

# Présentation de l'expérimentation d'agriculture de type néolithique menée à l'archéosite du parc de la Haute-Île (Neuilly-sur-Marne, France) : mise en œuvre et résultats des cultures céréalières

Aurélié SALAVERT, Françoise TOULEMONDE, Rémy AURAY,  
Caroline HOERNI, Guillaume HUITOREL, Ivan LAFARGE

**Résumé :** L'expérimentation agricole menée dans le parc de la Haute-Île (Département de la Seine-Saint-Denis) pendant trois années agricoles (2017-2020) a pour objectif de tester un système agricole de type néolithique (5500-4900 avant notre ère) impliquant un travail du sol minimal et un taux de fertilisation faible. Cet article présente la mise en œuvre de l'expérimentation et une analyse préliminaire des résultats concernant les rendements céréaliers et les relevés des cortèges d'adventices. L'amidonniér et l'engrain se sont montrés généralement compétitifs face aux plantes adventices herbacées. Les parcelles semées à l'automne avec la technique du sillon ont permis de récolter en moyenne 1350 kg/ha (ratio 1:15) d'engrain et 900 kg/ha (ratio 1:8,5) d'amidonniér. Cette moyenne est à nuancer en raison de la variabilité interannuelle des rendements pour les deux céréales. Néanmoins, le rendement est toujours supérieur à 1:10 pour l'engrain et en général inférieur à 1:10 pour l'amidonniér. Ainsi, contrairement aux données agronomiques qui indiquent que l'engrain est moins productif que l'amidonniér, l'expérimentation indique que certaines variétés d'engrain peuvent être plus performantes que celles d'amidonniér en culture d'hiver, plusieurs années consécutives, sous un système agraire engageant un très faible apport organique et un faible investissement humain. La flore adventice relevée sur les parcelles est dominée par les plantes vivaces probablement en raison de la faible intensité du travail du sol et de la courte durée de l'expérimentation. La majorité des taxons trouvés dans le lot de stock d'engrain (récolte traitée par battage puis vannage) provient de la prairie environnante. Les adventices résiduelles y représentent seulement un quart de la diversité enregistrée sur les parcelles et sont majoritairement des annuelles d'hiver ce qui ne correspond pas au ratio vivace/annuelle enregistré sur les parcelles.

**Mots-clés :** Néolithique, Europe tempérée, expérimentation, blé vêtu, système agricole, adventice, rendement céréalier.

**Abstract:** This article presents implementation choices and initial results on crop yields and weed assemblages from a 3-year Neolithic-type agricultural experiment (2017-2020) at the "parc de la Haute-Île" (Department of Seine-Saint-Denis), about 20 km east of Paris (France). The project aimed to experiment the currently accepted farming system for the Early Neolithic in central Temperate Europe (ca. 5500-4900 cal BC), i.e. a system of winter or spring cereal cultivation, conducted on small permanent plots, whose fertility is maintained by a low input of organic amendment. At the "parc de la Haute-Île", work on the plots was minimal (no weeding, no irrigation, low fertiliser input) due to constraints related to labour and time availabilities of the experimental team. The plots were mainly cultivated with the two emblematic hulled wheats of the Linearbandkeramik period (LBK): emmer (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccon*) and einkorn (*Triticum monococcum*). The initial state of the experimental site was a meadow surrounded by a wooded hedgerow and the initial soil had an inherent high fertility. The total area given over to the farming experiment was 180 m<sup>2</sup> (31.5 m<sup>2</sup> per plot). Each year, three plots were cultivated, either in monoculture or in maslin, i.e. cultivation of several cereal types on the same plot and subsequently harvested together. The annual cropping plans included one plot of cereals that had never been fertilized, another amended with animal manure (equivalent of 2 t/ha of animal manure), and another following the cultivation of a pulse crop (rotation). The aim was to evaluate the cereal yields following the

different methods that were used (fertilization, seasonality), as well as the qualitative diversity of weed assemblages in the plots and in one processed einkorn subsample, sown in autumn and gathered low on the stem. The main questions underlying the experimental project are:

- Does low organic input cultivation without weed control benefit one or the other of the two-hulled wheats in the monoculture and maslin plots?
- Does soil fertilisation have a short-term effect on the yields of the hulled cereals?
- What is the composition of the wild flora present in the cultivated plots, what is its origin, is it representative of the cultivation methods?
- Does the weed flora found in the harvested lots after their treatment reflect the results from the agricultural plots?

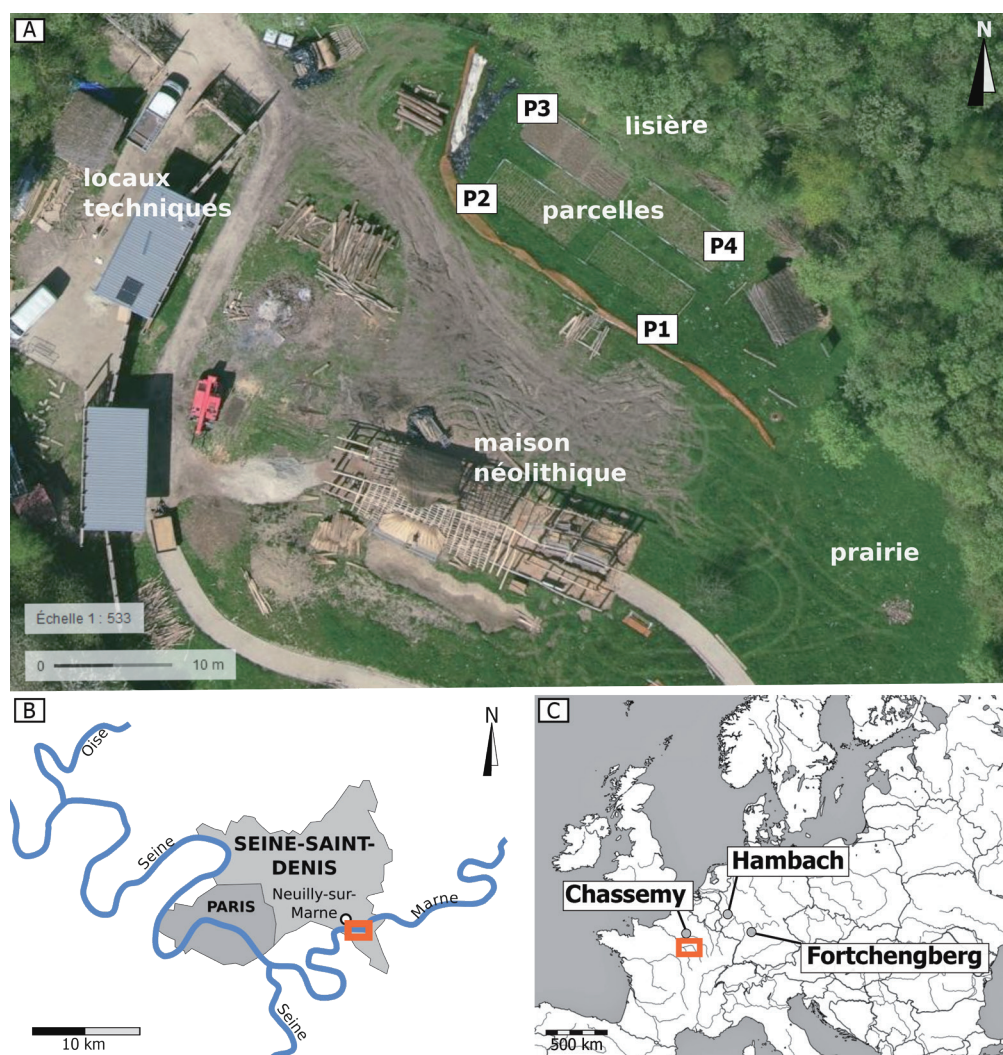
At the “parc de la Haute-Île”, emmer and einkorn competed with herbaceous weeds in the farming experiment with low labour input and low fertilization intensity. The yields for the two cereals show inter-annual but also intra-annual variabilities. Einkorn was the best performing cereal in both the monoculture and maslin plots. The average yield for einkorn is 1350 kg/ha (ratio 1:15) and 900 kg/ha (ratio 1:8,5) for emmer. The yield is always higher than 1:10 for einkorn regardless of when sowing took place and the fertilization methods. For emmer, the ratio is generally less than 1:10. Regarding sowing seasonality, the spring crop tested in year 1 (2018-2019) performed less well than the winter crop for both taxa, with emmer even stopping its development during the agricultural season. On the unfertilized plot, there is a discontinuous evolution of yields between the test year (2017-2018) and year 2 (2019-2020) with the two cereals showing contrasting behaviours. For einkorn in the test year, the unfertilized plot delivered the highest yield (1:23) of the three years. On the five plots fertilized in monoculture, yields were not systematically higher than on the unfertilized plots. For emmer, in year 2, the two fertilized plots (1:12 and 1:17) yielded more than the unfertilized plot (1:7) and even more than the reference value of the test year (1:10). Emmer seems thus to respond somewhat better to short-term fertilisation. These results contradict the current agronomic data that indicate a better productivity of emmer. This experiment leads us to assume that the better performance of einkorn during episodes of heavy rainfall could explain its preponderance on most of the LBK archaeological sites in Central European despite its supposed lower yield. Indeed, the experiment shows that currently, some varieties of einkorn can outperform emmer, several years in a row, under a low input winter cropping system with a soil with high inherent fertility.

36 herbaceous species were observed in the cereal plots. Most (n=25) were species identified in the meadow. At least 5 taxa may have originated in the meadow and/or initial seedlings and 2 taxa originated exclusively in the initial seedlings of the test year. The distribution by biological type shows 50% annuals (mostly winter annuals) and 50% perennials (without vegetative reproductive organs in majority). The high presence of perennials can be explained by the short duration of the experiment that did not favour annuals, and the low intensity of weeding. After threshing and winnowing, 10 taxa were identified to the species level in the einkorn stock. The distribution by biological type indicates 80% annuals, which are mostly winter annuals. Among the perennials, those without vegetative reproduction dominate. The ratio of annuals/perennials observed in the einkorn stock is thus not representative of what was observed on the plot. There is less diversity in the assemblage compared to what was recorded in the plots. Furthermore, winter annual weeds are over-represented compared to the ratio recorded in the plots, where perennials dominate. This could be explained by the fact that annuals, such as poppy (*Papaver rhoeas*) or brome (*Bromus* sp.), produce more seeds than perennials and are therefore more likely to be present in the samples. This result will have to be verified and explained when the entire harvest subsamples of the three experimental years are processed.

**Keywords:** Neolithic, temperate Europe, experimentation, hulled wheat, farming system, weed, cereal yield.

Afin de valoriser le riche patrimoine archéologique découvert lors de l'aménagement du parc de la Haute-Île à Neuilly-sur-Marne, le département de la Seine-Saint-Denis a mis en place un archéosite, au sein duquel un pôle Néolithique a été ouvert en 2017 (Hoerni et Lafarge, 2018). L'ambition initiale de cet équipement était de proposer un espace de médiation pour le grand public et les scolaires, présentant la reconstitution d'une maison néolithique. Une aire agricole s'est rapidement adossée à ce bâtiment dans un but d'archéologie expérimentale (fig. 1A et 1B). Cette démarche, axée sur le Néolithique, a pu être mise en œuvre dès l'automne 2017 grâce à une collaboration entre le Bureau du patrimoine archéologique du département de la Seine-Saint-Denis et l'UMR Archéozoologie, Archéobotanique : Sociétés, Pratiques et Environnements (AASPE, MNHN-CNRS). Les objectifs de l'expérimentation du parc de la Haute-Île (2017-2020) étaient de

tester les hypothèses récentes quant aux méthodes et techniques mises en œuvre dans les systèmes agricoles pionniers d'Île-de-France et plus largement d'Europe tempérée nord-occidentale. Le modèle actuellement accepté est un système de cultures de céréales d'hiver ou de printemps, mené sur de petites parcelles permanentes, et dont le maintien de la fertilité est assuré par un apport d'amendement organique (Bogaard, 2002a, 2004 ; Mueller-Bieniek *et al.*, 2019). Ce modèle s'appuie sur les données issues de l'archéobotanique, de travaux d'agriculture expérimentale et de la géochimie isotopique. Cet article présente le cadre archéobotanique dans lequel s'inscrit l'expérimentation, sa mise en œuvre incluant un argumentaire des choix techniques effectués ainsi qu'une analyse préliminaire des résultats concernant les rendements céréaliers et les relevés des cortèges d'adventices.



**Fig. 1 – A**, photographie aérienne de l'archéosite prise au printemps 2018 (année test) avec l'emplacement des quatre parcelles expérimentales (P). Les semis de légumineuses et de lin viennent d'être réalisés sur P3. La construction de la maison de type néolithique est en cours (fond d'illustration : Géoportail) ; **B**, localisation administrative et géographique du parc de la Haute-Île (carte : A. Salavert) ; **C**, localisation des trois principales expérimentations de type néolithique présentées dans le texte (fond de carte : Alexrk2, basé sur les données issues de naturalearthdata.com).

**Fig. 1 – A**, aerial photograph of the "archéosite" taken in spring 2018 (test year) with location of the four experimental plots (P). Pulses and flax have just been sown on P3. The building of the Neolithic house is in progress (background: Géoportail); **B**, Location of the "parc de la Haute-Île" (map: A. Salavert); **C**, Location of the three main Neolithic-type experiments presented in the text (map background: Alexrk2, based on the database from naturalearthdata.com).

## ÉTAT DES LIEUX ET OBJECTIFS DE L'EXPERIMENTATION

### Cadre archéobotanique

Les connaissances sur l'alimentation végétale et les chaînes opératoires agricoles des sociétés préhistoriques reposent essentiellement sur les restes de plantes cultivées, les graines/fruits de plantes sauvages, dont les adventices (c'est-à-dire plantes accompagnatrices des cultures qui poussent sans avoir été volontairement semées), provenant des sites archéologiques. Dans le bassin de la Seine (vallées de l'Aisne et de la Seine), les études archéobotaniques publiées sur des sites conservés

en milieu sec et attribués au Néolithique ancien (Rubané, 5100-4900 cal. BC) sont encore peu nombreuses. Les données les plus anciennes proviennent de la vallée de l'Aisne, affluent de l'Oise (Bakels, 1984, 1995, 1999). Dans la vallée de la Seine, des fouilles préventives menées par l'Institut national d'archéologie préventive ont renouvelé les connaissances sur l'économie végétale des premiers agriculteurs champenois (Toulemonde *et al.*, 2021). Néanmoins, en règle générale, les carporestes sont mal conservés, ne permettant qu'une approche qualitative de la diversité agricole dans cette région pour le début du Néolithique (Pernaud *et al.*, 2004 ; Berrio, 2011). De plus, la place des produits de la cueillette et des organes souterrains, comme les racines et les tubercules,

dans l'alimentation au Néolithique ancien, mais aussi aux périodes ultérieures, demeure largement méconnue (Dietsch-Sellami, 2007 ; Bouby *et al.*, 2018 ; Cagnato *et al.*, 2021 ; Hamon *et al.*, 2021).

### *Plantes cultivées et cortèges d'adventices*

Les sites du bassin de la Seine ont livré les céréales et les légumineuses typiques du Rubané d'Europe tempérée centrale et occidentale, c'est-à-dire l'engrain (*Triticum monococcum*), l'amidonnier (*T. turgidum* subsp. *dicoccon*), le pois (*Pisum sativum*) et la lentille (*Lens culinaris*) (Bakels, 1999, 2009 ; Kreuz, 2007 ; Salavert, 2011, 2017 ; Toulemonde *et al.*, 2021). Les assemblages carpologiques de la vallée de la Seine, et plus largement du Bassin parisien, semblent se distinguer du reste du territoire rubané par la fréquence de l'orge (*Hordeum vulgare*) et du blé nu (*Triticum aestivum* s.l./*durum/turgidum*) (Bakels, 2009 ; Toulemonde *et al.*, 2021). Des études complémentaires seront néanmoins nécessaires pour préciser leur statut (adventices, cultivars) et leur importance relative par rapport aux deux blés vêtus emblématiques des systèmes agricoles pionniers de la région. Concernant les plantes oléagineuses, les études champenoises ont montré la possible culture du pavot somnifère (*Papaver somniferum*) dès le Néolithique ancien (Salavert *et al.*, 2020 ; Toulemonde *et al.*, 2021). Le lin (*Linum usitatissimum*), pourtant répertorié dans la sphère rubanée, n'est pas identifié dans la vallée de la Seine. La sous-représentation des plantes oléagineuses, telles que le pavot et le lin, est probablement due à l'indigence du corpus archéobotanique additionné à la fragilité des semences dont le contenu oléagineux ne favorise pas la conservation par carbonisation. Le mode de culture, c'est-à-dire la monoculture ou la métur (c'est-à-dire plusieurs espèces semées, moissonnées et parfois même transformées ensemble), est difficile à mettre en évidence en archéobotanique car il faut disposer d'ensembles clos issus directement des récoltes, comme des structures de stockage (Comet, 1992 ; Zech-Matterne, 2011 ; Toulemonde *et al.*, 2016). Selon certains auteurs, l'emploi de la métur associant les deux principales céréales vêtues serait peu probable au Rubané car toutes deux n'arriveraient pas de manière synchrone à maturation, l'amidonnier précédant l'engrain (Kreuz et Schäfer, 2011).

Les mentions d'adventices de cultures identifiées dans les assemblages carpologiques sont utilisées pour appréhender le milieu cultivé et des aspects de la chaîne opératoire agricole comme les modes de culture et le traitement des récoltes. En effet, la composition spécifique et la diversité de la flore adventice dans un champ sont influencées par le type de plante cultivée, la saisonnalité des cultures, les facteurs environnementaux (par exemple le Ph du sol et l'humidité édaphique), ou encore l'organisation du paysage, la profondeur des labours et l'intensité du travail du sol (Charles *et al.*, 1997 ; Fried *et al.*, 2008 ; Jones *et al.*, 2010). En outre, la composition spécifique est tributaire des modes de récolte (sous l'épi, en bas de tige) et des traitements post-récolte (battage,

criblage, vannage). Dans le bassin de la Seine, peu de taxons d'adventices sont répertoriés. Les taxons principaux, comme sur l'ensemble du territoire rubané, sont le chénopode blanc (*Chenopodium album*), la renouée faux-liseron (*Fallopia convolvulus*), les bromes (*Bromus* spp.), la lampsane (*Lapsana communis*) ou encore les gaillets (*Galium* spp.) (Bakels, 1999).

### *Système agricole rubané*

L'agriculture sur abattis-brûlis a été l'un des premiers systèmes agraires proposés pour expliquer la rapide expansion de la migration néolithique dans une zone forestière en Europe centrale (Clark, 1952 ; Isaakidou, 2011). Ce système consiste à cultiver une parcelle en milieu forestier, après l'avoir défrichée et brûlée. La matière organique brûlée apporte alors les nutriments qui amélioreraient les rendements agricoles. L'hypothèse de la pratique de l'abattis-brûlis au Néolithique ancien en Europe tempérée a néanmoins été remise en question dès les années 1980. Les principaux arguments sont que ce système reposerait sur une analogie inappropriée avec des pratiques historiques du nord de l'Europe et que les champs permanents amendés pourraient offrir des rendements céréaliers élevés, et ce, sur plusieurs années consécutives (Rowley-Conwy, 1981).

Les hypothèses concernant le système agricole rubané, incluant les méthodes de maintien de la fertilité des sols, ont largement été renouvelées depuis une vingtaine d'années (Bogaard, 2002a, 2004 ; Kreuz, 2007 ; Kreuz et Schäfer, 2011 ; Bogaard *et al.*, 2013). D'après ces travaux qui combinent l'analyse carpologique d'ensembles conséquents d'adventices archéologiques et de la composition isotopique en azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) des céréales, les premiers agriculteurs d'Europe tempérée auraient pratiqué la culture intensive de petites surfaces agricoles sans itinérance et à l'échelle de la maisonnée. L'intensité du modèle comprend un facteur travail important par unité de surface, dit « *intensive labour input* » dans la littérature anglo-américaine (Bogaard, 2005). Ce travail intense intègre l'amendement des champs grâce à la fumure, un travail du sol et un désherbage régulier après les semis. La saisonnalité des semis (automne et/ou printemps) déduite sur la base des types biologiques des adventices archéologiques, comme leur période de germination, est encore très discutée pour le Néolithique (p. ex. Bogaard, 2002b ; Kreuz et Schäfer, 2011). Ce modèle agricole se combinerait à un élevage de petits troupeaux à proximité des habitats (Bogaard, 2005).

## **Expérimentation agricole de type néolithique en climat tempéré**

### *État des lieux des travaux expérimentaux*

Les interprétations des résultats archéobotaniques s'appuient sur les travaux et référentiels issus de la phytosociologie et de l'agronomie actuelles, des sources historiques et ethnologiques. Par exemple, l'écologie actuelle

des mauvaises herbes ou la composition des résidus céréaliers issus des différentes étapes de traitement (battage, vannage) tels qu'observés en ethnologie appuient l'interprétation des cortèges archéologiques (Bouby, 2000). Cependant, de nos jours, les modèles d'agriculture vivrière intégrant la céréaliculture, et se développant dans des contextes écologiques et socio-économiques comparables à ceux du Néolithique sont inexistantes en Europe tempérée. Pour pallier l'absence de comparatifs actuels et sub-actuels, les expérimentations agricoles permettent de valider les hypothèses de recherche fondées sur le matériel archéologique et archéobotanique, d'évaluer la faisabilité des chaînes opératoires proposées et d'ouvrir des pistes de réflexion, potentiellement nouvelles, autour des premiers systèmes agricoles européens (Lüning *et al.*, 1980). Elles sont susceptibles de produire des référentiels des différentes étapes des chaînes opératoires agricoles en contrôlant le maximum de paramètres climatiques, techniques et culturels.

À notre connaissance, trois projets d'expérimentation d'agriculture néolithique ont été développés (fig. 1C), dans un climat tempéré océanique humide selon la classification de Köppen-Geiger, c'est-à-dire sans saison sèche et avec des étés doux (Lüning *et al.*, 1980 ; Firmin, 1984 ; Meurers-Balke et Lüning, 1990 ; Peel *et al.*, 2007 ; Ehrmann *et al.*, 2014 ; Rösch *et al.*, 2017). Mis en œuvre sur une durée variable, ces projets ont principalement testé le modèle d'abattis-brûlis, avec ou sans itinérance qui était le système agricole privilégié par les archéologues dans les années 1980 pour le Néolithique ancien (Rowley-Conwy, 1981). Dans le cas de Chassemy (1982-1983) et de Hambach (1979-1984), le brûlis a été réalisé chaque année sans déplacement des parcelles cultivées, à partir d'éléments végétaux récoltés à proximité et déposés sur les parcelles. Dans le cas de l'expérimentation sur le long terme de Forchtenberg (1998-2012), les cultures ont été déplacées sur une autre zone ayant subi le même traitement (abattage, puis brûlis). Une régénération forestière s'est alors opérée sur les vieilles parcelles laissées en jachère. Si des semis d'automne ont pu être mis en œuvre dans ces travaux expérimentaux, les semis de printemps ont été privilégiés, notamment à Hambach (tabl. 1).

Au moins trois autres expérimentations sont à signaler. Le projet Butser Ancient Farm (1973-2007) dans le Hampshire (Angleterre) avait pour objectif initial de mieux comprendre l'économie agricole du second âge du Fer et du début de la période romaine (400 BC-400 AD), et incluait l'amidonniage dans les cultures (Reynolds, 1977, 1979, 1999). Deux autres expérimentations d'agriculture néolithique ont été menées sous climat plus continental en République tchèque dans les années 1980 (Kazdová, 1983 ; Beranova, 1993).

### *Objectifs et limites de l'expérimentation du parc de la Haute-Île*

L'expérimentation d'agriculture menée sur l'archéosite avait pour objectif de tester la culture de petits champs permanents, en appliquant différentes méthodes

de fertilisation et de récolte, et avec une intensité de travail minimale, c'est-à-dire pas de désherbage après les semis, pas d'irrigation et un apport faible de fumure. Ce système agricole n'a, à notre connaissance, jamais été expérimenté en Europe tempérée occidentale.

Tout comme les projets expérimentaux cités précédemment, l'expérimentation du parc de la Haute-Île ne visait pas à reproduire scrupuleusement l'aspect d'un champ néolithique (Lüning *et al.*, 1980). L'équipe engagée dans le projet d'expérimentation n'avait pas de compétences pratiques en agriculture céréalière. Le temps de travail dévoué aux actions de terrain était limité, comparé au temps que pouvaient probablement consacrer les hommes et femmes du Néolithique à leurs parcelles cultivées. Pour cette dernière raison, un désherbage manuel fréquent et un apport élevé de fumure n'étaient pas envisageables. De plus, au parc de la Haute-Île, le milieu cultivé s'inscrit dans un cadre environnemental incluant la végétation environnante, la topographie et l'hydrographie, qui a sensiblement changé depuis le début de l'Atlantique récent. Par exemple, la flore adventice est composée non seulement de taxons de type indigènes et d'archéophytes, c'est-à-dire, arrivés avec l'introduction des céréales, mais aussi des espèces néophytes. Ces dernières correspondent aux plantes arrivées à partir du *xvi<sup>e</sup>* siècle comme la datura (*Datura stramonium*) puis naturalisées en Europe (Brun, 2008). En outre, les parcelles cultivées constituaient un lieu de médiation et de recherche, et non un lieu de vie, ce qui est en soi un facteur limitant, par exemple, pour le développement de la flore adventice en lien avec l'anthropisation du milieu dans le cas d'une céréaliculture vivrière (Rösch *et al.*, 2017).

Enfin, plusieurs contraintes non prévisibles nous ont obligés à modérer nos ambitions scientifiques. D'une part, l'accès au parc de la Haute-Île n'a pas été possible au printemps 2020 en raison des restrictions de déplacement dues à la crise sanitaire. Les relevés de la flore adventice sur les parcelles et les semis de printemps de céréales et de légumineuses n'ont donc pas pu être réalisés lors de l'année 2 (2019-2020). Les travaux de terrain à partir de l'automne 2020 et l'assolement prévu lors de l'année 3 (2020-2021) n'ont pas pu être anticipés. L'expérimentation, prévue à l'origine sur cinq années agricoles, a dû être arrêtée précocement. Ainsi, la relative courte durée de l'expérimentation (2017-2020) offre une fenêtre temporelle réduite pour tester les méthodes de fertilisation des parcelles et observer la dynamique du cortège d'adventices sur la longue durée. D'autre part, la perte des récoltes de la parcelle menée en métairie lors de l'année 1, sur son lieu de stockage au parc de la Haute-Île, limite l'analyse du rendement et du comportement des céréales vêtues cultivées sous ce mode de semis.

L'expérimentation a néanmoins permis d'acquérir des référentiels des rendements des parcelles en monoculture sur trois années consécutives, ainsi que de la composition de la flore adventice sur les parcelles de céréales et après leur traitement (battage, tamisage) pendant deux années successives. Les principales questions sous-jacentes au projet expérimental sont les suivantes :

| Site                                  | Chassemy                                                                                                                                                                           | Hambacher Forst                                                                 | Forchtengberg                                                                               | Parc de la Haute-Île                                                                                                                               |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Années                                | 1982-1983                                                                                                                                                                          | 1979-1984                                                                       | 1998-2012                                                                                   | 2017-2020                                                                                                                                          |
| Localisation                          | Vallée de l'Aisne (France)                                                                                                                                                         | Rhénanie-du-Nord-Westphalie (Allemagne)                                         | Baden-Württemberg (Allemagne)                                                               | Seine-Saint-Denis (France)                                                                                                                         |
| Milieu                                | Dépôts alluvionnaires de la Vesle, texture sableuse acide, faible teneur en matière organique                                                                                      | Terrasse principale du Rhin, sables et graviers sous loess argileux. Sol acide. | Plaine légèrement vallonnée. Sols limoneux.                                                 | Dans paléoméandre de la Marne. Sols limono-sableux.                                                                                                |
| Altitude                              | 69 m                                                                                                                                                                               | 76 m                                                                            | 320 m                                                                                       | 80 m                                                                                                                                               |
| Cumul moyen des précipitations/ an    | 730 mm                                                                                                                                                                             | 989 mm                                                                          | 860 mm                                                                                      | 639 mm                                                                                                                                             |
| Température moyenne/an                | 11°C                                                                                                                                                                               | 11°C                                                                            | 9°C                                                                                         | 14°C                                                                                                                                               |
| Etat initial du terrain expérimental  | Taillis sous futaie peu riche, chêne pédonculé et bouleau                                                                                                                          | Sylviculture depuis plusieurs siècles. Forêt fermée. Chênaie-charmaie           | Forêt mixte décidue avec haute diversité taxonomique. Chênaie-charmaie et hêtraie-chênaie   | Clairière sur une butte entourée d'une zone boisée                                                                                                 |
| Mode de préparation des sols          | Brûlis d'un apport d'éléments végétaux + houe                                                                                                                                      | Brûlis + houe rotative                                                          | Brûlis, sans brûlis, et sans labour                                                         | Aération superficielle. Pas de brûlis.                                                                                                             |
| Outils utilisés                       | Plautoir (morceau de bois), bâton à fouir, houe                                                                                                                                    | Charrue en bois, engin motorisé. Crochets à manches courts et à manche long.    | Bâton en bois, hâche néolithique                                                            | Aérobêche, houe métallique, crochets à manche court                                                                                                |
| Espèces semées                        | <i>Triticum aestivum/compactum</i> (dit amidonnier vêtu dans Firmin 1984, p.97), <i>Hordeum vulgare</i> (escourgeon) var. <i>nudum</i> et variété vêtue, <i>Triticum compactum</i> | Orge, amidonnier, engrain, épeautre                                             | <i>T. aestivum</i> , <i>T. turgidum</i> subsp. <i>dicoccon</i> , <i>Hordeum hexastichon</i> | <i>Triticum turgidum</i> subsp. <i>dicoccon</i> , <i>T. monococcum</i> , <i>Pisum sativum</i> , <i>Lens culinaris</i> , <i>Linum usitatissimum</i> |
| Méthode de semis                      | Sillon, poquet                                                                                                                                                                     | Sillon                                                                          | Poquet                                                                                      | Poquet, à la volée (année test), sillons                                                                                                           |
| Taille parcelle × nombre de parcelles | 25 m <sup>2</sup> × 5                                                                                                                                                              | 9 m <sup>2</sup> × 20                                                           | 90 m <sup>2</sup> × 34                                                                      | 31,5 m <sup>2</sup> × 4                                                                                                                            |
| Saisonnalité                          | Printemps (année 1 : 1982) et automne (année 2 : 1982-1983)                                                                                                                        | Printemps 1979-1984                                                             | Printemps (blé nu), hiver et printemps (amidonnier et orges)                                | Hiver et printemps (2018-2019)                                                                                                                     |
| Désherbage                            | Oui et non                                                                                                                                                                         | Oui et non                                                                      | Oui et non                                                                                  | Non                                                                                                                                                |
| Références principales                | Firmin 1984, 1991                                                                                                                                                                  | Lüning <i>et al.</i> , 1980 ; Meurers-Balke et Lüning, 1990 ; Bogaard, 2002     | Rösch <i>et al.</i> , 2002, 2011, 2017 ; Ehrmann <i>et al.</i> , 2007                       | -                                                                                                                                                  |

**Tabl. 1** – Présentation synthétique des expérimentations d'agriculture de type néolithique en Europe dans un climat tempéré océanique humide.

**Table 1** – Synthetic presentation of the Neolithic-type experiments in Europe in humid oceanic temperate climate.

- La culture à faible intrant organique sans désherbage bénéficie-t-elle plutôt à l'un ou l'autre des deux blés vêtus dans les parcelles en monoculture et en mûre ?

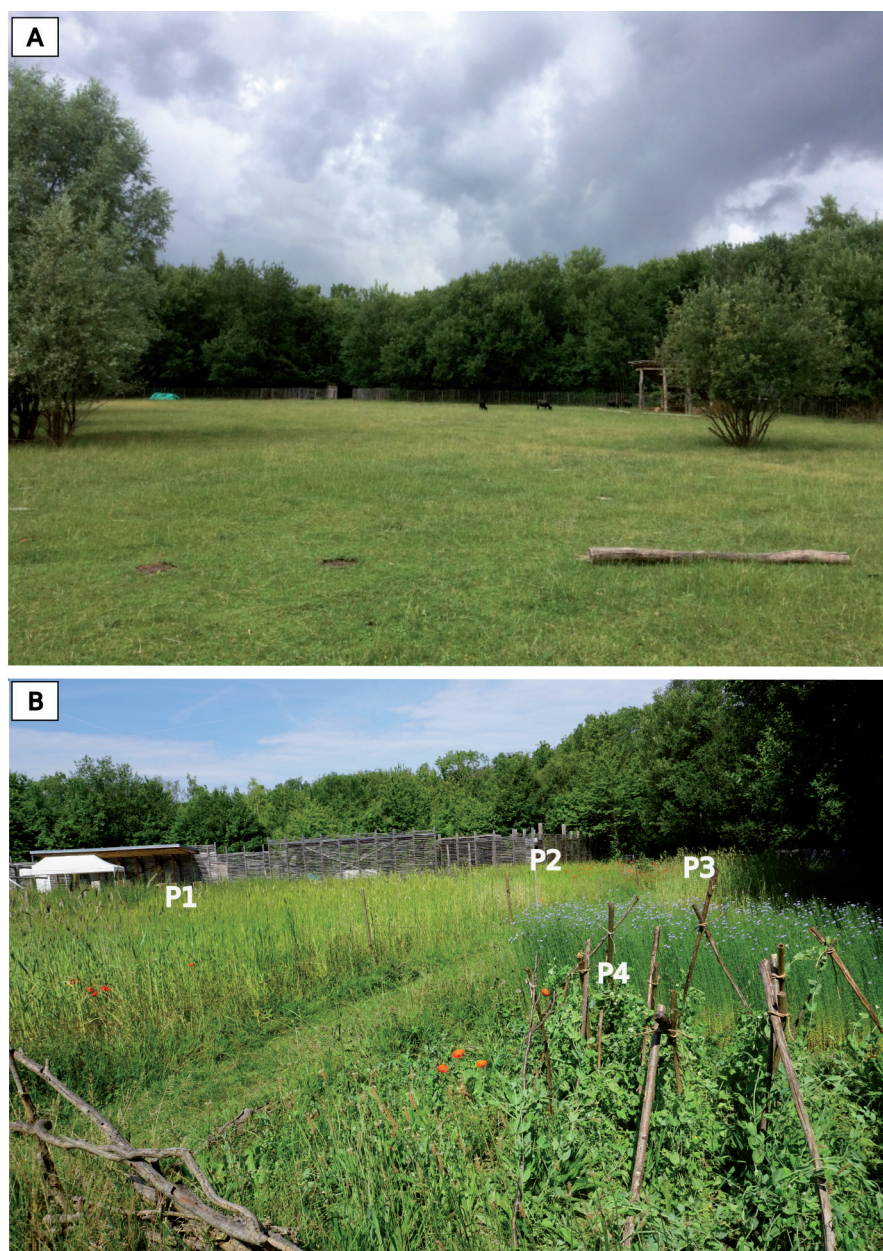
- La fertilisation des sols a-t-elle un effet sur les rendements des céréales vêtues à court terme ?

- Quelle est la composition de la flore sauvage présente dans les parcelles cultivées, quelle est son origine, est-elle représentative des modes de culture ? La flore adventice relevée dans les lots de récolte après leur traitement reflète-t-elle la diversité relevée sur les parcelles agricoles ?

L'ambition plus générale de l'expérimentation du parc de la Haute-Île est d'apporter des nouveaux éléments d'interprétation des assemblages archéobotaniques, particulièrement sur les questions des choix de céréales vêtues (amidonnier et engrain) et des méthodes d'interprétation des cortèges floristiques des assemblages carpologiques dans le cadre d'une culture céréalière avec un taux de fertilisation et un travail du sol minimaux.

## MISE EN ŒUVRE DE L'EXPÉRIMENTATION

Les bases de l'expérimentation ont été préparées en amont grâce à la littérature archéobotanique, archéologique et aux travaux expérimentaux qui ont déjà été menés en Europe tempérée occidentale (*supra*). L'expérimentation s'est déroulée sur trois années agricoles, c'est-à-dire des semis d'automne aux récoltes estivales, incluant une année test (2017-2018). Cette dernière visait à essayer différentes méthodes de semis, familiariser l'équipe aux travaux agricoles et évaluer le temps nécessaire pour chaque tâche, c'est-à-dire la préparation des sols, les semis, la récolte, le suivi des cultures. Au cours des deux années suivantes (2018-2019 et 2019-2020), deux assolements ont été expérimentés incluant deux méthodes de fertilisation : l'amendement par apport de fumure animale et la rotation avec des légumineuses.



**Fig. 2 – A**, état initial de la clairière, 30 juin 2017 ; **B**, vue d'ensemble de l'assolement de l'année 1 (2018-2019) et localisation des parcelles. Les légumineuses sont semées dans la P4, le lin est en fleur (clichés : A. Salavert).

**Fig. 2 – A**, the initial clearing, June 30, 2017; **B**, overview of the crop rotation of year 1 (2018-2019) and location of the plots. Pulses are sown in P4, flax is in flower (photos: A. Salavert).

Pour optimiser le temps de travail dédié à l'expérimentation, seules les parcelles céréalières ont été exploitées dans les axes de recherche.

### État initial du site expérimental

L'état initial du site est une clairière herbeuse, riche en graminées, trèfles et autres plantes de prairie, pâturée par les brebis solognotes du parc (fig. 2A). La clairière est entourée d'une zone boisée. Les taxons ligneux composant la lisière sont essentiellement des rosacées (*Prunus* spp., *Rubus* spp., *Crataegus*...), des saules (*Salix caprea*) et des érables (*Acer* spp.). La clairière n'a pas connu d'activités agricoles depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. L'analyse des sols

réalisée par le Laboratoire d'analyses microbiologiques des sols a montré une compaction du sol engendré par les travaux archéologiques réalisés dans la clairière dans les années 2000 et un envahissement de l'espace par des plantes de type chénopode et chardons (Bourguignon *et al.*, 2016). La texture du sol est limono-sableuse en surface, avec une hydromorphie localisée et en profondeur. Le Ph est basique (>8,2). L'horizon de surface des sols (<60 cm) présente une bonne qualité en matière organique, une teneur élevée en azote et en potasse, et une population importante de vers de terre.

L'état initial du site, aussi bien du point de vue de la granulométrie, de la structure chimique, biologique et de la diversité floristique a été conditionné par les



**Fig. 3 – A**, engrain noir de Turquie (*Triticum monococcum*) ; **B**, amidonnier de Soubise (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccon*), **C**, deux variétés d'amidonner et deux variétés d'engrain (jaune et noir) semées en métairie (clichés : A. Salavert).

**Fig. 3 – A**, black einkorn (*Triticum monococcum*); **B**, emmer (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccon*); **C**, two varieties of einkorn and emmer (yellow and black) sown in maslin (photos: A. Salavert).

remaniements liés aux activités archéologiques d'une part, et à son usage, dédié depuis une dizaine d'années, au pâturage des brebis d'autre part. Le sol initial est doté d'une fertilité inhérente élevée.

### Semences et assolement annuel

Les plantes choisies sont les deux blés vêtus emblématiques de la période rubanée, l'amidonner (*Triticum turgidum* subsp. *dicoccon*) et l'engrain (*Triticum monococcum*) (fig. 3). Le choix de deux légumineuses, le pois (*Pisum sativum*) et la lentille (*Lens culinaris*) a été conditionné par la volonté d'expérimenter la rotation avec des légumineuses comme méthode de fertilisation. De plus, il s'agissait de présenter la diversité des plantes cultivées par les agriculteurs pionniers du bassin de la Seine dans le cadre des activités de médiation de l'archéosite. Pour cette dernière raison, une plante oléagineuse, le lin (*Linum usitatissimum*), a été intégrée à l'assolement en plus des légumineuses. Pour les premiers semis de l'année test, les variétés sélectionnées provenant des récoltes 2017 ont été données par J.-F. Berthelot de la Ferme du Roc dans le Lot-et-Garonne (France). Une variété d'amidonner (amidonner de Soubise) et une variété d'engrain (engrain noir de Turquie) ont chacune été semées en monoculture. Deux variétés d'amidonner et deux variétés d'engrain ont été semées en métairie.

La surface totale consacrée à l'expérimentation agricole est de 180 m<sup>2</sup>. Une bande de deux mètres de largeur a été prévue à l'interface des parcelles. La surface de chacune des quatre parcelles, dénommées P1 à P4, est de 31,5 m<sup>2</sup> (fig. 1A, tabl. 2). Chaque année, trois parcelles ont été dédiées à la culture des céréales vêtues, et une parcelle au semis de lin, de pois et de lentilles, pour un tiers de la surface chacun. Lors de l'année test, les sols n'ont pas été fertilisés en raison de leur haute fertilité inhérente. Les parcelles céréalières ont été cultivées soit

en monoculture d'amidonner (P1) et d'engrain (P2), soit en métairie (P4). Lors des deux années suivantes, les plans d'assolement ont prévu une parcelle de céréales n'ayant jamais subi de fertilisation (toujours P1), une autre amendée avec de la fumure (semis d'hiver et de printemps) et une autre succédant à une culture de légumineuses (fig. 2B). La rotation complète comprenant la culture de céréales sans intrants (année test), suivie d'une culture de légumineuses (année 1) puis d'une culture de céréales avec amendement par fumure (année 2) n'a pu être accomplie que sur une parcelle (P3). Au cours des trois années expérimentales, un total de 2,260 kg d'épillettes a été semé, toutes espèces et variétés confondues (tabl. 2).

### Outils

Il n'y a pas d'outils clairement identifiés comme ayant servi à la préparation des sols tels que son ameublissement, sur les sites du Rubané. Aucune évidence directe (pathologie osseuse sur les animaux, joug, iconographie) ou indirecte (p. ex. travaux de traction animale n'est attestée au Néolithique ancien en Île-de-France probablement en raison des conditions taphonomiques non favorables. L'araire et la charrue ne semblent pas apparaître avant le milieu du 4<sup>e</sup> millénaire en Europe (Pétrequin *et al.*, 2006).

Lors des expérimentations de Hambach et de Chassemy, une réplique de houe à crochet en bois, semblable au pic en érable découvert dans un puits à Erkelenz-Kückhoven en Allemagne (Weiner, 1992 ; Broes et Bosquet, 2007 : fig. 3) a été testée sur un sol ameubli au préalable par la pratique du brûlis, sans efficacité avérée (Lüning *et al.*, 1980 ; Firmin, 1984 ; Bakels, 2009). Sur l'archéosite, des houes à crochet expérimentales ont également été utilisées lors de l'année test. Cette expérience n'a pas été concluante en raison de la difficulté de pénétration de l'outil dans le sol, probablement en raison de l'angle

| Année                  | Parcelle | Taxon              | Fertilisation  | Semis   | Saison    | Surface (m <sup>2</sup> ) | Poids semé (gr) | Poids récolté (kg) | Rendements calculés |       |
|------------------------|----------|--------------------|----------------|---------|-----------|---------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-------|
|                        |          |                    |                |         |           |                           |                 |                    | ratio               | kg/ha |
| Année-test (2017-2018) | P1_A     | Amidonnier         | Sans           | Sillons | Hiver     | 15,75                     | 140             | 1,458              | 1:10                | 926   |
|                        | P1_B     | Amidonnier         | Sans           | Volée   | Hiver     | 15,75                     | 150             | 0,763              | 1:5                 | 484   |
|                        | P2_A     | Engrain            | Sans           | Sillons | Hiver     | 15,75                     | 100             | 2,315              | 1:23                | 1470  |
|                        | P2_B     | Engrain            | Sans           | Volée   | Hiver     | 15,75                     | 150             | 2,076              | 1:14                | 1318  |
|                        | P3       | Légumineuses + lin | Sans           | Divers  | Printemps | 31,5                      | -               | -                  | -                   | -     |
|                        | P4_A     | Méture             | Sans           | Poquet  | Hiver     | 15,75                     | 70              | 0,34               | 1:5                 | 216   |
|                        | P4_B     | Méture             | Sans           | Volée   | Hiver     | 15,75                     | 150             | 0,372              | 1:2,5               | 236   |
| Année 1 (2018-2019)    | P1_A     | Amidonnier         | Sans           | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 75              | 0,774              | 1:10                | 983   |
|                        | P1_B     | Engrain            | Sans           | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 75              | 0,94               | 1:12,5              | 1194  |
|                        | P1_C     | Méture             | Sans           | Sillons | Hiver     | 15,75                     | 150             | -                  | -                   | -     |
|                        | P2_A     | Amidonnier         | Fumure (2t/ha) | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 75              | 0,322              | 1:4                 | 409   |
|                        | P2_B     | Engrain            | Fumure (2t/ha) | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 75              | 1,046              | 1:14                | 1329  |
|                        | P2_C     | Amidonnier         | Fumure (2t/ha) | Sillons | Printemps | 7,87                      | 75              | 0                  | 0                   | 0     |
|                        | P2_D     | Engrain            | Fumure (2t/ha) | Sillons | Printemps | 7,87                      | 75              | 0,831              | 1:11                | 1056  |
|                        | P3_A     | Amidonnier         | Rotation       | Sillons | Hiver     | 15,75                     | 150             | 1,084              | 1:7                 | 688   |
|                        | P3_B     | Engrain            | Rotation       | Sillons | Hiver     | 15,75                     | 150             | 1,772              | 1:12                | 1125  |
|                        | P4       | Légumineuses + lin | Sans           | Divers  | Printemps | 31,5                      | -               | -                  | -                   | -     |
| Année 2 (2019-2020)    | P1_A     | Amidonnier         | Sans           | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 75              | 0,553              | 1:7                 | 703   |
|                        | P1_B     | Engrain            | Sans           | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 75              | 1,325              | 1:18                | 1683  |
|                        | P1_C     | Méture             | Sans           | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 150             | 1,48               | 1:10                | 943   |
|                        | P2       | -                  | -              | -       | -         | -                         | -               | -                  | -                   | -     |
|                        | P3_A     | Amidonnier         | Fumure (2t/ha) | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 75              | 1,276              | 1:17                | 1620  |
|                        | P3_B     | Engrain            | Fumure (2t/ha) | Sillons | Hiver     | 7,87                      | 75              | 1,041              | 1:14                | 1322  |
|                        | P4_A     | Amidonnier         | Rotation       | Sillons | Hiver     | 15,75                     | 150             | 1,74               | 1:12                | 1105  |
|                        | P4_B     | Engrain            | Rotation       | Sillons | Hiver     | 15,75                     | 150             | 2,091              | 1:14                | 1328  |

**Tabl. 2** – Assolements réalisés avec la surface, le poids des épillets semés et le rendement obtenu sur chaque sous-parcelle pour les trois années expérimentales. Le ratio correspond au poids en grammes d'épillets récoltés divisé par le poids en grammes d'épillets semés. Le calcul en kg par hectare (kg/ha) est donné à titre indicatif.

**Table 2** – Crop rotation carried out each year with area and weight of sown spikelets. The ratio of the area, weight of sown spikelets and yield obtained on each subplot for the three experimental years. The ratio corresponds to the weight in grams of spikelets harvested divided by the weight in grams of spikelets sown. The calculation in kg per hectare (kg/ha) is given as an indication.

d'attaque de son crochet (60°), de la légèreté de l'outil et de son manche court qui ne le destinent pas au travail du sol. Cela est d'autant plus vrai lors de l'année test car la surface à préparer présentait une grande densité racinaire. Le brûlis n'a pas pu être employé pour aider à la préparation initiale du sol en raison de contraintes sécuritaires liées au statut du parc de la Haute-Île (site du réseau Natura 2000 en milieu urbain). Le choix technique s'est donc orienté vers l'aérobèche que nous supposons agir dans la limite des capacités des outils agricoles néolithiques en bois ou en pierre. L'aérobèche est un outil à dents métalliques facile à manipuler, qui permet de décompacter et aérer les sols en surface sans retournement de la terre (fig. 4A).

La préparation du sol des parcelles a donc consisté à (1) décompacter la couche superficielle du sol en cassant les racines d'herbacées à l'aide d'une aérobèche, (2) bri-

ser à la houe métallique les mottes de terres herbeuses obtenues après le passage de l'aérobèche. Ce protocole a le plus souvent été suivi deux fois sur chaque parcelle de céréale. Le travail de préparation du sol s'est avéré laborieux, en particulier sur toutes les parcelles lors de l'année test ainsi que sur la parcelle cultivée sans fertilisation (P1) les deux années suivantes. En effet, la rotation avec les légumineuses ameublait le sol et facilite considérablement sa préparation avant les semis.

### Fertilisation

L'analyse de la composition isotopique en carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et en azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) des grains de plantes cultivées, essentiellement des céréales, permet d'étudier leurs conditions de croissance, et d'appréhender les questions d'irrigation et du maintien de la fertilité de sols grâce



**Fig. 4 – A**, préparation du sol à l'aérobèche, année test ; **B**, préparation de la fumure composée d'un mélange de fumier et de paille pour l'année 2 (2019-2920) ; **C**, semis dans les sillons tracés à la houe à crochet, année 1 ; **D**, levée de l'engrain, année test, avril 2018 (clichés : A. Salavert).

**Fig. 4 – A**, soil preparation, test year; **B**, manure preparation composed of a mix of cattle dung and straw for the year 2; **C**, sowing in furrows traced with a wooden hoe, year 1; **D**, einkorn, April 2018 (photos: A. Salavert).

aux pratiques de fertilisation et de rotation des cultures (Fiorentino *et al.*, 2015). Encore jamais réalisées en France pour le Rubané, des études portant sur les questions d'amendement organique ont été menées sur les sites de Vaihingen-en-der-Enz (Allemagne) ainsi que de Brzezine 17 et d'Iwanowice-Klin (Pologne). Ces travaux suggèrent un apport faible (apport nul/ha) à modéré (10-15t/ha) de fumure sur les parcelles (Bogaard *et al.*, 2013 ; Mueller-Bieniek *et al.*, 2019). Les mesures de référence ont été obtenues sur des champs expérimentaux amendés à différents taux (Bogaard *et al.*, 2013). Un ouvrage sur l'enjeu du fumier dans la productivité agricole du milieu du <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle, décrit des apports en fumure plus modestes qui pouvaient aller de 1,5 à 3t/ha (Voisin, 1953). L'emploi d'un amendement organique d'origine animale au Néolithique ancien permet de proposer l'hypothèse d'une forte intégration agriculture/élevage dès les premiers systèmes agricoles en Europe tempérée occidentale. Sa qualité

dépend du type d'animal, de leur alimentation et de son mode de préparation, en tas ou en fosse par exemple (Brunet et Beuret, 1901). Le mode de préparation de la fumure, comme sa composition et les structures associées (fosse, tas), n'est cependant pas connu pour les périodes néolithiques. De plus, le fumier peut également être déposé lors du pacage des animaux sur les champs moissonnés ou récoltés. Concernant l'intégration des légumineuses dans la rotation des cultures, il n'y a pas de preuve directe de cette pratique au Néolithique ancien. Les légumineuses, comme le pois ou la lentille, fixent l'azote atmosphérique et le transforment en azote biologique. Cet azote est recyclé et sert le reste de l'écosystème cultivé. Il est indispensable pendant toutes les phases de développement des plantes. La disponibilité en azote du sol est ainsi plus élevée pour les céréales ensemencées après une culture de pois par exemple. Les deux méthodes de fertilisation (fumure, rotation) ont donc été testées au parc de la Haute-Île.

Concernant les quantités de fumure à appliquer, le choix s'est orienté vers un amendement faible afin de tester l'effet sur les rendements et sur le signal isotopique ( $\delta^{15}\text{N}$ ) des céréales expérimentales. La première année, la fumure a été composée d'un mélange de fumier de brebis et de vaches highlands (1/3 brebis, 2/3 vache) élevées sans apport d'antibiotiques sur le parc, et exclusivement de fumier de bovins l'année suivante. Le fumier a été prélevé au printemps sur les zones de pâturage ou en bergerie ; il a été laissé à décomposer en tas à proximité du site mélangé à de la terre et de l'herbe ou de la paille, puis déposé sur les parcelles environ deux à trois semaines avant les semis (fig. 4B). Lors des années 1 et 2, environ huit seaux de fumier par parcelle, correspondant à environ 80 litres, soit l'équivalent calculé de 2t/ha, ont été introduits. Concernant les légumineuses, une fois les plants secs, les pieds de petit pois et de lentilles ont été arrachés lors de l'année test et coupés en bas de tige lors de l'année 1 pour laisser les racines en place.

### Semis

Lors de l'année test, trois techniques de semis (sillon, volée, poquet) ont été testées. Au moment des semis, le poids d'épillets semés par  $\text{m}^2$  s'est révélé légèrement plus élevé avec la méthode de la volée, la méthode du poquet étant la plus économique (tabl. 2). Du point de vue de la préparation du terrain et de la rapidité d'exécution, les semis à la volée sont plus faciles à mettre en œuvre que les semis en sillons. Néanmoins, lors des deux années suivantes, seule la technique du semis en sillon a été utilisée car elle a offert de meilleurs rendements lors de l'année test (*infra*) et une plus grande facilité de récolte (fig. 4C et 4D). Pour chaque parcelle céréalière, le total des grains semés se monte à environ 10 g par  $\text{m}^2$  (tabl. 2). Les semences initiales fournies par J.-F. Berthelot, sont des variétés semées à l'automne (culture d'hiver). Seuls les semis d'automne ont été testés lors de l'année test (2017-2018) et l'année 2 (2019-2020). Les semis d'automne et de printemps ont été expérimentés lors de l'année 1 (2018-2019). Ils ont eu lieu entre fin octobre et début novembre pour ceux d'automne, et mi-mai pour ceux du printemps 2019.

### Récoltes et traitements post-récolte

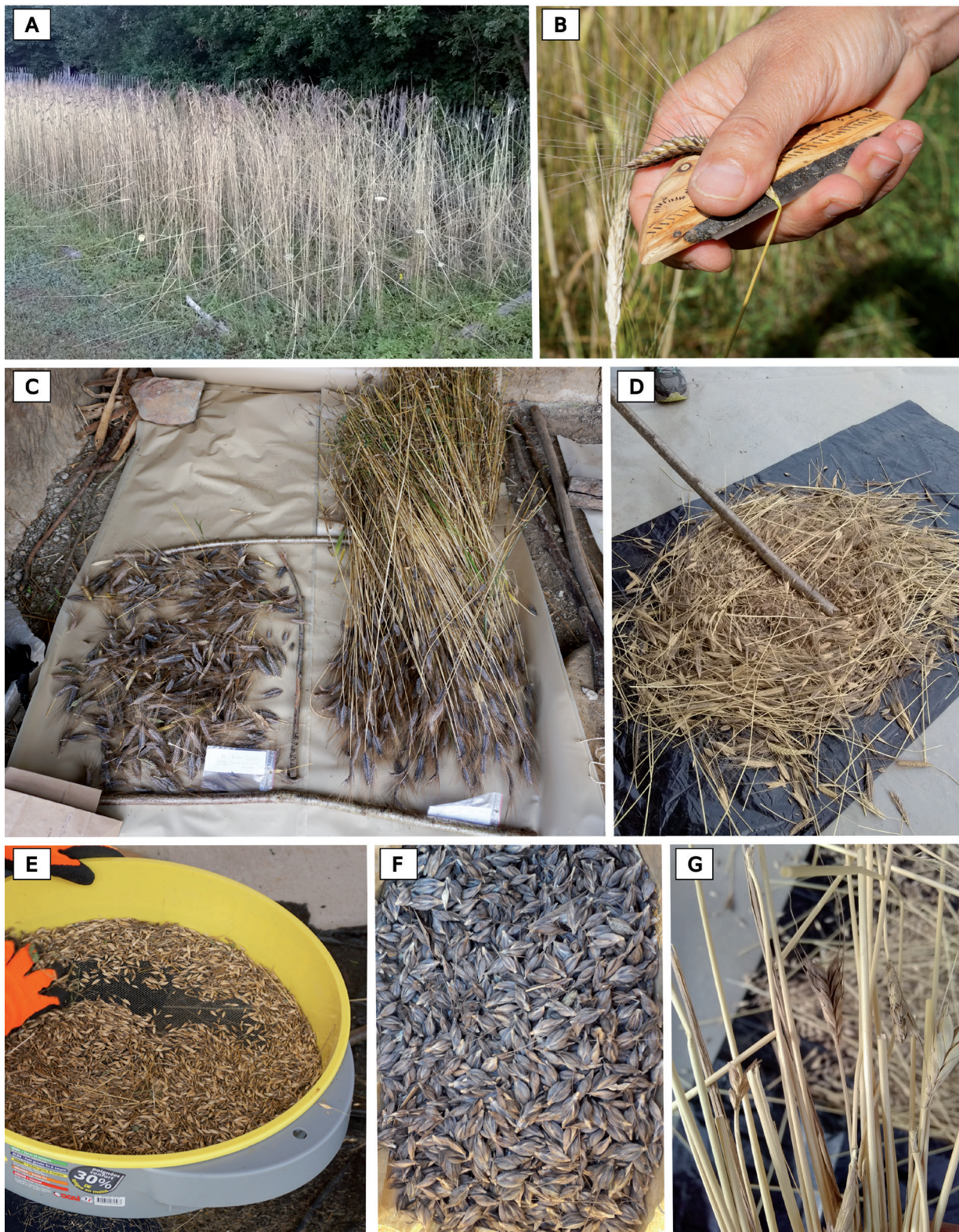
Il n'y a pas eu de dommages visibles liés à l'attaque de nuisibles tels que les mulots, les oiseaux, les souris et les lapins, ces deux derniers ayant fait de nombreux ravages dans les champs expérimentaux respectivement de Hambach et de Forchtenberg (Lüning *et al.*, 1980 ; Rösch *et al.*, 2002). Au moment des récoltes, le phénomène de verse a été constaté lors de l'année test sur la parcelle en métairie, récoltée 20 jours après les parcelles en monoculture, et lors de l'année 2 en bordure des parcelles d'amidonnière (fig. 5A). Néanmoins, ce phénomène n'a pas affecté les rendements, car les épis

des plants concernés n'ont pas été endommagés et ont donc été récoltés. Chaque année, les récoltes ont eu lieu entre le 10 et le 30 juillet en fonction de la maturité des épis des deux blés vêtus et de la disponibilité de l'équipe participant à la mise en œuvre de l'expérimentation. Il n'a pas été noté un retard dans le murissement de l'engrain, réputé plus tardif. Les céréales ont été récoltées avec des répliques d'outils néolithiques (deux faucilles et un couteau à moissonner, fig. 5B). Pour chaque parcelle et demi-parcelle, une moitié de la surface semée a été récoltée en haut de la tige, l'autre moitié en bas de la tige afin d'expérimenter les différentes techniques et d'évaluer la diversité des graines d'adventices résiduelles dans les stocks après traitement (fig. 5C). Les épis n'atteignant pas tous la même hauteur dans une parcelle, la récolte en bas de tige s'est avérée plus rapide à mettre en œuvre que la récolte en haut de la tige qui contraint à une récolte épi par épi. De plus, avec cette dernière méthode, un second passage est nécessaire pour enlever les chaumes restés sur les parcelles. En pratique, la récolte simultanée de plusieurs épis ayant à peu près la même hauteur est possible, mais peu aisée à mettre en œuvre. De plus, à titre d'information, l'engrain est très facile et rapide à récolter par simple arrachage du plant entier.

L'étape de traitement des céréales a consisté à dépiquer les épis, c'est-à-dire à séparer les grains du rachis, avant le stockage. Cette étape n'a pas fait l'objet d'un protocole d'expérimentation dédiée. Dans un premier temps, les céréales ont été battues au bâton droit (fig. 5D). Les résidus de battage ont ensuite été tamisés (tamis de 4 mm, fig. 5F). Le vannage a seulement été testé lors de l'année test, mais s'est avéré difficile à maîtriser dans un court laps de temps. En effet, le geste technique nécessite un apprentissage incluant la prise en compte de la force du vent. Afin de ne pas surévaluer le poids d'épillets récoltés et biaiser les rendements, les plus gros fragments de paille restants ont été triés à la main avant le stockage des épillets dans des sacs en papier épais (fig. 5G). Les premiers épillets à la base de l'épi d'engrain à maturité restent régulièrement accrochés au haut de la tige (fig. 5E). Ces parties ont alors été désarticulées à la main.

### Météorologie

Les températures moyennes ont été homogènes pour les trois années agricoles, avec néanmoins, une moyenne inférieure de 10 °C lors de l'année test en février par rapport aux autres années (fig. 6). Les cumuls de précipitation ont été variables avec, pour les trois années, un mois de juillet assez sec et un fort ensoleillement. Le cumul des précipitations printanières a été assez modéré lors de l'année 2 comparé aux deux années précédentes. Lors de l'année 1, la sécheresse des mois de septembre et octobre, couplée à un fort ensoleillement, ont rendu le travail du sol très difficile à l'automne.



**Fig. 5 – A**, verse de tiges d’amidonnier en bordure de parcelle (P3\_A), 28 juillet 2020 ; **B**, récolte à l’épi avec une réplique de couteau à moissonner (confection : F. Pichon et F. Abb s, UMR5133) ; **C**, produit de récolte de la parcelle d’amidonnier (P1) lors de l’année test, à gauche récolte à l’épi, à droite récolte en bas de tige ; **D**, battage des céréales r colt es en bas de tige ; **E**, tamisage des produits de battage (cliché : C. Bouchaud), **F**, stockage des épillets d’amidonnier après battage, tamisage et tri des plus gros fragments de chaume r siduels ; **G**,  pillets restant accroch s à la tige d’engrain après battage (clichés : A. Salavert, sauf mention contraire).

**Fig. 5 – A**, emmer stalk lodging at the edge of the plot (P3\_A), July 28th, 2020; **B**, ear harvesting with a replica knife (confection: F. Pichon and F. Abbās, UMR5133); **C**, harvested emmer (P1) during the test year - on the left harvested at the ear, on the right harvested at the bottom of the stalk; **D**, threshing of cereals harvested at the bottom of the stalk; **E**, sieving of threshing products (photo: C. Bouchaud), **F**, storage of emmer spikelets after threshing, sieving and sorting of the largest residual straw fragments; **G**, einkorn spikelets remaining on the stalk after threshing (photos: A. Salavert).



**Fig. 6** – Données météorologiques des trois années agricoles, issues des relevés réalisés à Montsouris-Paris, à environ 13 km à l'ouest de l'archéosite (source : [www.infoclimat.fr](http://www.infoclimat.fr)).

**Fig. 6** – Weather conditions for the three agricultural years. Surveys from Montsouris-Paris, about 13 km west of the "archéosite" (source: [www.infoclimat.fr](http://www.infoclimat.fr)).

## MÉTHODES

### Mode de calcul des rendements

Les épillets ont été pesés sur une balance de cuisine électronique après la dernière étape de traitement des récoltes (tamisage) et avant leur stockage. La pesée a été réalisée le même jour pour toutes les parcelles, afin d'éviter une potentielle différence du taux d'humidité résiduelle des grains. Pour la méture, les épis d'engrain et d'amidonniér ont été séparés par identification visuelle avant l'étape du battage et de tamisage. Les épillets des

deux espèces ont ensuite été pesés séparément. Un total de 23,6 kg d'épillets a ainsi été récolté pendant toute la durée de l'expérimentation (tabl. 2).

Le mode de calcul des rendements choisis est le rendement vrai (Paillet, 2005), calculé en divisant le poids d'épillets récoltés sur le poids d'épillets semés, appelé ci-après ratio ou rendement. Les objectifs sont d'observer (1) s'il y a un taxon dominant (engrain ou amidonniér) au cours de l'expérimentation dans les parcelles en monoculture et la parcelle en méture, (2) s'il y a des différences de productivité entre les parcelles et sous-parcelles en fonction des modes de semis pour l'année test (volée, poquet,

sillons), des modes de fertilisation des sols (fumure, rotation avec des légumineuses, sans fertilisation) et de la saisonnalité des semis pour l'année 1 (automne, printemps).

### Relevés de la flore adventice et caractérisation

#### *Relevés qualitatifs*

Dans le cadre de l'expérimentation, les problématiques susceptibles d'être abordées par l'étude de la flore adventice concernent principalement les modes de culture. Les caractéristiques biologiques et les exigences écologiques des herbacées sauvages associées aux cultures peuvent refléter la saisonnalité des semis, l'intensité du travail du sol (profondeur des labours, rythme de désherbages) ainsi que certaines pratiques telles que la fumure ou l'irrigation. L'approche FIBS (Functional Interpretation of Botanical Surveys), développée par le laboratoire de Sheffield en Angleterre, étudie ces relations pour interpréter les assemblages archéologiques (Charles *et al.*, 1997). Elle relie certains attributs des plantes dits « fonctionnels » ou encore appelés « traits de vie », tels que leur type biologique (p. ex. annuelle, vivace), la période et la durée de leur floraison, à leur capacité à survivre ou à se régénérer rapidement dans certaines conditions. Cette approche permet donc, en théorie, de caractériser les systèmes de culture (Bogaard, 2004). Cependant, toutes les espèces adventices présentes dans les champs au moment de la récolte ne sont pas représentées dans les assemblages carpologiques. Différents facteurs interviennent tout au long de la chaîne opératoire agricole qui va de la récolte à la transformation des végétaux avant leur consommation, en passant par leur stockage. Les modes de moisson (haut de tige/bas de tige) et de traitement post-récolte (battage, vannage, tamisage) vont profondément influencer la composition des cortèges à chacun des stades.

Dans le cadre de l'expérimentation, plusieurs questions ont été soulevées en lien avec ces méthodes d'interprétation des cortèges floristiques des assemblages carpologiques. Tout d'abord, la composition des cortèges observés dans les parcelles est-elle véritablement représentative du système de culture ? Comment cette composition évolue-t-elle à chaque stade de la chaîne opératoire agricole (récolte, battage, vannage/tamisage) et demeure-t-elle représentative de celle relevée sur les parcelles ? Quelles parts respectives des cortèges sont liées aux lots de semences initiaux (introduction d'adventices exogènes) et à la flore de la clairière ? Quelle évolution perçoit-on dans la composition des cortèges au fur et à mesure des années et en fonction des pratiques expérimentées ?

Dans les faits, les relevés exhaustifs de chacune des parcelles n'ont pu être réalisés (voir *supra*). Ceux effectués sur le terrain, dits *in situ*, sont des relevés qualitatifs indiquant la présence de la plante, sans notion de fréquence ou d'abondance de la flore adventice, sur les quatre parcelles agricoles et la prairie environnante. Ils concernent les herbacées sauvages des parcelles cultivées

et de la prairie. Ils ont été menés au printemps et au début de l'été de l'année test et de l'année 1. Les relevés ont été réalisés de façon globale pour l'ensemble des parcelles de céréales lors de l'année test, et de façon plus précise à l'échelle de chaque sous-parcelle lors de l'année 1. Cependant, du fait de l'absence de relevés pour l'année 2, l'évolution de la composition des cortèges d'adventices en fonction des modes de culture ne peut être appréhendée. Les relevés des deux premières années ont donc été réunis pour avoir une information plus complète des parcelles céréalières d'une part, et de la prairie d'autre part. Une description botanique, un herbier, une documentation photographique et le recours à des flores régionales (Bonnier et De Layens, 1986 ; Jauzein et Nawrot, 2011) ont permis l'identification taxonomique des adventices.

Les semences d'adventices ont été identifiées dans des échantillons des lots initiaux donnés par M. Berthelot pour les semis de l'année test. Ces échantillons ont été prélevés dans les lots de semis d'engrain (100 ml), d'amidonier (120 ml) et des deux lots composant la métairie (120 ml × 2). Des sous-échantillons des produits céréaliers (stocks) issus du traitement des céréales, différenciés selon les modes de récolte (épi, plante entière) et les stades de traitements (après battage, après tamisage) ont également été prélevés. À ce jour, outre les semis initiaux, seul un sous-échantillon des produits de récolte (300 ml) de la parcelle d'engrain (P2), semé à la volée et récolté en bas de l'épi lors de l'année test a été traité (Auray, 2020). Précisons que cet échantillon correspond à ces céréales transformées par vannage. Pour ces relevés, le tri et l'identification ont été réalisés sous loupe binoculaire sur le plateau d'archéobotanique de l'UMR7209 (MNHN-CNRS) avec l'aide des collections de graines/fruits de référence disponibles sur ce plateau.

#### *Caractères pris en compte*

La caractérisation des herbacées sauvages comprend leur classement par habitat écologique (Julve, 1998 ; Jauzein et Nawrot, 2013) et leur répartition par type biologique, ainsi que les indicateurs autoécologiques, qui expriment les exigences des plantes dans différents domaines comme la lumière et l'humidité édaphique (Julve, 1998). Ce travail de caractérisation s'appuie sur l'analyse des taxons herbacés identifiés à l'espèce et d'un taxon-valise (*Trifolium pratense/repens*) pouvant être analysé comme une espèce, sous l'angle du type biologique et de l'autoécologie.

Ces deux paramètres sont souvent utilisés lors de l'analyse des adventices recueillies dans les ensembles archéologiques afin, notamment, de comprendre les pratiques agricoles (Bouby, 2000). Le type biologique d'une plante (vivace ou annuelle) est le premier critère d'évaluation de sa capacité à se régénérer après destruction de son appareil aérien. Il est défini par le positionnement de ses organes de survie pendant les périodes défavorables, qui va lui permettre de répondre plus ou moins efficacement aux perturbations du milieu physique ou aux stress édapho-climatiques. Les groupes de plantes les

plus perfectionnées à cet égard sont les annuelles, dont la survie repose sur les graines enfouies dans le sol, et les vivaces à organes de survie profondément enterrés (géophytes) ou qui ont une capacité de reproduction végétative par rhizomes ou stolons, par exemple.

La période de germination (automne ou printemps) est un caractère que l'on peut mettre en rapport avec la saisonnalité des semis. Les adventices germant en automne (annuelles d'hiver) sont favorisées par les semis d'automne, tandis que les annuelles de printemps le sont par les semis de la même saison. Ces mêmes annuelles de printemps sont favorisées par un travail du sol intense qui déloge les adventices d'automne à courte floraison.

Les indicateurs autoécologiques permettent de caractériser le milieu dans lequel se développent les plantes, ainsi que les changements intervenant dans ces milieux, notamment l'augmentation ou la baisse de fertilité, par le biais de l'indicateur N qui exprime l'exigence en nutriments du sol, azote et phosphate principalement. L'augmentation peut signaler un amendement des terres cultivées, quand une diminution suggère à l'inverse un épuisement des sols.

Ce travail de caractérisation a été appliqué à tous les relevés, ceux réalisés *in situ* pour la prairie et les parcelles cultivées, et ceux faits en laboratoire pour les lots de semences initiaux et le sous-échantillon de stock d'engrain de P2 (tabl. 3).

Les objectifs de l'analyse des cortèges d'adventices sont d'évaluer (1) l'origine de la flore adventice présente dans les parcelles (semis initiaux, prairie), (2) la diversité et le type d'adventices présentes dans les parcelles sous un régime agricole à faible intensité, (3) la part des taxons annuels et vivaces présents dans un sous-échantillon de stock, et dans quelle mesure ce cortège est représentatif de la diversité floristique enregistrée *in situ* sur les parcelles.

## RÉSULTATS

### Rendements céréaliers

#### *Comparaison des méthodes de semis lors de l'année test et valeurs de référence*

L'année test (2017-2018) avait pour ambition de tester différentes méthodes de semis. Il n'y a pas eu d'emploi de méthodes de fertilisation. Les épillets d'amidonnier et d'engrain ont chacun été semés sur une demi-parcelle en monoculture soit à la volée, soit en sillons, et en culture d'hiver. La métairie a été semée en demi-parcelle soit à la volée, soit en poquets.

Les rendements obtenus sur les demi-parcelles en sillons sont plus élevés que sur les demi-parcelles à la volée pour les deux blés vêtus en monoculture (fig. 7, tabl. 2). Quel que soit le mode de semis, les rendements de l'engrain sont au moins deux fois supérieurs à ceux de l'amidonnier. Le ratio est compris entre 1:13 et 1:23 pour

l'engrain, et entre 1:5 et 1:10 pour l'amidonnier. Pour la métairie, le ratio est globalement plus faible par rapport à celui des parcelles en monoculture, entre 1:2,5 et 1:5. Les semis en poquets sont plus performants que ceux réalisés à la volée, avec un ratio deux fois plus élevé.

Les ratios de l'année test obtenus sur la sous-parcelle semée en sillons constituent les valeurs de référence pour l'engrain (1:23) et l'amidonnier (1:10). Ces valeurs initiales permettent d'évaluer la variabilité interannuelle des rendements des semis en sillons au cours de l'expérimentation, plus précisément (1) le comportement des deux blés sur la parcelle non fertilisée et les parcelles fertilisées, (2) le taxon le plus performant et la variabilité des rendements.

#### *Comparaison interannuelle des rendements céréaliers selon les modes de culture*

En premier lieu, il s'agit d'observer l'évolution des rendements au cours des trois années agricoles sur la parcelle non fertilisée (P1) semée en sillons en culture d'hiver (fig. 8, tabl. 2). Entre l'année test et l'année 2, on observe une variabilité des rendements pour les deux céréales aboutissant à une baisse de 22 % pour l'engrain et 29 % pour l'amidonnier. Lors de la deuxième année de mise en culture (année 1), les deux céréales vêtues présentent un comportement contrasté. Si le rendement de l'engrain chute de manière importante, celui de l'amidonnier reste égal à la valeur de référence de l'année test.

En second lieu, il s'agit de comparer les rendements des parcelles non fertilisées avec ceux des parcelles fertilisées aussi bien en culture d'hiver que de printemps. En culture d'hiver, les rendements de l'amidonnier pour l'année 2 sont plus élevés sur les deux parcelles fertilisées que sur la parcelle non fertilisée (+43% avec la fumure, +32% avec la rotation). Ils sont même supérieurs à la valeur de référence obtenue lors de l'année test (fig. 8). Pour l'engrain, la demi-parcelle amendée en culture d'hiver offre un rendement légèrement supérieur à celui de la parcelle non fertilisée (+10%) seulement lors de l'année 1. Pour les cultures de printemps de l'année 1, le rendement de la demi-parcelle d'engrain est légèrement inférieur aux valeurs obtenues en culture d'hiver. Pour l'amidonnier, aucun épi n'a pu être récolté, bien que les plants aient germé et levé sur une quinzaine de centimètres pendant l'hiver et au début du printemps.

#### *Taxon dominant et variabilité interannuelle*

Si l'on prend en compte toutes les parcelles en monoculture et toutes les méthodes de semis, l'engrain est la céréale la plus performante et cela pendant les trois années d'expérimentation au parc de la Haute-Île (tabl. 2, fig. 7 et 8). Si l'on ne compare que les parcelles semées en sillons (fig. 8), son rendement maximal a été obtenu lors de l'année test sans fertilisation (1:23) et son rendement minimal sur la parcelle en culture de printemps lors de l'année 1 (1:11). Ses rendements ne passent néanmoins jamais en dessous de la barre de 1:10.

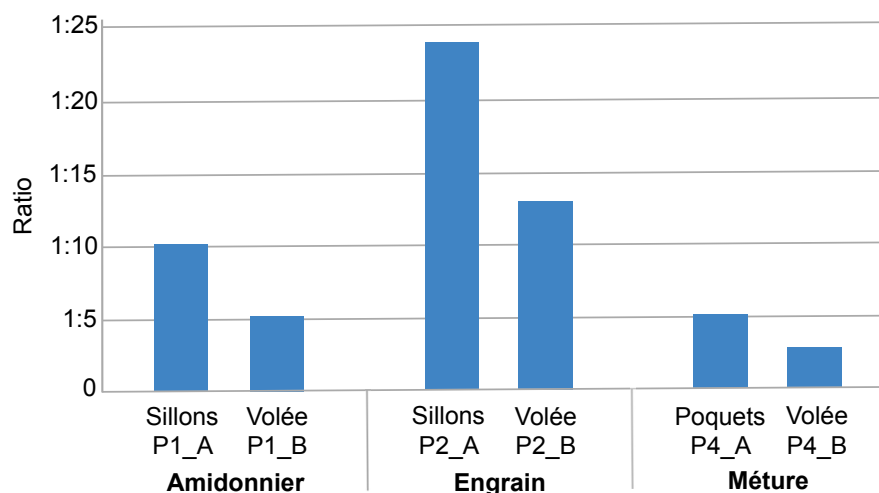
| Nom latin                              | Nom commun                      | Toutes parcelles, semis d'hiver | Prairie | Lots semis | Lot stock année test | Habitat                               | Type biologique (*sans repro. veg) | Indicateurs autoécologiques |       |        |       |
|----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------|------------|----------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------|--------|-------|
|                                        |                                 |                                 |         |            |                      |                                       |                                    | (Julve, 1998)               |       |        |       |
|                                        |                                 |                                 |         |            |                      |                                       |                                    | L                           | T     | HE     | N     |
|                                        |                                 |                                 |         |            |                      |                                       |                                    | (1-9)                       | (1-9) | (1-12) | (1-9) |
| <i>Achillea millefolium</i>            | Achillée millefeuille           | x                               | x       |            |                      | Prairies, pelouses, friches           | Vivace                             | 8                           | 5     | 5      | 4     |
| <i>Alopecurus pratensis</i>            | Vulpin des prés                 |                                 | x       |            |                      | Prairies humides                      | Vivace*                            | 7                           | 5     | 7      | 7     |
| <i>Anagallis arvensis ssp. foemina</i> | Mouron rouge                    |                                 |         |            | x                    | Cultures, friches, jachères           | Annuelle                           | 7                           | 5     | 5      | 7     |
| <i>Anthemis cotula</i>                 | Camomille puante                |                                 |         | x          |                      | Moissons, cultures                    | Annuelle d'hiver                   | 7                           | 6     | 4      | 5     |
| <i>Avena fatua</i>                     | Folle avoine                    |                                 |         | x          |                      | Moissons, cultures d'hiver            | Annuelle d'hiver                   | 7                           | 6     | 5      | 7     |
| <i>Avena sativa</i>                    | Avoine cultivée                 | x                               |         | x          |                      | Moissons, cultures d'hiver            | Annuelle d'hiver                   | 7                           | 6     | 5      | 7     |
| <i>Bellis perennis</i>                 | Pâquerette                      | x                               | x       |            |                      | Prairies                              | Vivace                             | 7                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Bromus sp.</i>                      | Bromes                          |                                 |         | x          | x                    | Milieux rudéraux                      |                                    |                             |       |        |       |
| <i>Capsella bursa-pastoris</i>         | Capselle bourse-à-pasteur       |                                 | x       |            |                      | Toutes cultures                       | Annuelle                           | 7                           | 5     | 5      | 7     |
| <i>Cardamine cf. hirsuta</i>           | Cardamine hirsute               | x                               | x       |            |                      | Cultures, friches, jachères           | Annuelle d'hiver                   | 5                           | 5     | 5      | 7     |
| <i>Cerastium glomeratum</i>            | Céraiste aggloméré              | x                               | x       |            | x                    | Milieux rudéraux                      | Annuelle d'hiver                   | 7                           | 5     | 6      | 6     |
| <i>Chenopodium album</i>               | Chénopode blanc ou album/murale | x                               | x       | x          |                      | Milieux rudéraux                      | Annuelle d'été                     | 8                           | 5     | 5      | 7     |
| <i>Cirsium arvense</i>                 | Cirse des champs                | x                               | x       |            |                      | Cultures sarclées, friches, jachères  | Vivace                             | 7                           | 5     | 5      | 7     |
| <i>Cirsium vulgare</i>                 | Cirse commun                    | x                               | x       |            |                      | Ubiquiste                             | Annuelle d'hiver                   | 8                           | 5     | 5      | 8     |
| <i>Cirsium sp.</i>                     | Cirse                           |                                 |         | x          |                      |                                       |                                    |                             |       |        |       |
| <i>Dactylis glomerata</i>              | Dactyle aggloméré               | x                               | x       |            |                      | Ubiquiste                             | Vivace*                            | 7                           | 5     | 5      | 7     |
| <i>Datura stramonium</i>               | Stramoine                       |                                 | x       |            |                      | Ubiquiste                             | Annuelle d'été                     | 8                           | 6     | 5      | 8     |
| <i>Daucus carota</i>                   | Carotte sauvage                 | x                               | x       |            |                      | Cultures sarclées, friches, jachères  | Annuelle d'hiver                   | 8                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Dipsacus fullonum</i>               | Cardère sauvage                 | x                               | x       |            |                      | Prairies, friches                     | Annuelle d'hiver                   | 8                           | 6     | 6      | 8     |
| <i>Epipactis cf. helleborine</i>       | Epipactis à large feuilles      | x                               |         |            |                      | Prairies, friches                     | Vivace                             | 3                           | 5     | 5      | 5     |
| <i>Galium aparine</i>                  | Gaillet gratteron               |                                 | x       |            |                      | Milieux et ourlets forestiers         | Annuelle d'hiver                   | 6                           | 5     | 5      | 8     |
| <i>Galium cf. mollugo</i>              | Gaillet mou                     | x                               |         |            |                      | Cultures, friches, jachères, lisières | Vivace                             | 8                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Geranium dissectum</i>              | Geranium disséqué               | x                               | x       |            |                      | Cultures sarclées, friches, jachères  | Annuelle d'hiver                   | 7                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Fallopia convolvulus</i>            | Vrillée faux-liseron            |                                 |         | x          |                      | Cultures sarclées, friches, jachères  | Annuelle d'été                     | 7                           | 4     | 5      | 6     |
| <i>Helminthoteca echinoides</i>        | Picris fausse-vipérine          | x                               | x       | x          | x                    | Milieux rudéraux                      | Annuelle d'hiver                   | 8                           | 7     | 3      | 6     |
| <i>Heracleum sphondylium</i>           | Grande berce                    |                                 | x       |            |                      | Prairies, friches                     | Vivace*                            | 7                           | 5     | 5      | 8     |
| <i>Hypericum perforatum</i>            | Millepertuis perforé            |                                 | x       |            |                      | Milieux rudéraux                      | Vivace*                            | 7                           | 5     | 5      | 5     |
| <i>Lactuca cf. seriola</i>             | Laitue scarole                  |                                 |         | x          |                      | Cultures, jachères, friches           | Annuelle d'hiver                   | 7                           | 5     | 4      | 6     |

**Tabl. 3** – Composition de la flore adventice dans la prairie, les parcelles de l'année test et de l'année 1, dans les lots de semis initiaux et le sous-échantillon de récolte d'engrain (P2, semis d'automne à la volée). x : présence, \* : sans reproduction végétative.

**Table 3** – Weed composition in the grassland, in the test year and year 1 plots, in the initial seeding lots and the einkorn harvest subsample (P2, fall broadcast seeding). x: presence, \*: without vegetative reproduction.

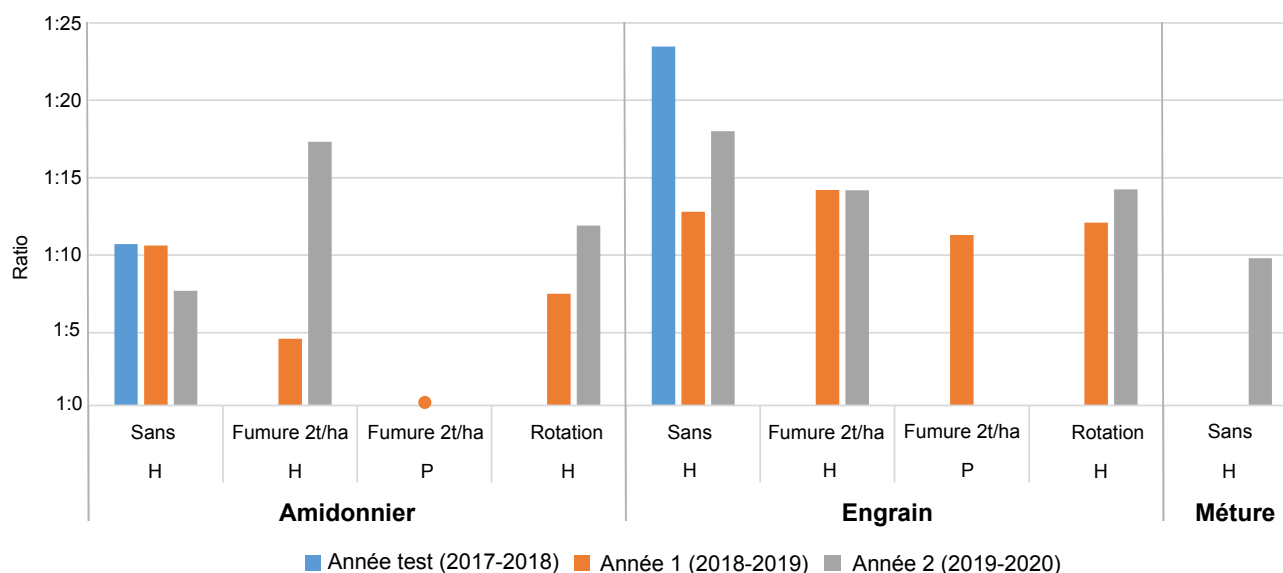
| Nom latin                              | Nom commun                   | Toutes parcelles, semis d'hiver | Prairie | Lots semis | Lot stock année test | Habitat                                 | Type biologique (*sans repro. veg) | Indicateurs autoécologiques |       |        |       |
|----------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------|------------|----------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------|--------|-------|
|                                        |                              |                                 |         |            |                      |                                         |                                    | (Julve, 1998)               |       |        |       |
|                                        |                              |                                 |         |            |                      |                                         |                                    | L                           | T     | HE     | N     |
|                                        |                              |                                 |         |            |                      |                                         |                                    | (1-9)                       | (1-9) | (1-12) | (1-9) |
| <i>Lamium purpureum</i>                | Lamier pourpre               | x                               | x       |            |                      | Cultures sarclées, friches, jachères    | Annuelle                           | 7                           | 5     | 5      | 8     |
| <i>Lapsana communis</i>                | Lampsane                     | x                               |         |            |                      | Milieux rudéraux, lisières              | Annuelle d'hiver                   | 4                           | 5     | 5      | 7     |
| <i>Medicago lupulina</i>               | Luzerne lupuline             | x                               | x       |            | x                    | Prairies, pelouses                      | Annuelle d'hiver                   | 7                           | 5     | 4      | 3     |
| <i>Medicago sativa</i>                 | Luzerne cultivée             | x                               | x       | x          |                      | Prairies, pelouses                      | Vivace*                            | 8                           | 6     | 4      | 7     |
| <i>Melilotus albus</i>                 | Mélilot blanc                |                                 | x       |            |                      | Milieux rudéraux                        | Vivace*                            | -                           | -     | -      | -     |
| <i>Origanum vulgare</i>                | Origan                       |                                 | x       |            |                      | Pelouses, ourlets, lisières basiphiles  | Vivace*                            | 6                           | 5     | 5      | 4     |
| <i>Papaver rhoeas ou rhoeas/dubium</i> | Grand coquelicot             | x                               |         | x          | x                    | Moissons, cultures d'hiver              | Annuelle d'hiver                   | 8                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Plantago lanceolata</i>             | Plantain lancéolé            | x                               | x       |            |                      | Prairies, pelouses, friches             | Vivace*                            | 7                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Plantago major</i>                  | Grand plantain               | x                               | x       |            |                      | Prairies, pelouses, friches             | Vivace*                            | 5                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Poa pratensis/trivialis</i>         | Pâturin des prés/commun      |                                 |         | x          |                      | Prairies, friches                       | Vivace*                            |                             |       |        |       |
| Poaceae                                | Céréales sauvages            | x                               | x       |            |                      |                                         |                                    |                             |       |        |       |
| <i>Polygonum cf. aviculare</i>         | Renouée des oiseaux          |                                 |         | x          |                      | Cultures, friches, jachères             | Annuelle d'été                     | 7                           | 5     | 5      | 8     |
| <i>Potentilla reptans</i>              | Potentille rampante          | x                               | x       |            |                      | Prairies, friches                       | Vivace                             | 7                           | 5     | 6      | 6     |
| <i>Prunella vulgaris</i>               | Brunelle commune             | x                               | x       | x          |                      | Prairies, pelouses                      | Vivace*                            | 5                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Ranunculus bulbosus</i>             | Renoncule bulbeuse           | x                               | x       |            | x                    | Prairies, pelouses                      | Vivace*                            | 8                           | 5     | 5      | 3     |
| <i>Reseda luteola</i>                  | Réséda jaunâtre              |                                 | x       |            |                      | Milieux rudéraux                        | Vivace*                            | 8                           | 5     | 5      | 3     |
| <i>Rumex cf. crispus</i>               | Patience crépue              |                                 | x       |            |                      | Prairies humides                        | Vivace*                            | 7                           | 5     | 7      | 8     |
| <i>Rumex cf. obtusifolius</i>          | Patience à feuilles obtuses  |                                 | x       |            |                      | Ubiquiste (friches, jachères, lisières) | Vivace*                            | 8                           | 5     | 5      | 8     |
| <i>Sambucus ebulus</i>                 | Sureau yèble                 |                                 | x       |            |                      | Ourlets forestiers                      | Vivace                             | 7                           | 6     | 5      | 7     |
| <i>Senecio jacobea</i>                 | Sénéçon jacobée              | x                               | x       |            |                      | Friches vivaces, prairies, lisières     | Vivace*                            |                             |       |        |       |
| <i>Setaria sp.</i>                     | Sétaire                      |                                 |         | x          |                      |                                         |                                    |                             |       |        |       |
| <i>Sonchus asper/oleraceus</i>         | Laiteron rude/maraîcher      | x                               | x       |            |                      | Cultures sarclées, cultures d'été       | Annuelle                           | 7                           | 5-6   | 5      | 7-8   |
| <i>Stellaria media</i>                 | Mouron des oiseaux           |                                 | x       |            |                      | Cultures et milieux rudéraux            | Annuelle                           | 7                           | 5     | 5      | 8     |
| <i>Symphytum officinale</i>            | Grande consoude              |                                 | x       |            |                      | Prairies humides                        | Vivace*                            | 7                           | 5     | 7      | 7     |
| <i>Taraxacum spp.</i>                  | Pissenlit                    | x                               | x       |            |                      | Ubiquiste                               | Vivace*                            |                             |       |        |       |
| <i>Torilis japonica</i>                | Torilis anthrisque           | x                               | x       |            |                      | Milieux rudéraux, ourlets forestiers    | Annuelle d'hiver                   | 6                           | 5     | 5      | 8     |
| <i>Trifolium pratense</i>              | Trèfle des prés              | x                               | x       |            |                      | Prairies                                | Vivace*                            | 7                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Trifolium repens</i>                | Trèfle blanc                 | x                               | x       |            |                      | Prairies                                | Vivace                             | 7                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Trifolium pratense/repens</i>       | Trèfle des prés/trèfle blanc |                                 |         |            | x                    |                                         |                                    | 7                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Verbena officinalis</i>             | Verveine officinale          |                                 | x       |            |                      | Milieux rudéraux (friches vivaces)      | Vivace*                            | 8                           | 6     | 5      | 7     |
| <i>Veronica arvensis</i>               | Véronique des champs         | x                               | x       |            | x                    | Cultures, friches, jachères             | Annuelle d'hiver                   | 7                           | 5     | 5      | 6     |
| <i>Veronica chamaedrys</i>             | Véronique petit-chêne        | x                               | x       |            |                      | Ourlets forestiers                      | Vivace*                            | 6                           | 5     | 5      | 5     |
| <i>Veronica persica</i>                | Véronique de Perse           | x                               | x       |            |                      | Cultures, friches, jachères             | Annuelle                           | 7                           | 5     | 5      | 7     |
| <i>Vicia sativa ssp. vegetalis</i>     | Vesce des moissons           | x                               | x       |            |                      | Cultures et milieux rudéraux            | Annuelle                           | 8                           | 6     | 5      | 8     |

**Tabl. 3 (suite)** – Composition de la flore adventice dans la prairie, les parcelles de l'année test et de l'année 1, dans les lots de semis initiaux et le sous-échantillon de récolte d'engrain (P2, semis d'automne à la volée). x : présence, \* : sans reproduction végétative.



**Fig. 7 –** Comparaison des rendements (poids d'épillets récoltés/poids d'épillets semés) lors de l'année test (2017-2018), trois méthodes ont été testées en culture d'hiver, sans fertilisation.

*Fig. 7 – Comparison of yields (weight of spikelets harvested/weight of spikelets sown) in the test year (2017-2018), winter crop, without fertilization.*



**Fig. 8 –** Comparaison des rendements obtenus sur la parcelle non fertilisée (sans) et les parcelles fertilisées (fumure, rotation), semées en sillons, en culture d'hiver (H) et de printemps (P), durant les trois années agricoles.

*Fig. 8 – Comparison of yields obtained on the unfertilized ("sans"/without) and fertilized ("fumure"/manure, rotation) plots, sown in furrows, in winter (H) and spring (P) crops, during the three agricultural years.*

Pour l'amidonnier, les rendements maximaux, supérieurs à la valeur de référence, sont obtenus sur les deux parcelles fertilisées en culture d'hiver lors de l'année 2 (1:12 et 1:18). Le rendement minimal est obtenu en culture de printemps lors de l'année 1 (1:0). Son rendement général est égal ou inférieur à 1:10.

Pour la métairie semée en sillons, le rendement n'a été calculé que suite à la récolte de l'année 2. Le ratio est légèrement inférieur à 1:10. Un mélange composé pour moitié d'épillets d'engrain, et pour l'autre moitié d'amidonnier a été semé. Lors de la récolte, le rapport est passé à 63 % d'épillets d'engrain et 37% d'amidonnier. Dans la métairie, l'engrain domine donc avec un ratio moyen de 1:15 pour l'engrain contre 1:8,5 pour l'amidonnier. Lors de l'année 1, si le stock a été perdu, le tri des plants

d'engrain et d'amidonnier dans la métairie a tout de même été réalisé sur le site expérimental. D'après une estimation visuelle, l'engrain semblait également dominer sur l'amidonnier.

### Composition et caractérisation de la flore adventice

#### Les flores herbacées présentes et introduites

#### Composition de la flore herbacée autour des parcelles

Les relevés effectués dans la prairie font mention de la présence d'au moins 46 taxons herbacés (tabl. 3). Il s'agit de plantes de milieux anthropisés, dont les habitats

principaux comprennent les prairies, les pelouses, les friches, les jachères et les milieux rudéraux. Certaines espèces telles les cirses (*Cirsium arvense/Cirsium vulgare*) sont ubiquistes, tandis que d'autres ajoutent les cultures à la liste de leurs habitats (comme la bourse-à-pasteur - *Capsella bursa-pastoris* - ou encore le chénopode blanc - *Chenopodium album*). Enfin, quelques plantes sont plus particulièrement inféodées aux milieux et/ou ourlets forestiers, comme l'épipactis à larges feuilles (*Epipactis* cf. *helleborine*). On les observe surtout à proximité de la lisière boisée de la clairière. Les indicateurs autoécologiques font écho à cette répartition (fig. 9). Si la plupart des espèces sont héliophiles (indicateur L le plus souvent compris entre 7 et 8), de plus rares espèces comme la lampsane commune (*Lapsana communis*) ou l'épipactis ont des exigences moindres (L = 4 ou 3). Il en va de même pour les besoins en eau. La plupart des plantes sont mésoxérophiles à mésohydriques, c'est-à-dire qu'elles n'ont besoin que d'une humidité édaphique moyenne (indicateur HE = 4 ou 5), mais la présence de certaines espèces aux exigences plus importantes, telles que la grande consoude (*Symphytum officinale*) ou le vulpin des prés (*Alopecurus pratensis*) suggèrent la présence de zones plus humides que d'autres au sein de la prairie. Enfin, les besoins assez élevés en nutriments (indicateur N le plus souvent compris entre 6 et 8) signalent la bonne fertilité des sols de la clairière (fig. 9).

Les plantes herbacées relevées dans la prairie comprennent 41 % d'annuelles, dont un peu plus de la moitié sont des annuelles d'hiver. Les vivaces représentent donc 59% des espèces. Parmi ces vivaces, la majorité n'ont pas de système de reproduction par voie végétative et ne sont donc pas très compétitives en cas de perturbation du sol (fig. 10).

#### Composition de la flore herbacée dans les lots initiaux

Dans les lots de semences initiaux, 18 taxons ont été identifiés dont 15 ont pu être identifiés à l'espèce (tabl. 3). Ces taxons comprennent des adventices messicoles (c'est-à-dire plantes à germination automnale ou hivernale associées aux zones cultivées) telles que la camomille puante (*Anthemis cotula*), le grand coquelicot (*Papaver rhoeas*), l'avoine cultivée et la folle avoine (*Avena sativa* et *Avena fatua*), des adventices des cultures sarclées ou ubiquistes (*Chenopodium album*, *Fallopia convolvulus*, *Polygonum aviculare*), et des espèces rudérales ou prairiales qui ont souvent les cultures comme habitat secondaire (comme *Lactuca serriola* et *Lathyrus hirsutus*).

La répartition des 15 taxons selon leur type biologique fait état de 11 annuelles (73 % du total des taxons) dont les deux tiers sont des annuelles d'hiver, et de 4 vivaces (27 % du total). Cette répartition est probablement assez proche de celle de la flore adventice effectivement présente dans les champs où ont été récoltées les céréales. D'après Jauzein et Nawrot (2011), dans les espaces cultivés actuellement, on observe en effet en moyenne 20% de vivaces et 80% d'annuelles. Les céréales cultivées par

J.-F. Berthelot ont été menées en semis d'automne, ce qui explique probablement aussi la présence majoritaire d'annuelles d'hiver parmi les adventices des lots initiaux. La présence de quelques adventices estivales peut avoir été favorisée par la pratique de rotations menées par J.-F. Berthelot (légumineuses d'été).

#### Les flores herbacées dans les parcelles cultivées et le stock d'engrain

Un total de 36 espèces d'herbacées a été observé dans les parcelles de céréales (tabl. 3). La plupart (n=25) sont des espèces relevées dans la prairie (fig. 11). Au moins 5 taxons peuvent être originaires de la prairie et/ou des semis et 2 taxons identifiés à l'espèce proviennent exclusivement des semis initiaux (*Papaver rhoeas* et *Avena sativa*). *Lapsana communis* et *Epipactis* cf. *helleborine*, tous deux relevés dans les parcelles n'ont pas d'origine identifiée. Il est possible qu'elles aient été présentes mais n'aient pas été identifiées dans la prairie en raison de leur faible occurrence par exemple ou qu'elles n'aient pas été en fleur au moment des relevés.

Dans les parcelles, les principales classes autoécologiques des adventices relevées *in situ* dans la parcelle sont représentées (fig. 9). La répartition par type biologique fait état de 50% d'annuelles, dont les trois quarts sont des annuelles d'hiver, et de 50% de vivaces dont la majorité sont des vivaces sans organe de reproduction végétatif (fig. 10).

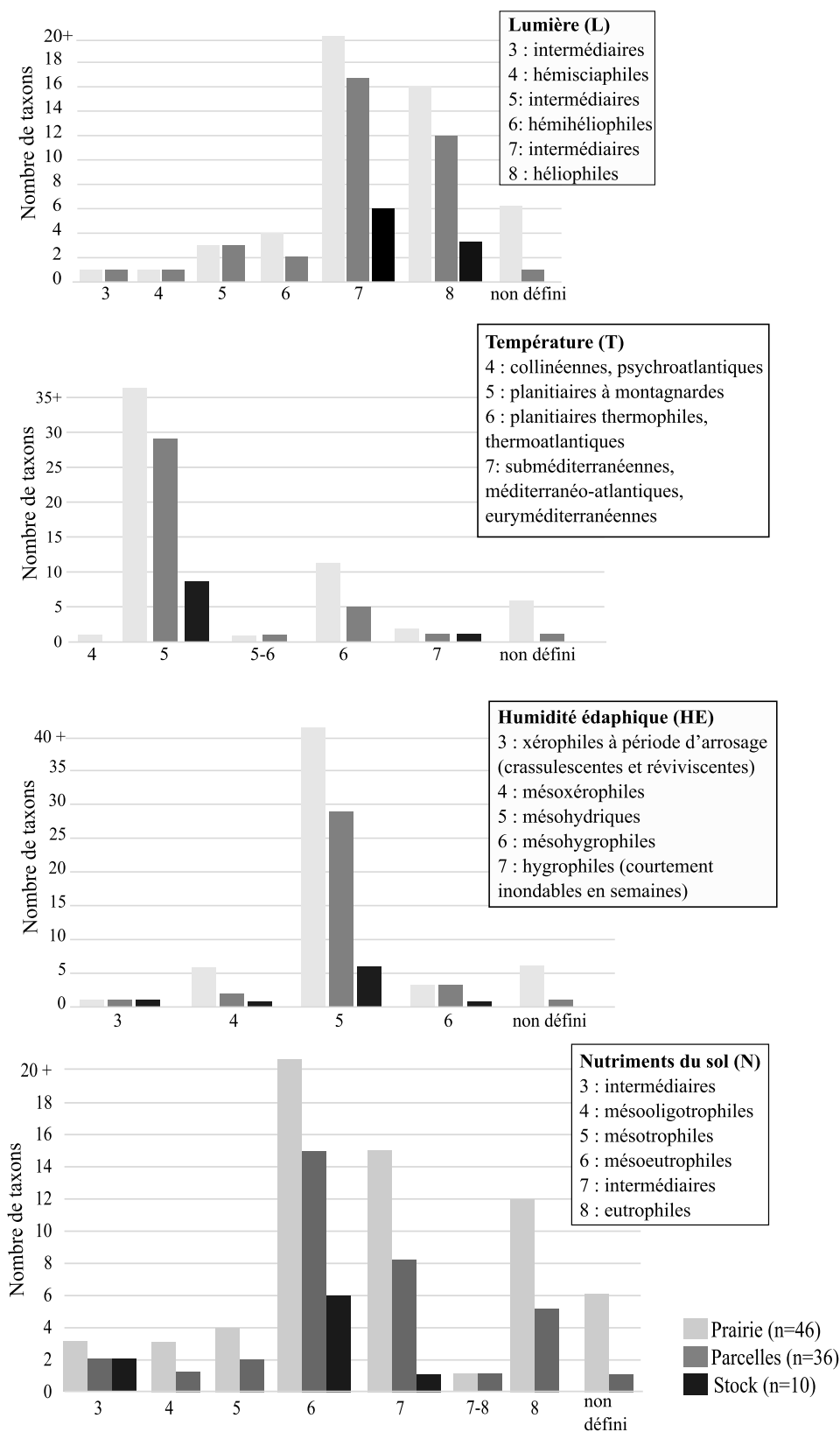
La comparaison avec la prairie et les lots de semences initiaux amène aux observations suivantes. En termes de répartition par type biologique, le spectre observé dans les parcelles est assez proche de celui observée dans la prairie, avec néanmoins un taux un peu plus faible de vivaces, et notamment de vivaces sans organe de reproduction par voie végétative.

Dans le stock d'engrain après battage et vannage de la parcelle (P2, à la volée, récolte en bas de tige), 10 taxons ont été identifiés à l'espèce (tabl. 3). Il s'agit d'un sous-ensemble du spectre présent dans les parcelles. La répartition par type biologique indique 80 % d'annuelles, qui sont essentiellement des annuelles hivernales. Parmi les vivaces, celles sans reproduction végétative dominent (20 % du total) (fig. 10). Le ratio annuelle/vivace observé dans le stock n'est donc pas représentatif de ce qui a été observé sur la parcelle. La comparaison du stock avec le relevé des parcelles de céréales montre un taux d'annuelles plus élevé.

#### Bilan

La courte durée de l'expérimentation (3 ans), la crise sanitaire du printemps 2020 et la perte de la métairie de l'année 1 ne permettent pas d'évaluer la reproductibilité des premiers résultats obtenus sur les rendements et l'évolution de la flore adventice selon les modes de culture au parc de la Haute-Île.

Néanmoins, des résultats significatifs semblent émerger de l'expérimentation. La méthode du sillon a offert un

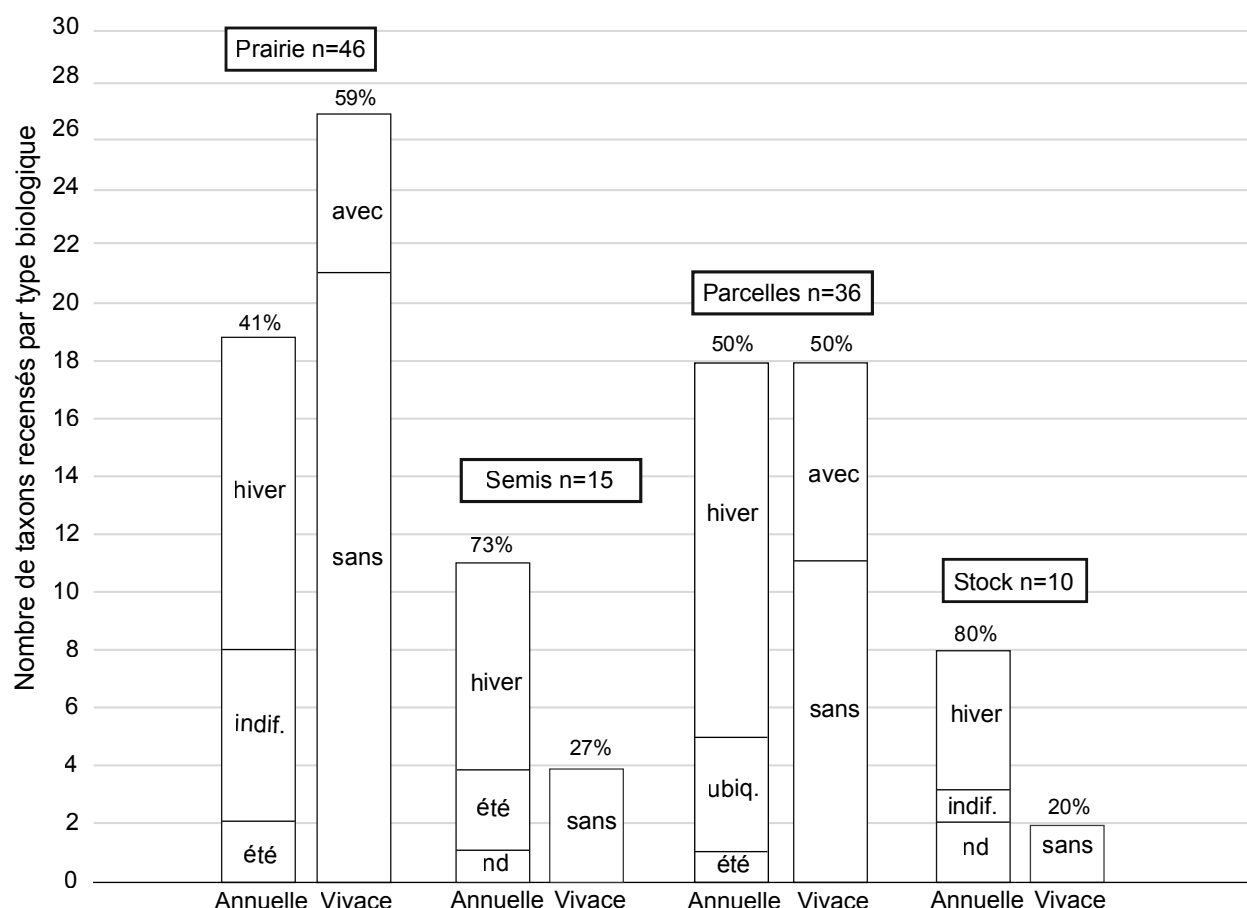


**Fig. 9** – Principaux paramètres auto-écologiques des adventices identifiées dans la prairie, les parcelles et le sous-échantillon de stock d'engrain.

*Fig. 9* – Main auto-ecological parameters of weeds identified in the meadow, plots and einkorn stock subsample.

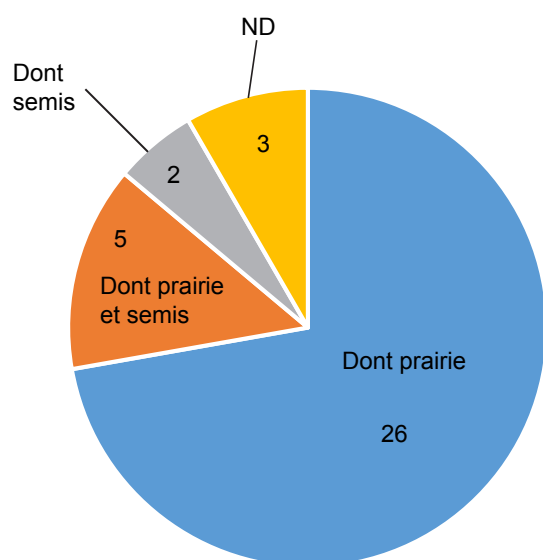
meilleur rendement que les semis à la volée ou en poquet lors de l'année test. L'engrain est la céréale la plus performante au parc de la Haute-Île aussi bien sur les parcelles en monoculture que dans la métur. La moyenne

des rendements pour l'engrain est de 1:15, tandis qu'il est de 1:8,5 pour l'amidonniér. Le rendement est toujours supérieur à 1:10 pour l'engrain quelles que soient la saisonnalité des semis et les méthodes de fertilisation.



**Fig. 10** – Répartition par type biologique des herbacées par type de relevés : indif. : annuelle sans période de germination préférentielle ; avec/sans : avec/sans reproduction végétative ; ND : non déterminé pour les taxons identifiés au genre ou taxon valide. Le nombre total de taxons identifiés dans le lot de semis initiaux est de 18 (le type biologique des trois genres non inclus à la figure ne peut être précisé).

**Fig. 10** – Distribution of biological type of herbaceous weed taxa in the different surveys.



**Fig. 11** – Répartition des taxons herbacés relevés sur les parcelles céréalières selon leur provenance.

**Fig. 11** – Distribution of herbaceous taxa found on cereal plots according to their origin.

Pour l'amidonnier, le ratio est en général inférieur à 1:10. Concernant la saisonnalité des semis, la culture de printemps testée lors de l'année 1 est moins performante que

la culture d'hiver pour les deux taxons, l'amidonnier ayant même arrêté son développement au cours de la saison agricole. Pour les parcelles semées en sillons, les rendements, pour les deux céréales, présentent une variabilité interannuelle mais aussi intra-annuelle. Selon les années, le ratio va de 1:7 à 1:17 pour l'amidonnier et de 1:12 à 1:23 pour l'engrain en culture d'hiver.

Sur la parcelle non fertilisée, l'évolution des rendements entre l'année test et l'année 2 est discontinue. Les deux céréales présentent des comportements contrastés. Pour l'engrain, la parcelle cultivée sans fertilisation lors de l'année test a livré le rendement le plus élevé des trois années agricoles. Sur les cinq parcelles fertilisées en monoculture, les rendements ne sont pas systématiquement plus élevés que sur les parcelles non fertilisées. Pour l'amidonnier, deux parcelles cultivées lors de l'année 2 ont tout de même livré un rendement supérieur à la parcelle non fertilisée et même à la valeur de référence de l'année test.

Concernant les relevés d'adventices, le signal de la fertilisation peut difficilement être évalué en raison de la fertilité inhérente des sols de la clairière et la courte durée de l'expérimentation. Le cortège identifié dans le sous-échantillon de stock d'engrain est réduit par rapport à la diversité enregistrée dans les parcelles. Les annuelles notamment celles associées à des cultures d'hiver, sont

majoritaires dans la récolte. Les grains et capsules de coquelicot sont arrivés sur les parcelles *via* les semis initiaux. Le reste des taxons sont des plantes que l'on trouve dans la prairie à proximité des parcelles. La répartition par type biologique des herbacées présentes dans les parcelles cultivées montre un gradient qui s'éloigne du cortège de la prairie pour aller vers un cortège plus typique des espaces cultivés sans atteindre les ratios vivaces/annuelles que l'on observe aujourd'hui dans les champs (Jauzein et Nawrot, 2013). Le ratio annuelle/vivace observé dans le stock ne reflète pas celui observé dans les parcelles.

## DISCUSSION

La discussion va porter sur les résultats qui nous semblent les plus pertinents pour être mis en perspective avec les données archéobotaniques : (1) la meilleure performance de l'engrain, (2) l'inefficacité relative à court terme des pratiques de fertilisation testées (fumure, rotation avec des légumineuses) en termes de rendement, (3) la part des taxons adventices annuels *versus* vivaces dans les parcelles et dans un sous-échantillon de stock d'engrain sous un régime agricole peu intensif.

### Meilleure performance de l'engrain

L'engrain et l'amidonnier sont tous deux réputés comme étant des blés rustiques, adaptés à des sols peu fertiles. Ils poussent de nos jours dans des zones marginales, peu propices à la monoculture de blés nus modernes du type froment (Martin et Leighty, 1924 ; Stallknecht *et al.*, 1996 ; Zohary *et al.*, 2012 ; Mascher *et al.*, 2017). D'après les résultats issus d'expérimentations agronomiques actuelles et du début du *xx*<sup>e</sup> siècle en Amérique du Nord, l'amidonnier semble en général avoir une meilleure productivité que l'engrain (Martin et Leighty, 1924 ; Troccoli et Codianni, 2005 ; Kreuz, 2007 ; Mascher *et al.*, 2017). Ces expérimentations sont certes ancrées dans des contextes climatiques et environnementaux autres et emploient des moyens techniques très différents de ceux employés au parc de la Haute-Île. Cependant, la domination de l'amidonnier sur l'engrain y est constatée sur une même station et avec des méthodes culturales comparables. De même, dans l'expérimentation d'agriculture néolithique de Hambach réalisée sur brûlis (Lüning *et al.*, 1980), les rendements extrapolés de l'année 1979 (c'est-à-dire qu'un facteur de correction a été appliqué du fait d'attaques des souris sur la base de la densité de peuplement avant la montaison des épis et du nombre de tiges effectivement récoltées), en semis de printemps, sont clairement supérieurs pour l'amidonnier (652 kg/ha, ratio 1:12) par rapport à l'engrain (160 kg/ha, ratio 1:5).

Au parc de la Haute-Île, l'engrain offre généralement un meilleur rendement lors des trois années agricoles dans les parcelles en monoculture. De même, les épillets d'engrain prennent le dessus sur ceux d'amidonnier dans les produits de récolte sur la demi-parcelle en métairie,

cultivée sans fertilisation. De plus, l'unique expérimentation de semis de printemps réalisée au parc de la Haute-Île en semant les blés vêtus au printemps lors de l'année 1 a livré des résultats nuls pour l'amidonnier et un rendement de 1056 kg/ha (1:11) pour l'engrain. Comment expliquer la domination de l'engrain au parc de la Haute-Île alors que l'amidonnier semble plus productif d'après les expérimentations agronomiques et expérimentales ?

L'amidonnier est vulnérable à la verse, favorisée par la taille de sa tige, généralement plus longue que celle de l'engrain (Kreuz, 2007 ; Mascher *et al.*, 2017). Le phénomène de verse a été constaté au moment de la récolte au parc de la Haute-Île. Il semble avoir touché l'amidonnier, mais aussi plus ponctuellement l'engrain, de manière localisée, en bordure de parcelle. Les épis des amidonniers et engrains versés ont aussi été récoltés n'impactant donc pas *a priori* les rendements finaux. De même, sur une expérimentation agronomique en Suisse (2014), la verse a été quantifiée de manière plus prononcée sur les parcelles d'amidonnier dont les rendements restaient néanmoins majoritaires, et ce, pour toutes les variétés (Mascher *et al.*, 2017). Les variétés d'engrain semées au parc de la Haute-Île (une variété en monoculture, deux variétés en métairie) sont peut-être mieux adaptées au climat et aux conditions édaphiques locales que celles d'amidonnier, sachant que les semences originelles proviennent du sud-ouest de la France. Cette hypothèse ne peut malheureusement pas être argumentée plus précisément, la reproductibilité de ce résultat ne pouvant être vérifiée sur le long terme. Néanmoins, force est de constater que l'engrain peut s'avérer plus performant sur des sols à fertilité inhérente élevée, et sous un système agricole à faible intensité, tel que celui expérimenté au parc de la Haute-Île.

### Effets des pratiques agricoles sur les rendements céréaliers

L'un des objectifs de l'expérimentation était de tester plusieurs modes de semis et d'appliquer différentes techniques de fertilisation (sans, rotation, amendement) et notamment de comparer les rendements des parcelles fertilisées et non fertilisées.

Les semis en sillons sont plus performants en termes de rendement que les semis à la volée et/ou en poquet pour les deux céréales et la métairie, comme cela a déjà mentionné par plusieurs auteurs (Reynolds, 1979 ; Sigaut, 1992). La raison principale est, qu'avant l'invention de la herse, les grains semés à la volée ne sont pas suffisamment recouverts pour les protéger des prédateurs, comme les oiseaux.

Sur la parcelle sans fertilisation, les rendements céréaliers sont irréguliers, même s'ils ont globalement baissé à l'issue des trois années expérimentales (entre 20 et 30 % de baisse). De même, à la Butser Farm, le rendement de l'amidonnier, cultivé sans amendement, ne montre pas de diminution, mais une variabilité importante pendant les 14 années d'expérimentation (Reynolds, 1992). Au

parc de la Haute-Île, la baisse globale des rendements céréaliers observée entre l'année test et l'année 2 peut être due à une baisse de la fertilité du sol et à la compétition des mauvaises herbes ou, plus prudemment, être mise sur le compte de la variabilité interannuelle des rendements.

Sur les parcelles ayant bénéficié d'une fertilisation, les résultats sont contrastés. Pour l'engrain, les valeurs sont le plus souvent inférieures à celles obtenues sur la parcelle non fertilisée. Pour l'amidonniér, les rendements sont plus élevés sur les parcelles fertilisées que sur la parcelle non fertilisée dans deux cas, lors de l'année 2. La meilleure performance a été réalisée sur la parcelle (P3) ayant bénéficié d'une succession de méthodes de fertilisation. Ce résultat permet de poser l'hypothèse du bénéfice de la fertilisation sur le court terme, ou en tout cas, d'une meilleure réponse de l'amidonniér à une succession de techniques de fertilisation. En effet, l'amendement organique augmente la fertilité du sol sur le long terme (Bogaard, 2012). La durée de l'expérimentation du parc de la Haute-Île n'a pas permis de vérifier cette hypothèse. Cependant, d'autres facteurs comme les excès ou carences en eau, ou encore l'ensoleillement peuvent rentrer en compte dans la forte variabilité interannuelle des rendements qui est systématiquement constatée sur des expérimentations agronomiques ou des observations ethnobotaniques pour ces deux céréales vêtues (Hajnalová et Dreslerová, 2010 ; Mascher *et al.*, 2017 ; Herrera *et al.*, 2020). Ceci est bien illustré par une expérimentation à long terme réalisée en Suisse sur des céréales modernes d'hiver. Les auteurs ont conclu que dans les systèmes agricoles à faible intrant, l'impact des facteurs environnementaux sur la variance des rendements est élevé (Herrera *et al.*, 2020). Au parc de la Haute-Île, lors de l'année 2, les parcelles semblent avoir bénéficié d'un nombre d'heures d'ensoleillement plus élevé associé à un cumul de précipitations plus faible que lors des deux années précédentes. Néanmoins, si l'on considère que les conditions environnementales ont pu jouer un rôle dans la performance de l'amidonniér sur deux demi-parcelles, elles n'ont pas significativement bénéficié à l'engrain, ni à l'amidonniér sur la parcelle sans fertilisation lors de l'année 2. À titre d'hypothèse, nous proposons que la succession de méthodes de fertilisation associée à des conditions météorologiques favorables ont pu participer au succès de l'amidonniér lors de la dernière année d'expérimentation.

### Flore adventice

L'amidonniér et l'engrain se sont montrés compétitifs face aux plantes adventices herbacées, à l'exception de la parcelle d'amidonniér semée au printemps, qui n'a pas été au bout de son développement.

Le spectre observé dans les parcelles est assez proche de celui observé dans la prairie, avec les différences suivantes : un taux un peu plus faible de vivaces et notamment de vivaces sans organes de reproduction par voie végétative. Ces différences s'expliquent probablement

par le fait que ces vivaces sont très peu compétitives dans des sols perturbés. Même si le système de culture pratiqué au parc de la Haute-Île n'a pas été intensif, il a probablement suffi à déloger durablement un certain nombre d'herbacées mal équipées biologiquement pour une régénération rapide.

Le ratio vivaces/annuelles dans les parcelles cultivées est encore assez éloigné de ce que l'on observe dans les espaces cultivés actuels (Jauzein et Nawrot, 2013). Outre la faible intensité du travail du sol qui contribue à accentuer la balance en faveur des vivaces, la différence peut s'expliquer par le fait que les parcelles n'ont été cultivées que deux ans. Même si le milieu de départ était différent dans la forêt de Hambach (espace forestier), certains résultats des expérimentations qui y ont été menées ont montré que les annuelles prennent un certain temps à s'installer lors de la mise en place des cultures. À Hambach, il a fallu six ans pour que le taux d'annuelles supprime celui des vivaces (Bogaard, 2004).

La domination forte des annuelles d'hiver dans les parcelles et le stock reflète bien la saisonnalité des semis, ainsi que le fait qu'il n'y a pas eu (ou peu, à la seule occasion des semis de printemps de l'année 1) de travail du sol au printemps qui aurait pu les déloger. Par contre, dans le sous-échantillon de stock d'engrain, le ratio vivace/annuelle ne reflète pas le ratio relevé dans les parcelles. Ceci pourrait être dû au fait que les annuelles, comme le grand coquelicot ou les bromes, produisent plus de graines que les vivaces et ont donc plus de chances d'être présentes dans les échantillons.

### Mise en perspective des résultats de l'expérimentation avec les données archéobotaniques

Les résultats issus de l'expérimentation du parc de la Haute-Île permettent de discuter certaines hypothèses archéologiques à la lumière d'une expérience pratique de céréaliculture vivrière peu intensive. D'après une analyse comparée des assemblages archéobotaniques sur les sites rubanés de la province de Hesse (Allemagne) et de Moyenne-Belgique, une partition est/ouest est constatée dans le rapport engrain/amidonniér entre la région rhénane (engrain) et la Meuse (amidonniér) quel que soit le type d'éléments anatomiques (grains, bases de glume) pris en compte (Salavert, 2011). L'argument d'une meilleure tenue de l'engrain aux fortes précipitations a été proposé pour expliquer le choix de cette céréale en Hesse en dépit de sa supposée moindre productivité comparée à l'amidonniér (Kreuz, 2007). Cette résistance aurait permis à l'engrain d'être mieux adapté aux plus fortes précipitations qui caractérisent la seconde moitié du 6<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, soit la période rubanée (Dubouloz, 2008). Les résultats obtenus au parc de la Haute-Île montrent qu'actuellement, sur un sol à forte fertilité inhérente, certaines variétés d'engrain peuvent être plus performantes que l'amidonniér, plusieurs années consécutives, sous un système agraire peu intensif en culture d'hiver.

Le cortège de plantes adventices relevé sur les parcelles au parc de la Haute-Île est probablement assez éloigné en termes de composition de celui caractérisant le système agricole dominant du Néolithique ancien. Quelques taxons, tels que *Chenopodium album*, *Fallopia convolvulus*, *Bromus* spp. et *Lapsana communis*, sont tout de même retrouvés dans les deux types d'enregistrements, archéologique et expérimental (Knörzer, 1971 ; Bogaard, 2004 ; Bakels, 2009 ; Kreuz et Schäfer, 2011). La composition du sous-échantillon de récolte est intéressante à discuter car il s'agit de la principale source des restes d'adventices en contexte archéologique. Au parc de la Haute-Île, le sous-échantillon d'engrain récolté en bas de tige représente seulement un quart de la diversité enregistrée *in situ* dans les parcelles, sachant que les semences n'étaient pas carbonisées, le désherbage minimal et les techniques de traitement pré-stockage peu optimales. La composition de cet échantillon ne reflète pas la répartition des taxons d'herbacées par type biologique constatée sur les parcelles. Il faudra certainement étudier davantage d'échantillons pour obtenir une représentativité statistique des résultats. De plus, le coquelicot (*Papaver rhoeas*) absent de la prairie lors de l'année test a été introduit via le lot de semences d'origine, lors de l'année test. Le taxon s'est ensuite développé massivement lors de l'année 1 et 2 dans les parcelles, et leurs abords. Ceci illustre la capacité de certaines adventices, ici une plante annuelle d'hiver, absente du milieu initial à s'intégrer rapidement à la biodiversité agricole locale suite à la transmission de semences exogènes. Ce phénomène, dû à des contacts ou échanges interculturels sur la longue distance, a permis à de nombreux archéophytes de se disperser en Europe tempérée avec les plantes cultivées néolithiques (Pyšek *et al.*, 2005 ; Brun, 2009).

## CONCLUSION

L'expérimentation du parc de la Haute-Île a produit des résultats issus d'une expérience pratique de céréaliculture vivrière. Elle a permis de tester un système engageant un faible travail du sol, une fertilisation modérée et pas de désherbage après les semis sur des parcelles permanentes d'engrain et d'amidonniér cultivées pendant trois années successives (2017-2020). Ce type de système a permis, avec des variétés actuelles semées à l'automne en sillons, de récolter en moyenne, 1350 kg/ha d'engrain et 900 kg/ha d'amidonniér par an (la surface moyenne des sous-parcelles est de 11 m<sup>2</sup>). Cette moyenne est cependant à nuancer en raison de la variabilité interannuelle des rendements valable pour les deux céréales. Dans le cas de l'expérimentation du parc de la Haute-Île, l'engrain s'est révélé la céréale la plus performante, même si l'amidonniér semble répondre un peu mieux à la succession de fertilisations à court terme. L'analyse de la composition isotopique en carbone ( $\delta^{13}\text{C}$ ) et azote ( $\delta^{15}\text{N}$ ) des grains de céréales

expérimentales, en cours, permettra d'évaluer si le signal de fertilisation, notamment en azote, est présent dans les grains de céréales expérimentaux. L'étude du cortège d'adventices présent dans un des sous-échantillons de stock représente un quart des taxons effectivement observés sur les parcelles et que les types biologiques représentés ne reflètent pas ceux enregistrés *in situ*. En termes pratiques, l'expérimentation menée au parc de la Haute-Île a montré que les parcelles ayant bénéficié d'une rotation avec des légumineuses sont beaucoup plus faciles à travailler à l'automne que la parcelle n'ayant bénéficié d'aucune rotation et ce, dès la seconde année de mise en œuvre. Sans rotation, les mauvaises herbes s'installent et le sol devient de plus en plus difficile à travailler, rendant indispensable à terme la pratique de la rotation des cultures. Les rendements et les cortèges d'adventices issues des parcelles de légumineuses et de lin n'ont pas été étudiés principalement en raison du temps que l'équipe expérimentale pouvait consacrer à la mise en œuvre de l'expérimentation. Leurs cultures trouvaient néanmoins tout leur sens dans le cadre de la pratique de la rotation des cultures et de la valorisation des parcelles auprès du grand public.

Du point de vue de la mise en œuvre, une expérimentation d'agriculture nécessite un personnel dédié, ce dont n'a pas bénéficié celle du parc de la Haute-Île. Le faible retour sur investissement en termes de production scientifique sur le court et moyen terme ne favorise pas l'établissement d'un cadre administratif et de recherche indispensable à la réalisation d'un tel projet. Cependant, les informations obtenues de ce type de projet scientifique sont fondamentales pour notre compréhension des systèmes agricoles anciens. À titre d'exemple, les données issues de l'expérimentation dans la forêt de Hambach, menée dans les années 1980, ont contribué à la caractérisation du système agricole pionnier en Europe tempérée 20 ans plus tard, montrant tout l'intérêt de mener ce type d'expérimentation sur le long terme.

**Remerciements.** Nous tenons à remercier le département de la Seine-Saint-Denis pour la mise à disposition de l'archéosite afin de mettre en œuvre l'expérimentation agricole néolithique pour mener des activités de recherche. Nous remercions chaleureusement Jean-François Berthelot, paysan-boulangier dans le Lot-et-Garonne, pour le don des céréales et ses conseils avisés. Une immense merci aux stagiaires, étudiants et collègues, aux agents du Bureau du patrimoine du département de la Seine-Saint-Denis et de l'UMR AASPE du Muséum national d'Histoire naturelle qui ont participé, avec enthousiasme, aux activités de terrain. Sans eux, la mise en œuvre de l'expérimentation n'aurait pas pu avoir lieu. Nous pensons tout particulièrement à Charlene Bouchaud, Cristina Gonçalves-Buissart, Michel Lemoine et Fabien Normand. Merci aussi à Clarissa Cagnato et Caroline Hamon pour leur aide sur le terrain et leur intérêt pour le projet, ainsi que Fiona Pichon et Frédéric Abbes (UMR5133 Archeorient) pour la confection des outils de récolte. Le stage de Master 2 de R. Auray a été financé par l'ANR HOMES N°ANR-18-CE27-0011-01 (C. Hamon dir). Nous remercions également les deux relecteurs anonymes pour leur travail et leurs commentaires.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AURAY R. (2020) – *Mieux comprendre les premiers systèmes agricoles du Bassin parisien : étude des adventices issues d'assemblages carpologiques expérimentaux et potentiel des analyses isotopiques*, Mémoire de Master 2, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 99 p.
- BAKELS C.C. (1984) – Carbonized Seeds from Northern France, *Analecta Praehistorica Leidensia*, 17, p. 1-27.
- BAKELS C.C. (1995) – Les restes carbonisés de graines et de fruits, in *Le site néolithique de Berry-au-Bac « Le Chemin de la Pêcherie » (Aisne)*, Paris, CNRS Éditions (coll. Monographie du CRA, 15), p. 142-143.
- BAKELS C.C. (1999) – Archaeobotanical investigations in the Aisne valley, northern France, from the neolithic up to the early Middle Ages, *Vegetation History and Archaeobotany*, 8, 1-2, p. 71-77.
- BAKELS C.C. (2009) – *The Western European Loess Belt - Agrarian History, 5300 BC-AD 1000*, New York, Springer Verlag, 295 p.
- BERANOVA M. (1993) – Versuche zur vorgeschichtlichen und frühmittelalterlichen Landwirtschaft, *Památky archeologické*, 84, 1, p. 97-119.
- BERRIO L. (2011) – *L'Économie végétale au Néolithique ancien : comparaison des données carpologiques des sites rubanés et Blicquy-Villeneuve-Saint-Germain dans le Bassin parisien et en Moyenne-Belgique*, Mémoire de Master 1, Université de Paris 1-Panthéon-Sorbonne, 100 p.
- BOGAARD A. (2002a) – Questioning the relevance of shifting cultivation to Neolithic farming in the loess belt of Europe: evidence from the Hambach Forest experiment, *Vegetation History and Archaeobotany*, 11, 1-2, p. 155-168.
- BOGAARD A. (2002b) – *The permanence, intensity and seasonality of early crop cultivation in Western-Central Europe*, PhD Thesis, vol. 1, University of Sheffield, 220 p.
- BOGAARD A. (2004) – *Neolithic farming in central Europe: an archaeobotanical study of crop husbandry practices*, London, Routledge, 224 p.
- BOGAARD A. (2005) – 'Garden agriculture' and the nature of early farming in Europe and the Near East, *World Archaeology*, 37, 2, p. 177-196.
- BOGAARD A. (2012) – Middening and Manuring in Neolithic Europe: Issues of Plausibility, Intensity and Archaeological Method, in R. Jones (dir.), *Manure: historical, archaeological and ethnographic perspectives*, London, Routledge, p. 25-40.
- BOGAARD A., FRASER R., HEATON T.H., WALLACE M., VAIGLOVA P., CHARLES M., JONES G., EVERSLED R.P., STYRING A.K., ANDERSEN N.H. (2013) – Crop manuring and intensive land management by Europe's first farmers, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 31, p. 12589-12594.
- BONNIER G., DE LAYENS G. (1986) – *Flore complète portative de la France, de la Suisse et de la Belgique*, Paris, Belin, 426 p.
- BOUBY L. (2000) – Restituer les pratiques agraires par la carpologie archéologique, *Études rurales*, 153-154, p. 177-194.
- BOUBY L., DIETSCH-SELLAMI M.-F., MARTIN L., MARINVAL P., WIETHOLD J. (2018) – Ressources végétales et économie de subsistance au Néolithique en France (6000-2000 av. J.-C.), in J. Guilaine et D. Garcia (dir.), *La Protohistoire de la France*, Paris, Hermann (coll. Histoire et Archéologie), p. 141-152.
- BOURGUIGNON C., GABUCCI-BOURGUIGNON L., BOURGUIGNON E. (2016) – *Clairière cuisine. Analyse complète physique, chimique et biologique de sol*, Rapport d'analyse, Laboratoire d'analyse microbiologique des sols, Marey-sur-Tille, 23 p.
- BROES F., BOSQUET D. (2007) – Fabrication d'outils de terrassiers et creusement des fossés rubanés : de la théorie à la pratique, *Notae Praehistoricae*, 27, p. 131-149.
- BRUN C. (2008) – L'évolution de la biodiversité dans les milieux fortement anthropisés du Néolithique à nos jours (caractérisation, périodisation) : un outil pour sa compréhension et sa conservation, in A. Bonis (dir.), *Actualité de la recherche en écologie des communautés végétales*, Actes du 4<sup>e</sup> colloque ECOVEG, Paris, Lavoisier, p. 209-216.
- BRUN C. (2009) – Biodiversity changes in highly anthropogenic environments (cultivated and ruderal) since the Neolithic in eastern France, *The Holocene*, 19, 6, p. 861-871.
- BRUNET R., BEURET L. (1901) – *Manuel pratique de l'agriculteur*, Paris, L. Mulo, 640 p.
- CHARLES M., JONES G., HODGSON J.G. (1997) – FIBS in Archaeobotany: Functional Interpretation of Weed Floras in Relation to Husbandry Practices, *Journal of Archaeological Science*, 24, 12, p. 1151-1161.
- CLARK J.G.D. (1952) – Prehistoric Europe: the economic basis, *American Association for the Advancement of Science*, 116, 3016, p. 434-435.
- COMET G. (1992) – *Le paysan et son outil. Essai d'histoire technique des céréales (France, VIII<sup>e</sup>-XI<sup>e</sup> siècle)*, Rome, École française de Rome (coll. de l'École française de Rome, 165), 711 p.
- DIETSCH-SELLAMI M.-F. (2007) – L'utilisation des plantes sauvages au Néolithique dans le nord-ouest de la France: témoignages carpologiques, in M. Besse (dir.), *Sociétés néolithiques, des faits archéologiques aux fonctionnements socio-économiques*, Actes du 27<sup>e</sup> colloque interrégional sur le Néolithique, Lausanne, Cahiers d'archéologie romande, p. 127-136.
- DUBOULOZ J. (2008) – Impacts of the Neolithic Demographic Transition on Linear Pottery Culture Settlement, in J.-P. Bocquet-Appel et O. Bar-Yosef (dir.), *The Neolithic Demographic Transition and its Consequences*, Dordrecht, Springer Netherlands, p. 207-235.
- EHRMANN O., BIESTER H., BOGENRIEDER A., RÖSCH M. (2014) – Fifteen years of the Forchtenberg experiment: results and implications for the understanding of Neolithic land use, *Vegetation history and archaeobotany*, 23, 1, p. 5-18.

- FIorentino G., FERrio J.P., BOGAARD A., ARAUS J.L., RIEHL S. (2015) – Stable isotopes in archaeobotanical research, *Vegetation History and Archaeobotany*, 24, 1, p. 215-227.
- FIRMIN G. (1984) – Agriculture expérimentale dans la vallée de l'Aisne, *Revue archéologique de Picardie*, 1, 1, p. 95-102.
- FRIED G., NORTON L.R., REBOUD X. (2008) – Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 128, 1, p. 68-76.
- HajNALOVÁ M., DRESLEROVÁ D. (2010) – Ethnobotany of einkorn and emmer in Romania and Slovakia: towards interpretation of archaeological evidence, *Památky archeologické*, 101, p. 169-202.
- HAMON C., CAGNATO C., EMERY-BARBIER A., SALAVERTE A. (2021) – Food practices of the first farmers of Europe: combined use-wear and microbotanical studies of Early Neolithic grinding tools from the Paris Basin, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 36, p. 102764.
- HERRERA J.M., LEVY HÄNER L., MASCHER F., HILTBRUNNER J., FOSSATI D., BRABANT C., CHARLES R., PELLET D. (2020) – Lessons From 20 Years of Studies of Wheat Genotypes in Multiple Environments and Under Contrasting Production Systems, *Frontiers in Plant Science*, 10, 1745.
- HOERNI C., LAFARGE I. (2018) – Le parc départemental de la Haute-Île (Neuilly-sur-Marne, Seine-Saint-Denis). Un outil de valorisation des patrimoines naturel et archéologique, un instrument de recherche et d'observation, *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 153, p. 60-63.
- ISAAKIDOU V. (2011) – Farming regimes in Neolithic Europe: gardening with cows and other models, in A. Hadzikoumis, E. Robinson, S. Viner (dir.), *Dynamics of Neolithisation in Europe: Studies in Honour of Andrew Sherratt*, Oxford, Oxbow Books, p. 90-112.
- JAUZEIN P., NAWROT O. (2013) – *Flore d'Île-de-France: Clés de détermination, taxonomie, statuts*, Versailles, Éditions Quae, 606 p.
- JONES G., CHARLES M., BOGAARD A., HODGSON J. (2010) – Crops and weeds: the role of weed functional ecology in the identification of crop husbandry methods, *Journal of Archaeological Science*, 37, 1, p. 70-77.
- JULVE P.H. (1998) – *Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la flore de France*, Lille, Institut Catholique de Lille.
- KAZDOVÁ E. (1983) – Příspěvek k neolitickým skliznovým nástrojům, *Fakulty brněnské university*, 32, 28, p. 161-169.
- KNÖRZER K.H. (1971) – Urgeschichtliche Unkräuter im Rheinland ein Beitrag zur Entstehungsgeschichte der Segetalgesellschaften, *Vegetatio*, 23, 3-4, p. 89-111.
- KREUZ A. (2007) – Archaeobotanical perspectives on the beginning of agriculture north of the Alps, in S. Colledge et J. Conolly (dir.), *The origins and spread of domestic plants in southwest Asia and Europe*, Routledge, Walnut Creek, p. 259-294.
- KREUZ A., SCHÄFER E. (2011) – Weed finds as indicators for the cultivation regime of the early Neolithic Bandkeramik culture?, *Vegetation History and Archaeobotany*, 20, 5, p. 333.
- LÜNING J., MEURERS-BALKE J., SCHALICH J., URBAN B., LOHMEYER W., SCHMIDT B., THIELE H., WEISCHER B. (1980) – Experimenteller Getreideanbau im Hambacher Forst, Gemeinde Elsdorf, Kr. Bergheim-Rheinland, *Bonner Jahrbücher*, 180, p. 305-344.
- MARTIN J.H., LEIGHTY C.E. (1924) – *Experiments with emmer, spelt, and einkorn*, Washington, U.S. Dept. of Agriculture, 60 p.
- MASCHER F., BERTSCHI C., FESSELET M., SCHORI A., SCHIERSCHERVIRET B., MAYOR J. (2017) – Aptitude de l'amidonniér et de l'engrain à la culture, *Recherche agronomique suisse*, 8, 4, p. 142-149.
- MEURERS-BALKE J., LÜNING J. (1990) – Experimente zur frühen Landwirtschaft: eine Überblick über den Kölner Versuche in den Jahren 1978-1986, in M. Fansa (dir.), *Experimentelle Archäologie in Deutschland*, Oldenburg, Isensee (coll. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, 4), p. 82-92.
- MUELLER-BIENIEK A., NOWAK M., STYRING A., LITYŃSKA-ZAJĄC M., MOSKAL-DEL HOYO M., SOJKA A., PASZKO B., TUNIA K., BOGAARD A. (2019) – Spatial and temporal patterns in Neolithic and Bronze Age agriculture in Poland based on the stable carbon and nitrogen isotopic composition of cereal grains, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 27, p. 101993.
- PAILLET A. (2005) – *Archéologie de l'agriculture moderne*, Paris, Errance, 288 p.
- PEEL M.C., FINLAYSON B.L., MCMAHON T.A. (2007) – Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 5, p. 1633-1644.
- PERNAUD J.-M., CHARTIER M., TRESSET A., SIDÉRA I., AUGÉREAU A., LEROYER C. (2004) – Gestion des territoires et évolution de l'exploitation des ressources animales et végétales aux V<sup>e</sup> et IV<sup>e</sup> millénaires dans le Bassin parisien, in P. Bodu, C. Constantin (dir.), *Approches fonctionnelles en Préhistoire*, Paris, Société préhistorique française p. 409-426.
- PÉTREQUIN P., ARBOGAST R.-M., PÉTREQUIN A.-M., VAN WILIGEN S., BAILLY M. (2006) – Premiers chariots, premiers araires, *La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IV<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> millénaires avant notre ère*, Paris, CNRS Éditions.
- PYŠEK P., JAROŠÍK V., CHYTRÝ M., KROPÁČ Z., TICHÝ L., WILD J. (2005) – Alien plants in temperate weed communities: prehistoric and recent invaders occupy different habitats, *Ecology*, 86, 3, p. 772-785.
- REYNOLDS P.J. (1977) – Experimental archaeology and the Butser ancient farm project, in J. Collis (dir.), *The Iron Age in Britain: a review*, Sheffield, Department of Prehistory & Archaeology, University of Sheffield, p. 32-40.
- REYNOLDS P.J. (1979) – *Iron-age farm: the Butser experiment*, Colonnade Books, British Museum Publications, 112 p.
- REYNOLDS P.J. (1992) – Crop yields of the prehistoric cereal types emmer and spelt: the worst option. A discussion of the data achieved from 15 years of research at the Ancient Farm, in P. C. Anderson-Gerfaud (dir.), *Préhistoire de l'agriculture : nouvelles approches expérimentales et ethnographique*, Valbonne, CNRS (coll. Monographies du Centre de recherches archéologiques, 6), p. 17-28.

- REYNOLDS P.J. (1999) – Butser ancient farm, Hampshire, UK, in P. G. Stone et P. G. Planel (dir.), *The Constructed Past: Experimental archaeology, education and the public*, London, Routledge, p.144-155.
- RÖSCH M., EHRMANN O., HERRMANN L., SCHULZ E., BOGENRIEDER A., GOLDAMMER J.P., HALL M., PAGE H., SCHIER W. (2002) – An experimental approach to Neolithic shifting cultivation, *Vegetation History and Archaeobotany*, 11, 1-2, p. 143-154.
- RÖSCH M., BIESTER H., BOGENRIEDER A., ECKMEIER E., EHRMANN O., GERLACH R., HALL M., HARTKOPF-FRÖDER C., HERRMANN L., KURY B., LECHTERBECK J., SCHIER W., SCHULZ E. (2017) – Late neolithic agriculture in temperate Europe: a long-term experimental approach, *Land*, 6, 1, p. 11.
- ROWLEY-CONWY P. (1981) – Slash and burn in the temperate European Neolithic, in R. Mercer (dir.), *Farming practice in British Prehistory*, Edinburgh, Edinburgh University Press, p. 85-96.
- SALAVERTE A. (2011) – Plant economy of the first farmers of central Belgium (Linearbandkeramik, 5200-5000 B.C.), *Vegetation History and Archaeobotany*, 20, 5, p. 321-332.
- SALAVERTE A. (2017) – Agricultural Dispersals in Mediterranean and Temperate Europe, Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. <http://environmentalscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-307>.
- SALAVERTE A., ZAZZO A., MARTIN L., ANTOLÍN F., GAUTHIER C., THIL F., TOMBRET O., BOUBY L., MANEN C., MINEO M., MUELLER-BIENIEK A., PIQUÉ R., ROTTOLI M., ROVIRA N., TOULEMONDE F., VOSTROVSKÁ I. (2020) – Direct dating reveals the early history of opium poppy in western Europe, *Scientific Reports*, 10, 1, p. 20263.
- SIGAUT F. (1992) – Rendements, semis et fertilité: signification analytique des rendements, in P. C. Anderson-Gerfaud (dir.), *Préhistoire de l'agriculture : nouvelles approches expérimentales et ethnographique*, Valbonne, CNRS (coll. Monographies du Centre de recherches archéologiques, 6), p. 395-403.
- STALLKNECHT G.F., GILBERTSON K.M., RANNEY J.E. (1996) – Alternative Wheat Cereals as Food Grains: Einkorn, Emmer, Spelt, Kamut, and Triticale, in J. Janick (dir.), *Progress in new crops, new opportunities new technologies*, Alexandria, American Society for Horticultural Science, p.156-170.
- TOULEMONDE F., DAOULAS G., BONNAIRE E., RIQUEUR V., WIETHOLD J., ZECH-MATTERNE V. (2021) – A brief history of plants in north-eastern France: 6,000 years of crop introduction in the Plain of Troyes, Champagne, *Vegetation History and Archaeobotany*, 30, 1, p. 5-19.
- TOULEMONDE F., avec la collaboration de LE CLEZIO L., LANGRY-FRANÇOIS F., GARMOND N. (2016) – Contribution à la compréhension des découvertes de semences carbonisées dans le comblement des silos laténiens en France septentrionale, in M.-F. Dietsch-Sellami, C. Hallavant, L. Bouby, et B. Pradat (dir.), *Plantes, produits végétaux et ravageurs, Actes des X<sup>e</sup> rencontres d'archéobotanique*, Les Eyzies-de-Tayac, Aquitania, p. 129-153.
- TROCCOLI A., CODIANNI P. (2005) – Appropriate seeding rate for einkorn, emmer, and spelt grown under rainfed condition in southern Italy, *European Journal of Agronomy*, 22, 3, p. 293-300.
- VOISIN A. (1953) – Production de fumier et productivité agricole, *Économie rurale*, 18, 1, p. 29-32.
- WEINER J. (1992) – Feuchtbodenfunde ohne Moor und Seeufer: zwei Spaten aus dem bandkeramischen Brunnen von Erkelenz-Kückhoven, *Arch. Mitt. aus Nordwestdeutschland*, 15, p. 161-166.
- ZECH-MATTERNE V. (2011) – Rejet domestique ou dépôt intentionnel ? Interprétations des récoltes carbonisées découvertes en contexte de stockage laténien, dans le nord de la Gaule, in J. Wiethold (dir.), *Carpologia. Articles réunis à la mémoire de Karen Lundström-Baudais*, Glux-en-Glenne, Centre archéologique européen du Mont-Beuvray (coll. Bibracte, 20), p. 63-74.
- ZOHARY D., HOPF M., WEISS E. (2012) – *Domestication of Plants in the Old World: The origin and spread of domesticated plants in Southwest Asia, Europe, and the Mediterranean Basin*, Cambridge, Oxford University Press, 251 p.

**Aurélie SALAVERT**

UMR Archéozoologie, Archéobotanique :  
Sociétés, Pratiques et Environnements  
MNHN, CNRS, Alliance Sorbonne Université  
MNHN-CP 56, 55 rue Buffon, 75005 Paris  
salavert@mnhn.fr

**Françoise TOULEMONDE**

Chercheuse associée  
UMR Archéozoologie, Archéobotanique :  
Sociétés, Pratiques et Environnements  
MNHN, CNRS, Alliance Sorbonne Université  
67 rue des Sablons, 78750 Mareil Marly  
francoise.toulemonde@gmail.com

**Rémy AURAY**

UMR Archéozoologie, Archéobotanique :  
Sociétés, Pratiques et Environnements  
MNHN, CNRS, Alliance Sorbonne Université  
UMR Trajectoires (CNRS, Paris 1)  
Centre Mahler, 9 rue Malher, 75004 Paris

**Caroline HOERNI**

Centre départemental d'archéologie  
1-5 route de Saint Leu, 93800 Épinay-sur- Seine  
choerni@seinesaintdenis.fr

**Guillaume HUITOREL**

UMR ArScAn (CNRS, Paris 1  
Paris Nanterre, Paris 8, Ministère de la culture  
et de la communication)  
Centre départemental d'archéologie  
1-5 route de Saint Leu, 93800 Épinay-sur- Seine  
ghuitorel@seinesaintdenis.fr

**Ivan LAFARGE**

UMR ArScAn (CNRS, Paris 1  
Paris Nanterre, Paris 8, Ministère de la culture  
et de la communication)  
Centre départemental d'archéologie  
1-5 route de Saint Leu, 93800 Épinay-sur- Seine  
ilafarge@seinesaintdenis.fr