôt de téphra, ont vraisemblablement diminué les possibilités d'échanges avec les pays voisins, tout en affaiblissant le pouvoir des palais, sur lesquels le commerce reposait. En outre, des changements au niveau de l'organisation de la société semblent avoir eu lieu, donnant un plus grand pouvoir aux autorités locales et délégitimisant davantage le pouvoir central que les palais revêtaient – peut-être – auparavant. Plusieurs villas agricoles, qui semblaient fonctionner dans une dynamique de vassalité par rapport aux palais, sont abandonnées. Sur de nombreux sites, notamment dans des palais, des pièces autrefois dédiées à la collectivité et à des pratiques rituelles se voient affectées à des fins de stockage de denrées.

Si d'autres modifications au sein de cette civilisation, notamment sur le plan de la religion et de l'éthos collectif des Minois, ne peuvent pas forcément être expliquées par le seul biais de

l'agriculture, il est cependant clair que de nombreux aspects de la vie minoenne ont changé après l'éruption de Santorin. D'une civilisation tournée vers la collectivité, les Minois semblent devenir plus introvertis et évoluent vers un individualisme qui, s'il est compréhensible en temps de famine et d'incertitude, n'a pu que fragiliser la cohésion de la société. Bien qu'une étude multidisciplinaire, rassemblant l'aspect agricole étudié ici, mais aussi la politique et l'organisation de la société, la religion, l'architecture et toutes les facettes de la civilisation, permettrait de comprendre plus en profondeur les séquelles exactes ayant affecté le tissu de cette civilisation, nous pouvons d'ores et déjà affirmer que, au moins en ce qui concerne le système agraire, qui est la base de la subsistance de toute société, l'éruption de l'âge du Bronze du volcan Santorin a laissé une empreinte qui ne saurait être négligée. Cette fragilité nouvelle a pu, à son tour, ouvrir la porte aux destructions par le feu, probablement d'origine anthropique, de la plupart des sites minois à la fin du MR IB et à l'occupation mycénienne qui s'en est suivi.

Afin d'aller plus loin dans notre étude, une meilleure estimation de l'épaisseur d'origine du dépôt de téphra nous permettrait de mieux évaluer la question de la remobilisation, et donc des conséquences à long terme de ce dépôt sur le système agraire minoen. En effet, nous pourrions tout à fait étudier les plantes cultivées à l'époque et leurs réponses respectives à un dépôt de téphra, et mieux délimiter les impacts du téphra sur chacune d'entre elles. Cependant, puisqu'il semble qu'un dépôt d'un centimètre de téphra suffise à détruire la majeure partie de la récolte, la remobilisation reste une question prépondérante quant aux effets de l'éruption à long terme sur l'agriculture.

De même, une meilleure compréhension du fonctionnement réel de la société minoenne, notamment des relations de pouvoir entre la population générale et les palais, préciserait le gradient des impacts au niveau de la population : sur qui la famine pèsera-t-elle le plus, et quelles en seront les conséquences ? Ceci nous permettrait également de mieux comprendre les modifications dans la hiérarchie et la dynamique de pouvoir en Crète suite au stress appliqué sur le système agraire, et l'affaiblissement sociétal qui a pu s'ensuivre. Ces données étant entièrement dépendantes de l'archéologie, il n'est malheureusement pas certain que nous arrivions un jour à dessiner un organigramme exact de la société minoenne.

Quant à la question de l'implication de l'éruption dans le déclin de la civilisation minoenne, si nous étions amenés à approfondir le sujet, nous viserions une approche plus multidisciplinaire, ajoutant à notre étude de l'agriculture minoenne une investigation des autres facettes de la société, comme la religion, l'architecture, l'éthos minoen et son rapport à la nature et à l'environnement, qui a pu être modifié après la catastrophe naturelle que fut l'éruption de Santorin.

8. Annexes

Annexe 1 : Carte présentant la dispersion du nuage de téphra de l'éruption de Santorin obtenue par krigeage (Athanasas et al., 2017).

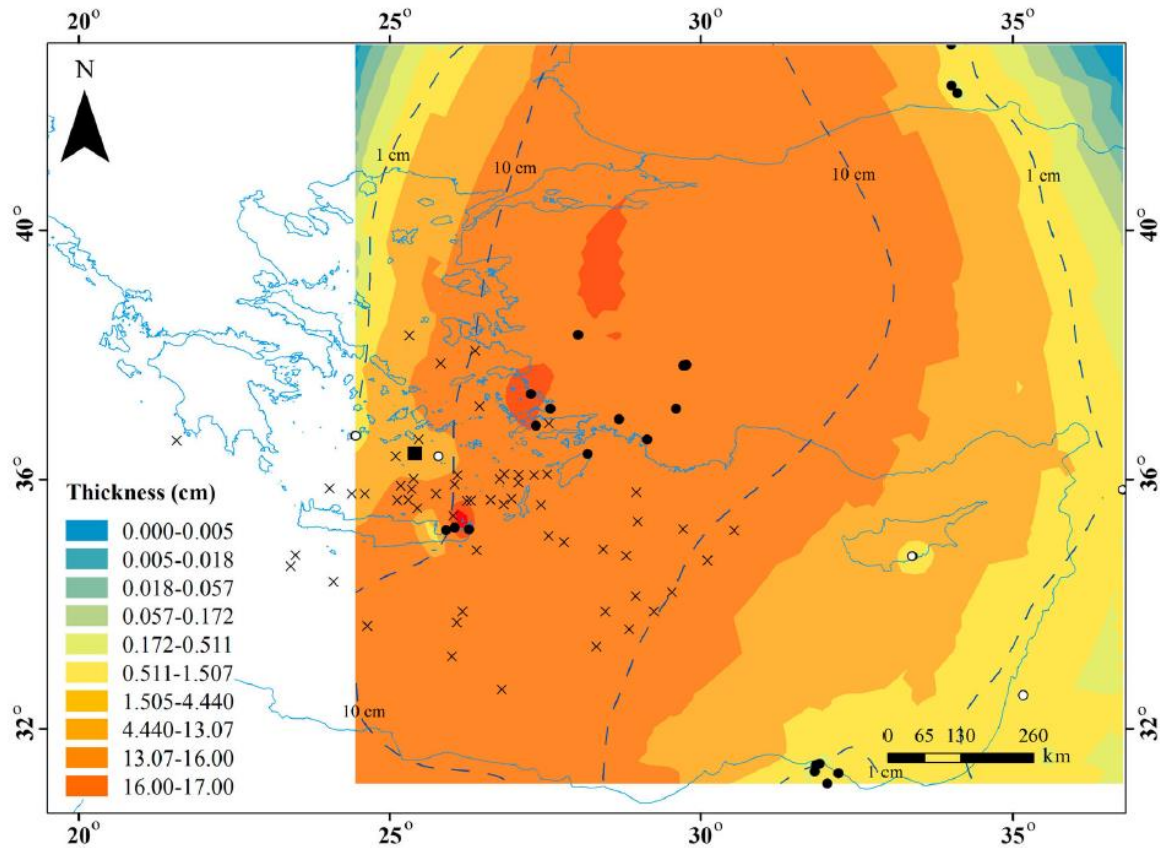


Figure 8.1 : Geostatistical prediction map for the dispersion of Minoan tephra over the Eastern Mediterranean, as derived from ordinary kriging. Predicted tephra thicknesses are shown as filled color-graded contours. Coordinate system is WGS84. Filled circles correspond to sites where Minoan tephra has been identified on land, while empty circles correspond to 'absence' sites. 'x' marks the marine spots. Santorini is marked by the solid rectangle. Dashed lines correspond to isopachs of 1 and 10 cm, respectively (Athanasas et al., 2017).

Annexe 2 : Modélisation d'isopaques pour une éruption plinienne, coignimbrite et la combinaison des deux, en été et au printemps (Johnston et al., 2012) et isopaques présentés dans des études antérieures.

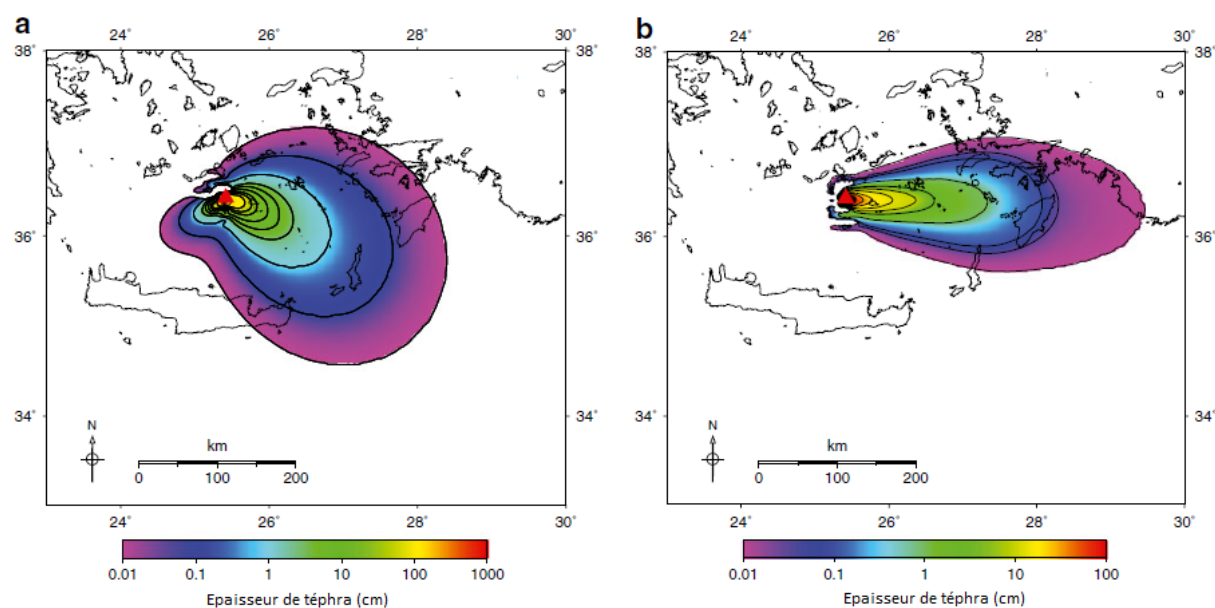


Figure 8.2 : Isopaques modélisées de la dispersion du téphra produit pour (a) une éruption plinienne en été et (b) une éruption plinienne au printemps (Johnston et al., 2012).

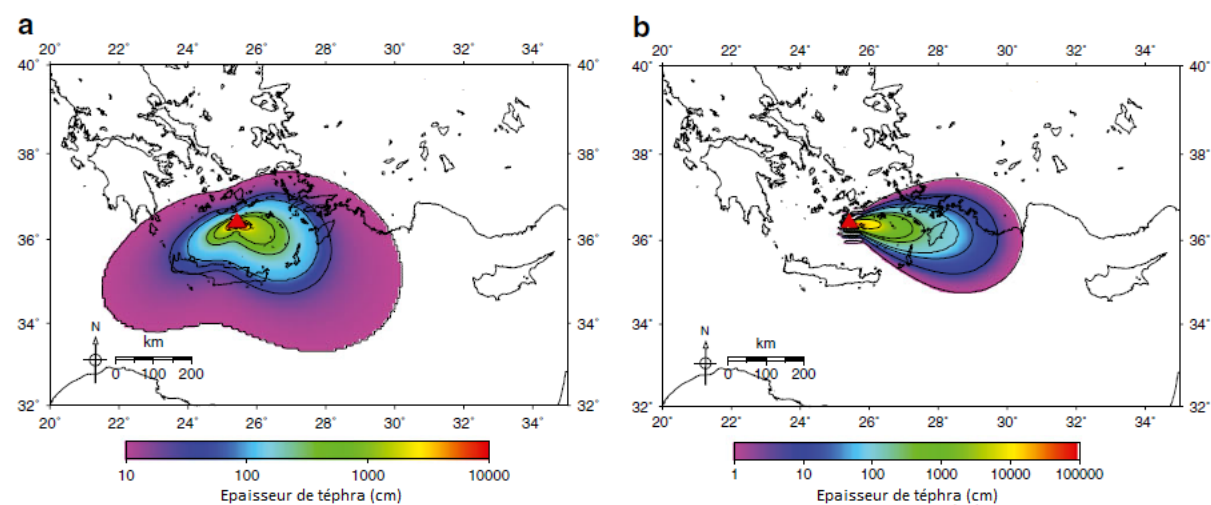


Figure 8.3 : Isopaques modélisées de la dispersion du téphra produit pour (a) une éruption coignimbrite en été et (b) une éruption coignimbrite au printemps (Johnston et al., 2012).

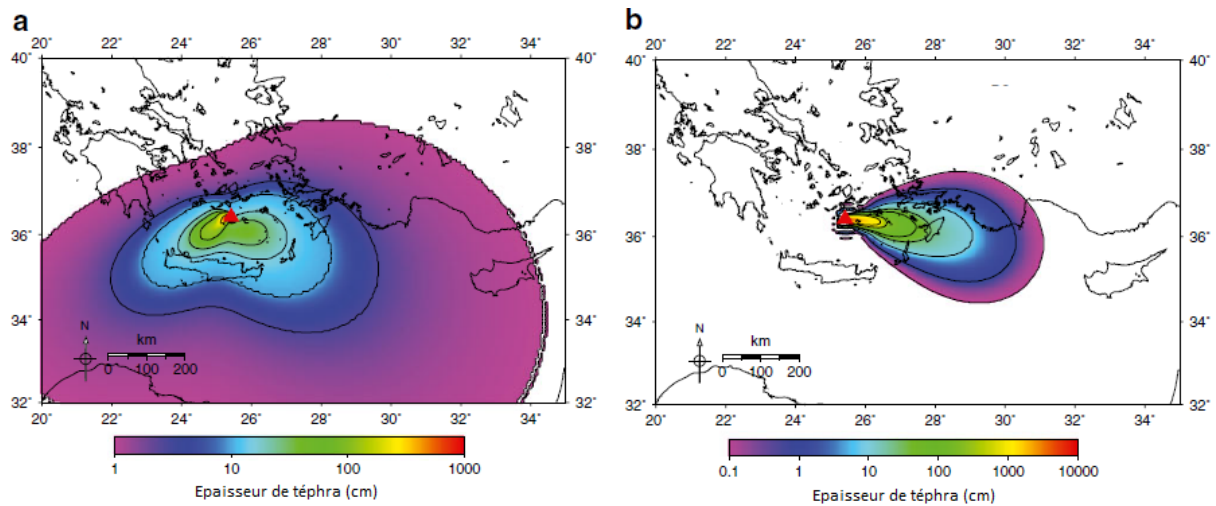


Figure 8.4 : Isopaques modélisées de la dispersion du téphra produit pour (a) une éruption en été et (b) une éruption au printemps, sur base des données de dépôts marins (Johnston et al., 2012).

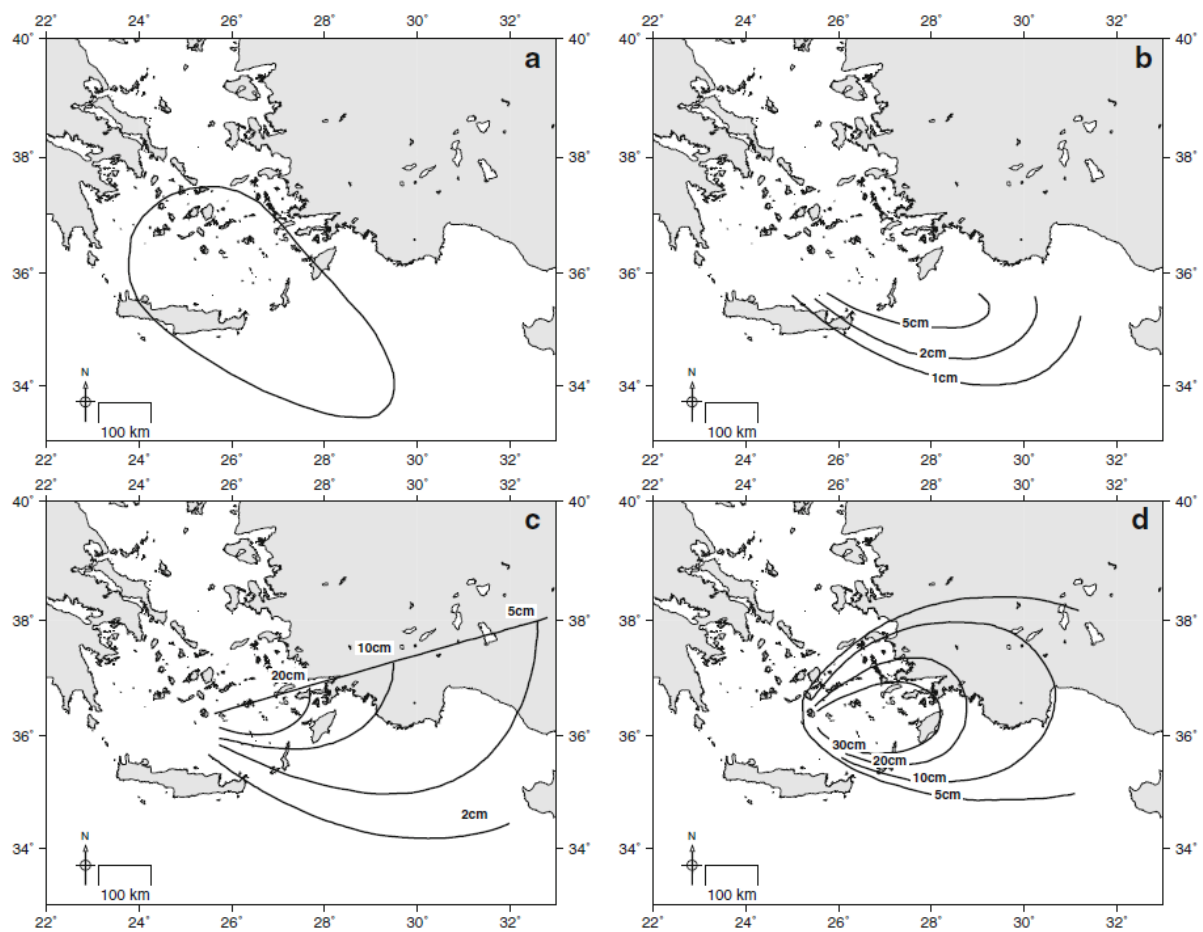


Figure 8.5 : Cartes d'isopaques publiées (en cm) : (a) Ninkovich and Heezen (1965), (b) Watkins et al. (1978), (c) Sigurdsson et al (1990), (d) Pyle (1990). La figure 8.5(a) ne montre que la distribution générale du téphra, la publication originale ne contenant pas de valeur d'isopaque (Johnston et al., 2012).

Annexe 3 : Tableaux reprenant la nature et l'ampleur des dégâts (1%, 20% et 90% de pertes) causés par le dépôt de différentes épaisseurs de téphra sur les secteurs agricoles de la production de bétail (bœuf et moutons), les biens agricoles (par exemple, le matériel, les terres...) et les cultures (aussi bien la diminution de production que les dégâts causés aux plantes) d'après Wilson et al., 2007.

Tableau 8.1 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur la production de bœufs.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Some increase in supplementary feed consumption as animals are put off pasture. Risk of chemical poisoning from aerosols (e.g. fluorosis).
0.2	10	Pasture covered, cattle put off feeding, animal health impacts, increased chance of aerosol poisoning, increased supplementary feed required as pastures are increasingly covered. This additional stress on the beef cows lowers their weight gaining potential. Ash takes longer to be shed from pastures (Neild et al., 1998).
0.9	100 (low)	All pasture will be coated with ash regardless of length, potentially stopping animals eating it. Pastures may be destroyed so will need to be rehabilitated as quickly as possible. Similar impacts as to dairy farms.
	175 (average)	
	300 (high)	

Tableau 8.2 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur la production de moutons et de gibier (cervidés).

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	lowest possible value – any ashfall is likely to impact production
0.2	7	Pasture will be mostly covered, stock put off eating, increased use of supplementary feed. Less resilient than beef as graze closer to ground level – higher level of volcanic ash ingestion (increased animal health impacts, e.g. teeth abrasion, aerosol poisoning, etc.).
0.9	90 (low)	Similar vulnerabilities to beef and dairy farms, with pasture rehabilitation likely to be required at this point.
	150 (average)	
	250 (high)	

Tableau 8.3 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les biens agricoles.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	5 mm	Possible damage to gutters on farm buildings, corrosion of metal roofs and fences, damage to cooling systems (condensers), farm machinery if operating in ashy conditions (Neild et al., 1998; Blong, 1984; Johnston, 1997)
0.2	70 mm	Damage to pastures creating a possible need to cultivate (plough under) ash layer, additional fertiliser inputs, potential long term loss of soil fertility. If the ash becomes wet and has not been cleared from roofs, then collapse may be possible (Spence et al., 2005). Animal deaths are likely to occur through lack of clean feed (dependant on supplementary feed reserves) and health problems.
0.9	200 mm (low)	Inability to plough ash into soil (Neild et al., 1998), possibly resulting in the need to consider land use change (e.g. to forestry). 300 mm of wet ash is a 6 kPa load, creating a 96% probability (P) roof collapse for weak roof; 70% P roof collapse for strong roof (Spence et al. 2005). It is likely the farm will suffer near complete loss of livestock herd, either through lack of feed, culling or health problems.
	300 mm (average)	
	400 mm (high).	

Tableau 8.4 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les légumes à feuilles.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Some abrasion and chemical impacts.
0.2	2	Ash abrasion and chemical impacts on plants. Increased difficulty removing volcanic ash from crops to a satisfactory level for sale. Careful hand washing techniques may be necessary to remove ash from leaves and crevices at bases of leaves (Wilson et al., 2007).
0.9	5 (low)	Ninety percent of crop is likely to be un-saleable as volcanic ash coverage is of sufficient amounts to either destroy crops, or make ash removal so expensive as to make harvesting un economical (Barnard, 2003).
	10 (average)	
	30 (high)	

Tableau 8.5 : Ratios et justification des dégâts au téphra sur les fruits.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Some abrasion and chemical damage
0.2	3	Some of crop destroyed from abrasion of fruit by ash and absorption of ash similar into skins, similar to tree crops but more severe as closer proximity to the ground (secondary deposition, wind abrasion, thicker bunches of leaves on stalks)
0.9	5 (low)	Very small amount of crop can be successfully harvested and sold after intense washing and ash removal efforts during cleanup.
	10 (average)	
	20 (high)	

Tableau 8.6 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les légumes racines.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	5	Some abrasion and chemical damage to leaves. Most of the crop value retained as the valuable root remains unaffected and the relatively small thickness of ash may be washed from leaves over time either manually or naturally.
0.2	30	Increased impacts to above ground leaves, possibly causing smothering or acidification damage.
0.9	50 (low)	Crop lost due to higher amounts of ash accumulating and overwhelming leafy vegetable stalks near to the ground, which might decimate the portions of the plants above ground, but allows for removal of below ground (valuable) portions with some difficulty.
	100 (average)	
	150 (high):	

Tableau 8.7 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur la production des arbres fruitiers.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Losses expected due to pitting of fruit skin and absorption of ash into the fruits (Barnard, 2003). Some impact to harvesting operations.
0.2	3	Higher frequency of occurrence of losses due to pitting and skin damage, also harvesting operations more severely affected.
0.9	10 (low)	Severe impact to fruit, possible breakage of tree branches. Very small amount of crop can be successfully harvested and sold, even after intense washing and ash removal efforts.
	20 (average)	
	50 (high)	

Tableau 8.8 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur la production des vignes.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	1	Some abrasion and chemical impacts to grapes. Some impact to harvesting operations.
0.2	2	Intensive steps necessary to save fruit (hand washing). Costs to recover grapes by removing ash begin to equal value of crop.
0.9	1 (low)	Grapes nearly all destroyed by volcanic ash – near total loss of crop.
	5 (average)	
	20 (high)	

Tableau 8.9 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les biens liés aux plantes annuelles.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	5	impacts to gutters on farm buildings, corrosion of metal roofs, fences, damage to cooling system (condensers), farm machinery if operating in ashy conditions
0.2	100	impact to soils, need to cultivate (plough under) ash layer, additional fertiliser inputs, potential long term loss of soil fertility. Wet ash – roof collapse (Spence et al., 2005). Specialist harvesting equipment may be damaged if operated in ashy conditions.
0.9	200 (low)	Inability to plough ash into soil – land use change to forestry may be required.
	300 (average)	
	400 (high).	

Tableau 8.10 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les biens liés aux plantes pérennes.

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	3	Few trees and plants destroyed, some damage to farm infrastructure
0.2	75	Trees and plants breaking under ash load, minor damage to farm infrastructure
0.9	250 (low)	Widespread damage to trees and plants, high risk of building and equipment damage (as mentioned within seasonal crops).
	350 (average)	
	100 (high)	

Tableau 8.11 : Ratios et justification des dégâts dus au téphra sur les vignes

Dr	Ash Depth (mm, dry)	Effects (Damage)
0.01	10	Some damage to grape vines from load of ash on leaves, physical abrasion and chemical damage
0.2	50	Moderate damage to grape vines from load of ash on leaves, physical abrasion and chemical damage. Minor damage to vineyard
0.9	100 (low)	Widespread damage to vines, high risk of building and equipment damage.
	250 (average)	
	400 (high)	

Annexe 4 : Présentation des sites utilisés pour la modélisation, et itérations de la modélisation du réseau de commerce en mer Egée avant l'éruption de Santorin, immédiatement après, et à long terme, de Knappett et al. (2011).

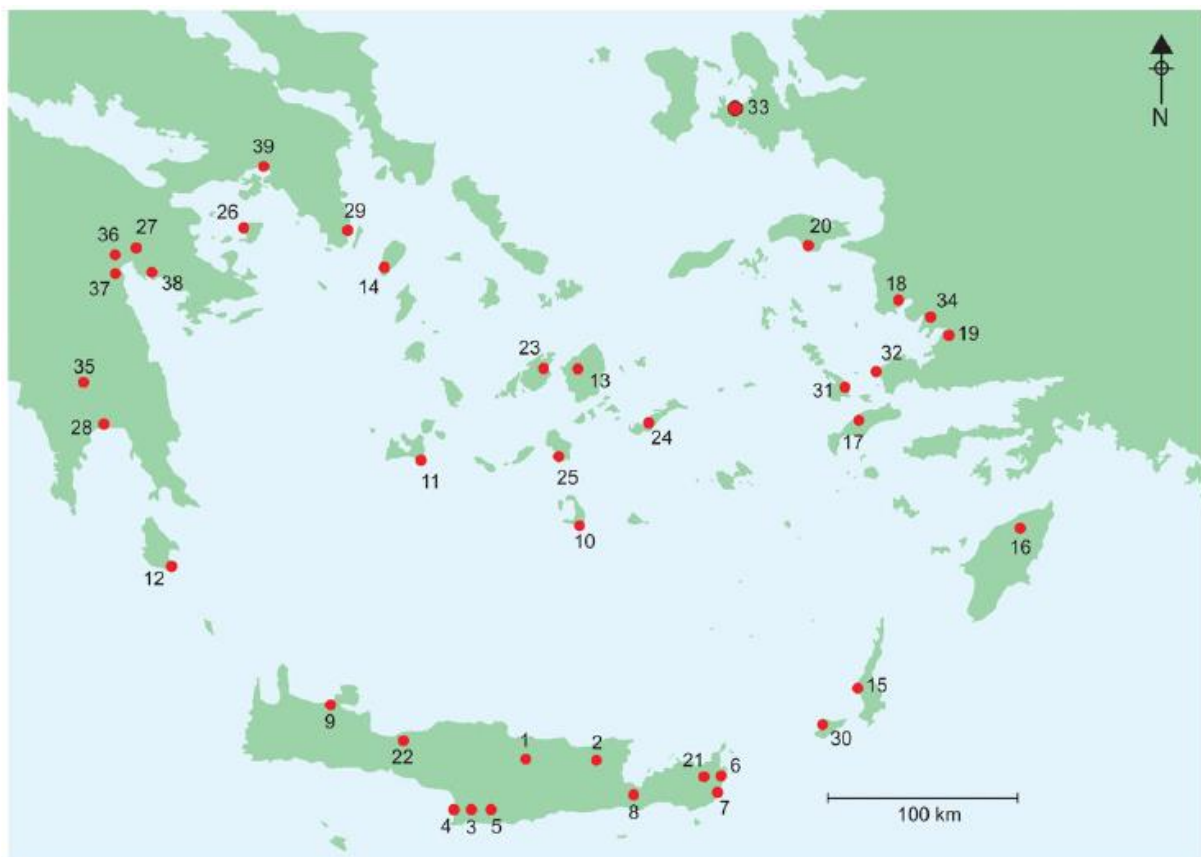


Figure 8.6 : La mer Egée, avec les 39 sites sélectionnés pour la génération du réseau de commerce maritime : 1. Knossos, 2. Malia, 3. Phaistos, 4. Kommos, 5. Ayia Triadha, 6. Palaikastro, 7. Zarkos, 8. Gournia, 9. Chania, 10. Thera, 11. Phylakopi, 12. Kasti, 13. Naxos, 14. Kea, 15. Karpathos, 16. Rhodes, 17. Kos, 18. Miletus, 19. Iasos, 20. Samos, 21. Petras, 22. Rethymnon, 23. Paroikia, 24. Amorgos, 25. Ios, 26. Aegina, 27. Mycenae, 28. Ayios Stephanos, 29. Lavrion, 30. Kasos, 31. Kalymnos, 32. Myndus, 33. Cesme, 34. Akbuk, 35. Menelaion, 36. Argos, 37. Lerna, 38. Asine, 39. Eleusis.

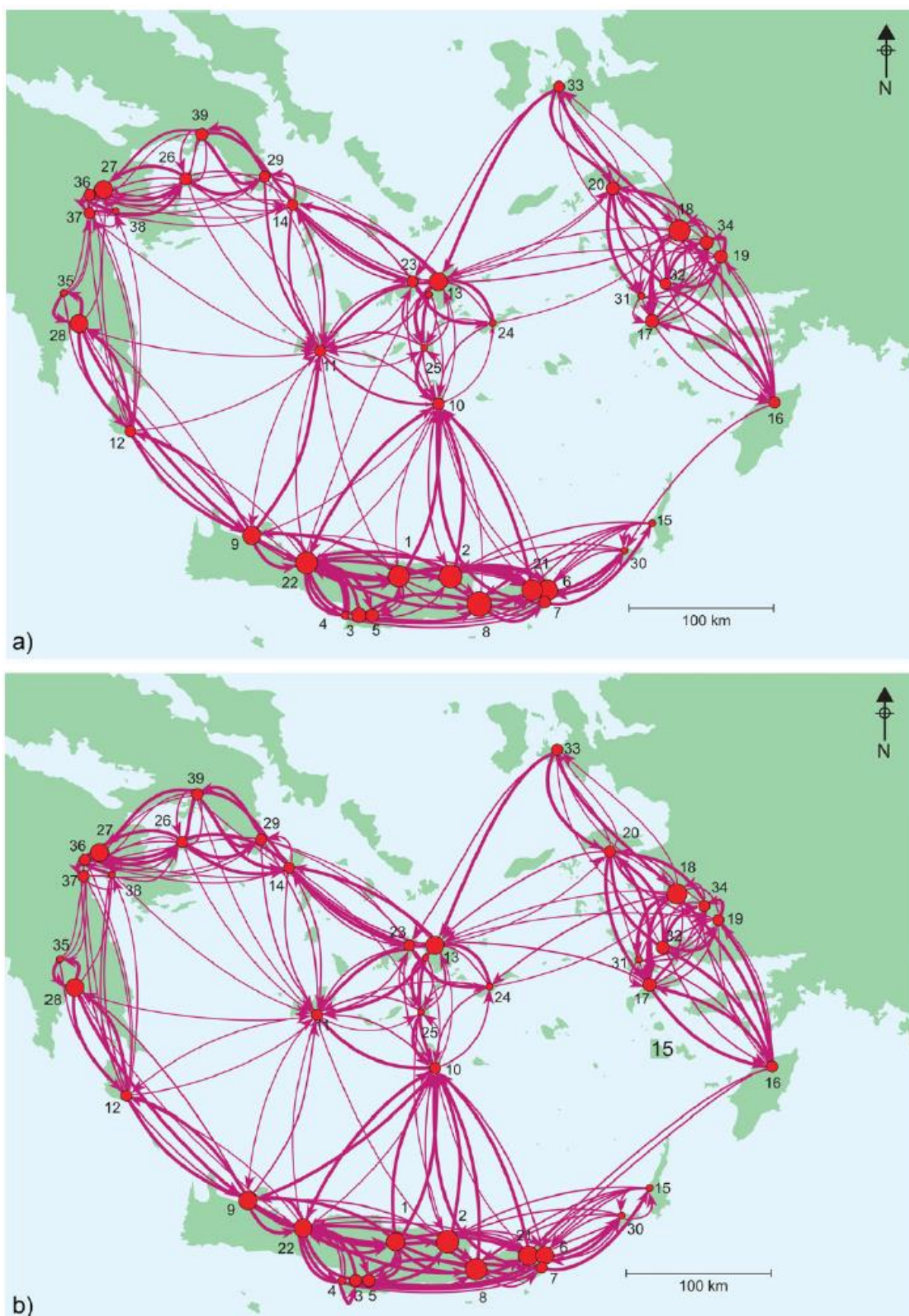


Figure 8.7 : Deux exemples d'itération du modèle pour des valeurs identiques de paramètres. La taille des nœuds reflète les populations respectives des sites, l'épaisseur des liens reflète le trafic annuel entre les sites. Dans les deux cas, l'importance de Théra et le reste de l'Egée est clairement visible.

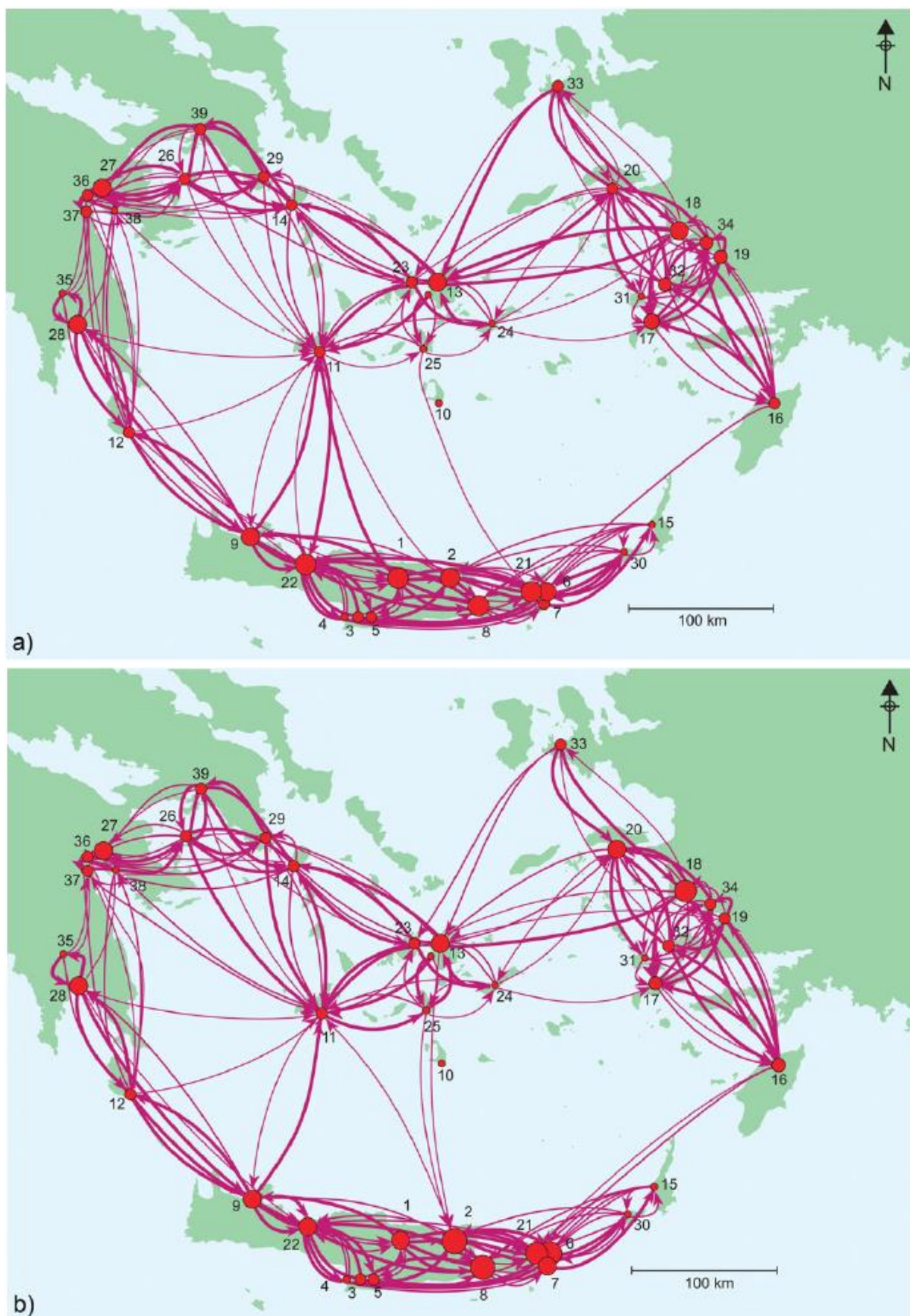
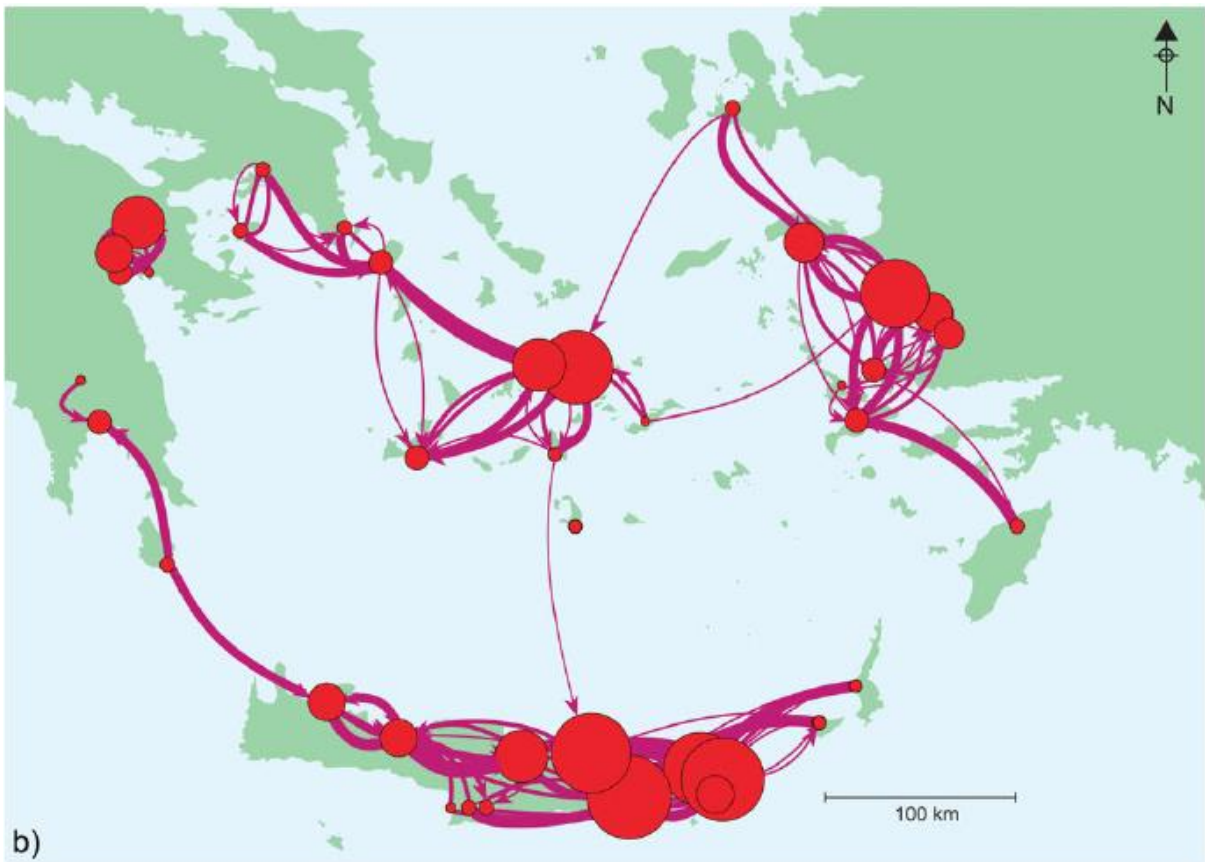
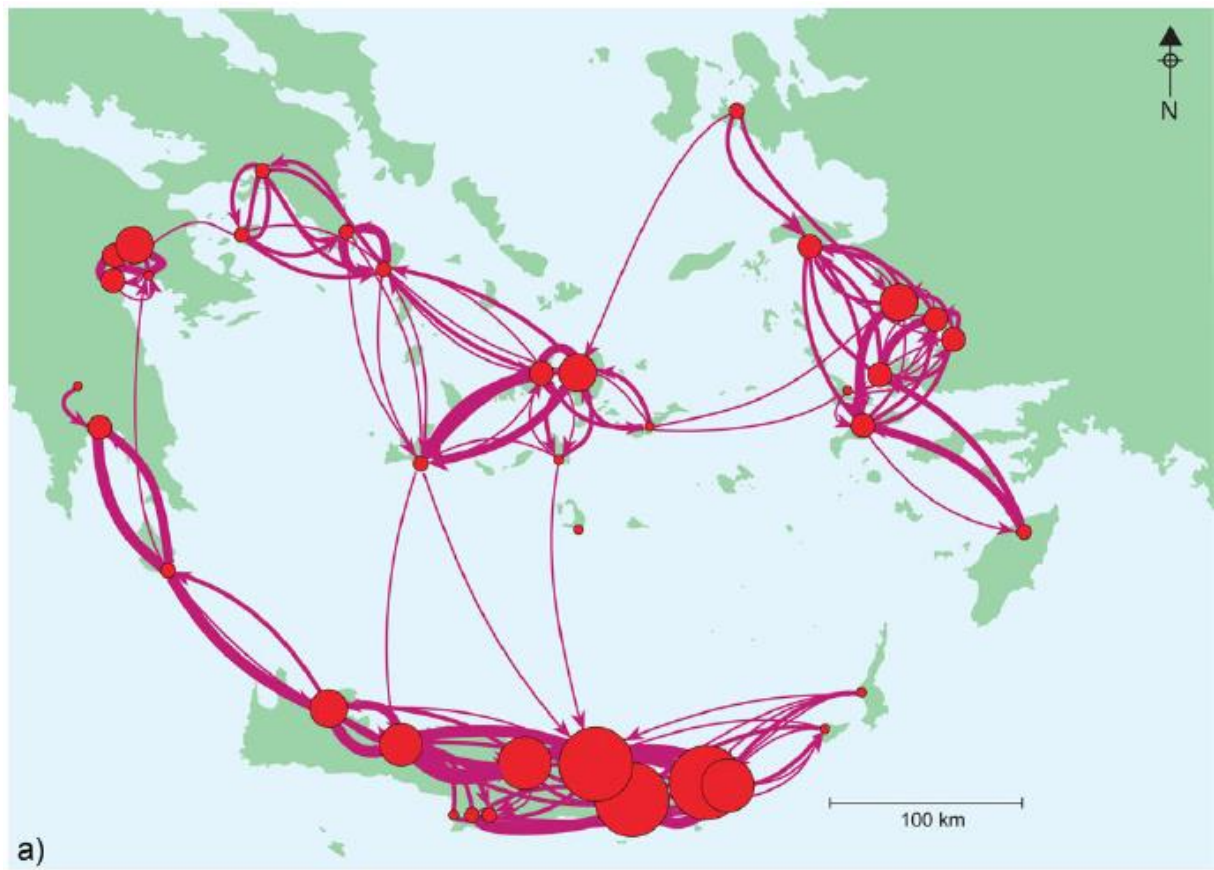


Figure 8.8 : Deux exemples d'itération du modèle pour des valeurs identiques de paramètres lorsque Théra est retirée du modèle. La population totale et le commerce sont essentiellement inchangés par rapport à avant l'éruption.



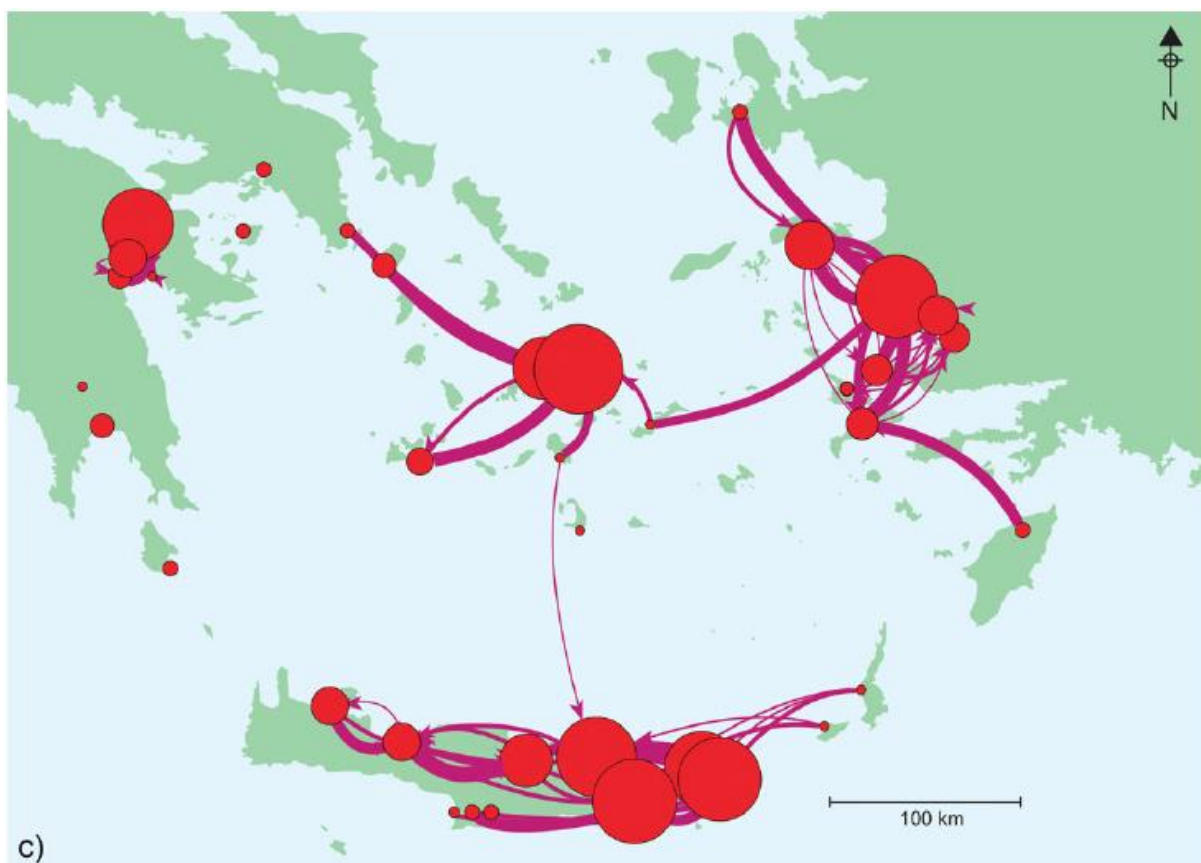


Figure 8.9 : Trois exemples d'itération du modèle dans lesquels, en commençant avec les valeurs des paramètres de la Figure 8.8, les coûts de maintien des liens sont augmentés.

9. Bibliographie

- Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB), 2018. Barley growth guide [WWW Document]. URL <https://projectblue.blob.core.windows.net/media/Default/Imported%20Publication%20Docs/Barley%20growth%20guide%20130718.pdf> (accessed 6.4.21).
- Allbaugh, L.G., 1953. Crete: A Case Study of an Underdeveloped Area.
- Angelakis, A., De Feo, G., Laureano, P., Zourou, A., 2013. Minoan and Etruscan Hydro-Technologies. *Water* 5, 972–987. <https://doi.org/10.3390/w5030972>
- Angelakis, A.N., 2017. Hydro-technologies in the Minoan Era. *Water Supply* 17, 1106–1120. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.006>
- Athanassas, C.D., Modis, K., Alçiçek, M.C., Theodorakopoulou, K., 2017. Contouring the Cataclysm: A Geographical Analysis of the Effects of the Minoan Eruption of the Santorini Volcano. *Environmental Archaeology* 23, 160–176. <https://doi.org/10.1080/14614103.2017.1288885>
- Ayris, P.M., Delmelle, P., 2012. The immediate environmental effects of tephra emission. *Bull Volcanol* 74, 1905–1936. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0654-5>
- Baillargeon, S., 2005. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Université Laval, Québec.
- Barberán, A., Bates, S.T., Casamayor, E.O., Fierer, N., 2012. Using network analysis to explore co-occurrence patterns in soil microbial communities. *ISME J* 6, 343–351. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.119>
- Bastian, M., Heymann, S., Jacomy, M., 2009. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. Presented at the International AAAI Conference on Weblogs and Social Media, North America.
- Betancourt, P.P., 2009. Evidence from Pseira for the Santorini eruption, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating the Minoan Eruption of Santorini*, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.
- Blong, R.J., 1984. *Volcanic Hazards. A Sourcebook on the Effects of Eruptions*. Elsevier, Sydney. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21853-8>
- Bosi, V., MIAVITA Group, 2012. Handbook for volcanic risk management: prevention, crisis management and resilience. BRGM Orleans. <https://doi.org/10.13140/2.1.2167.0083>
- Bottema, S., Sarpaki, A., 2003. Environmental change in Crete: a 9000-year record of Holocene vegetation history and the effect of the Santorini eruption. *The Holocene* 13, 733–749. <https://doi.org/10.1191/0959683603hl659rp>
- Bouron, J.-B., 2019. Système agraire [WWW Document]. Géoconfluences. URL <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/systeme-agraire> (accessed 7.24.21).
- Brogan, T.M., Sofianou, C., 2009. Papadiokambos: new evidence for the impact of the Thera eruption on the northeast coast of Crete, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating*

- the Minoan Eruption of Santorini, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.
- Bruins, H.J., Keller, J., Klügel, A., Kisch, H.J., Katra, I., van der Plicht, J., 2019. Tephra in caves: Distal deposits of the Minoan Santorini eruption and the Campanian super-eruption. *Quaternary International* 499, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.09.040>
- Bruins, H.J., MacGillivray, J.A., Synolakis, C.E., Benjamini, C., Keller, J., Kisch, H.J., Klügel, A., van der Plicht, J., 2008. Geoarchaeological tsunami deposits at Palaikastro (Crete) and the Late Minoan IA eruption of Santorini. *Journal of Archaeological Science* 35, 191–212. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.08.017>
- Chester, D.K., 1993. *Volcanoes and Society*. Edward Arnold, London.
- Christakis, K., 2019. The Neglected “Fields” of Proto-Urban Living: A View from Bronze Age Crete, in: Garcia, D., Orgeolet, R., Pomadère, M., Zurbach, J. (Eds.), *Country in the City: Agricultural Functions of Protohistoric Urban Settlements (Aegean and Western Mediterranean)*, Archaeopress Archaeology. Archaeopress Publishing Ltd, Oxford.
- Christakis, K., 2008. From Storage Implements to Subsistence Autarkies: A Framework for Interpreting the Archaeological Record, in: *The Politics of Storage: Storage and Sociopolitical Complexity in Neopalatial Crete*, Prehistory Monographs. INSTAP Academic Press.
- Cioni, R., Gurioli, L., Sbrana, A., Vougioukalakis, G., 2000. Precursory phenomena and destructive events related to the Late Bronze Age Minoan (Thera, Greece) and AD 79 (Vesuvius, Italy) Plinian eruptions; inferences from the stratigraphy in the archaeological areas. *Geological Society, London, Special Publications* 171, 123–141. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.171.01.11>
- Cook, R.J., Barron, J.C., Papendick, R.I., Williams, G.J., 1981. Impact on Agriculture of the Mount St. Helens Eruptions. *Science* 211, 16–22. <https://doi.org/10.1126/science.211.4477.16>
- Craig, H.M., 2015a. *Agricultural vulnerability to tephra fall impacts*. University of Canterbury.
- Craig, H.M., 2015b. *Agricultural vulnerability to tephra fall impacts*. University of Canterbury.
- Decuyper, M., 2020. Visual Network Analysis: a qualitative method for researching sociomaterial practice. *Qualitative Research* 20, 73–90. <https://doi.org/10.1177/1468794118816613>
- Driessen, J., 2019. The Santorini eruption. An archaeological investigation of its distal impacts on Minoan Crete. *Quaternary International* 499, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.04.019>
- Driessen, J., 2015. The Birth of a God? Cults and Crises on Minoan Crete, in: Cavalieri, M., Lebrun, R., Meunier, N. (Eds.), *De La Crise Naquirent Les Cultes, Homo Religiosus*. Brepols Publishers, Turnhout, pp. 31–44. <https://doi.org/10.1484/M.HR-EB.5.108417>
- Driessen, J., 2003. Towards an archaeology of Crisis: Defining the longterm impact of LBA Santorini Eruption, in: Grattan, J., Torrence, R. (Eds.), *Natural Disasters and Cultural Change*. Routledge, pp. 250–263. <https://doi.org/10.4324/9780203165102>

- Driessen, J., Jusseret, S., 2019. Collateral Damage? The Santorini Eruption and the collapse of Minoan Civilization 51.
- Driessen, J., Jusseret, S., Letesson, Q., 2013. Minoan Lands? Some Remarks on Land Ownership on Bronze Age Crete, in: Relaki, M., Catapoti, D. (Eds.), *An Archaeology of Land Ownership*. Routledge, New York and Abingdon, pp. 46–69.
- Driessen, J., MacDonald, C.F., 2000. The eruption of the Santorini volcano and its effects on Minoan Crete. *Geological Society, London, Special Publications* 171, 81–93. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.171.01.08>
- Driessen, J., Macdonald, C.F., 1997. The troubled island: Minoan Crete before and after the Santorini eruption, *Aegaeum*. Université de Liège, Liège & Austin.
- Druitt, T.H., McCoy, F.W., Vougioukalakis, G.E., 2019. The Late Bronze Age Eruption of Santorini Volcano and Its Impact on the Ancient Mediterranean World. *Elements* 15, 185–190. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.3.185>
- Encyclopædia Universalis France, 2021. Dictionnaire - Isopaque [WWW Document]. URL <https://www.universalis.fr/dictionnaire/isopaque/> (accessed 7.1.21).
- Evans, K.J., McCoy, F.W., 2020. Precursory eruptive activity and implied cultural responses to the Late Bronze Age (LBA) eruption of Thera (Santorini, Greece). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 397, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106868>
- Fahimnia, B., Sarkis, J., Davarzani, H., 2015. Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics* 162, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.003>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018. Social network analysis for territorial assessment and mapping of food security and nutrition systems (FSNS): a methodological approach. Rome.
- Friedrich, W.L., 2006. Santorini Eruption Radiocarbon Dated to 1627-1600 B.C. *Science* 312, 548–548. <https://doi.org/10.1126/science.1125087>
- Friedrich, W.L., Heinemeier, J., 2009a. The Minoan eruption of Santorini radiocarbon dated to 1613 +/- 13 BC - geological and stratigraphic considerations, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating the Minoan Eruption of Santorini*, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.
- Friedrich, W.L., Heinemeier, J., 2009b. The Minoan eruption of Santorini radiocarbon dated to 1613 +/- 13 BC - geological and stratigraphic considerations, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating the Minoan Eruption of Santorini*, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.
- Friedrich, W.L., Sigalas, N., 2009. The effects of the Minoan eruption - visible at various archaeological sites on Santorini, Greece, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating the Minoan Eruption of Santorini*, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.

- Fructification des oliviers : de la fleur au fruit [WWW Document], n.d. URL <https://www.olivierdeprovence.com/odpce-fr/olivier-fleurs-fructification.php> (accessed 6.4.21).
- Gorokhovich, Y., Mays, L., Ullmann, L., 2011. A survey of ancient Minoan water technologies. *Water Supply* 11, 388–399. <https://doi.org/10.2166/ws.2011.072>
- Halstead, P., 2014. *Two oxen ahead: pre-mechanized farming in the Mediterranean*. Wiley-Blackwell, Hoboken, New Jersey.
- Halstead, P., 2006. Sheep in the garden: the integration of crop and livestock husbandry in early farming regimes of Greece and southern Europe, in: Serjeantson, D., Field, D. (Eds.), *Animals in the Neolithic of Britain and Europe*. Oxbow, Oxford.
- Halstead, P., Isaakidou, V., 2011. Revolutionary Secondary Products: the Development and Significance of Milking, Animal-Traction and Wool-Gathering in Later Prehistoric Europe and the Near East, in: Wilkinson, T.C., Sherratt, S., Bennet, J. (Eds.), *Interweaving Worlds: Systemic Interactions in Eurasia, 7th to the 1st Millennia BC*. Oxbow Books, Oxford. <https://doi.org/10.2307/j.ctvh1dr2k>
- Hamilakis, Y., 1999. Food technologies/technologies of the body: The social context of wine and oil production and consumption in Bronze Age Crete. *World Archaeology* 31, 38–54. <https://doi.org/10.1080/00438243.1999.9980431>
- Hamilakis, Y., 1996. WINE, OIL AND THE DIALECTICS OF POWER IN BRONZE AGE CRETE: A REVIEW OF THE EVIDENCE. *Oxford J Archeol* 15, 1–32. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0092.1996.tb00071.x>
- Heinemeier, J., Friedrich, W.L., Kromer, B., Bronk Ramsey, C., 2009. The Minoan eruption of Santorini radiocarbon dated by an olive tree buried by the eruption, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating the Minoan Eruption of Santorini*, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.
- Höflmayer, F., 2012. The Date of the Minoan Santorini Eruption: Quantifying the “Offset.” *Radiocarbon* 54, 435–448. <https://doi.org/10.1017/S0033822200047196>
- Höflmayer, F., à paraître. Tracing the Season of the Santorini (Thera) eruption.
- Isaakidou, V., 2011. Farming regimes in Neolithic Europe: gardening with cows and other models, in: Hadjikoumis, A., Robinson, E., Viner, S. (Eds.), *Dynamics of Neolithisation in Europe: Studies in Honour of Andrew Sherratt*. Oxbow Books, Oxford. <https://doi.org/10.2307/j.ctvh1dhqm>
- Isaakidou, V., 2008. ‘The Fauna and Economy of Neolithic Knossos’ Revisited, in: Isaakidou, V., Tomkins, P.D. (Eds.), *Escaping the Labyrinth: The Cretan Neolithic in Context*, Sheffield Studies in Aegean Archaeology. Oxbow Books, pp. 90–114.
- Isaakidou, V., 2006. Ploughing with Cows: Knossos and the Secondary Products Revolution, in: Serjeantson, D., Field, D. (Eds.), *Animals in the Neolithic of Britain and Europe*. Oxbow, Oxford. <https://doi.org/10.2307/j.ctt1w1vjbn>

- Jarriel, K., 2020. Climate disaster and the resilience of local maritime networks: Two examples from the Aegean Bronze Age. *Quaternary International* S1040618220304602. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.08.010>
- Jenkins, S.F., Spence, R.J.S., Fonseca, J.F.B.D., Solidum, R.U., Wilson, T.M., 2014a. Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 276, 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.002>
- Jenkins, S.F., Wilson, T.M., Magill, C., Miller, V., Stewart, C., Blong, R., Marzocchi, W., Boulton, M., Bonadonna, C., Costa, A., 2014b. Volcanic ash fall hazard and risk: Technical background paper for the UN-ISDR 2015 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015, in: Loughlin, S.C., Sparks, S., Brown, S.K., Jenkins, Susanna F., Vye-Brown, C. (Eds.), *Global Volcanic Hazards and Risk*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 173–222. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.005>
- Johnston, E.N., Phillips, J.C., Bonadonna, C., Watson, I.M., 2012. Reconstructing the tephra dispersal pattern from the Bronze Age eruption of Santorini using an advection–diffusion model. *Bull Volcanol* 74, 1485–1507. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0609-x>
- Johnston, E.N., Sparks, R.S.J., Phillips, J.C., Carey, S., 2014. Revised estimates for the volume of the Late Bronze Age Minoan eruption, Santorini, Greece. *Journal of the Geological Society* 171, 583–590. <https://doi.org/10.1144/jgs2013-113>
- Knappett, C., Evans, T., Rivers, R., 2008. Modelling maritime interaction in the Aegean Bronze Age. *Antiquity* 82, 1009–1024. <https://doi.org/10.1017/S0003598X0009774X>
- Knappett, C., Rivers, R., Evans, T., 2011. The Theran eruption and Minoan palatial collapse: new interpretations gained from modelling the maritime network. *Antiquity* 85, 1008–1023. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00068459>
- Kopaka, K., 2011. On Caves and Households in Bronze Age Crete: “Της Ουρανιάς το Φρούδι” Cave at Zakros, in: ΣΤΕΓΑ: The Archaeology of Houses and Households in Ancient Crete, *Hesperia Supplements*. The American School of Classical Studies at Athens, Princeton, pp. 273–284.
- Kulick, R., Westgate, J., 2021. Tephrochronology and micromorphology of Theran tephra deposits at Palaikastro, Crete. *Journal of Archaeological Science: Reports* 36, 102884. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102884>
- Lentille, *Lens culinaris* [WWW Document], n.d. . auJardin.info. URL <https://www.aujardin.info/plantes/lens-culinaris.php> (accessed 6.4.21).
- Les sureaux (*Sambucus* sp.) [WWW Document], n.d. . Rustica.fr. URL <https://www.rustica.fr/fruits-et-verger/sureau-fiche-arbre,4606.html> (accessed 6.4.21).
- Livarda, A., Kotzamani, G., 2013. THE ARCHAEOBOTANY OF NEOLITHIC AND BRONZE AGE CRETE: SYNTHESIS AND PROSPECTS. *Annu. Br. Sch. Athens* 108, 1–29. <https://doi.org/10.1017/S0068245413000063>

- Livarda, A., Orengo, H.A., Cañellas-Boltà, N., Riera-Mora, S., Picornell-Gelabert, L., Tzevelekidi, V., Veropoulidou, R., Marlasca Martín, R., Krahtopoulou, A., 2021. Mediterranean polyculture revisited: Olive, grape and subsistence strategies at Palaikastro, East Crete, between the Late Neolithic and Late Bronze Age. *Journal of Anthropological Archaeology* 61, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2021.101271>
- Manning, S.W., Höflmayer, F., Moeller, N., Dee, M.W., Ramsey, C.B., Fleitmann, D., Higham, T., Kutschera, W., Wild, E.M., 2014. Dating the Thera (Santorini) eruption: archaeological and scientific evidence supporting a high chronology. *Antiquity* 88, 1164–1179. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00115388>
- Marinatos, Sp., 1939. The Volcanic Destruction of Minoan Crete. *Antiquity* 13, 425–439. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00028088>
- McCoy, F.W., 2009. The eruption within the debate about the date, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating the Minoan Eruption of Santorini*, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.
- Meerow, S., Newell, J.P., Stults, M., 2016. Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning* 147, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
- Molloy, B.P.C., McCoy, F.W., Megarry, R., Edwards, D.J.G., 2014. Of Tephra and Tsunamis: A Secondary Deposit of Tephra Sealing LM IA Activity at Priniatikos Pyrgos, in: Molloy, B.P.C., Duckworth, C.N. (Eds.), *A Cretan Landscape through Time: Priniatikos Pyrgos and Environs*, BAR International Series. Archaeopress, Oxford, pp. 43–53.
- Newhall, C.G., Self, S., 1982. The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.* 87, 1231. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>
- Nikolaou, T., Christodoulakos, I., Piperidis, P., Angelakis, A., 2017. Evolution of Cretan Aqueducts and Their Potential for Hydroelectric Exploitation. *Water* 9, 31. <https://doi.org/10.3390/w9010031>
- Oliver-Smith, A., 2015. Conversations in catastrophe: Neoliberalism and the cultural construction of disaster risk, in: Krüger, F. (Ed.), *Cultures and Disasters: Understanding Cultural Framings in Disaster Risk Reduction*, Routledge Studies in Hazards, Disaster Risk and Climate Change. Routledge, London, p. 10.
- Oliver-Smith, A., 1999. "What is a disaster?": Anthropological Perspectives on a Persistent Question, in: Oliver-Smith, A., Hoffman, S. (Eds.), *The Angry Earth: Disaster in Anthropological Perspective*. Routledge, London.
- Oliver-Smith, A., 1996a. Anthropological Research on Hazards and Disasters. *Annu. Rev. Anthropol.* 25, 303–328. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.25.1.303>
- Oliver-Smith, A., 1996b. Anthropological Research on Hazards and Disasters. *Annu. Rev. Anthropol.* 25, 303–328. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.25.1.303>
- Oliver-Smith, A., Hoffman, S. (Eds.), 2002a. *Catasrophe & Culture, The Antropology of Disaster*. School of American Research Press, Santa Fe.

- Oliver-Smith, A., Hoffman, S., 2002b. Why Anthropologists Should Study Disasters, in: Oliver-Smith, A., Hoffman, S. (Eds.), *Catasrophe & Culture, The Antropology of Disaster*. School of American Research Press, Santa Fe.
- Panagiotakopulu, E., Higham, T., Sarpaki, A., Buckland, P., Doulas, C., 2013. Ancient pests: the season of the Santorini Minoan volcanic eruption and a date from insect chitin. *Naturwissenschaften* 100, 683–689. <https://doi.org/10.1007/s00114-013-1068-8>
- Paque, M., 2019. Stockage du C en sols enfouis sous téphra : cas du volcan Atacazo, Equateur. Universit  Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Phrygana, 2021. *Raphanus raphanistrum* L., 1753 subsp. *raphanistrum* [WWW Document]. URL <https://phrygana.eu/Flora/Brassicaceae/Raphanus-raphanistrum-raphanistrum/Raphanus-raphanistrum-raphanistrum.html> (accessed 6.4.21).
- Phrygana, 2020. *Lathyrus clymenum* L., 1753 [WWW Document]. URL <https://phrygana.eu/Flora/Fabaceae/Lathyrus-clymenum/Lathyrus-clymenum.html> (accessed 6.4.21).
- Platon, L., 2013. The Uses of Caves in Minoan Crete: A Diachronic Analysis, in: Mavridis, F., Tae Jensen, J. (Eds.), *Stable Places and Changing Perceptions: Cave Archaeology in Greece*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. <https://doi.org/10.30861/9781407311791>
- Pois chiche, *Cicer arietinum* [WWW Document], n.d. . auJardin.info. URL <https://www.aujardin.info/plantes/cicer-arietinum.php> (accessed 6.4.21).
- Pyle, D.M., 1989. The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bull Volcanol* 51, 1–15. <https://doi.org/10.1007/BF01086757>
- Riede, F., Kierdorf, U., 2020. The eruption of the Laacher See volcano (~13,000 years BP) and possible fluoride poisoning amongst contemporaneous wildlife and human foragers—Outline of a hypothesis and the way to test it. *Int J Osteoarchaeol* 30, 855–871. <https://doi.org/10.1002/oa.2916>
- Riley, F.R., 2012. THE OLIVE INDUSTRY OF BRONZE AGE CRETE: EVIDENCE FOR VOLCANIC DAMAGE TO OLIVE GROVES AND PROPERTY IN CENTRAL AND EASTERN CRETE. *AKR* 49. <https://doi.org/10.7445/49-0-82>
- Roberts, R., 2019. The Minoan and Mycenaean Agricultural Trade and Trade Routes in the Mycenaean Empire.
- Sarpaki, A., 2009. Knossos, Crete Invaders, ‘sea goers’, or previously ‘invisible’ - Sarpaki.pdf.
- Siart, C., Eitel, B., 2013a. Santorini tephra on Crete: a mineralogical record of Bronze Age environmental change, in: Meller, H., Bertemes, F., Bork, H.R., Risch, R. (Eds.), *1600 – Cultural Change in the Shadow of the Thera-Eruption?*, Tagungen Des Landesmuseums F r Vorgeschichte Halle (Saale). Landesmuseum f r Vorgeschichte, Halle (Saale), pp. 77–87.
- Siart, C., Eitel, B., 2013b. Santorini tephra on Crete: a mineralogical record of Bronze Age environmental change, in: Meller, H., Bertemes, F., Bork, H.R., Risch, R. (Eds.), *1600 – Cultural Change in the Shadow of the Thera-Eruption?*, Tagungen Des Landesmuseums

- Für Vorgeschichte Halle (Saale). Landesmuseum für Vorgeschichte, Halle (Saale), pp. 77–87.
- Siart, C., Hecht, S., Holzhauer, I., Altherr, R., Meyer, H.P., Schukraft, G., Eitel, B., Bubenzer, O., Panagiotopoulos, D., 2010. Karst depressions as geoarchaeological archives: The palaeoenvironmental reconstruction of Zominthos (Central Crete), based on geophysical prospection, sedimentological investigations and GIS. *Quaternary International* 216, 75–92. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.06.020>
- Siebert, L., Simkin, T., Kimberly, P., 2010. *Volcanoes of The World: Third Edition*. University of California Press.
- Smith, W.H., Staskawicz, B.J., 1977. Removal of atmospheric particles by leaves and twigs of urban trees: Some preliminary observations and assessment of research needs. *Environmental Management* 1, 317–330. <https://doi.org/10.1007/BF01865859>
- Soles, J.S., 2009. The impact of the Minoan eruption of Santorini on Mochlos, a small Minoan town on the north coast of Crete, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating the Minoan Eruption of Santorini*, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.
- Soles, J.S., Taylor, S.R., Vitaliano, C.J., 1995. Tephra samples from Mochlos and their chronological implications for Neopalatial Crete. *Archaeometry* 37, 385–393. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1995.tb00751.x>
- Sparks, R.S.J., Bursik, M., Carey, S., Gilbert, J., Glaze, L., Sigurdsson, H., Woods, A., 1997. *Volcanic plumes*. Wiley, Chichester ; New York.
- Stewart, C., Johnston, D.M., Leonard, G.S., Horwell, C.J., Thordarson, T., Cronin, S.J., 2006. Contamination of water supplies by volcanic ashfall: A literature review and simple impact modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 158, 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002>
- SUDEXPE, n.d. Grenade: Floraison et production [WWW Document]. URL <https://www.sudexpe.net/Floraison-et-production-270> (accessed 6.4.21).
- Texier, C., Rocher, P., Turpin, O., 2004. Les fumiers de porcs sur litière de paille accumulée: Composition, production et rejets entre le sevrage et l'abattage.
- Warren, P., 2009. The date of the Late Bronze Age eruption of Santorini, in: Warburton, D.A. (Ed.), *Time's Up! Dating the Minoan Eruption of Santorini*, Monographs of the Danish Institute at Athens. The Danish Institute at Athens, Athènes.
- Weinstein, L.H., Davison, A., 2004. *Fluorides in the environment: effects on plants and animals*. CABI Pub, Wallingford, Oxon, UK ; Cambridge, MA, USA.
- Werner, V., Baika, K., Tzigounaki, A., Reicherter, K., Papanikolaou, I., Emde, K., Fischer, P., Vött, A., 2019. Mid-Holocene tectonic geomorphology of northern Crete deduced from a coastal sedimentary archive near Rethymnon and a Late Bronze Age Santorini tsunamite candidate. *Geomorphology* 326, 167–189. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.017>

- Wilson, T., Stewart, C., Cole, J., Johnston, D., Cronin, S., 2010. Vulnerability of farm water supply systems to volcanic ash fall. *Environ Earth Sci* 61, 675–688. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0380-2>
- Wilson, T.M., Kaye, G.D., GNS Science (N.Z.), 2007. Agricultural fragility estimates for volcanic ash fall hazards. GNS Science, Lower Hutt, N.Z.

Réévaluation du rôle potentiel de l'éruption de Santorin au XVII^e siècle ACN dans l'effondrement de la civilisation minoenne en Crète : une focalisation sur la vulnérabilité agraire

Sophie Malherbe

La raison du déclin de la civilisation minoenne, qui s'est installée en Crète en 3000 ACN et a s'est effondrée aux alentours de 1450 ACN, est une question qui taraude la communauté scientifique depuis des décennies. L'une des hypothèses est que l'éruption de Santorin, au XVII^e siècle ACN, fut un élément dévastateur et catalyseur de changements qui, à terme, menèrent au déclin de cette société. Dans ce travail, nous cherchons à évaluer l'impact de cette éruption sur l'agriculture minoenne, puisque l'agriculture est un élément-clé de la subsistance de toute société. Pour ce faire, nous avons représenté le système agraire minoen, comprenant non seulement les cultures et le bétail de l'époque mais aussi les acteurs du système comme l'élite et les paysans minoens, sous forme de réseau grâce au logiciel de visualisation « Gephi ». Le but de cet exercice est de comprendre les relations qui existent au sein de ce système afin d'évaluer, suite à l'éruption de Santorin, les impacts qu'un dépôt de téphra a pu avoir sur ses différents éléments, et donc de comprendre la vulnérabilité de l'agriculture minoenne. Une fois les impacts identifiés, l'analyse réseau a permis de mettre en évidence non seulement les dommages subis par les éléments du système agraire pris séparément, mais aussi les répercussions indirectes de ces dégâts sur l'ensemble du système. L'épaisseur réelle du dépôt de téphra en Crète étant inconnue, nous avons envisagé deux scénarios, l'un d'une épaisseur d'un millimètre et l'autre, de dix millimètres. Nous avons pu déduire que les dégâts au niveau végétal et animal deviennent rapidement catastrophiques, avec une perte de près de toute la production végétale et d'environ 20 % du cheptel suite à un dépôt de dix millimètres de téphra. De telles diminutions de la quantité de nourriture l'année de l'éruption, avec de probables répercussions les années subséquentes, ont pu engendrer des problèmes de famine et participer à une réforme de la mentalité et de la société minoenne, la faisant basculer vers un mode de gouvernance plus fractionné et un mode de vie plus individualiste. Dans ce cas, la fragilisation du tissu sociétal aurait pu ouvrir la porte à des invasions et, après 1450 ACN, à la soumission des Minoens aux Mycéniens.