Archéologie et informatique. Histoire d'une rencontre

François Favory, Catherine Fruchart, Laure Nuninger

Notre présentation des rapports entre l'archéologie et l'informatique s'appuiera sur les expériences développées par l'équipe d'archéologie et d'histoire ancienne de l'université de Franche-Comté.

La préhistoire d'une rencontre : la mathématique et la statistique sans douleur pour les SHS

Cette aventure, amorcée dans la décennie 1970, est inséparable de la présence dans une Faculté de Lettres et Sciences humaines, à Besançon, d'un mathématicien et statisticien, Jean-Philippe Massonie, recruté par le Département de Psychologie puis associé aux travaux de l'équipe de recherche de Géographie qui va constituer la future UMR 6049 ThéMA, sous l'impulsion de Jean-Claude Wieber. Adepte des méthodes d'analyse des données élaborées par Jean-Paul Benzécri et promoteur convaincu et convaincant de la micro-informatique au sein des SHS, J.-Ph. Massonie va créer avec ses disciples en économie, en géographie, en histoire, en littérature et en psychologie, des logiciels d'acquisition et de traitement statistique des données, en tenant compte des comportements des spécialistes de sciences humaines et sociales (enregistrement automatique des actions des opérateurs, peu habitués à sauvegarder les étapes de leur travail, usage minimal des lignes codées pour agir et pour accéder à des données enregistrées, convivialité des procédures).

J.-Ph. Massonie crée, à son arrivée, en 1964, le Laboratoire Mathématiques, Informatique, Statistiques de l'université de Franche-Comté (MIS). Son objectif « était de développer, au sein des Sciences de l'Homme, l'usage des méthodes d'analyse des données plus couramment utilisées dans les Sciences de la Matière et de la Nature. Il ne visait pas seulement à adapter ces méthodes. Son souci était de les rendre accessibles aux chercheurs afin qu'ils puissent les utiliser dans leurs recherches. En raison de l'importance des calculs, l'informatique était la condition incontournable de développement des méthodes d'analyse des données. Le laboratoire MIS s'est progressivement spécialisé dans les solutions informatiques conviviales, économiques et simples à utiliser. La pluridisciplinarité entre, d'une part, des mathématiciens et des informaticiens et, d'autre part, des chercheurs en Sciences de l'Homme, a abouti à la réalisation d'outils accessibles. Ils ont permis aux chercheurs en Sciences de l'Homme de participer activement à la diffusion des "nouvelles technologies" au sein de leurs disciplines dans le cadre de recherches souvent qualifiées de "quantitatives" » (Girardot, 2004, 2-3).

L'arrivée des équipements personnels portables Apple : Apple II (1977), Macintosh (1984), IMac (1998), etc., va permettre la diffusion des ordinateurs dans les laboratoires et à domicile. Il est alors possible de libérer l'enregistrement et le traitement statistique des données de la dépendance à l'égard des centres de calcul, celui de l'université comme celui du Circé[1] pour les grands fichiers. J.-Ph. Massonie a adapté le logiciel d'analyse des correspondances de J.-P. Benzécri aux ordinateurs du Centre Universitaire de Calcul, avec l'aide de Xuan Luong. C'est ainsi qu'ont été effectuées les premières analyses factorielles des correspondances (AFC) portant sur les objets archéologiques – typologie de haches de bronze à ailerons médians : Vuaillat et Massonie, 1974 ; Schmitt, 1974 – et sur des corpus littéraires grecs –

[1] Centre inter-régional de calcul électronique (Circé) du CNRS, à Orsay.

classification de divinités en fonction des offrandes reçues dans des sanctuaires grecs, d'après l'Anthologie palatine : Mactoux, 1974.
Le recours à l'informatique répond au besoin, chez les archéologues et les historiens, d'enregistrer des informations dans des fichiers durables, modifiables, qualitativement et quantitativement, et capables d'être traités directement, sans nouvelle saisie, par des programmes d'analyse statistique, permettant, entre autres, de fonder des classifications à variables multiples. C'est à la fin des années 1970 et dans la décennie 1980 qu'apparaissent les systèmes de gestion de bases de données[2] dont vont s'emparer les archéologues, stimulés par les initiatives de formation du Centre de recherches archéologiques du CNRS, tête du réseau national des unités de recherche propres du CNRS ou labellisées par le CNRS et associées à une université, opérant en archéologie, archéométrie, archéobotanique, archéozoologie, anthropologie physique et en paléo-environnement (CRA, unité propre du CNRS, Sophia Antipolis[3]).
On rappellera que c'est dans la décennie 1970 que naît et se manifeste, en Grande-Bretagne, le réseau « Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology » (CAA) qui organise son premier colloque à Birmingham en 1973, à l'initiative de la fondatrice du cycle de colloques, Susan Laflin, membre de la Birmingham University Field Archaeology Unit, parallèlement aux développements de la *new archaeology* anglo-saxonne, entre autres à l'université de Cambridge (Favory, van der Leeuw dir., 2016).

En 1987-1988, paraissent, dans la revue *Gallia*, les résultats de l'AFC appliquée aux établissements gallo-romains du territoire d'*Vgernum* (Beaucaire, Gard) (Favory, Fiches, Girardot, 1987-1988) : cette initiative est fondatrice à plus d'un titre. Jean-Luc Fiches, chercheur au CNRS, animateur d'une équipe d'archéologues engagés dans la publication des données relatives à la ville gallo-romaine d'*Vgernum* et à son territoire, avait compilé les données livrées par des prospections au sol et par des fouilles sur les établissements ruraux du territoire d'*Vgernum*. Ces données ont été enregistrées dans un tableau Excel structuré par descripteurs, soit des catégories descriptives qualitatives et quantitatives : surface de l'établissement, qualité des matériaux de construction, qualité et diversité du mobilier céramique et métallique collecté, niveau de vie, activités spécialisées et fonction de l'établissement, date d'implantation, périodes d'occupation, nature du terroir environnant l'établissement et relief du site, insertion dans un terroir structuré par une « limitation » antique. Chacun de ces descripteurs était structuré en modalités quantitatives ou qualitatives. J.-L. Fiches avait tenté de regrouper les établissements selon leur profil dans une matrice ordonnée selon la méthode préconisée par J. Bertin (Bertin, 1969). Le regroupement a fonctionné pour deux à trois variables (superficie, matériaux, mobilier) et n'a pu se poursuivre pour les autres variables. J.-L. Fiches, un ami qui connaissait nos travaux statistiques, nous a alors confié son fichier Excel qu'on a structuré en modalités booléennes (présence : 1/absence : 0) des différents caractères qu'il avait élaborés et retenus. Le fichier booléen a été soumis à une analyse factorielle des correspondances après suppression ou regroupement des modalités trop peu fréquentes ou redondantes.
Cette opération exploratoire sur un fichier de qualité limitée, alimenté par des chercheurs dépourvus de protocole commun et concerté de collecte de l'information, va offrir à la communauté archéologique le premier catalogue de descripteurs archéologiques et situationnels adopté, enrichi et diversifié, encore aujourd'hui, par des équipes d'archéologues en France et à l'étranger (Favory, Nuninger, Sanders 2012 ; Favory 2016). Ce catalogue

[2] Oracle Database (1979), 4D (1985), File Maker Pro (1985), HyperCard (1987), etc., auxquels il faut ajouter Excel, tableur abondamment utilisé et permettant la saisie des objets et individus.
[3] Il obtient en 1989 le titre de Centre thématique de formation du CNRS, offrant une vingtaine de stages par an.

inspirera les analyses pratiquées en Languedoc oriental (Favory *et al.*, 1994a et 1994b ; Durand-Dastès *et al.*, 2008), dans le programme européen *Archaeomedes*[4] (van der Leeuw, Favory, Fiches, 2003) et dans le programme ACI et ANR *ArchaeDyn*[5] (Gandini, Favory et Nuninger, 2008 ; 2012). Nombre de thèses d'archéologie ont repris ce catalogue et l'ont adapté à leur corpus de sites, soumis à l'analyse factorielle des correspondances (Nuninger, 2002 ; Gandini, 2006 ; 2008 ; Ouriachi, 2009 ; Fovet, 2010 ; Lautier, 2010 ; Nüsslein, 2016 ; 2018).
A l'époque, une AFC portant sur un fichier d'une cinquantaine à une centaine d'individus et lancée sur un Apple IIe, durait le temps d'un déjeuner, selon la formule légendaire de J.-Ph. Massonie. Nous utilisions le logiciel convivial créé par Jean-Jacques Girardot, @Anaconda[6], à partir du logiciel d'AFC de J.-P. Benzécri et de certaines astuces de son adaptation par J.-Ph. Massonie. Cet outil, de manipulation aisée, produisait des graphiques des différents plans structurés selon les premiers axes factoriels choisis (généralement 1-2, 1-3, 2-3), l'arbre de classification hiérarchique calculée sur les résultats de l'AFC et les précieuses aides à l'interprétation permettant de travailler sur la contribution des individus et des caractères sur la formation des axes factoriels, sur leur corrélation par rapport au plan des différents graphiques demandés, ce qui permettait de restituer la distance des individus et des caractères par rapport à un plan considéré.
C'est à l'occasion de l'analyse du corpus de sites du territoire d'*Vgernum* que J.-L. Fiches va recourir à un programme de classification ascendante hiérarchique (CAH) créé par un de ses collègues de Montpellier, Maurice Roux (Roux 1985), et intégré par J.-J. Girardot dans le logiciel Anaconda.

L'archéologie dans la structuration de la recherche en SHS

L'initiative de Besançon s'inscrit alors dans un processus de structuration des SHS regroupées dans des Maisons dédiées aux recherches en SHS et fédérant les laboratoires de recherche d'une université autour de plates-formes technologiques offrant des équipements, des banques de données, des logiciels d'acquisition et de traitement de données variées et des personnels ingénieurs et techniciens : se met en place progressivement, au départ à l'initiative de J. Pouilloux, un réseau de Maisons des Sciences de l'Homme « historiques », associant une ou plusieurs universités et le CNRS, comme la Maison de l'Orient et de la Méditerranée, la MOM, à Lyon II (1975), la Maison des Pays Ibériques, à Bordeaux (1979), la Maison méditerranéenne des Sciences de l'Homme, à Aix-en-Provence (MMSH, 1996), la Maison Archéologie et Ethnologie de Nanterre (MAE, Paris I Sorbonne et Paris X, 1996), où

[4] Archaeomedes I (1992-1994): "Understanding the Natural and Anthropogenic causes of soil degradation in the Mediterranean Basin" (Program Environment of the European Commission DGXII) ; Archaeomedes II (1996-1999) : "Policy-relevant models of the natural and anthropogenic dynamics of degradation and desertification and their spatio-temporal manifestations" (Program Environment of the European Commission DGXII), coordination S. van der Leeuw (Arizona State University).

[5] ArchaeDyn I (2005-2007): "*Dynamique spatiale du peuplement et ressources naturelles : vers une analyse intégrée dans le long terme, de la Préhistoire au Moyen Âge*" (Action Concertée Incitative – ACI Espaces et Territoires, contrat ET28) ; ArchaeDyn II (2009-2012): "*Dynamique spatiale des territoires de la Préhistoire au Moyen Âge*" (ANR-08-BLAN-0157-01), coordination F. Favory and L. Nuninger.

[6] Le logiciel Anaconda, *Analyse conviviale de données*, a été développé dès 1979 pour favoriser la diffusion de l'analyse des données en simplifiant les manipulations informatiques indispensables à sa mise en œuvre. Ce logiciel propose une solution accessible, aisée et gratuite pour analyser les données (Bernard, 2010).

l'archéologie jouera un rôle moteur dans l'animation scientifique et dans le lancement de plates-formes d'envergure nationale : le réseau FRANTIQ (« Fédération et ressources sur l'Antiquité (Frantiq) »), alimentant une base de données bibliographiques sur l'Antiquité, la plate-forme de mise en ligne de publications périodiques PERSÉE (MOM), la plate-forme Datation C^{14} (MOM), le Réseau Information spatiale en Archéologie, à coordination répartie. Ces premières Maisons vont servir de socle, avec la MSH de Paris, au Réseau national des Maisons des Sciences de l'Homme (1999), alors soutenu par une Action Concertée Incitative (ACI) du Fonds National de la Science (FNS), grâce aux efforts de Maurice Garden, professeur d'Histoire et responsable de la recherche en SHS au Ministère de la Recherche dans les décennies 1980 et 1990. Fort de 21 Maisons, le Réseau est, depuis 2006, organisé sous forme d'un Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS).

Télédétection satellitaire

Dans les années 1980 et 1990, les progrès réalisés dans la résolution des images satellitaires et l'accessibilité des produits SPOT, grâce à l'action du *Comité d'évaluation de l'action ISIS* (répartition de bons d'achat de scènes satellitaires SPOT)[7], ont encouragé le recours aux images satellitaires pour les études des paysages fossiles (Favory, 1998). C'est surtout dans l'archéologie des deltas et des littoraux, lagunaires et maritimes, que la télédétection satellitaire va se révéler efficace, en exploitant les combinaisons entre les différents canaux des scènes multispectrales et en appréhendant les phénomènes pédologiques et paléo-hydrographiques à échelles petites et moyennes (Favory, Poupet, 1992 ; Tounsi *et al*., 1997). A l'époque, c'est avec la petite société UNISFERE, animée, à Besançon, par deux ingénieurs de géomatique, formés en Géographie à l'université de Franche-Comté, Philippe Cour et François-Pierre Tourneux, que sont effectués les traitements sur scènes multispectrales en fonction des problématiques explorées. Ce sont ces deux ingénieurs qui aideront les archéologues du programme européen Archaeomedes à préciser, en septembre 1992, les outils analytiques offerts par les SIG et les produits alors possibles pour répondre à leurs multiples questions : calcul des paramètres environnementaux autour des établissements analysés : relief, valeur et orientation des pentes, rapport à l'eau, nature des terroirs alentour, chaleur reçue au sol, exposition aux vents dominants, etc. (Tourneux, 2000 ; van der Leeuw, Favory, Fiches, 2003). C'est avec les mêmes ingénieurs que seront explorées la dynamique des parcellaires ruraux sous influence d'une centuriation antique et l'intensité de leurs linéaments en phase avec l'inclinaison des vestiges de la centuriation.

Filtrage numérique de photographies aériennes

Au début des années 1990, Daniel Charraut, chercheur CNRS en physique optique, un des pionniers du filtrage optique, en lumière cohérente, de photographies aériennes pour en extraire les structures linéaires inclinées éventuellement héritées d'une centuriation antique, entreprend une recherche pour réaliser le filtrage numérique de ces photographies aériennes. Avec le concours d'un étudiant de DEA Perrin, 1990), puis d'un doctorant (Jourdain, 1995), il va créer un logiciel de filtrage directionnel des images aériennes dont les résultats sont soumis

[7] F. Favory y a siégé, de 1993 à 1996, comme rapporteur principal du thème "Archéologie" et rapporteur secondaire du thème "Urbanisme et gestion de l'espace". 7 satellites SPOT ont été lancés de 1986 à 2014.

à un logiciel d'extraction des périodicités détectées dans le réseau des linéaments retenus par le filtrage numérique (Charraut, Favory, 1994 ; Charraut, Chouquer et Favory, 1994).

L'ère des systèmes d'information géographique

Les années 1990 ouvrent à l'archéologie les ressources de stockage et de croisement des données archéologiques géoréférencées avec les données spatialisées informant très largement sur le paysage dans toutes ses dimensions, physiques, biologiques et anthropiques. C'est Sander van der Leeuw, professeur à Cambridge, alors engagé dans un programme interdisciplinaire engagé par le Centre de Recherches Archéologiques, sous la direction de son directeur-adjoint, Jean-Luc Fiches[8], qui va offrir les moyens d'un programme européen pour permettre la valorisation des données archéologiques accumulées depuis des décennies par des individus et des équipes associatives ou institutionnalisées (Ministère de la Culture, université, CNRS). A l'occasion d'un séminaire du programme interrégional de recherche Languedoc, Provence-Côte-d'Azur et Rhône-Alpes « Occupation des sols à l'époque romaine en Narbonnaise », soutenu par le Ministère de la Culture dans la thématique H11 « Terroirs, productions et établissements ruraux gallo-romains »[9], que S. van der Leeuw a mesuré le niveau d'intégration méthodologique des bases de données sur l'habitat protohistorique, antique et alto-médiéval des équipes regroupées dans ce collectif et décidé d'associer les archéologues du Midi méditerranéen au programme européen « Archaeomedes »[10] piloté par son université. L'établissement des SIG du programme archéologique sera confié aux sociétés française UNISFERE et néerlandaise RAAP.

Le collectif des archéologues du Midi méditerranéen engagés dans une douzaine de programmes de prospection micro-régionaux et regroupés depuis 1981 dans les programmes collectifs de recherche mentionnés plus haut, a stimulé la prospection au sol systématique et la collecte la plus large des artefacts anthropiques, ainsi que la prospection aérienne à basse altitude. Les vestiges repérés doivent être soigneusement localisés sur plan cadastral et en coordonnées Lambert, et caractérisés aux plans archéologique et environnemental : étendue des vestiges, nature des matériaux de construction, nature du mobilier collecté, datation de l'implantation et durée de l'occupation, activités productives attestées, stockage, rapport aux sols disponibles alentour, à la voirie locale, à l'eau courante et stagnante, insertion dans le parcellaire hérité d'aménagements concertés laténiens, gallo-romains et médiévaux (Favory, 1989 ; Favory, Fiches (dir.), 1994).

L'objectif visé est d'établir des classifications typologiques combinant des descripteurs archéologiques renseignés par la prospection au sol et, éventuellement, par la fouille, et des descripteurs sitologiques inscrivant l'établissement dans son contexte environnemental (topographie, pédologie, hydrologie), et des descripteurs situationnels, permettant d'inscrire l'habitat dans les réseaux anthropiques (réseaux d'habitat, voirie). Les typologies micro-

[8] Programme de l'ATP *Grands projets d'archéologie métropolitaine*, sur le thème « Hommes, espaces et techniques dans la région de Fréjus (Var). Occupation et environnement dans le bassin de l'Argens depuis le Néolithique », où l'ambition est d'impliquer les chercheurs et personnels du CRA dans un programme fédérateur et de faciliter le travail en commun des archéologues, historiens et paléo-environnementalistes.

[9] Le Groupement de Recherche n° 954 du CNRS « Archéologie de l'espace rural méditerranéen dans l'Antiquité et le Moyen Âge » poursuivra, sous la direction de J.-L. Fiches, le travail collectif engagé dans ces programmes collectifs inter-régionaux de recherche.

[10] Archaeomedes I (1992-1994) : «Understanding the Natural and Anthropogenic causes of soil degradation in the Mediterranean Basin» (Program Environment of the European Commission DGXII), coordination Sander van der Leeuw (University of Cambridge)

régionales peuvent être comparées et révéler des contrastes entre micro-régions et au sein d'une même micro-région et la prise en compte de la chronologie permet d'esquisser les voies et la rapidité des dynamiques spatio-temporelles du système d'habitat et de ses composantes : agglomérations, fermes-résidences de notables (cf. les *villae* gallo-romaines), fermes de paysans, locaux techniques, aires de stockage, etc.
Après discussion au sein du collectif des archéologues de la Gaule méridionale engagés dans le programme « Archeomedes », les informations archéologiques relatives à 934 établissements ruraux, occupés entre 125 av. J.-C. et 500 apr. J.-C., ont pu être saisies ou transférées dans une base de données Excel et décrites selon un protocole commun structuré en 7 descripteurs : superficie, matériaux de construction, mobilier, activité, date d'implantation, durée d'occupation, prise en compte d'une occupation antérieure sur le même site. La typologie obtenue par analyse factorielle des correspondances et classification ascendante hiérarchique, a été croisée avec la typologie environnementale dont les descripteurs ont été calculés sous SIG par les sociétés UNISFERE et RAAP : contexte topographique (pourcentage et orientation des pentes dans un rayon de 1 km), contexte pédologique dans un rayon de 500 m, énergie solaire reçue au sol, sensibilité au vents dominants, taux d'humidité des sols, distance aux ressources en eau, degré d'insertion dans le réseau de dessertes locales (Favory, Girardot, 1994 ; van der Leeuw, Favory, Fiches, 2003) (fig. 1).

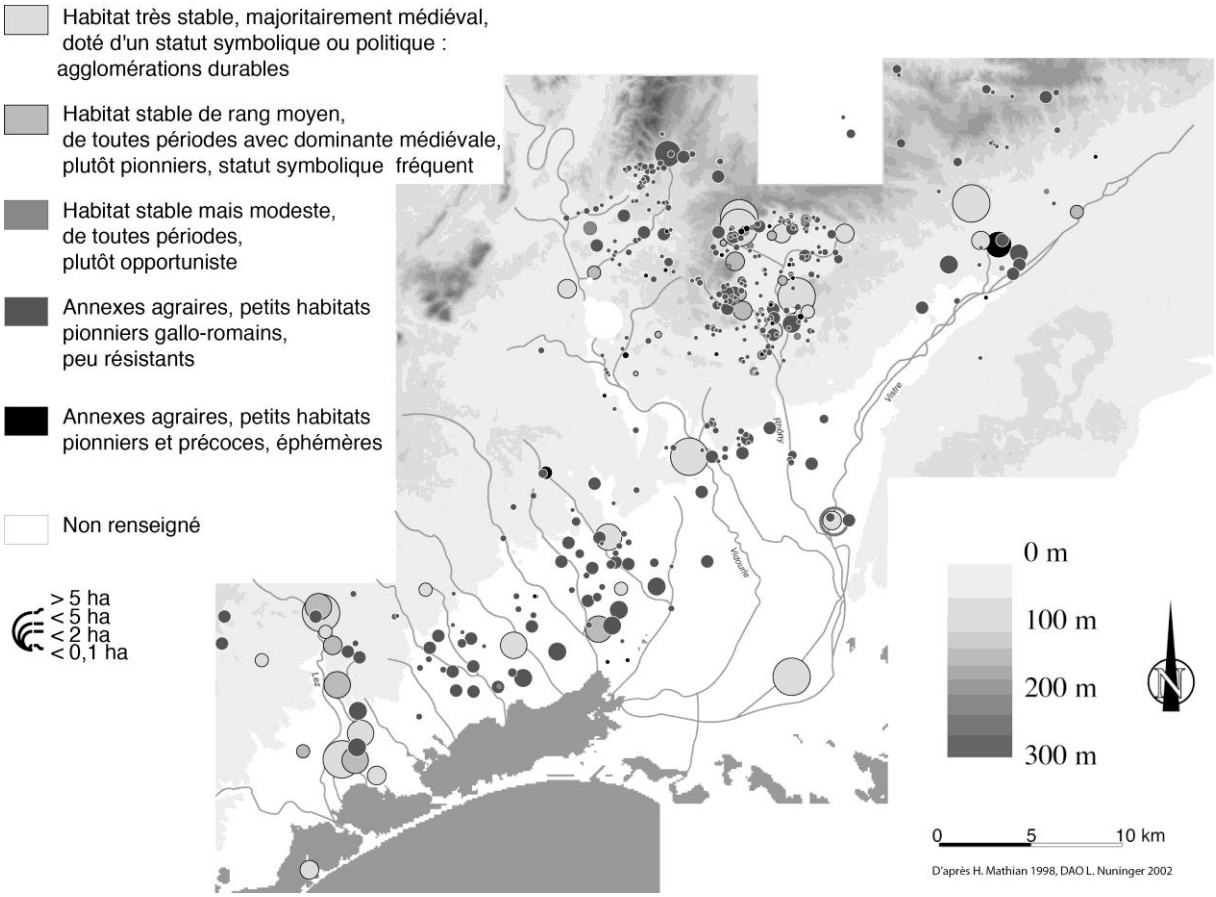


Fig. 1. Distribution spatiale des types d'établissements au I^er^ s. La carte, élaborée par H. Mathian, à partir des données archéologiques collectées en Languedoc oriental, localise les établissements étudiés, occupés au I^er^ s. ap. J.-C., et leur attribue la superficie maximale relevée à la fouille ou en prospection et la classe, en nuances de gris, qui les accueille dans l'analyse multivariée, laquelle tient compte de leurs éventuelles antériorité et postérité dans l'occupation

(*Archaeomedes*, *Des* oppida *aux métropoles*, 1998, p. 124, pl. 5 : conception H. Mathian ; DAO, L. Nuninger).

Du contexte aux interactions spatiales

Dès la seconde moitié des années 90, dans une nouvelle phase du programme Archaeomedes[11], le corpus des établissements est élargi dans l'espace géographique avec l'étude de nouvelles micro-régions de la basse et moyenne vallée du Rhône, mais surtout dans le temps long en intégrant des établissements de l'Âge du Fer et de la période médiévale. La base de données comprend désormais 2155 établissements et englobe la période allant de l'extrême fin de l'âge du Bronze à l'orée de l'époque moderne, de 800 av. J.-C. à 1600 (Favory *et al*. 1999). A l'aspect quantitatif s'ajoute un aspect qualitatif en particulier ce qui concerne l'environnement topographique nettement plus varié que dans la première phase du programme. L'élargissement a trois conséquences d'un point de vue informatique. La première correspond à la nécessité d'enregistrer les données dans un logiciel ad hoc pour les traiter sur le plan statistique, mais également pour contrôler la cohérence des saisies et limiter au maximum les erreurs d'enregistrement qui représentait initialement environ 20 % du corpus. Ce travail a été réalisé grâce à l'application ArchaeBase[12] qui permettait de produire automatiquement les bilans statistiques par variables uniques ou croisées deux à deux, ainsi que les fichiers texte brut et booléen interopérables avec l'application d'analyse des données (Excel, Anaconda) et les SIG (Grass et ArcInfo). La seconde révolution correspond au développement de scripts sous Grass par Ph. Verhagen (RAAP) pour calculer automatiquement certaines variables renseignées manuellement, uniquement pour la région du Languedoc oriental. Outre les variables concernant le rapport à la voirie (distance, nombre d'accès…), il s'agit notamment de la variable « legs du voisinage » qui vise à calculer le degré d'anthropisation de l'espace polarisé par les établissements en comptabilisant pour chacun, c'est-à-dire pour chaque implantation d'habitat en un lieu donné, la somme des durées d'occupation des établissements occupés avant sa création, dans un rayon de 500 m (Nuninger *et al*. 2012a ; Favory, Nuninger et Sanders 2012). Enfin, le dernier apport notable de l'informatique correspond au développement sous ArcInfo par F.-P. Tourneux (UNISFERE) d'un modèle d'analyse spatiale permettant de calculer des contextes topographiques statistiquement comparables d'une micro-région à une autre quel que soit le relief dominant de chacune des régions (Tourneux 2000) (fig. 2).

[11] Archaeomedes II (1996-1999) : «Policyrelevant models of the natural and anthropogenic dynamics of degradation and desertification and their spatio-temporal manifestations » (Program Environment of the European Commission DGXII), coordination Sander van der Leeuw (University of Cambridge)

[12] Issue du logiciel d'analyse des données Pragma développé par J.-J. Girardot et des scripts de contrôle automatiques en HyperCard élaborés par L. Nuninger et C. Masselot dans le cadre du Centre MTI@SHS/UMR 6049 ThéMA (ex. Laboratoire MIS).

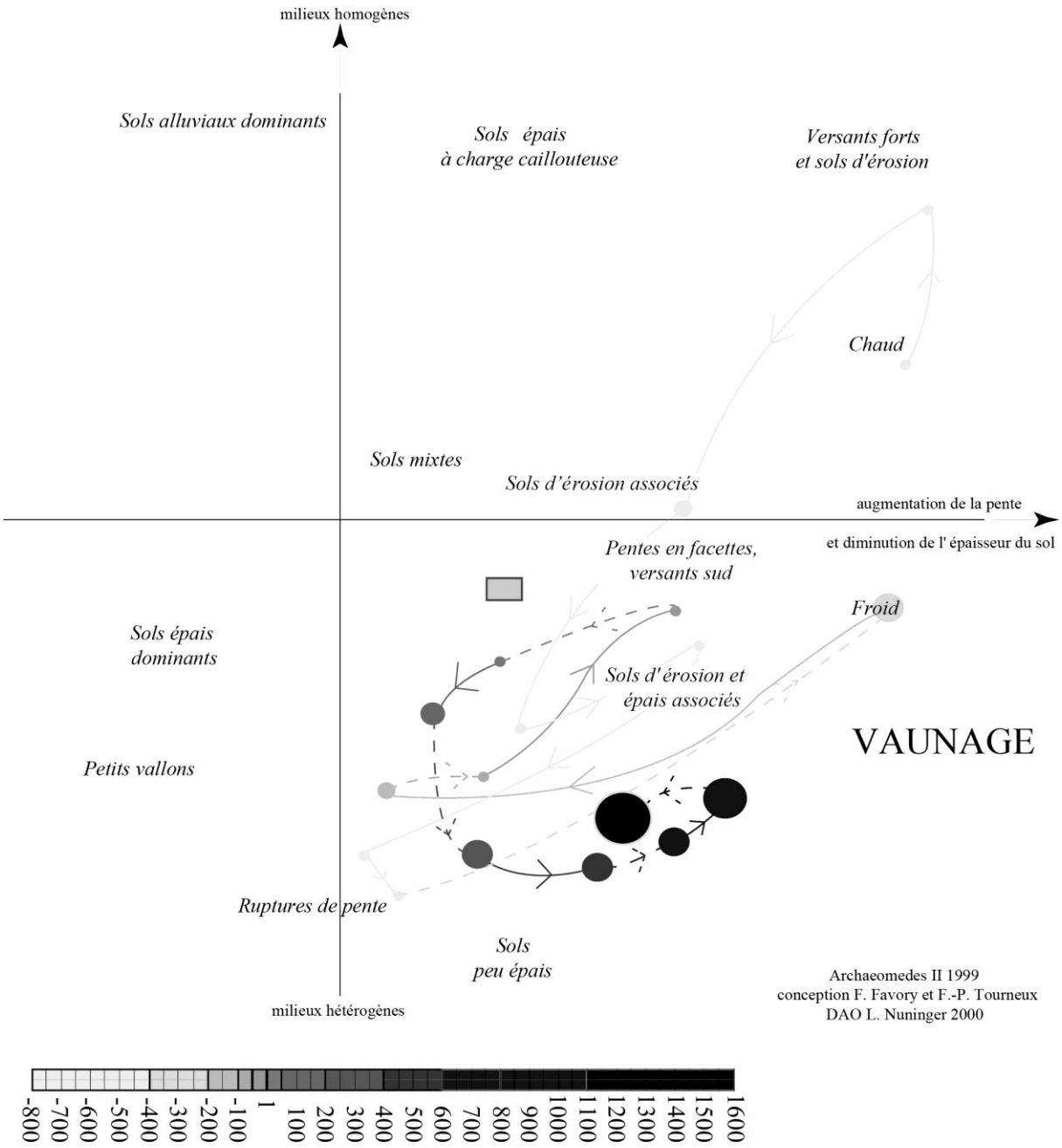


Fig. 2. Graphe d'analyse factorielle des correspondances (facteurs 1 et 2) réalisée par F. P. Tourneux et synthétisant la dynamique spatio-temporelle, de 800 av. J.-C. à 1600, de l'habitat en Vaunage (Gard), en rapport avec les ressources topographiques et pédologiques (Archaeomedes II, Besançon, 1999 : conception F. Favory et F.P. Tourneux ; DAO L. Nuninger 2000).

A l'issue de l'expérience Archaeomedes I, la rencontre entre les archéologues languedociens et les géographes statisticiennes de l'équipe PARIS, Lena Sanders et Hélène Mathian, va également permettre d'explorer une nouvelle piste en termes d'analyse spatiale en introduisant l'idée de niveau fonctionnel des établissements (Durand-Dastès *et al*. 1998). Cette notion modifie radicalement la manière d'appréhender les établissements dans l'espace et dans le temps en intégrant véritablement l'espace comme une des composantes actives, et non plus seulement descriptives, du système d'habitat étudié. En effet, dans Archaeomedes I, le niveau

hiérarchique des établissements est défini comme une valeur de type absolu et c'est la somme des critères dans un graphique qui va permettre de définir les changements du système de peuplement selon les choix d'implantation dans le paysage. Avec le niveau fonctionnel, les établissements ne sont plus caractérisés de façon indépendante, mais en relation les uns par rapport aux autres, et leur poids hiérarchique est fonction de leur distance aux autres établissements. Il n'y a donc plus de valeur hiérarchique absolue mais une valeur relative qui dépend du voisinage de chaque établissement. Le poids hiérarchique est calculé par une fonction mathématique à partir d'une méthode probabiliste qui introduit un effet décroissant du poids en fonction de la distance. La fonction de décroissance n'est pas linéaire (modèle de Huff) mais elle est également modélisée par une fonction de type puissance négative qui, selon son paramétrage, va faire décroître la valeur du poids hiérarchique plus ou moins rapidement au fur et à mesure de l'éloignement de l'établissement étudié. C'est ensuite le rapport de la valeur des poids respectifs de chaque établissement en fonction de la distance qui les sépare qui va permettre d'établir la valeur de leur relation en terme d'influence et de produire, par le calcul, des réseaux d'habitat, dans un espace euclidien dénué de relief. Le même modèle est donc ensuite réinvesti sur le cas languedocien pour la période de l'âge du Fer mais en intégrant dans la fonction des calculs de distance pondérés par la topographie ainsi que des calculs d'emprise visuelle, réalisés à l'aide d'un SIG - ArcGIS (Nuninger, Sanders *et al*. 2006 ; Nuninger 2002). Cette approche se singularise également par la prise en main des outils statistiques et SIG par l'archéologue lui-même qui doit inventer ses propres protocoles d'ajustement et de validation des modèles sans dialogue spécifique avec un expert extérieur.

C'est dans cette mouvance que le modèle d'analyse des contextes, le critère « Legs du voisinage » et l'approche fonctionnelle sont réutilisés comme des briques fondatrices dans un programme ultérieur IHAPMA[13] qui visait à introduire le facteur humain dans les modèles prédictifs archéologiques développés à l'aide des SIG. Le nouveau modèle co-construit par les archéologues et les spécialistes du SIG[14] permet d'estimer statistiquement le rôle des facteurs qui influent dans les choix d'implantation des communautés agro-pastorales d'une période d'un siècle à une autre (Nuninger *et al.* 2012b). Le critère « Legs du voisinage » a été transformé en variable spatiale appelée « héritage ». Il s'agit d'une carte au format raster où chaque cellule de l'espace étudié, et pas uniquement le voisinage des établissements, est renseigné par une valeur de leg à partir de la distribution des établissements à un moment donné. La valeur de l'héritage est pondérée par la distance spatiale entre les établissements et la distance temporelle qui sépare une occupation de la période considérée pour le calcul. Cette opération nécessite la répétition systématique d'un calcul compliqué et le cumul des valeurs obtenues pour chaque point de l'espace étudié, c'est-à-dire sur des milliers de cellules (Nuninger *et al*. 2016). Tous les facteurs sociaux-environnementaux ainsi calculés pour chaque cellule d'un espace donné contribuent à définir le profil descriptif de chaque cellule. Il est ainsi possible de réaliser une classification de toutes les cellules de plusieurs micro-régions et d'établir des classes de contextes comparables d'une micro-région à une autre, pour ensuite analyser statistiquement leur potentiel attractif, ou non, selon les périodes.
Cette approche, impossible sans les capacités de calcul informatique, permet de réintroduire de la dynamique temporelle dans les variables mobilisées, et de ne plus focaliser sur les seuls espaces effectivement occupés, mais d'embrasser l'ensemble des régions étudiées, y compris

[13] Introducing the human (f)actor in predictive modelling for archaeology, PHC Van Gogh, MAE – FRNL, 2010-2011, coordination Ph. Verhagen, L. Nuninger.

[14] Ph. Verhagen, L. Nuninger, F.-P. Tourneux, F. Bertoncello, rejoints ensuite par A. Castrorao-Barba et A. Nüsslein et E. Martinet.

les zones marginales ou totalement délaissées qui contribuent à notre compréhension des modes d'occupation du sol et d'organisation des systèmes de peuplement.

Des vestiges archéologiques qualifiés par l'espace à l'espace qualifié par l'archéologie

L'expérience précédente s'appuie sur les développements du programme Archaeomedes mais également sur le renversement épistémologique opéré quelque temps avant dans le cadre du programme Archaedyn[15]. En effet, par rapport aux analyses centrées sur les établissements développées dans Archaeomedes pour comprendre les modalités d'implantation des populations passées en fonction d'un environnement donné, le collectif Archaedyn s'interroge sur les facteurs qui contribuent à produire un environnement dynamique ou non en fonction des modalités d'occupation du sol. Il s'agissait de répondre à trois grandes questions : quels sont les espaces occupés de façon permanente ? Quels espaces ont été conquis puis abandonnés ? Quels espaces ont été utilisés régulièrement mais jamais durablement ?
Pour tenter d'y répondre, les archéologues ont reconsidéré l'espace, non pas comme un attribut permettant de décrire le contexte ou la répartition spatiale des établissements, mais comme l'objet même de leur étude décrit par des attributs archéologiques. S'inspirant des travaux précédents et des méthodes de traitement d'images satellitaires, une même cellule étant caractérisée par plusieurs informations selon les canaux considérés, L. Nuninger a suggéré de pousser l'analyse en caractérisant chaque portion d'espace, soit chaque cellule d'un espace numérique raster, par un ensemble d'attributs topographiques, pédologiques et archéologiques. Un premier travail a consisté pour le collectif à définir le maillage pertinent, c'est-à-dire la taille des cellules, pour mener à bien des analyses permettant de produire trois types d'indicateurs : d'occupation ou d'abandon, de concentration ou de dispersion et de stabilité ou d'instabilité. Néanmoins la variété des échelles considérées, de la localité à l'échelle pan-européenne des échanges en passant par celles des régions et des micro-régions, a nécessité le développement d'une méthode pour produire un canevas de référence emboîtant plusieurs grilles d'analyse spatiale avec des cellules d'une résolution de 1 m à 250 km. La résolution a été adaptée à chaque jeu de données en fonction d'une règle mathématique permettant de sélectionner la résolution optimale. Ainsi, même s'ils étaient produits à partir de différents type de données archéologiques (artefacts, objets, dépôts, établissements…), les indicateurs pouvaient être combinés à l'aide d'un SIG de manière à analyser la dynamique des espaces dans la très longue durée du Néolithique au Moyen Âge (fig. 3).
Le renversement épistémologique opéré dans Archaedyn a permis l'utilisation de nouvelles techniques de statistiques spatiales et a nécessité une transposition des modèles d'analyse spatiale développés précédemment. Dans cette phase de la recherche, ce sont les archéologues qui ont été les principaux acteurs de l'innovation méthodologique et technique en réalisant l'ensemble des analyses spatiales à l'aide du SIG, en intégrant des méthodes de télédétection (Fovet 2010) et en contribuant largement au développement d'outils sous la forme de scripts informatiques ou de modules dédiés, repris et parfois améliorés dans des travaux universitaires (Nüsslein 2016 ; Nüsslein, Nuninger, Verhagen sous presse). Parmi les outils notables développés dans le projet sous la direction de L. Saligny, on peut signaler le module de calcul des « cartes de confiance » dont l'objectif est d'éliminer des jeux de données soumis à l'analyse spatiale les zones où l'on ne dispose que d'une information spatiale et lacunaire

[15] ArchaeDyn I (2005-2007) : «Dynamique spatiale du peuplement et ressources naturelles : vers une analyse intégrée dans le long terme, de la Préhistoire au Moyen Âge» (Action concertée incitative – ACI Espaces et Territoires, contrat ET28)

(Saligny *et al.* 2011 ; Rodier dir. 2011). Cet outil a été intégré dans la Boîte à Outils Archéologique (BOA) développée par la plateforme GeoBFC - MSH de Dijon sous la forme d'un module logiciel intégrable à un SIG (ArcGIS).

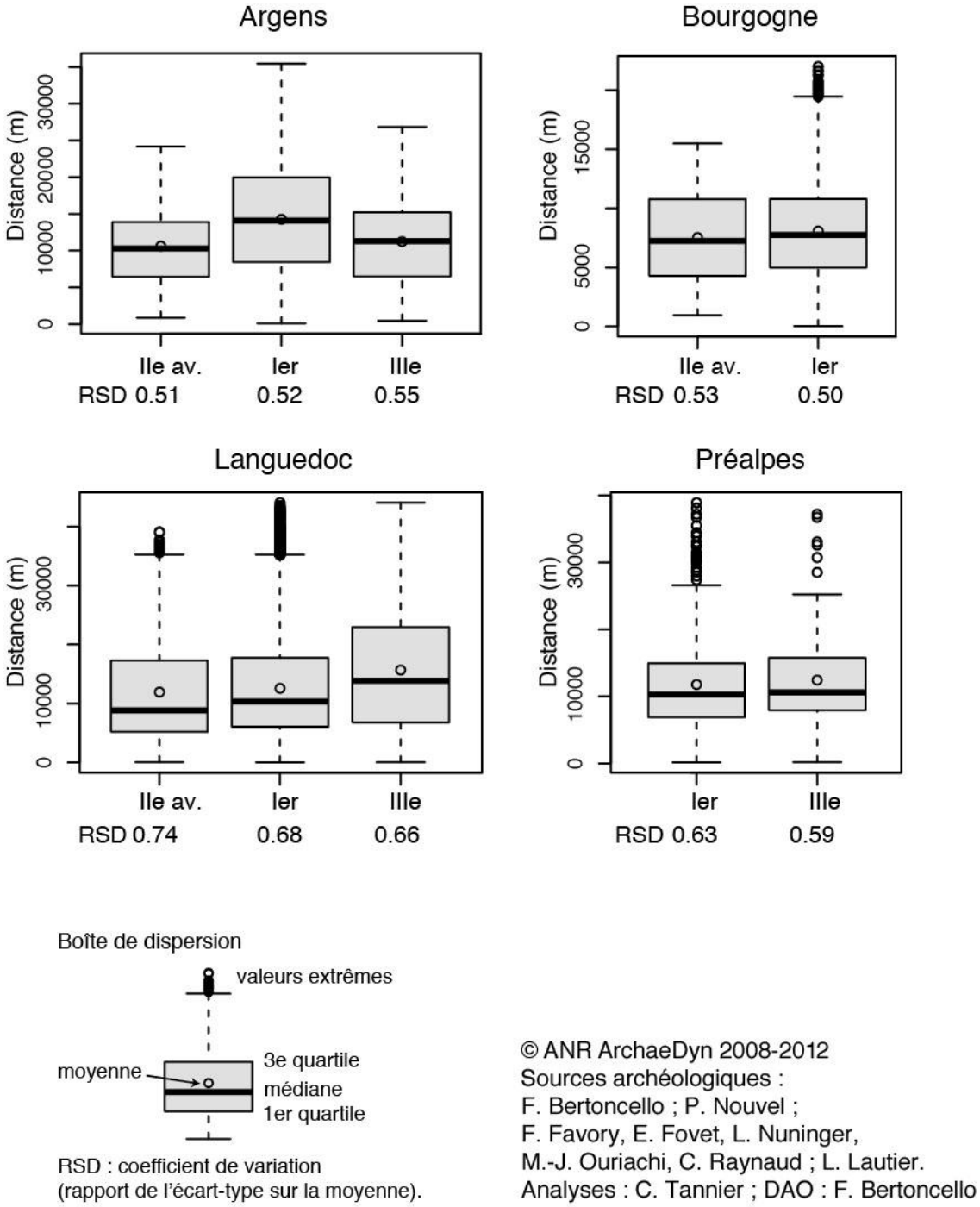


Fig. 3. Dispersion statistique des distances entre tous les établissements des II^{ème} s. av. J.-C. I^{er} et III^{ème} s. dans quatre micro-régions étudiées dans le programme Archaedyn et situées dans la vallée de l'Argens, en Bourgogne, en Languedoc oriental et dans les Pré-Alpes de Grasses. Légende explicative. Outre la valeur de la distance moyenne qui sépare les établissements au sein de chaque micro-région, les boîtes de dispersion indiquent la valeur médiane mais également les valeurs de

distance extrêmes. Ce graphique permet de comparer les micro-régions pour une même période. Au I^er^ s. par exemple, les établissements de la micro-région bourguignonne apparaissent ainsi beaucoup moins dispersés (environ 8 km) que dans les trois autres micro-régions (entre 11 et 14 km environ). Ce graphique permet aussi d'évaluer la signification de la moyenne grâce au coefficient de variation RSD. Plus le coefficient est faible, plus la moyenne est significative pour l'ensemble des établissements avec une dispersion assez homogène (en Bourgogne par exemple). Plus le RSD est élevé plus les distances entre les sites sont hétérogènes (en Languedoc par exemple, la moitié des établissements sont distants de moins de 10 km, mais la moyenne est légèrement supérieure à 10 km car plusieurs établissements présentent des valeurs de distance extrêmement plus élevées, 35 km et plus).

LiDAR : les paysages se révèlent

Dans les programmes précédents, l'étude du peuplement est toujours couplée à celle du paysage. Néanmoins, les modèles topographiques utilisés dans les SIG (MNT) sont définis par l'environnement actuel ce qui pose des problèmes dans certaines zones comme la plaine de Mauguio en Languedoc qui est devenue uniformément plane suite aux aménagements modernes. Aussi dans le cadre du Laboratoire Européen Associé ModeLTER[16], K. Ostir a produit un nouveau MNT à partir de données radar. L'objectif était de détecter des micro-reliefs résiduels et de tester leur relation spatiale aux sites archéologiques de plusieurs périodes afin de produire un paléo-MNT pour analyser le système de peuplement dans une environnement topographique plus proche de la réalité historique (Nuninger, Ostir 2005 et Ostir, Nuninger 2006). Les premiers résultats étaient prometteurs mais manquaient de précision, c'est pourquoi il a été décidé, dès 2006, d'acquérir des données par lasergrammétrie aéroportée (LiDAR) afin de travailler à partir de données beaucoup plus précises, dans le cadre du projet LidOr (ATIP CNRS, Nuninger *et al*. 2008).
Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technique de télédétection[17] utilisée en archéologie depuis le début des années 2000.
L'archéologie a été pionnière dans l'intégration du LiDAR pour l'étude de paysages. Les tous premiers projets ont été développés au Royaume-Uni (relevés LiDAR en 1998 : Holden 2001, Motkin 2001) et en Guyane (relevé en 2001 : Mestre *et al.* 2008). Le LiDAR est un outil particulièrement efficace pour étudier l'occupation et l'usage passés des sols dans nos forêts actuelles, approche encore inenvisageable il y a à peine vingt ans. En forêt, la végétation forme un écran qui empêche tout autant l'exploitation de clichés aériens que les prospections à vue sur le terrain.
Cette technologie, répartie en trois grandes familles (LiDAR atmosphérique, topographique et bathymétrique), produit des relevés d'espaces physiques avec un rayon laser. Elle est utilisée dans des disciplines et domaines très divers : recherche, aménagement du territoire, domaine militaire, sciences physiques, environnementales, géographie, et archéologie. Le LiDAR atmosphérique étudie les corps gazeux (nuages, etc.), le LiDAR topographique, terrestre ou aéroporté, documente la géométrie de corps solides aériens (végétation, édifices, terrains) et le LiDAR bathymétrique celle de surfaces immergées (lits de cours d'eau, lacs, bords de mer). Le LiDAR topographique, utilisé en archéologie, produit un relevé géométrique du paysage à l'aide d'un faisceau laser mobile émis à très haute fréquence. L'équipement est disposé dans un engin volant (LiDAR aéroporté, fig. 4) ou sur un support au sol (LiDAR terrestre). Il

[16] Des fiches relatives à ces actions sont consultables sur le site internet de la MSHE C.N. Ledoux : https://mshe.univ-fcomte.fr/poles-de-recherche

[17] La télédétection désigne l'ensemble des techniques qui captent et enregistrent l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par un corps solide, liquide ou gazeux (globe terrestre, sous-sol, atmosphère, corps humain, etc.), pour obtenir de l'information sur ce corps sans contact direct avec lui. La photographie, la radiographie, le sonar, par exemple, sont des techniques de télédétection.

génère le faisceau laser et enregistre le signal qui lui est retourné, par la réflexion de l'onde lumineuse sur les obstacles rencontrés sur sa trajectoire. Cette technique permet *in fine* de restituer la géométrie précise des surfaces des obstacles rencontrés (végétation, constructions, sol), sous la forme de millions de points géolocalisés.

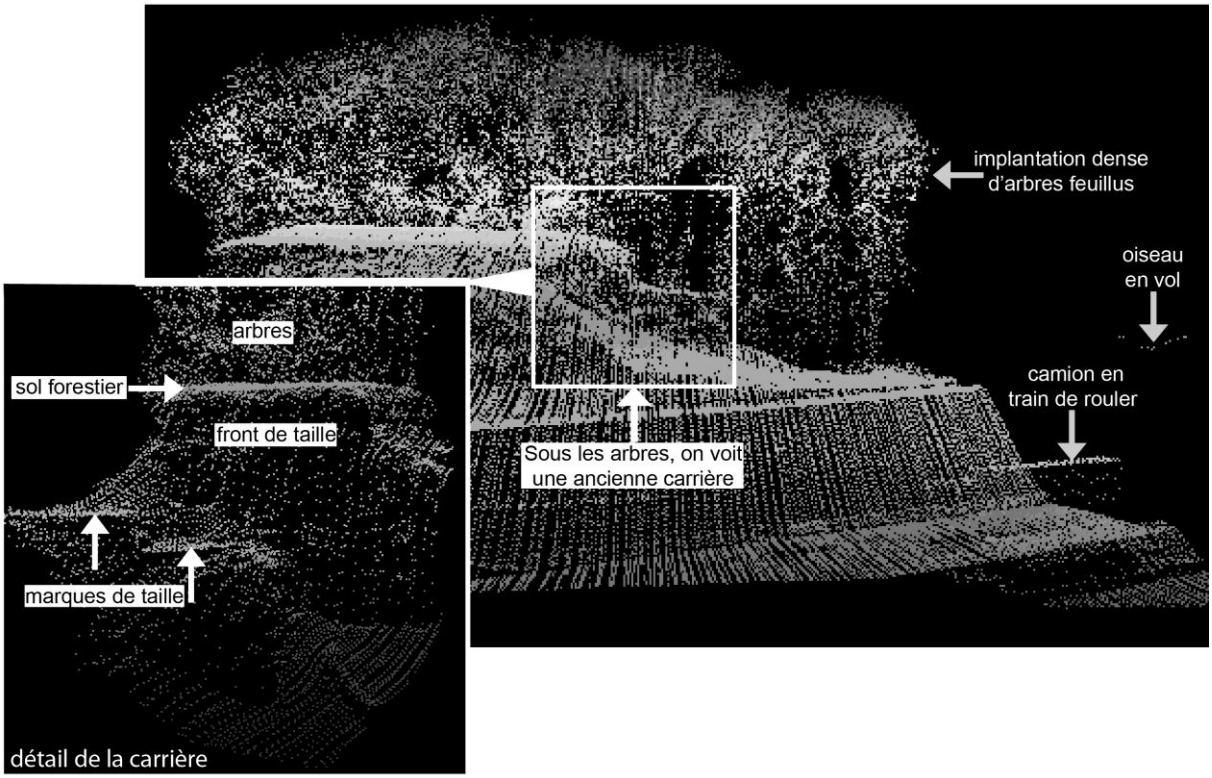


Fig. 4. Aperçu d'un nuage de points obtenu par LiDAR aéroporté, montrant une ancienne carrière médiévale ou moderne, aujourd'hui sous forêt, et actuellement bordée par une grande voie de circulation (Besançon, quartier des Quatrouillots : C. Fruchart 2019, données LiDAR MSHE C.N. Ledoux 2009, Besançon).

Après le relevé, des traitements informatiques opérés à l'aide de logiciels spécialisés permettent de trier les millions de points obtenus et de les séparer par type d'entités paysagères : sol, végétation, constructions, etc. On peut ensuite étudier isolément les éléments du paysage et, notamment, la topographie détaillée de la surface du sol en faisant virtuellement abstraction de la végétation (fig. 5) (Leroy, Nuninger, Opitz 2014) .

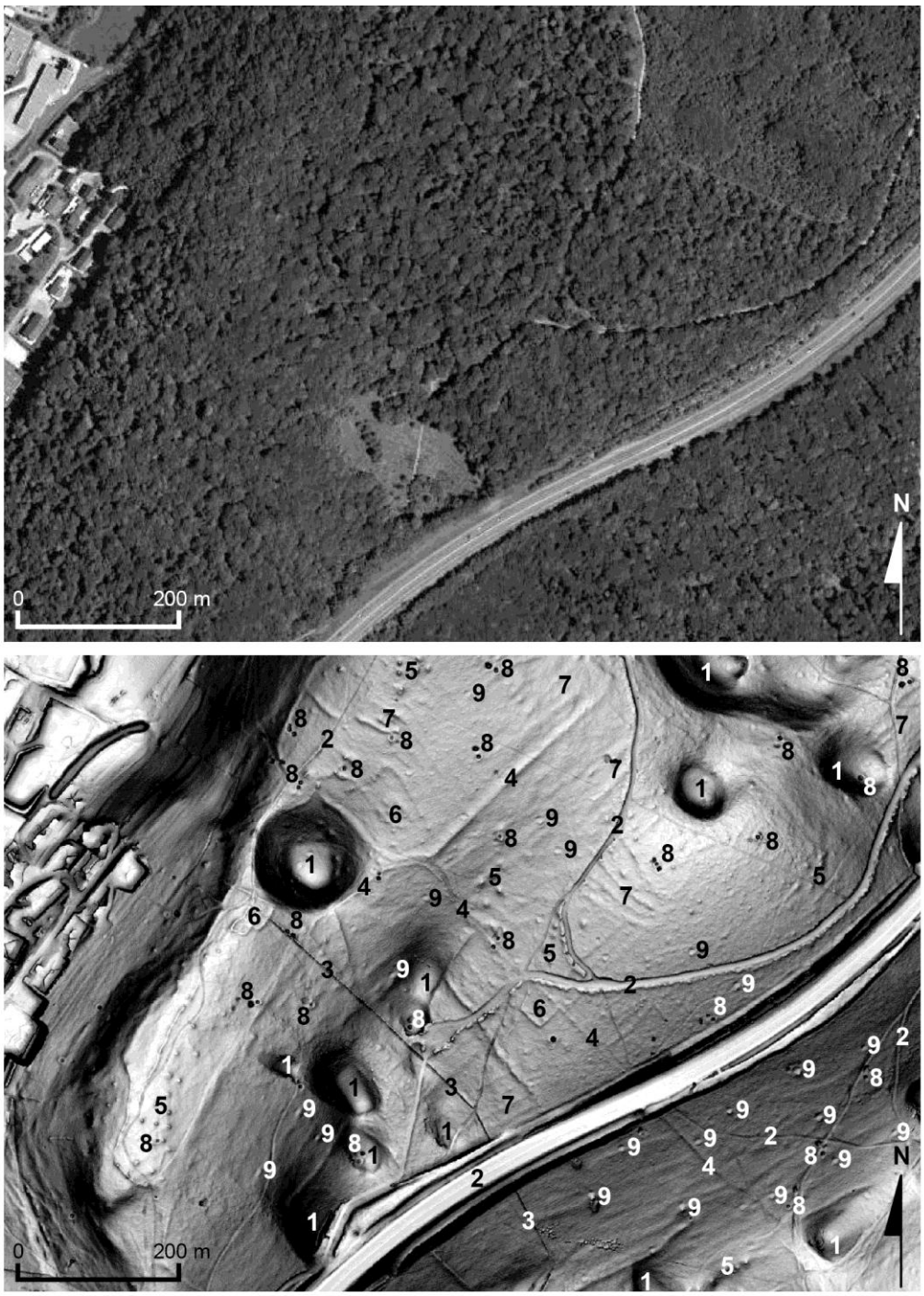
C'est principalement la possibilité de supprimer le couvert végétal pour analyser le peuplement et les paysages dans un espace a priori continu, qui a motivé le développement du programme « LIEPPEC[18] » dès 2008, puis la spécialisation de l'équipe dans le traitement des données numériques LiDAR grâce à de nouveaux moyens logiciels (LP360, CloudCompare, TerraScan…) et à l'expertise de R. Opitz, accueillie en post-doctorat à la MSHE. La richesse des données découvertes sous couvert forestier avec cette nouvelle technologie, déjà appréhendée de façon pionnière dans la forêt de Haye (Georges-Leroy *et al*. 2011) a motivé des recherches spécifiques sur le milieu forestier actuel, à l'occasion de la thèse de C.

[18] Lidar pour l'Etude des Paysages Passés et Contemporains, coordination Laure Nuninger (MSHE C.N. Ledoux, AAP2008 Région Franche-Comté).

Fruchart « Anthropisation d'un milieu forestier : la forêt de Chailluz », et un programme interdisciplinaire « ODIT / Construction Historique des Espaces Forestiers »[19] (Opitz *et al.* 2012 ; Fruchart 2014 ; Nuninger *et al.* 2015 et 2016, entre autres).

Avant l'usage du LiDAR, on connaissait mal le passé archéologique de nos territoires forestiers, qui occupent pourtant un tiers du sol métropolitain. Grâce à cette technique, on y découvre maintenant de nombreux aménagements anciens, bien conservés, comme figés dans leur état d'abandon, parfois survenu il y a plusieurs millénaires. Les sols de nos forêts préservent bien les structures archéologiques car ils échappent aux labours répétés qui détruisent les vestiges en zones cultivées.
A l'instar du phénomène survenu dans les années 1970 avec l'introduction en archéologie de la photographie aérienne, le LiDAR provoque aujourd'hui un saut quantitatif des découvertes archéologiques : les structures révélées avec cette technologie se comptent par milliers. Les vestiges détectés sont d'autant plus nombreux que les relevés couvrent de vastes surfaces, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres carrés d'un seul tenant, en documentant la topographie avec une totale continuité spatiale et une résolution très détaillée. Cette nouvelle approche documentaire de l'occupation du sol a induit un contexte d'analyse encore inédit en archéologie. L'information exploitable est passée d'une dimension généralement locale, construite à l'échelle du site archéologique à partir d'observations ponctuelles et discontinues, à une information extensive et intensive, produite continûment sur de vastes espaces. Ces changements d'échelle et de qualité documentaires transforment les perspectives archéologiques d'analyse de l'espace géographique et de ses occupations anciennes, ainsi que celles de l'accès à la connaissance de l'héritage paysager ou patrimonial qui nous est parvenu.
L'usage du LiDAR a permis la découverte et l'étude d'anciennes voies de circulation par centaines, pouvant former des réseaux viaires d'une complexité insoupçonnée.
Ces découvertes ont questionné les travaux de modélisation spatiale et de développement d'algorithmes développés par l'équipe sur les chemins optimaux (Fovet 2010 ; Zaksek *et al*. 2008, Fovet et Zaksek 2011 ; Verhagen *et al.* 2019) et une nouvelle étape de travail interdisciplinaire mobilisant une approche par ontologies est en cours de développement dans le programme Movescape[20].
Le LiDAR a aussi mis en évidence des milliers de structures associées à l'exploitation de matières premières : bois, tourbe, matières minérales, eau. Il a révélé des centaines de kilomètres carrés d'anciens systèmes agro-sylvo-pastoraux et, aussi, les nombreux vestiges d'aménagements militaires modernes et contemporains (tranchées, fortifications, etc.) ou, encore, des vestiges d'habitats et édifices divers de toutes périodes depuis le Néolithique. Des zones d'exploitation de minerais qui s'étendent sur des kilomètres ont été documentées, depuis les âges des métaux jusqu'à la période contemporaine : mines d'étain protohistorique autour d'Autun, par exemple (Cauuet, Boussicault 2014), ou mines d'or antiques en Espagne (Fernandez-Lozano *et al*. 2015). Au-delà des seules structures d'extraction, l'ensemble des exploitations est observable et on identifie des complexes miniers d'une ampleur difficilement mesurable avant. Dans un autre cadre, la mise en évidence et la cartographie de milliers de microstructures de production de charbon de bois, très fréquentes dans nos forêts, ont relancé des programmes d'étude sur la production passée de charbon de bois. Au-delà de recherches sur la production ancienne en bois-énergie, ce sont tous les usages passés du bois (multifonctionnalité ancienne des forêts) qui bénéficient de perspectives inédites d'analyse.

[19] Observatoire des Dynamiques Industrielles et Territoriales, resp. Jean-Claude Daumas, Chantier 4 Construction Historique des Espaces Forestiers, coord. Laure Nuninger (MSHE C.N. Ledoux, Feder UE).
[20] PICS CNRS Movescape, coord. L. Nuninger, Ph. Verhagen (CNRS, VU Amsterdam, ZRC SAZU), porté par l'UMR 6249 Chrono-Environnement CNRS-université de FRanche-Comté.



1 : dépressions naturelles se formant sur des terrains calcaires karstiques (dolines)
2 : autoroute, routes et chemins forestiers actuels
3 : fossé délimitant deux propriétés forestières. Le bornage des propriétés date du XIV^{e} s. et le fossé du XV^{e} s.
4 : anciennes voies de circulation datées de la période romaine par des prospections archéologiques
5 : zones où des tertres d'épierrement signalent un ancien usage agro-pastoral. L'ensemble de l'espace représenté sur cette figure est boisé sans interruption depuis la fin du Moyen Âge *a minima*.
6 : vestiges de constructions d'époque romaine délimitées par des enclos polygonaux en pierres sèches
7 : zones où le terrain a été aménagé pour former des séries de petites terrasses (ancien usage agro-pastoral)
8 : anciens fours à chaux (époque moderne à contemporaine)
9 : anciennes places à charbon (époque moderne à contemporaine)

Fig. 5. Aperçu de la quantité et de la distribution des structures archéologiques et naturelles remarquables situées sous forêt, et révélées par l'analyse de données LiDAR (forêt de Chailluz

et Bois de la Lave, Besançon et Châtillon-le-Duc : C. Fruchart 2019, données LiDAR MSHE C.N. Ledoux 2009, Besançon).

Là encore, le LiDAR ouvre un champ d'investigation renouvelé sur la diversité des usages passés du bois et de ses dérivés (Deforce *et al*. 2013 ; Dupin *et al.* 2017 ; Raab *et al.* 2019, entre autres). Il en va de même pour les vestiges d'aménagements agro-pastoraux : outre la découverte supplémentaire et abondante de structures qui sont déjà connues, car elles sont régulièrement identifiées depuis plusieurs décennies par les prospections et les fouilles (terrasses, fossés et buttes délimitant des parcelles, etc.), les données LiDAR permettent la détection fine de traces ténues laissées par des pratiques agropastorales anciennes. L'étude des pratiques qui ont entraîné la formation de crêtes de labours, de rideaux de culture, ou de billons-sillons, suscitent un regain d'intérêt, en particulier lorsqu'ils sont aujourd'hui sous forêt, car ils y sont souvent bien conservés (Georges-Leroy *et al*. 2014 ; Favory et Fruchart 2018 ; Favory *et al*. 2017).
Les informations collectées grâce au LiDAR apportent un éclairage neuf à des données et champs d'investigation déjà connus par des fouilles, des textes antiques, ou des archives historiques, mais qui restaient encore peu exploités, faute d'éléments tangibles sur lesquels s'appuyer pour développer les recherches. L'étude de pratiques cynégétiques dans des forêts modernes, par exemple, prend une toute autre dimension lorsqu'on peut associer des structures bien réelles, détectées et localisées par LiDAR, à celles évoquées par des archives historiques (Crozet *et al*. 2017). Plus largement, en conjuguant les informations produites par le LiDAR avec celles de l'imagerie à haute résolution et celles obtenues par les fouilles archéologiques, nous sommes aujourd'hui en mesure de renouveler notre point de vue sur les espaces exploités par les sociétés passées. Nous disposons de leviers capables d'apporter une connaissance plus globale et plus large des territoires passés, peut-être en mesure de nous donner une vision plus riche et nuancée des dynamiques qui modèlent l'évolution de nos sociétés et de nos paysages au fil des siècles.

Conclusion

Le parcours des archéologues du laboratoire Chrono-Écologie, puis Chrono-Environnement, de Besançon, et de leurs partenaires français et étrangers, est particulièrement éclairant sur les transformations apportées à leur pratique scientifique par le recours aux outils informatiques et aux méthodes analytiques développées et appliquées avec ces outils. L'informatique a révolutionné la saisie des données, leur stockage raisonné, leur correction, leur protection et leur durabilité – en prenant les précautions nécessaires –, leur traitement par des logiciels appropriés, leur représentation cartographique : exploitation statistique, croisement des données archéologiques géoréférencées avec des données environnementales, physiques et biologiques, croisement des cartes de répartition des artefacts et des établissements avec des plans parcellaires et des cartes anciennes, et avec des données historiques spatialisées. Ce que l'informatique a apporté à la démarche scientifique de l'archéologie, c'est, comme dans les autres disciplines des sciences humaines et sociales, une contribution qui transcende les compétences cérébrales humaines individuelles, réalise des opérations jusqu'alors impossibles, comme les analyses multivariées appliquées à de grands effectifs d'individus décrits par une multiplicité de variables. En outre, au delà des aspects quantitatifs et techniques associés au traitement des données, l'informatique a nettement favorisé la mobilité conceptuelle des chercheurs dans leur manière d'appréhender les objets archéologiques et les questionnements sur la dynamique des territoires et des paysages. Enfin, elle permet et stimule les pratiques collectives et interdisciplinaires sur des mêmes objets et élargit, grâce à l'internet, les possibilités de mobiliser les acteurs d'un intellectuel collectif.

Bibliographie

Archeologia E Calcolatori (1990, Istituto di Studi sulle Civiltà Italiche e del Mediterraneo Antico, Conseil national de la Recherche italien).

BERNARD, Sylvain, *Anaconda, une solution d'analyse de données. Sous la direction de Cyril Masselot et Jean-Jacques Girardot et la tutelle de Nicolas Janey*, Rapport de stage, Besançon, Licence Professionnelle « Système informatique et logiciel », Université de Franche-Comté, 2010, https://docplayer.fr/13116179-Anaconda-une-solution-d-analyse-de-donnees.html.

BERTIN, Jacques, « Graphique et mathématique: généralisation du traitement graphique de l'information », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, vol. 24, Cambridge University Press, 1969, p. 70‑ 101.

CARTER, Alison K. *et al.*, « Temple occupation and the tempo of collapse at Angkor Wat, Cambodia », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 3 juin 2019, p. 201821879, http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1821879116, consulté le 12 juin 2019.

CAUUET, Béatrice et BOUSSICAULT, Matthieu, « Apport du Lidar à l'étude des mines d'étain antiques en dépôts secondaires autour d'Autun », *Actes de la journée du 18 avril 2014*, Autun, Service Archéologique de la Ville, 18 avril 2014, p. 31‑ 33.

CHARRAUT, Daniel, CHOUQUER, Gérard et FAVORY, François, « Photographie aérienne: traitement numérique de l'image. Rythmes et mesures des parcellaires antiques et médiévaux », *Archeologia*, n° 307, 1994, p. 24‑ 32.

CHARRAUT, Daniel et FAVORY, François, « Mise au point d'un logiciel de traitement d'image : recherche sur les parcellaires fossiles et leur métrologie », *AGER*, n° 4, 1994, p. 28‑ 29.

CHARRAUT, Daniel, FAVORY, François et RAYNAUD, Claude, « Paysages rythmés: recherche sur l'empreinte des mesures antiques dans le parcellaire agraire languedocien », *Mappemonde*, vol. 3, n° 92, 1992, p. 28‑ 33.

CROZET, Aude, LAPLAIGE, Clément et RODIER, Xavier, « A Multidisciplinary Approach to the Long-Term Production of Landscapes in the Forests of Blois, Russy, Boulogne and Chambord (Loir-et-Cher) », *Projets de paysage : revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace*, 2017, https://www.projetsdepaysage.fr/une_approche_multidisciplinaire_de_la_fabrique_des_paysages_dans_la_longue_dur_e_dans_les_for_ts_de_blois_russy_boulogne_et_chambord_loir_et_cher_, consulté le 17 mai 2019.

DEFORCE, Koen *et al.*, « Selective woodland exploitation for charcoal production. A detailed analysis of charcoal kiln remains (ca. 1300–1900 AD) from Zoersel (northern Belgium) », *Journal of Archaeological Science*, vol. 40, n° 1, 1er janvier 2013, p. 681‑ 689, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440312003275, consulté le 17 mai 2019.

DJINDJIAN, François, *Méthodes pour l'archéologie*, Colin, 1991.

DJINDJIAN, François, « Contributions de l'Analyse des Données à l'étude de l'outillage de pierre taillée », *Mémoire de Maîtrise, Université de Paris*, vol. 1, 1976, p. 1976.

DUPIN, Aurore *et al.*, « Anthracology of charcoal kilns in the forest of Chailluz (France) as a tool to understand Franche-Comte forestry from the mid-15th to the early 20th century AD », *Quaternary International*, vol. 458, Anthracology: Local to Global Significance of Charcoal Science Part II, 15 novembre 2017, p. 200‑ 213, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040618216307649, consulté le 17 mai 2019.

DURAND-DASTÈS, François *et al.*, « Archaeomedes: Des oppida aux métropoles », *Anthropos: Paris*, coll. « Villes », 1998, p. 277.

FAVORY, François, « Organisation et hiérarchisation de l'habitat antique: l'expérience d'Archaeomedes et d'ArchaeDyn », *Archimède: archéologie et histoire ancienne*, n° 4, (Communication au séminaire DyHA « Dynamiques Humaines Anciennes », 18 octobre 2015, MISHA Strasbourg), 2016, p. 207‑ 215.

FAVORY, François, « La télédétection satellitale appliquée à l'archéologie. En guise d'introduction au dossier », *Nouvelles de l'Archéologie*, n° 74, 1998, p. 5‑ 10.

FAVORY, François, « Occupation des sols en Narbonnaise: présentation d'une pratique collective », *Archéologie en Languedoc*, n° 2‑ 3, (Actes des Journées d'étude sur les Méthodes de prospection, Fédération Archéologique de l'Hérault —Loupian, 19-20 novembre 1988), 1989, p. 29‑ 35.

FAVORY, François *et al.*, « Le Finage dolois », dans REDDÉ, Michel, dir., *Gallia Rustica 1. Les campagnes du nord-est de la Gaule, de la fin de l'Âge du Fer à l'Antiquité tardive*, vol. 49, Bordeaux, Ausonius, Mémoires, 2017, p. 817‑ 867.

FAVORY, François et FICHES, Jean-Luc, *Les Campagnes de la France méditerranéenne dans l'Antiquité et le haut Moyen Âge: études microrégionales*, Ed. de la Maison des sciences de l'homme, 1994.

FAVORY, François, FICHES, Jean-Luc et GIRARDOT, Jean-Jacques, « L'analyse des données appliquée à la typologie des sites gallo-romains dans le Beaucairois (Gard): matériel de prospection et environnement paysager. Essai méthodologique », *Gallia*, 1987, p. 67‑ 85.

FAVORY, François et FRUCHART, Catherine, « Les systèmes parcellaires tardo-laténiens et gallo-romains », dans REDDÉ, Michel, dir., *Gallia Rustica. 2, Les campagnes du Nord-Est de la Gaule, de la fin de l'âge du fer à l'antiquité tardive*, Bordeaux, France, Ausonius éditions, Mémoires, 2018, p. 401‑ 451.

FAVORY, François et GIRARDOT, Jean-Jacques, « "Archaeomedes" : l'archéologie agraire au service de la politique communautaire contre l'aridification », *AGER*, n° 4, 1994, p. 12‑ 18.

FAVORY, François *et al.*, « Archaeomedes : une étude de la dynamique de l'habitat rural en France méridionale, dans la longue durée (800 av. J.-C.-1600 ap. J.-C.) », *AGER*, n° 9, 1999, p. 15‑ 35, http://ager.hypotheses.org/463, consulté le 1er mai 2016.

FAVORY, François *et al.*, « L'habitat gallo-romain autour de l'étang de l'Or (Hérault). Hiérarchie, dynamique et réseaux du iie s. av. au ve s. ap. J.-C », *Collection de l'Institut des Sciences et Techniques de l'Antiquité*, vol. 499, n° 1, 1994b, p. 123‑ 215.

FAVORY, François et LEEUW, Sander Ernst van der, dir., *Voyage dans l'archéologie spatiale anglo-saxonne*, PUFC-Presses Uni Franche Comté, Les Cahiers de la MSHE C.N. Ledoux, 2016, 203 p.

FAVORY, François, NUNINGER, Laure et SANDERS, Lena, « Intégration de concepts de géographie et d'archéologie spatiale pour l'étude des systèmes de peuplement », *L'Espace géographique*, n° 4, 2012, p. 295‑ 309.

FAVORY, François *et al.*, « Lunel-Viel et son territoire. Notice des sites. Index toponymique de la commune de Lunel-Viel et de ses abords », *Documents d'archéologie française*, n° 42, 1994a, p. 163‑ 245.

FAVORY, François et POUPET, Pierre, *Traitement d'images satellitaires et archeologie du paysage en Languedoc oriental: parcellaires antiques et paléohydrographie de l'Étang de Mauguio et de ses tributaires*, Paris, Les Belles Lettres, (Séminaire du GDR 36 « Techniques nouvelles en Sciences de l'homme » — Journée du 26 février 1991), 1992, 65‑ 116 p.

FERNÁNDEZ-LOZANO, Javier, GUTIÉRREZ-ALONSO, Gabriel et FERNÁNDEZ-MORÁN, Miguel Ángel, « Using airborne LiDAR sensing technology and aerial orthoimages to unravel roman water supply systems and gold works in NW Spain (Eria valley, León) », *Journal of Archaeological Science*, vol. 53, 1er janvier 2015, p. 356‑ 373, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440314004105, consulté le 17 mai 2019.

FOVET, Élise, *Dynamiques socio-environnementales durant l'Antiquité : approche micro-régionale du peuplement en Languedoc oriental. Dir. François FAVORY et Kristof OSTIR*, Thèse de doctorat en Archéologie

et Géodésie, Besançon, Université de Franche-Comté, Univerza v Ljubljani, 2010, http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00616794.

FOVET, Élise et ZAKŠEK, Klemen, « Path Network Modelling and Network of Aggregated settlements: a case study in Languedoc (Southeastern France) », dans POLLA, Silvia et VERHAGEN, Philip, dir., *Computational Approaches to the Study of Movement in Archaeology. Theory, Practice and Interpretation of Factors and Effects of Long Term Landscape Formation and Transformation*, Berlin, De Gruyter, Topoi – Berlin Studies of the Ancient World/Topoi – Berliner Studien der Alten Welt, 2014, p. 43‑72, https://www.degruyter.com/viewbooktoc/product/182464.

FRUCHART, Catherine, *Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours*, Thèse de Doctorat, Besançon, Université de Franche-Comté, ED Langage, Espace, Temps, Société, 2014, 345+103+214+60 p.

GANDINI, Cristina, *Des campagnes gauloises aux campagnes de l'Antiquité tardive : la dynamique de l'habitat rural dans la cité des Bituriges Cubi (IIe s. av. J.-C. – VIIe s. ap. J.-C.)*, FERACF, vol. 33, Tours, supplément à la RACF, 2008, 511 + CD-rom p.

GANDINI, Cristina, *Des campagnes gauloises aux campagnes de l'Antiquité tardive: la dynamique de l'habitat rural dans la cité des Bituriges Cubi (IIe s. av. J.-C.-VIIe s. ap. J.-C.).*, Thèse de doctorat en Archéologie, Paris, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I, 2006.

GANDINI, Cristina, FAVORY, François et NUNINGER, Laure, *Settlement Patterns, Production and Trades from the Neolithic to the Middle Ages*, London, Archaeopress, BAR International Series 2370, 2012, 80 p.

GANDINI, Cristina, FAVORY, François et NUNINGER, Laure, *Archaedyn. 7 millennia of territorial dynamics. Settlement pattern, production and trades from Neolithic to Middle Ages, Final Conference, University of Burgundy, Dijon 23-25 june 2008*, Besançon, PUFC, Pré-actes (ACI espaces et territoires 2005-2007 : Spatial dynamics of settlement and natural ressources : toward un integrated analysis over the long terme from Prehistory to Middle Ages, contract ET 28), 2008, 242 p.

GEORGES-LEROY, Murielle *et al.*, « Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye », *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, n° 35, 2011, p. 117‑129.

GEORGES-LEROY, Murielle *et al.*, « Parcellaires et habitat antiques des forêts du plateau de Haye en Lorraine : bilan et perspectives », *Les parcellaires conservés sous forêt*, Paris, France, mai 2014, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01067845, consulté le 17 mai 2019.

GEORGES-LEROY, Murielle, NUNINGER, Laure et OPITZ, Rachel, « Le lidar : une technique de détection au service de l'archéologie », *Techniques de l'Ingenieur*, 10 août 2014, p. IN215, https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01099797.

GIRARDOT, Jean Jacques, « Intelligence Territoriale et Participation», 3e Rencontres TIC & Territoire: quels développements?, Lille », *ISDM*, vol. 16, 2004, http://www.isdm.org, consulté le 26 juin 2019.

HOLDEN, N, « Digital airborne remote sensing: the principles of lidar and casi », *AARGNews*, vol. 22, 2001, p. 23.

JOURDAIN, Philippe, *Traitements numériques d'images. Détection et métrologie de parcellaires. Restauration d'empreintes de filigranes*, Thèse de Doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, Besançon, Université de Franche-Comté, 1995, 187 p.

LAUTIER, Laurence, *Les systèmes de peuplement des Préalpes de Grasse de l'âge du Bronze à l'Antiquité tradive: apport de l'analyse factorielle à une étude de cas*, Nice, 2010.

LEEUW, Sander Ernst van der, FAVORY, François et FICHES, Jean-Luc, dir., *Archéologie et systèmes socio-environnementaux: études multiscalaires sur la vallée du Rhône dans le programme Archaeomedes*, vol. 27, Paris, CNRS, 2003.

MACTOUX, Marie-Madeleine, « Analyse factorielle et religion grecque: un essai d'application », *Dialogues d'histoire ancienne*, vol. 1, n° 1, 1974, p. 237‑ 265.

MESTRE, Mickaël, HILDEBRAND, Matthieu et TEXIER, Pierre, « Un exemple d'utilisation du LiDAR sous couvert forestier guyanais », *Archéopages*, vol. 23, 2008, p. 69‑ 75.

MOTKIN, D, « The assessment of LIDAR for archaeological use », *AARGNews*, vol. 22, 2001, p. 24‑ 25.

NUNINGER, Laure, *Peuplement et territoires protohistoriques du VIIIe au Ier s. av. J.-C. en Languedoc oriental (Gard-Hérault)*, Université de Franche-Comté, 2002.

NUNINGER, Laure *et al.*, « Peuplement et territoire dans la longue durée : retour sur 25 ans d'expérience », *L'archéologie en mouvement : hommes, objets et temporalités - 23-25 juin 2010*, CNRS éditions Alpha, Archambault De Beaune S., Francfort H.-P., 2012, p. 152‑ 159.

NUNINGER, Laure *et al.*, « Détection et analyse des structures archéologiques pour comprendre la forêt de Chailluz (Besançon) d'hier à aujourd'hui », dans LAURENCE DELOBETTE, Paul Delsalle, dir., *Histoire des paysages forestiers comtois et jurassiens*, ed. Franche-Bourgogne, 15 janvier 2016, p. 35‑ 51, https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01222742.

NUNINGER, Laure *et al.*, *Chantier «Construction Historique des Espaces Forestiers»*, Rapport d'activité Recherche - in Daumas Jean-Claude et al. rapport du programme ODIT (Feder/UE), Besançon, MSHE C. N. Ledoux -ONF - Ville de Besançon, 2015, 263‑ 348 p.

NUNINGER, Laure et OŠTIR, Krištof, « Contribution à la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale de l'Etang de Mauguio (Languedoc, France) », *Temps et espaces de l'homme en société, analyses et modèles spatiaux en archéologie. XXVe Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes*, Antibes, France, APDCA, 21 octobre 2004, p. 123‑ 134, https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00618046.

NUNINGER, Laure *et al.*, *Lidor. Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental.*, Rapport d'ATIP CNRS, Besançon-Ljubljana, LEA ModeLTER - CNRS (USR 3124, UMR 6249)/ZRC SAZU (IAPS), 2008.

NUNINGER, Laure *et al.*, « La modélisation des réseaux d'habitat: trois expériences », *Mappemonde*, vol. 3, n° 83, 2006, p. 1‑ 28.

NUNINGER, Laure *et al.*, « Estimating "land use heritage" to model changes in archaeological settlement patterns », *LAC 2014 proceedings*, Amsterdam, VU University, 1er octobre 2016, p. 1‑ 12, https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01252663.

NUNINGER, Laure *et al.*, « Contextes spatiaux et transformations du système de peuplement : approche comparative et prédictive », dans BERTONCELLO, BRAEMER, Frédérique and et FRANK, dir., *Variabilités environnementales, mutations sociales : natures, intensités, échelles et temporalités des changements. Actes des XXXIIe Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, Antibes 20-22 octobre 2011*, 2012b, p. 139‑ 154, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02125851.

NÜSSLEIN, Antonin, *Les campagnes entre Moselle et Rhin dans l'Antiquité : Dynamiques du peuplement du Ier s. avant J.-C. au Ve s. après J.-C.*, Strasbourg, AVAGE, Monographies d'Archéologie du Grand Est, 2018, 385 p.

NÜSSLEIN, Antonin, *Les campagnes entre Moselle et Rhin dans l'Antiquité. Analyse comparative des dynamiques spatiales et temporelles du peuplement de quatre micro-régions du Ier s. av. J.-C. au Ve s. ap. J.-C.*, PhD thesis (unpublished), Strasbourg, University of Strasbourg, 2016a.

NÜSSLEIN, Antonin, NUNINGER, Laure et VERHAGEN, Philip, « To boldly go where no one has gone before: integrating social factors in site location analysis and predictive modelling, the hierarchical types map », *Digital Archaeologies, Material Worlds (Past and Present), Proceeding of the 45th Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference (CAA 2017 ATLANTA, USA)*, sous presse, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01678020.

OPITZ, Rachel, NUNINGER, Laure et FRUCHART, Catherine, « Thinking topographically about the landscape around Besançon (Doubs, France) », dans KLUIVING, S.J. et GUTTMANN-BOND, E.B., dir., *Landscape Archaeology between Art and Science*, Amsterdam University Press, From a Multi- to an Interdisciplinary Approach, 2012, p. 395‑412, https://www.jstor.org/stable/j.ctt6wp79m.32, consulté le 17 mai 2019.

OŠTIR, Krištof et NUNINGER, Laure, « Paleorelief detection and paleoDEM modelling - a case of study in eastern Languedoc (France) », *From Space to Place, 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, Rome, 2006 december 2nd-7th*, vol. 1568, Oxford, United Kingdom, BAR Series, 2006, p. 255‑260, https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00110876.

OURIACHI, Marie-Jeanne, *Habitat, terroirs et territoire en Languedoc oriental durant l'Antiquité. Approche spatio-temporelle d'un système de peuplement.*, université de Franche-Comté, 2009.

PERRIN, Hervé, *Traitement d'image et analyse systématique de paramètres morphologiques des structures agraires antiques*, DEA, Besançon, Laboratoire d'Optique P.-M. Duffieux, University de Franche-Comté, 1990.

POIRIER, Nicolas et NUNINGER, Laure, « Techniques d'amendement agraire et témoins matériels », *Histoire Societes Rurales*, vol. 38, n° 2, 2012, p. 11‑50.

RAAB, Thomas, RAAB, Alexandra et SCHOPPER, Franz, « Erfassung und Bewertung von vorindustriellen Meilerstandorten-Workshop 19. Februar 2019 », *GeoRS*, vol. 8, 2019, https://opus4.kobv.de/opus4-btu/frontdoor/index/index/docId/4817, consulté le 17 mai 2019.

RODIER, Xavier *et al.*, *Information spatiale et archéologie*, Errance, Paris, 2011, 256 p.

ROUX, Maurice, *Algorithmes de classification*, Paris-New York, Elsevier Masson, 1985, 151 p.

SALIGNY, Laure *et al.*, « Models and tools for territorial dynamic studies. Spatial dynamics of settlement patterns and natural resources: towards an integrated analysis over a long term, from Prehistory to the Middle Ages », *Archaedyn - 7 millenia of territorial dynamics: Settlement pattern, production & trades from Neolithic to Middle Ages*, PUFC, Dijon, France, Les cahiers de la MSHE Ledoux, 2011, p. 25‑41.

SCHMITT, Luc, « Application de la méthode de reconnaissance de forme à l'étude des talons de haches à ailerons médians », *Dialogues d'histoire ancienne*, n° 1, 1974, p. 47‑49.

STENBORG, Per, SCHAAN, Denise P. et FIGUEIREDO, Camila G., « Contours of the Past: LiDAR Data Expands the Limits of Late Pre-Columbian Human Settlement in the Santarém Region, Lower Amazon », *Journal of Field Archaeology*, vol. 43, n° 1, 2 janvier 2018, p. 44‑57, https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00934690.2017.1417198, consulté le 12 juin 2019.

TOUNSI, Ibtissem *et al.*, « Étude de la paléohydrographie et du réseau routier ancien en pays tricastin (France, Drôme-Vaucluse) à partir d'images "Thematic Mapper" », *Photo-Interprétation*, vol. 35, n° 1‑2, Journées de Télédétection en Sciences Humaines, Paris 2-3 mai 1996, 1997, p. 113‑126.

TOURNEUX, François-Pierre, *Modes de représentation des paysages*, Thèse de doctorat en Géographie, Besançon, Université de Franche-Comté, 2000.

VERHAGEN, Philip, NUNINGER, Laure et MARK, Groenhuijzen, « Modelling of pathways and movement networks in archaeology: an overview of current approaches », dans PHILIP, Verhagen, JAMIE, Joyce et MARK, Groenhuijzen, dir., *Finding the limits of the limes: modelling economy, demography and transport at the Edge of the Roman Empire*, vol. 1766, New York, NY, Springer New York, Simulation Studies in Archaeology, février 2019, p. 217‑249, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01860568, consulté le 17 mai 2019.

VUAILLAT, Dominique et MASSONIE, Philippe, « Essai d'une typologie des haches à ailerons médians par une méthode mathématique », *Dialogues d'histoire ancienne*, n° 1, 1974, p. 29‑46.

ZAKŠEK, Klemen *et al.*, « Path Modelling and Settlement Pattern », dans POSLUSCHNY, A., LAMBERS, K. et HERZOG, I., dir., *Layers of Perception. Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, Germany, April 2–6, 2007*, Bonn, Dr.

Rudolf Habelt GmbH, Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte, 2008, p. 309‑315, http://proceedings.caaconference.org/paper/101_zaksek_et_al_caa2007/.

ZAKŠEK, Klemen, OŠTIR, Kristof et KOKALJ, Žiga, « Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique », *Remote Sensing*, vol. 3, n° 2, 23 février 2011, p. 398‑415, http://www.mdpi.com/2072-4292/3/2/398, consulté le 17 mai 2019.