



HAL
open science

Ensilage expérimental en Roussillon. Approche croisée de l'archéologie et de la biologie

Cécile Dominguez, Eric Yebdri, Francis Fleurat-Lessard, Jerome Ros, Jean-Michel Savoie Inrae, Tanguy Wibaut

► **To cite this version:**

Cécile Dominguez, Eric Yebdri, Francis Fleurat-Lessard, Jerome Ros, Jean-Michel Savoie Inrae, et al.. Ensilage expérimental en Roussillon. Approche croisée de l'archéologie et de la biologie. Archéopages : archéologie & société, 2022, Hors série 6, pp.178-186. hal-03932541

HAL Id: hal-03932541

<https://hal.inrae.fr/hal-03932541>

Submitted on 10 Jan 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons CC0 - Public Domain Dedication 4.0 International License

Ensilage expérimental en Roussillon

Approche croisée de l'archéologie et de la biologie

Cécile Dominguez

Inrap, UMR 5140 « ASM »

Eric Yebdri

Inrap

Avec la contribution de

Francis Fleurat-Lessard

Insecto-Net IAA

Jérôme Ros

CNRS, UMR 5554 « ISEM »

Jean-Michel Savoie

Inrae, UR 1264 « MycSA »

Tanguy Wibaut

Inrap

Le cadre de l'expérimentation

Contrairement à l'utilisation actuelle du silo aérien, l'ensilage enterré est une méthode traditionnelle de conservation confinée, totalement abandonnée de nos jours dans l'agriculture conventionnelle du monde occidental. La technique est pourtant étudiée en archéologie à partir de fosses-silos abandonnées qui recèlent parfois dans leurs comblements les traces de leur fonction primaire (Gransar 2003; Gentili 2009; Charmoillaux 2019). Compte tenu de ces éléments, pourquoi expérimenter l'ensilage ? En premier lieu, fouiller des fosses-silos ne nous renseigne pas directement sur leur contenu, souvent absent, et ne démontre pas *in fine* la conservation des denrées périssables (céréales, légumineuses, légumes, fourrage) et l'état de ces denrées à l'issue du processus. Ce que l'on étudie, c'est une structure détournée de son usage initial, réutilisée comme dépotoir, et non un aménagement dans son état primaire, adapté au stockage de denrées périssables. Ensuite, si quelques expérimentations ont été tentées, aucune étude systématique enregistrant tous les paramètres n'a jamais été menée, et les études historiques ne comblent pas plus ces lacunes que les témoignages ethnologiques. Les savoir-faire précis nous échappent dans bien des aspects pratiques.

Notre équipe a engagé depuis 2016 des campagnes d'expérimentation ayant pour principal objectif, au moyen de l'archéologie et des sciences connexes¹, d'améliorer l'identification des silos et l'analyse du fonctionnement des espaces dédiés au stockage enterré. Le parti pris de considérer qu'une technique évolue dans le temps pour répondre à des contraintes davantage géographiques ou climatiques qu'économiques, politiques ou culturelles² nous conduit à traiter les questions de l'ensilage d'un point de vue diachronique³. Le territoire des Pyrénées-Orientales a été choisi car il témoigne de pratiques d'ensilage depuis le Néolithique ancien jusqu'à l'Époque moderne. Les études sont menées dans le cadre d'un projet collectif de recherche (PCR) pluridisciplinaire auquel participent chercheurs, agriculteurs et artisans⁴. En 2016, l'expérimentation était incluse dans l'axe de recherche des grandes aires d'ensilage

du PCR « Habitats groupés du haut Moyen Âge en Languedoc et Roussillon (VII^e-XII^e s.) »⁵. Pour répondre aux besoins croissants en moyens et à des problématiques spécifiques, elle est devenue le PCR « Expérimentation archéologique de l'ensilage souterrain pré-industriel »⁶. À partir de janvier 2022 et pour une durée de quatre ans, ce PCR est financé et promu dans le cadre du projet « SilArchaeoBio » du laboratoire MycSA⁷.

Le PCR est planifié sur une décennie de façon à évaluer la conservation sur le long terme (Gast *et al.* dir. 1979-1985) et à assurer la déclinaison des variables expérimentées. Il s'agit en effet d'observer et d'analyser au moins sur deux années consécutives la corrélation entre des critères d'ensilage maîtrisés (capacité et forme de la fosse, technique de protection du stock, denrée ensilée) et des variables non maîtrisées (climat, vie microbiologique qui se développe au sein des grains en atmosphère confinée). En définitive, c'est toute une partie de la chaîne opératoire qui est prise en compte, depuis le stockage enterré jusqu'à la transformation en farine puis en pain et au semis en plein champ. La rencontre complémentaire de trois domaines, l'archéologie, la microbiologie et la production agro-alimentaire⁸, inédite en expérimentation d'ensilage, renforce l'intérêt de la démarche.

Le silence des silos

L'archéologie préventive, telle qu'elle se pratique dans l'Hexagone, permet, par le biais de nombreuses opérations de fouille et de diagnostic, la collecte de données sérielles sur l'ensilage. Mais la récurrence et la densité des découvertes sont-elles garantes d'une bonne compréhension de la technique ? Ou, plus simplement, d'une identification correcte des silos parmi toutes les structures en creux dont la fonction initiale est incertaine ? L'état de conservation variable des fosses-silos, dont seule la fonction secondaire de fosse à remblai est précisément documentée, est un biais inhérent à cet axe de recherche. Le retrait du contenu primaire du silo en vue de l'alimentation ou de l'utilisation pour le semis induit que le fragile réceptacle du stock se dégrade naturellement ou évolue volontairement au gré des réemplois. La morphologie si caractéristique du silo est alors progressivement gommée, et seule une méthodologie de fouille et d'enregistrement adaptée peut la restituer (Villes 2006). Si les assemblages de carpores carbonisés identifiés en position secondaire renseignent indéniablement sur les produits issus des chaînes opératoires agricoles, cela n'en fait pas pour autant des preuves fiables de la nature des produits qui pouvaient être stockés à l'origine (Ros *et al.* 2019). Non seulement le doute peut subsister sur l'identification correcte de certaines fosses, car le silo archéologique nous parvient dégradé, remanié et parfois détourné de sa fonction initiale (cas des inhumations en silo), mais de plus la découverte passe souvent sous silence l'éventail

1. Carpologie, géomorphologie, sédimentologie, histoire.
2. Une technique évolue quand elle n'est plus adaptée aux réalités du moment ou qu'il est possible de l'améliorer sensiblement.
3. Voir le mémoire de master 2 de C. Dominguez : « Les silos de la plaine du Roussillon (Pyrénées-Orientales) entre le Néolithique ancien et le haut Moyen Âge (VI^e millénaire av. n. è. - XII^e s. de n. è.). Identification, évolution morphologique et analyse des dynamiques de comblement », université de Montpellier III, 2014.
4. <https://ensilage.hypotheses.org>.
5. Responsables : Odile Maufras (Inrap, UMR 5140 « ASM ») et Carole Puig (ACTER, UMR 5136 « FRAMESPA »).
6. Responsables : C. Dominguez et E. Yebdri; financement : Inrap et Drac Occitanie.
7. Projet sélectionné par l'Agence nationale de la recherche (ANR); responsables : J.-M. Savoie, J. Ros et E. Yebdri.
8. Paysans (exploitation agricole non extensive), artisan meunier (meule de pierre) et artisan boulanger (pétrissage manuel et cuisson au feu de bois).

complet des usages et des pratiques relatives à ce mode de conservation spécifique. La recherche se heurte aussi à une mauvaise définition de l'ensilage, associée à l'idée communément admise que nous connaissons dans ses grands principes le fonctionnement du silo enterré, de sa mise en œuvre (jugée simple) à son principe de conservation et à son utilisation. Toutefois, le contexte de la recherche est dynamique, en raison notamment de l'essor depuis les années 1980 de l'archéologie agraire, qui participe au renouvellement des connaissances fondamentales sur les occupations rurales. Les comparaisons entre des sites d'ensilage d'une même région ou appartenant à un même cadre chronologique ciblé révèlent, par l'analyse de l'organisation spatiale, des fonctionnements de société ainsi que des règles économiques et politiques très variées. On y découvre des silos tantôt isolés, tantôt organisés en grappes de quelques unités, voire en batteries regroupant plusieurs centaines de structures, comme c'est le cas dans les grandes aires d'ensilage du haut Moyen Âge dans le Sud de la France. Les contextes médiévaux, parce qu'ils peuvent être mis en relation avec des sources historiques, constituent des cas d'étude prometteurs. Néanmoins, il faut considérer que celles-ci livrent des informations partielles à propos de l'ensilage. Les ouvrages agronomiques antiques et médiévaux éclairent parfois la pluralité des techniques qui peuvent être mises en place, mais ces indications sont rares et à considérer avec prudence. Le reste de la documentation fait plus référence aux dimensions économique et sociale du silo qu'à son fonctionnement (Puig 2011).

Une relecture précise des données ethnographiques est nécessaire, car l'ensilage renvoie à une pratique agricole ancienne, disparue depuis la fin du Moyen Âge sur notre territoire et dans le courant du xx^e siècle autour du bassin méditerranéen. Celle-ci existe désormais de manière résiduelle dans certaines contrées très rurales d'Afrique du Nord, où le stockage en atmosphère confinée ne se pratique plus dans les *matmoras*⁹ mais dans les fûts métalliques qui s'y sont substitués. Les apports de ces sources sont indéniables mais insuffisants, car ils sont peu détaillés et, par définition, non comparables aux contextes archéologiques de nos régions.

Les recherches archéologiques en Préhistoire récente et en Protohistoire s'appuient traditionnellement sur des observations croisées entre l'archéologie, l'ethnologie et l'expérimentation pour repérer, parmi les très nombreuses fosses-dépotoirs, lesquelles pouvaient être vouées à l'ensilage (Jiménez-Jáimez, Suárez-Padilla 2020). Cependant, les études expérimentales destinées à comprendre les silos archéologiques ne sont pas nombreuses. Deux chercheurs en particulier ont publié des résultats fréquemment cités. Gérard Firmin a mené une expérimentation dans la vallée de l'Aisne, de la préparation d'un champ de blé au stockage de la récolte, d'après des méthodes identifiées au Néolithique (Firmin 1984). Malheureusement, les observations

réalisées à l'issue de l'ouverture de ces silos n'ont pas été publiées. L'archéologue Peter J. Reynolds s'est beaucoup investi dans l'expérimentation archéologique durant les années 1970-1980. Il est à l'origine de travaux dirigés dans la ferme expérimentale de Butser (Hampshire, Sud de l'Angleterre) d'après des acquis protohistoriques (Reynolds 1979). Aujourd'hui, ses travaux sont largement utilisés par les archéologues pour comprendre la construction de silo et le principe de ce type de conservation. Cette dernière serait rendue possible par la germination d'une partie des grains stockés, au contact des parois humides. Ce phénomène mènerait à la formation d'une croûte de grains germés observable au niveau des parois, à l'interface avec la matrice sédimentaire. Cependant, cette « croûte de grains germés » n'a jamais été mise en évidence par la carpologie, même si l'on soupçonne que, dans certains assemblages, il pouvait y avoir des grains en position primaire (Ruas 2011). Ce manque de preuve concerne le contexte archéologique, mais au vu des connaissances actuelles dans nos expérimentations, la formation de cette croûte de grains germés ne semble pas nécessaire pour assurer une atmosphère confinée favorable à la conservation de grains. Par ailleurs, nous ne sommes pas certains de bien comprendre la complexité des échanges gazeux qui participent ou non à la conservation ou à la détérioration des grains (White *et al.* 1982). De plus, l'un des facteurs importants trop rarement considéré est l'humidité. Il est pris en compte pour la première fois dans le cadre des expérimentations menées dans les années 2010 dans le Val-d'Oise¹⁰.

Il est donc important que l'ensilage soit soumis à d'autres investigations expérimentales en relation avec les problématiques actuelles développées par des archéologues et des spécialistes de la conservation des céréales capables de bien appréhender les processus observés. Désormais, il n'est plus satisfaisant de réduire l'ensilage aux observations issues de rares sites expérimentaux, car la réalité des découvertes archéologiques est beaucoup plus complexe et diversifiée. Certes, le silo est un procédé technique, et en cela, ses caractéristiques générales sont constantes; mais le climat, la nature du sous-sol, le type et l'état des denrées stockées sont autant de variables qui mènent à des adaptations locales de l'ensilage qu'il conviendrait de documenter. La synthèse des connaissances archéologiques, historiques et carpologiques confrontées aux résultats de certaines expérimentations et à l'éclairage de l'ethnologie permettront de tendre vers une meilleure connaissance des pratiques anciennes. La recherche actuelle lance des pistes en ce sens au travers d'équipes pluridisciplinaires, mais force est de constater que la prolifération des données se heurte à des questions récurrentes, souvent sans réponse, concernant les savoir-faire engagés, la mémoire des gestes ou la gestion économique et sociale qui constitue le cadre général de ces pratiques.

9. Silos à grain enterrés traditionnels.

10. Voir l'article d'Antoine Bourrouilh et de Camille Saout : « Le stockage des grains de céréales en silo souterrain sous climats océanique et océanique altéré, interroger la pratique par l'expérimentation, retour sur une problématique classique dans l'archéologie ouest-européenne », décembre 2016, <https://www.academia.edu/14980045>.



[III. 1] Plan général de l'expérimentation sur extrait cadastral. L'identification de chaque silo repose sur la nomenclature employée en archéologie : aux lettres « SI » identifiant la structure silo succèdent son numéro unique et l'année de creusement, afin de garder la traçabilité du réemploi de la fosse.

Du balbutiement de la première année à l'élaboration d'un protocole solide

L'expérimentation roussillonnaise trouve son origine dans la rencontre de chercheurs investis sur des sites du haut Moyen Âge recelant des centaines de fosses-silos et dans l'étude diachronique de l'ensilage dans la plaine, avec un désir commun : celui de comprendre la technique moins superficiellement qu'au travers de silos abandonnés¹¹. Faute de silo médiéval découvert à l'état fonctionnel en France méridionale et en l'absence de protocole précis consigné à l'issue d'expérimentations antérieures, il nous a fallu tout inventer, depuis la méthode d'enregistrement jusqu'aux techniques de creusement et d'ensilage. Cette ultime étape a suscité des interrogations. Les découvertes récurrentes de dalles de pierre dans les comblements d'abandon ont véhiculé l'idée que celles-ci constituaient, à l'origine, un élément du dispositif de fermeture. En réalité, sans maîtriser le savoir-faire du tailleur de pierre et même en récupérant des dalles issues de fouilles achevées, nous avons été incapables de les utiliser concrètement pour obturer un silo expérimental. Leurs formes n'étaient jamais adéquates. Elles sont apparues trop étroites pour être maintenues à la surface du stock et le protéger convenablement, ou trop lourdes, ce qui générerait alors un risque de fragilisation de l'épaule du silo en surplomb. L'exemple du bouchon est assez caractéristique de nos hésitations durant la première année d'ensilage et de la démarche propre à cette expérimentation.

La somme des découvertes archéologiques nous livre des exemples précieux de mise en œuvre à tester, et s'y ajoute le bénéfice d'une démarche empirique. Ainsi, pour sortir de l'impasse où nous mettaient des dalles que nous étions incapables d'utiliser en l'état, une solution a été trouvée en septembre 2016 : valoriser le volume de terre issu du creusement des quatre premières fosses-silos¹² pour mettre en œuvre des bouchons associant terre et paille¹³.

Les recherches bibliographiques préliminaires nous avaient alertés sur l'intérêt d'enregistrer l'évolution du stock de grain *in situ*, avec la mise en place d'enregistreurs d'humidité et de température. Au terme de la première année, les quatre stocks de fèves, la légumineuse sélectionnée comme denrée expérimentale, avaient moisi, et les enregistreurs montraient une fluctuation que nous n'étions pas en capacité d'interpréter. Pour comprendre ce phénomène et y remédier, la collaboration avec des spécialistes de la conservation des céréales s'est avérée indispensable¹⁴. Leurs expertises ont permis de comprendre que, dans ce type d'encaissant, pour un stockage d'une année présentant une pluviométrie normale et en l'absence de dispositif freinant la diffusion de l'humidité¹⁵, le développement des moisissures était inévitable. Au-delà de la simple collaboration scientifique, le protocole mis en place avec l'aide de ces spécialistes a marqué un tournant dans le processus expérimental. Nous ne percevons plus le silo par le seul prisme véhiculé par l'archéologie, c'est-à-dire

11. Nous remercions nos collègues, en particulier O. Maufrais (Inrap) et Jérôme Kotarba (Inrap), qui ont guidé le démarrage des expérimentations.

12. Le volume total des fosses-silos est de 2,2 m³, ce qui a généré selon le coefficient de terres sèches (1,25) 2,75 m³ de déblais, réemployés en totalité dans les dispositifs de fermeture de ces silos.

13. L'emploi du mot « torchis » est approprié seulement lorsque le mélange terre-paille est appliqué sur une armature porteuse, ce qui n'est pas le cas ici.

14. Laboratoire MycSA de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) et entreprise Insecto-Net IAA.

15. Épais paillage des parois et du fond, ou paillage du fond associé à un torchis appliqué contre les parois.

comme une simple fosse en forme d'ampoule, mais comme le réceptacle souterrain d'un stock de grain vivant, un instrument spécifique lié à une technique qu'il convient de mieux appréhender. À cette fin, il est apparu nécessaire de comprendre comment une denrée périssable peut se conserver en terre et de définir quels étaient les paramètres à maîtriser pour lutter contre les fluctuations du taux d'humidité, de la température interne et des échanges gazeux responsables du développement de moisissures à mycotoxines (Fleurat-Lessard 2017).

Notre démarche est originale à plus d'un titre. D'abord, pour éviter les écueils rencontrés par les rares équipes qui se sont lancées dans l'ensilage expérimental, ce programme repose sur un lieu fixe et protégé du vandalisme à l'unité Inrae d'Alénya¹⁶ [ill. 1]. La parcelle en jachère restera inexploitée pendant la décennie dédiée à l'expérimentation. Nous devons procéder au débroussaillage de l'emprise avant la campagne d'ensilage, sans quoi les silos sont difficilement détectables à la surface. Ce sont la présence des piquets d'axe de relevé qui nous guident. Les herbes sèches coupées sont soit réemployées dans la confection des mélanges terre-paille, soit rejetées dans les fosses-silos abandonnées. Le sous-sol est adéquat, comme l'attestent les nombreuses fosses-silos creusées dans un encaissant similaire en Roussillon. La faisabilité a été préalablement vérifiée par des sondages mécaniques, avec relevé de la stratigraphie afin de confirmer la stabilité du terrain. L'encaissant se compose d'alluvions fines de limon sableux à argileux jusqu'à 1,50 m de profondeur¹⁷.

En cohérence avec les techniques anciennes, tous les outils de creusement sont manuels¹⁸, les matériaux locaux¹⁹ et les denrées issues de l'agriculture biologique. Le producteur partenaire est installé en Lot-et-Garonne²⁰. Outre ses productions céréalières habituelles, il sème chaque fin d'année la ou les variétés de grains qui nous seront nécessaires lors de l'ensilage l'année suivante. En 2016, ce fut de la féverole, de 2017 à 2020 de l'engrain, auquel s'est ajouté en 2021 du blé dur. À partir de 2022, le nombre de silos passant de sept à neuf nous permet d'ajouter de l'orge vêtue au corpus existant. Les espèces ensilées sont choisies parmi celles mises en lumière par les études carpologiques de contextes archéologiques locaux datés du Moyen Âge (Ros *et al.* 2019). Dans le respect du calendrier agricole actuel, les semis se font à la fin de l'automne, et les grains sont récoltés en juillet ou août, sur pieds, lorsqu'ils s'assèchent naturellement jusqu'à atteindre un taux d'humidité d'environ 10 %, à partir duquel ils sont prêts à entrer en phase de conservation. L'ensilage a lieu au début de l'automne suivant. La production est laissée au soin de l'agriculteur partenaire selon des pratiques modernes : labour, semence et récolte mécaniques ; conservation à la ferme en silo aérien métallique ventilé électriquement un mois avant la livraison sur le site de l'expérimentation. À l'issue du

déstockage expérimental et après des analyses menées en laboratoire destinées à identifier et quantifier les mycotoxines présentes, seuls les échantillons en deçà du seuil réglementaire de santé publique sont transformés en farine et en pain par des artisans professionnels²¹ dont le processus de travail est enregistré. Chaque professionnel réalise des comparaisons entre un lot témoin conservé ou transformé selon des techniques contemporaines et un lot issu de l'ensilage expérimental. Ainsi, l'agriculteur sème au même moment ses grains et 50 kg de grains issus du désilage pour comparer la levée. Le meunier produit et décrit la texture et la couleur de 30 à 50 kg provenant de chacun des silos ouverts. Avec ces farines sont confectionnés des pains au levain cuits au feu de bois afin d'évaluer la levée, la croûte et le goût des échantillons.

Les premiers silos sont en fonction depuis 2016 [ill. 2]. En 2021, le site compte sept silos : deux sont abandonnés afin d'enregistrer la dégradation naturelle des fosses, quatre sont en réemploi successif et un en réemploi différé grâce à la mise en place d'un remblai de terre. Les silos abandonnés sont remplis avec des apports de remblai et par érosion naturelle des parois. L'enregistrement (dessin des sections et restitutions photogrammétriques en trois dimensions) sera poursuivi jusqu'au colmatage complet. Ces fosses-silos seront ensuite recoupées mécaniquement pour comparer les dynamiques de comblement à des cas archéologiques et réaliser des prélèvements pour mettre en place des référentiels applicables à la géoarchéologie et aux sciences de l'environnement. Le site s'étend sur 180 m², mais l'emprise au sol des silos nécessite le triple de surface pendant l'ensilage afin d'organiser l'espace selon les différentes étapes à réaliser : entreposer et peser le grain, préparer les différents matériaux destinés à la fermeture des silos, stocker les outils et les échantillons.

La capacité maximale totale de conservation s'élève à ce jour à 3 m³. Le volume total de chaque fosse-silo est compris entre 0,7 et 1,058 m³, mais le volume utile peut s'amoinrir en fonction de l'épaisseur du dispositif de protection interne mis en place [ill. 3], qui regroupe un chemisage au niveau des parois et du fond de la chambre de stockage (paille et/ou mélange terre-paille) avec un couvercle en bois et un colmatage du goulot d'accès du silo (paille ou mélange terre-paille). La capacité de conservation va encore évoluer, soit par le creusement de nouveaux silos soit par l'élargissement des chambres de stockage des fosses actuelles. Le silo type présente un profil en ampoule, avec des parois plus ou moins galbées. Sa profondeur est d'environ 1,30 m pour profiter de la fraîcheur naturelle du sous-sol, et le diamètre de son embouchure de 60 centimètres pour qu'un adulte arrive à passer ses épaules pour travailler dans le silo. Le goulot d'accès mesure entre 50 et 60 centimètres de hauteur pour s'écarter de l'épaisseur de terre végétale qui pourrait fragiliser l'épaulement en surplomb et aussi s'éloigner de l'emprise des animaux fouisseurs.

16. Nous remercions les équipes, notamment Catherine Mignolet et José Catala, pour le prêt du terrain, le soutien logistique et l'intérêt envers nos travaux, garants d'une expérimentation de qualité et d'une enrichissante collaboration.

17. Pour des raisons de sécurité, les creusements des fosses n'excèdent pas 1,40 m.

18. Barre à mine, pioche, piochon et herminette à manche court pour le creusement et l'extraction des déblais au seau.

19. Terre et paille pour l'essentiel, plus rarement sable ou argile.

20. Ferme de Jacques Baboulène à Grateloup-Saint-Gayrand.

21. Artisan meunier travaillant avec une meule en pierre (Laurent Clavié, Mauzac, Haute-Garonne) et artisan boulanger recourant au pétrissage à la main et au four à bois (Jérémy Nechtschein, Mauvaisin, Haute-Garonne).

Année d'expérimentation	Numéro de silo	Type de creusement			Usage		Abandon définitif
		Nouveau creusement	Élargissement de la chambre de stockage	Premier ensilage	Réemploi	Fosse réservée	
2016	SI01.16	●				●	
	SI02.16	●		●			
	SI03.16	●		●			
	SI04.16	●		●			
2017	SI01.16						●
	SI02.16		●		●		
	SI03.16					●	
	SI04.16		●		●		
	SI05.17			●			
2018	SI02.16				●		
	SI03.16		●			●	
	SI04.16				●		
	SI05.17		●		●		
2019	SI02.16				●		
	SI03.16				●		
	SI04.16				●		
	SI05.17				●		
	SI06.18	●				●	
	SI07.19	●		●			
2020	SI02.16						●
	SI03.16					●	
	SI04.16					●	
	SI05.17					●	
	SI06.18					●	
	SI07.19					●	
2021	SI03.16					●	
	SI04.16				●		
	SI05.17				●		
	SI06.18				●		
	SI07.19				●		

Année d'expérimentation	Numéro de silo	Protection interne du stock	Volume de la chambre de stockage vide (en litres)	Volume ensilé (en litres)	Perte de volume	
					en litres	en %
2018	SI04.16	Paillage fond et parois	740,7	429,4	311,3	42,0
	SI05.17	Paillage fond et parois	828,9	587,6	241,3	29,1
2019	SI02.16	Paillage fond et parois	580,0	390,3	189,7	32,7
	SI03.16	Paillage fond, chemisage parois avec un mélange terre-paille	864,3	634,4	229,9	26,6
	SI04.16	Paillage fond et parois	740,7	387,4	353,3	47,7
	SI05.17	Paillage fond et parois	828,9	592,8	236,1	28,5
	SI07.19	Paillage fond et parois	635,0	467,2	167,8	26,4

[ill. 2] Récapitulatif des usages et des évolutions des profils entre 2016 et 2021.

[ill. 3] Volumes des fosses ensilées en 2018 et 2019. Nous constatons que la mise en place de dispositifs de protection interne des stocks par paillage et/ou mélange de terre-paille contre les parois engendre un différentiel entre le volume utilisable de la chambre de stockage et le volume effectif de grains enfouis de l'ordre de 33 % en moyenne.

L'objectif à terme est de produire des résultats et une méthode à destination des chercheurs (agronomes, archéologues, historiens) et des agriculteurs désireux d'applications concrètes. Pour ce faire, nous documentons chaque silo par des sections cumulatives relevées au 1/10 pour enregistrer les processus taphonomiques (tassement du stock, évolution du dispositif de fermeture et du profil des fosses) à chaque ensilage puis désilage.

La méthode allie la collecte des données objectives, comprenant une description des caractéristiques du stock avant et après ensilage pour comparer le poids, le volume et le pourcentage d'humidité et recenser les pathogènes et les insectes présents, à des enregistrements placés dans le stock, qui mesurent l'évolution quotidienne du taux d'humidité et de la température [ill. 4]. Ces mesures sont mises en corrélation avec les données climatiques issues de la station météorologique d'Alénya. Nous collectons aussi des informations empiriques, tel que le temps nécessaire au creusement, tous les gestes indispensables à la préparation des grains en amont et en aval du stockage et l'organisation globale du travail. Par exemple, nous notons que, suite au marquage au sol de l'embouchure du silo, le creusement est exclusivement manuel. Il dure en moyenne douze heures et occupe deux à trois personnes, en rotation entre le creusement et l'évacuation des déblais. Les premières dizaines de centimètres sont décaissées à la pioche, puis l'emploi d'une barre à mine devient rapidement indispensable pour évoluer dans cet espace exigü. De même, l'évacuation des déblais au seau devient vite impossible dès que l'on s'enfonce dans le goulot d'accès, et laisse la place à l'utilisation de petits contenants souples d'un litre environ.

L'état sanitaire de chaque stock est caractérisé par des observations et mesures immédiates sur le terrain et par des analyses différées en laboratoire. Les prélèvements sont effectués par secteurs définis dans chaque silo en fonction de la hauteur dans le stock et de la proximité des parois latérales. Sur le terrain, des fiches de contrôle visuel et sensoriel sont renseignées. Les relevés qualitatifs portent sur l'aspect général (couleur, compacité) ainsi que sur les caractéristiques mécaniques et olfactives. Ils sont complétés par des mesures quantitatives de température et de teneur en eau réalisées avec un humidimètre portable²². Dans le souci d'allier les démarches scientifique et empirique s'ajoute à cette méthode générale des prélèvements systématiques de grains, destinés à créer un référentiel de comparaison avec les corpus carpologiques, et des tests de semis, de meunerie et de panification.

La synthèse des informations aboutit à la reconstitution d'un scénario d'évolution du stock permettant d'adapter le protocole [ill. 5]. Les variables reproductibles testées dans ce programme concernent la protection du stock et la durée de conservation. La variable non maîtrisée est le climat. Ainsi, la validation du protocole complet ne saurait être effective

que lorsque celui-ci aura éprouvé des conditions météorologiques différentes durant plusieurs années consécutives. La conservation minimale est d'un an. Elle sera prolongée d'année en année si le contrôle des stocks par prélèvements non perturbateurs du stock réalisés avec une canule spéciale révèle un bon état sanitaire des grains. La protection du stock se situe à deux niveaux : dans la chambre de stockage et depuis le goulot d'accès jusqu'à la surface. De 2016 à 2018, les résultats des observations d'ensilage de féverole et d'engrain avec un protocole de protection interne absent²³ ou minimal²⁴ révèlent la nécessité d'un dispositif de protection épais systématique pour limiter l'impact de l'humidité transmise par le terrain encaissant [ill. 6]. De plus, les dispositifs de fermeture des goulots de la première année - à base de terre sèche ou humide²⁵, de couches de paille et de mélanges terre-paille²⁶ en des proportions différentes - ne sont certainement pas efficaces pour limiter les apports d'humidité liés aux variations du climat extérieur. De même, les dômes en mélange terre-paille - peu proéminents²⁷ ou plus imposants, composés de terre sèche maintenue par un cercle de blocs en calcaire²⁸ - s'érodent trop rapidement pour être efficaces dans la durée.

Depuis 2018, l'enjeu du protocole est d'assurer une meilleure conservation en limitant le développement des moisissures et des bactéries, favorisé par deux sources d'humidité - verticale (avec la pluie) et horizontale (par percolation ou *via* des strates drainantes du substrat) -, grâce à un dispositif stable et massif [ill. 7]. En sous-sol, les stocks sont protégés par un paillage compact de 15 centimètres d'épaisseur appliqué contre les parois et le fond. À titre de comparaison, depuis 2019, nous pratiquons le chemisage des parois en torchis : le mélange terre-paille est appliqué contre une armature de tenons de roseau sec afin d'épouser la forme incurvée des parois. Sans ce dispositif, inventé à cette occasion, l'enduit ne resterait pas en place. Le paillage épais du fond est également expérimenté [ill. 8]. Le stockage en silo avec chacune de ces deux mises en œuvre sera reconduit durant deux années consécutives pour inclure la variable non maîtrisée de la météo. Dans la partie supérieure, les stocks sont protégés des variations du taux d'humidité dues à la pluviométrie grâce à un dispositif en trois parties. Le sommet du stock est couvert d'un couvercle en bois puis de 10 à 15 centimètres d'épaisseur de paille tassée. Ensuite, l'intégralité du goulot d'accès est colmatée avec un mélange terre-paille. À la surface, ce dispositif est finalisé par la mise en œuvre d'un dôme en mélange terre-paille, d'un diamètre moyen de 1,59 m et de 20 à 25 centimètres de hauteur maximale, ce qui crée une pente de plus de 3 %, propice à l'écoulement de la pluie via les brins longs de paille. L'installation d'un couvercle en bois n'a pas d'équivalent en bibliographie. Il nous est apparu important de maintenir la surface du stock propre au moment du désilage, le démontage du bouchon en terre

22. Samap-O-Test, produit par la société Samap écosystème.

23. En 2017 : silos S102.16 et S105.17.

24. De 2016 à 2017 : fine couche de paille sur le fond pour les silos S102.16, S103.16 et S104.16.

25. En 2016 : silos S102.16 et S103.16.

26. En 2016 : silo S104.16 ; en 2017 : silos S104.16 et S105.17.

27. En 2016-2017 : silos S102.16, S103.16 et S104.16 ; en 2018 : silo S102.16.

28. En 2016-2017 : silo S101.16.

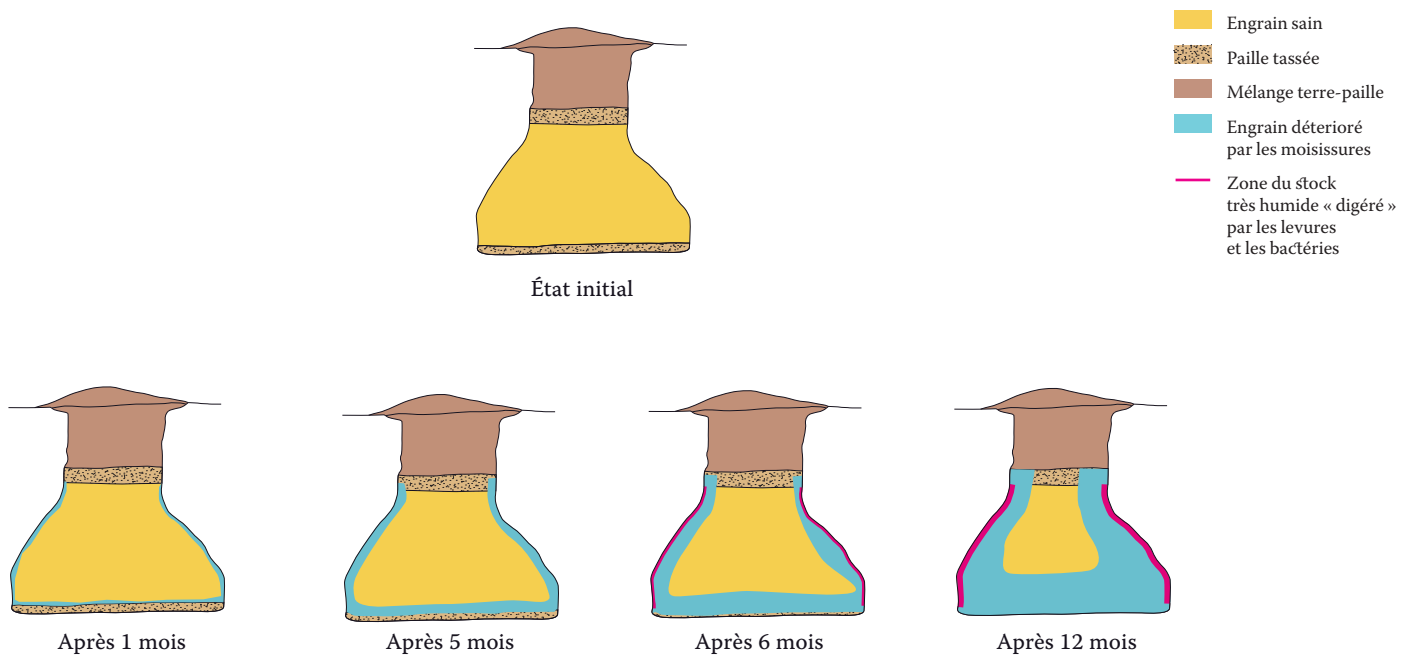


[ill. 4] Chaque silo est muni de trois enregistreurs (Kimo type KH220) protégés dans des boîtes en plastique. Leurs sondes sont placées sur le fond, contre la paroi à mi-hauteur et au cœur du stock. Cette photo montre le désilage du silo S104.16 en 2018, avant le retrait des enregistreurs mis en place en septembre 2017. Les résultats des mesures ont montré

une augmentation saisonnière de l'humidité et de la température responsable de la moisissure des grains. Les plus touchés restent adhérents aux parois. Le reste du stock est fluide mais imprégné d'une forte odeur de moisi. En laboratoire, les analyses ont livré des taux de mycotoxine OTA très supérieurs aux teneurs maximales autorisées par la législation.

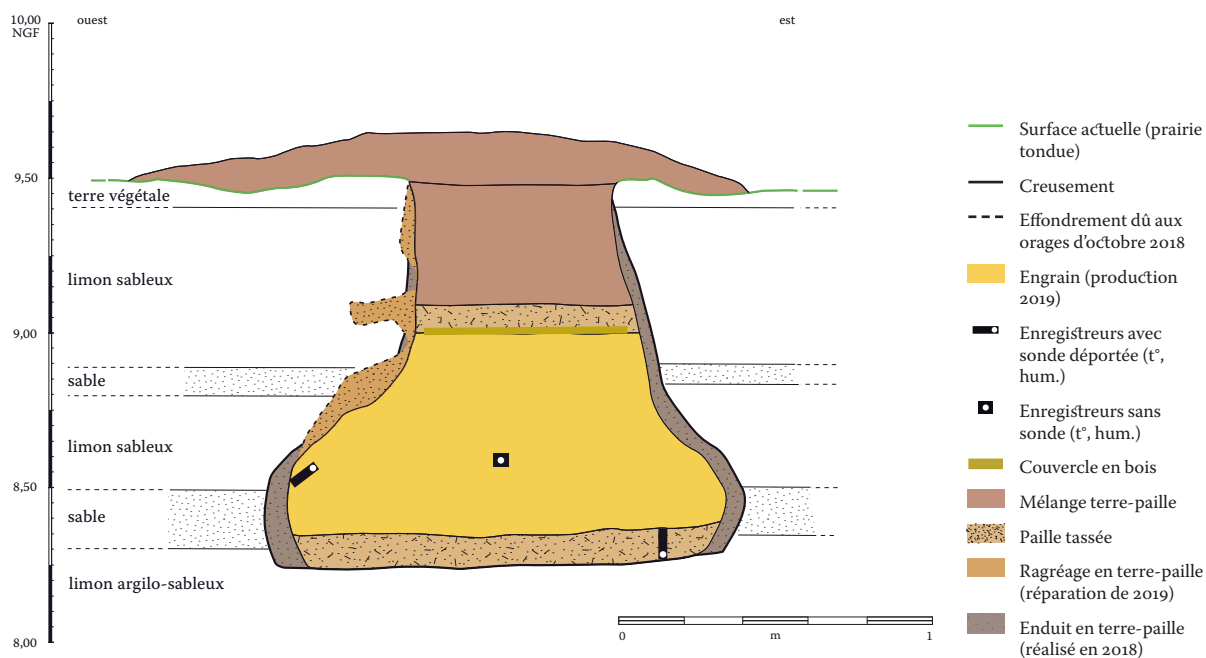
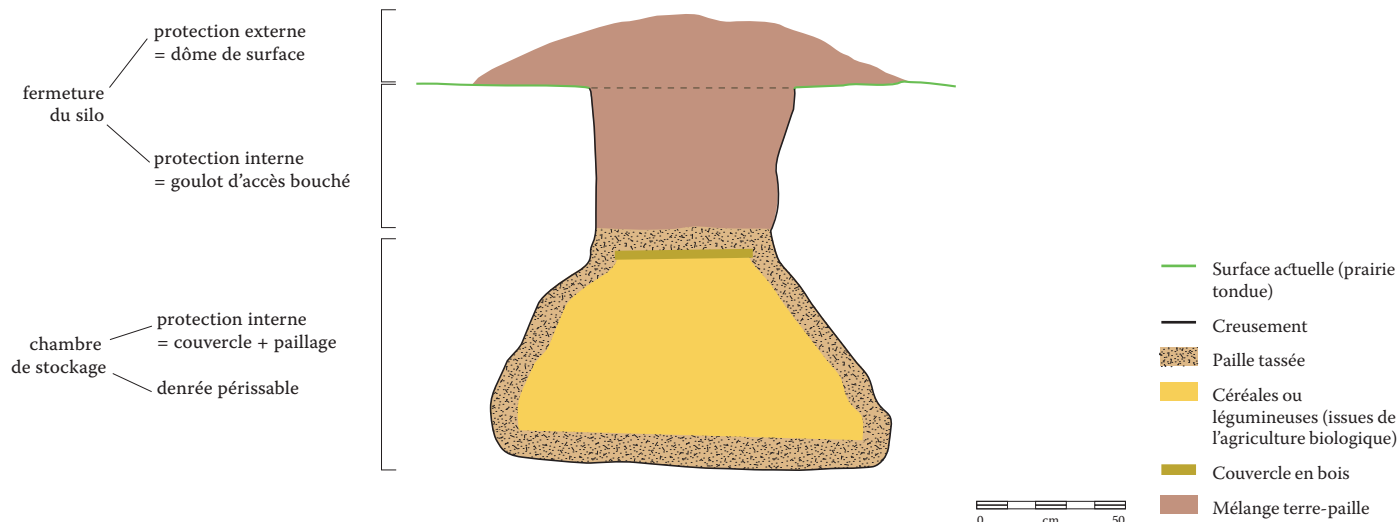


[ill. 6] Ensilage du silo S107.19 en 2019, avec paillage des parois pour réduire les transferts d'humidité responsables de la moisissure du stock observée les années précédentes. Une épaisse couche de paille est disposée contre la paroi et maintenue en place grâce au poids des grains versés progressivement.



[ill. 5] Scénario le plus probable de la détérioration progressive de l'état sanitaire de l'engrain stocké en silo pendant une année entière sans paillage des parois entre 2017 et 2018. Ce constat nous a conduit depuis

à ensiler avec un paillage compact et épais appliqué contre les parois et le fond. L'évolution du protocole a conduit à sortir en 2019 un stock ensilé un an consommable et panifiable.



[III. 7] Représentation d'un silo type (terminologie et technique de protection employées dès 2018).

[III. 8] Premier exemple de silo pourvu d'un enduit de terre. Sa mise en œuvre et le séchage ont demandé des réfections successives. Au désilage, en 2020, la conservation

avec ce dispositif ne s'est pas révélée plus efficace qu'avec le paillage des parois. Une nouvelle expérience sera menée entre 2022 et 2023. (NGF : nivellement général de la France)

souillant le grain. Ce couvercle a également pour finalité de ralentir la pénétration de l'humidité depuis la surface vers le stock de grain.

Premiers résultats et perspectives d'avenir

La réussite d'une année de conservation donnant lieu à la transformation du produit déstocké en pain délicieux est encourageante. La poursuite des expérimentations jusqu'en 2026 (comme initialement prévu) se justifie, car des objectifs importants ne sont pas atteints. Par exemple, la conservation des capacités germinatives de l'engrain lors des tests de germination en plein champ et en laboratoire est quasi nulle, et ce quel que soit le protocole de protection mis en place. L'explication

privilegiée est celle de l'humidité du sous-sol, responsable du développement de moisissures dommageables pour le germe. Bien que décevante, l'absence de germination est digne d'intérêt pour la communauté d'archéologues afin de mettre en question la double finalité communément admise de l'ensilage pour la subsistance et la mise en réserve de grains destinés aux semis. Inscrire les expérimentations sur une décennie, c'est aussi programmer l'échelonnement de l'ouverture des silos pour documenter ce qui est sans doute l'intérêt principal de l'ensilage enterré, à savoir la conservation durant plusieurs années consécutives. Le dernier enjeu sera de documenter les différents stades de dégradation des silos abandonnés pour avoir des éléments de comparaison avec les découvertes effectuées sur les sites.

L'appropriation de ce programme expérimental hors de la sphère scientifique n'est pas à négliger. Des liens entre le monde de la recherche, celui des paysans et celui des artisans transformant les céréales sont progressivement tissés, comme l'atteste l'intérêt croissant suscité par nos travaux : articles parus dans la presse spécialisée agricole, visites d'exploitants en reconversion, d'éleveurs ou d'agriculteurs soucieux d'employer des techniques non énergivores. Certains professionnels sont en demande de solutions techniques alternatives afin d'être en phase avec les enjeux environnementaux, et dans l'avenir, ils pourraient s'approprier notre redécouverte de savoirs traditionnels dans le domaine de la conservation.

Dans la communauté archéologique, donner envie à des chercheurs d'expérimenter ailleurs dans l'Hexagone serait souhaitable et permettrait des comparaisons avec nos observations. À mi-parcours du programme décennal, nous sommes conscients que nous ne parviendrons peut-être pas à répondre à toutes les questions soulevées, mais nous serons néanmoins en mesure d'apporter à la communauté scientifique un nouveau regard sur l'ensilage, même si le climat actuel et la nature du sous-sol en Roussillon sont des biais inhérents à la comparaison des résultats avec les contextes archéologiques. Le parti pris de cette recherche repose sur une méthodologie empruntée aux sciences de la nature, alliée aux savoir-faire empiriques qui, selon nous, sont le principal atout pour mieux comprendre les silos « anciens ». Le processus de mise en place du protocole expérimental nous a conduit à mettre progressivement au cœur de nos préoccupations le stock de grains avec, au premier plan, les ingénieurs spécialistes du grain, les paysans et les artisans. C'est l'expertise croisée de ces différents professionnels qui explique le résultat de l'ensilage, pourquoi et comment les grains se sont maintenus ou ont évolué durant la conservation. L'archéologie, l'histoire et l'ethnologie donnent quant à elles des exemples de mise en œuvre et de solutions techniques que l'on peut appliquer afin d'améliorer les résultats obtenus. Mieux comprendre l'ensilage, c'est mettre à disposition des archéologues la variabilité des techniques abordées dans les archives, toute une gamme de possibilités qu'ils sont susceptibles de trouver sur les sites. Le bilan du programme pourrait avoir aussi un impact sur les futures recherches archéologiques, participer à l'évolution des stratégies et des méthodes de fouille dans les prescriptions et, plus largement, changer le regard de l'archéologue sur la complexité du silo.

- CHARMOILLAUX J. 2019 : Un type de stockage prédominant : l'ensilage, in Charmoillaux J., Gaime S. (dir.), *Les formes de l'habitat rural au Moyen Âge en Limagne septentrionale et Sologne bourbonnaise*, Paris, Inrap - Éd. du CNRS (coll. Recherches archéologiques, 17), p. 146-158.
- FIRMIN G. 1984 : Agriculture expérimentale dans la vallée de l'Aisne, *Revue archéologique de Picardie*, 1-2, p. 95-102.
- FLEURAT-LESSARD F. 2017 : Integrated management of the risks of stored grain spoilage by seedborne fungi and contamination by storage mould mycotoxins - An update, *Journal of Stored Products Research*, 71, p. 22-40.
- GAST M., SIGAUT F., BEUTLER C. (DIR.) 1979 : *Les techniques de conservation des grains à long terme : leur rôle dans la dynamique des systèmes de cultures et des sociétés*, Paris, Éd. du CNRS.
- GENTILI F. 2009 : Silos et greniers. Structures de conservation des grains sur les sites ruraux du haut Moyen Âge d'après des exemples franciliens, in Gentili F., Lefèvre A. (dir.), *L'habitat rural du haut Moyen Âge en Île-de-France*, Guiry-en-Vexin, Centre de recherches archéologiques du Vexin français (CRAVF) (coll. Suppl. du *Bulletin archéologique du Vexin français et du Val-d'Oise*, 2), p. 97-123.
- GRANSAR F. 2003 : L'apport de l'étude du stockage à la reconstitution des systèmes agro-alimentaires de l'âge du Fer en France septentrionale, in Anderson P. C., Cummings L. S., Schippers T. K., Simonel B. (dir.), *Le traitement des récoltes : un regard sur la diversité du Néolithique au présent, Actes des XXIII^{es} rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 17-19 octobre 2002*, Antibes, Association pour la promotion et la diffusion des connaissances archéologiques, p. 201-217.
- JIMÉNEZ-JÁIMEZ V., SUÁREZ-PADILLA J. 2020 : Understanding Pit Sites: Storage, Surplus and Social Complexity in Prehistoric Western Europe, *Journal of Archaeological Method and Theory*, 27-4, p. 799-835.
- PUIG C. 2011 : L'apport de l'étude du stockage à notre connaissance de la conjoncture alimentaire autour de 1300 (Languedoc, Catalogne), in Bourin M., Drendel J., Menant F. (dir.), *Les disettes dans la conjoncture de 1300 en Méditerranée occidentale, Actes du séminaire organisé conjointement par l'École française de Rome et la Casa de Velázquez, 27-28 février 2004*, Rome, École française de Rome, p. 159-177.
- REYNOLDS P. J. 1979 : A General Report of Underground Grain Storage Experiments at the Butser Ancient Farm Research Project, in Gast M., Sigaut F., Beutler C. (dir.), *Les techniques de conservation des grains à long terme : leur rôle dans la dynamique des systèmes de cultures et des sociétés*, Paris, Éd. du CNRS, p. 70-88.
- ROS J., RUAS M.-P., HALLAVANT C. 2019 : Gestion des déchets agropastoraux et domestiques en France méditerranéenne médiévale : les dépôts archéobotaniques, in Conesa M., Poirier N. (dir.), *Fumiers! Ordures! Gestion et usage des déchets dans les campagnes de l'Occident médiéval et moderne, Actes des XXXVIII^{es} journées internationales d'histoire de l'abbaye de Flaran, 14-15 octobre 2016*, Toulouse, Presses universitaires du Midi (coll. Flaran), p. 169-185.
- RUAS M.-P. 2011 : Un témoignage de pratiques agro-pastorales au XI^e-XII^e siècle en Bas-Limousin : les grains brûlés dans un silo à Chadalais (Haute-Vienne), in Wiethold J. (dir.), *Carpologia. Articles réunis à la mémoire de Karen Lundström-Baudais, Actes des rencontres d'archéobotanique, 9-12 juin 2005, Glux-en-Glenne*, Glux-en-Glenne, Bibracte, Centre archéologique européen, p. 137-196.
- VILLES A. 2006 : Pitié pour les silos, in Frère-Sautot M.-C., Lichardus-Itten M. (dir.), *Des trous... structures en creux pré- et protohistoriques, Actes du colloque de Dijon et Baume-les-Messieurs, 24-26 mars 2006*, Montagnac, Mergoïl (coll. Préhistoires), p. 357-360.
- WHITE N. D. G., SINHA R. N., MUIR W. E. 1982 : Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat, *Canadian agricultural engineering*, 24-1, p. 35-42.