Chapitre 1.2

Une chronologie culturelle du paléolithique supérieur en France entre 32 et 21 ka cal. BP

William E. BANKS(1), Philippe LANOS(2)

(1) University of Bordeaux, CNRS, MCC, PACEA, UMR 5199, Bâtiment B2, Allée Geofroy St. Hilaire, CS 50023, 33600, Pessac, France, (2) Archéosciences-Bordeaux, Université Bordeaux-Montaigne & Géosciences-Rennes, Université de Rennes 1

Les études de chronologie jouent un rôle clé dans la majorité des recherches archéologiques et sont particulièrement pertinentes pour l'examen des relations culture-environnement, surtout pendant les périodes caractérisées par une variabilité climatique et une réorganisation environnementale rapides et marquées. C'est le cas du registre archéologique du Paléolithique supérieur documenté dans la France actuelle de 32 000 à 21 000 ans calibrés BP. Dans l'exemple développé ici (Banks *et al.*, 2019), nous prenons en compte des mesures de radiocarbone examinées de manière critique et provenant de contextes archéologiques étudiés en détail dans le but de reconstruire la chronologie des cultures archéologiques du Gravettien moyen au Badegoulien. Les intervalles chronologiques calculés pour chaque phase typo-technologique sont comparés au registre climatique dans les glaces du Groenland, ce qui permet de corréler précisément chaque culture archéologique avec la variabilité paléoclimatique.

1 Construire une chronologie dans le cadre du paradigme bayésien

Les informations chronologiques en archéologie peuvent être classées en deux grandes catégories : les informations qui sont obtenues avant toute datation et les datations proprement dites (qu'on appellera observations, mesures, ou encore données) qui sont fournies par les expertises des archéologues et des historiens et par les laboratoires de datation. La statistique bayésienne (cf. 12), qui fait intervenir la théorie des probabilités (cf. 7), permet de relier ces deux types d'information afin d'obtenir une meilleure

information *a posteriori** sur la chronologie, c'est-à-dire une information plus fiable et plus précise.

1.1 Les informations chronologiques *a priori*

Les informations chronologiques *a priori* sont appelées ainsi du fait qu'elles sont connues avant la réalisation de datations « absolues ». Nous identifions au moins trois types d'information *a priori* :

(a) Le premier type d'information *a priori** est représenté par la période durant laquelle on suppose que les événements étudiés sont survenus. Cette information intervient avant le processus de datation lui-même et est fournie par la connaissance « antérieure » de l'archéologue ou de l'historien sur le phénomène étudié. Elle s'exprime par un intervalle de date calendaire* $[T_a, T_b]$ appelé « plage d'étude » (*study period*). C'est une information *a priori* nécessaire afin de rendre possible les calculs en termes de probabilité. Notons que cette information peut contraindre fortement les dates à l'intérieur de la plage d'étude si celle-ci est petite par rapport à l'étendue des dates. Les bornes de la plage d'étude constituent de fait un terminus post quem (TPQ) et un terminus ante quem (TAQ) pour toutes les dates d'événement mises en jeu dans l'étude.

(b) Le deuxième type d'information *a priori* concerne les relations d'antéro-postériorité. Les relations d'ordre sur le temps entre des événements, qui définissent la datation relative, peuvent par exemple être déduites de l'étude de la stratigraphie. Ces relations peuvent aussi être déduites de l'étude de l'évolution de « faciès » au cours du temps : céramique, lithique, technique, architectural, sédimentologie, botanique… qui définissent des phases chronologiques. Les études de sériation (*cf.* 1.6) sur les artefacts par exemple peuvent mettre en évidence de telles relations d'ordre entre phases.

(c) L'information *a priori* peut provenir de la connaissance de la durée maximale d'un groupe d'événements (durée maximale d'une phase). Par exemple, la durée d'occupation d'un habitat peut être connue à l'avance, sur la base de critères historiques ou anthropologiques par exemple, avant tout processus de datation sur des artefacts qui y sont découverts. Cette information peut aussi provenir d'un hiatus connu par avance entre deux groupes d'événements (deux phases) : ce hiatus est l'écart de temps minimal qui sépare les événements des deux groupes.

1.2 Les observations : les datations de laboratoire

Afin d'améliorer notre connaissance sur la date des événements pour lesquels nous disposons des informations *a priori* précédentes, qui restent encore imprécises, nous effectuons des datations d'artefacts grâce à des mesures chronométriques : méthodes du radiocarbone (^{14}C), de la luminescence (TL/OSL), de la dendrochronologie (DC), de l'archéomagnétisme (AM), etc. Nous pouvons aussi dater les artefacts à l'aide de comparaisons avec des références (corpus) bien datées : ce sont les marqueurs chronologiques de la typo-chronologie. Ces différentes datations peuvent s'exprimer

mathématiquement sous la forme de distributions* (ou densités*) de probabilité de date (*cf.* 7).

1.3 Combinaison de l'information *a priori* avec les observations : statistique bayésienne et information *a posteriori*

L'objectif de la combinaison de l'information *a priori* avec les observations est de pouvoir estimer dans un second temps, *a posteriori*, soit la date d'un événement, soit l'extension temporelle d'un groupe d'événements, c'est-à-dire d'une phase : son début, sa fin, et donc sa durée. Enfin, lorsque le nombre d'événements datés est important, on peut chercher à caractériser le rythme de ces événements. Dans le cas simple où les dates d'événement seraient sans incertitude et toutes fiables, alors les début, fin, durée, ordre et rythme des événements seraient parfaitement connus. Mais les datations obtenues en laboratoire ou fournies par la typo-chronologie sont le plus souvent entachées d'incertitudes* qui proviennent de différentes sources d'erreur* : des erreurs de mesures, de calibration, de référence mais aussi des erreurs inconnues qui se traduisent par des désaccords entre les dates obtenues pour caractériser un même événement. Les datations sont alors représentées par des distributions* de date, appelées encore « densités* de probabilité de date », qui expriment le fait que la date vraie se situe quelque part sous cette courbe et plus probablement dans les régions de plus forte densité. La figure 1 montre trois exemples de distribution de date obtenues par datation ^{14}C.

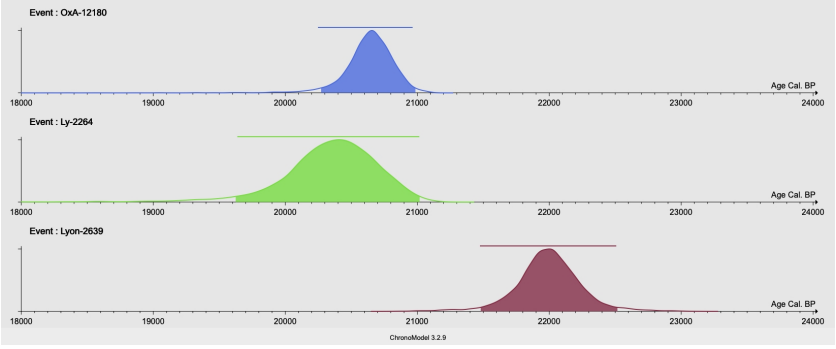


FIG. 1 : Exemples de distribution de date *a posteriori* calculées avec le logiciel ChronoModel à partir d'âges ^{14}C (Lanos & Dufresne, 2019). La distribution de date, qui est aussi appelée « densité de probabilité de date », exprime le fait que la date vraie se situe quelque part sous cette courbe et plus probablement vers les régions de plus forte densité.

Pour réaliser la combinaison des informations *a priori* avec les observations (mesures en laboratoire) dans le but d'obtenir les informations *a posteriori*, nous utilisons les outils mathématiques de la statistique bayésienne*, du nom du mathématicien Thomas Bayes (1702-1761). En résumé, la statistique bayésienne permet de définir un modèle mathématique qui va relier les observations aux informations *a priori* afin d'en déduire une information *a posteriori* exprimée sous une forme probabiliste. L'objectif ici est d'améliorer notre connaissance sur la chronologie (*cf.* 12).

2 La modélisation chronologique avec le logiciel ChronoModel

ChronoModel (CM) est un logiciel de modélisation chronologique bayésienne créé pour interpréter les données chronométriques (par exemple, radiométriques) en combinaison avec les informations chronologiques et contextuelles provenant des sites archéologiques. Il est fondé sur un nouveau concept statistique d'estimation de la date d'un événement cible qui introduit une erreur individuelle associée à chaque date chronométrique (Lanos & Philippe, 2017). C'est le modèle d'événement (*Event model*). Cette approche diffère de celle mise en œuvre dans les logiciels BCal (Buck *et al.*, 1999) et OxCal (Bronk Ramsey, 1995, 2001).

ChronoModel a été développé entre 2011 et 2015 dans le cadre du programme ANR « modèles numériques » sur le sujet « Modélisation chronologique et développement de logiciel pour le traitement des données de datation en archéométrie, archéologie et sciences de la Terre ». Quatre versions ont été publiées depuis 2015, qui correspondent à des améliorations et à l'ajout de nouvelles fonctionnalités :

- Version 1.1 publiée en 2015 + manuel de 85 pages en ligne sur le site Web
- Version 1.5 publiée en 2016 + manuel de 97 pages en ligne sur le site Web.
- Version 2.0 publiée en 2019 + manuel de 84 pages en ligne sur le site Web (Lanos & Dufresne, 2019).
- Version 3.2 publiée en 2024 + manuel de 111 pages en ligne sur le site Web (Lanos & Dufresne, 2024).

ChronoModel est gratuit, open-source et multiplateforme (Mac / Windows / Linux). Il est téléchargeable avec sa documentation à l'adresse : https://chronomodel.com/. Le code source est accessible sur GitHub : https://github.com/Chronomodel/chronomodel.git. La programmation est effectuée en C++ dans un environnement Qt et le code utilise la bibliothèque FFTW (http://www.fftw.org) pour le calcul des densités de probabilité.

ChronoModel présente une interface conviviale où les données et les informations *a priori* peuvent être organisées à l'aide d'éléments graphiques intuitifs (vignettes représentant les dates, les événements, les phases) qui s'organisent selon le principe d'un diagramme stratigraphique, autrement dit d'un graphe acyclique orienté (Desachy, 2005 ; Dye & Buck, 2015). Les modèles et méthodes statistiques bayésiens mis en œuvre dans CM sont documentés en détail dans deux publications (Lanos & Philippe, 2017, 2018) ainsi que dans le manuel de l'utilisateur de la version 1.5 (Vibet *et al.*, 2016).

2.1 Le modèle d'événement

Au cœur de ChronoModel se trouve le concept de la date inconnue θ d'un événement, qui est définie mathématiquement *via* un modèle statistique bayésien hiérarchique (*cf.* 12, section 5). Ce paramètre représente la date calendaire inconnue (date cible) d'un événement temporel dans une chronologie donnée (Dean, 1978). Dans ce modèle,

différents types de mesures peuvent être combinés pour estimer la date de l'événement cible. En supposant que l'événement peut être associé de manière fiable à un ou plusieurs échantillons appropriés, sur lesquels des mesures ont été effectuées et des dates calendaires obtenues, le modèle d'événement combine ces dates calendaires, supposées être contemporaines, afin d'estimer la date cible inconnue θ de l'événement. Ainsi, une mesure (appelée *data* dans CM) peut être un âge radiométrique (^{14}C), un âge de luminescence, des paramètres archéomagnétiques, ou toute mesure d'âge gaussienne ou uniforme (typo-chronologie).

Il est important de souligner que les situations archéologiques dans lesquelles des mesures multiples peuvent être associées sans équivoque à un événement unique ne sont pas très courantes. Dans la présente étude, à l'exception de mesures multiples de ^{14}C effectuées à partir d'un seul échantillon (artefact), l'hypothèse sous-jacente doit être que chaque mesure radiocarbone représente un événement unique, ce qui signifie que chaque niveau archéologique reconnu représente un palimpseste d'un nombre inconnu d'événements distincts.

2.2 Le modèle de phase

Une phase est représentée par un groupe d'événements archéologiques définis sur la base de critères archéologiques, historiques, géologiques, environnementaux ou autres – que l'on souhaite placer dans le temps et qui sont représentés par les dates d'événements cibles θ estimées par ChronoModel. Contrairement au modèle de date d'événement, le concept de phase dans CM repose sur l'hypothèse que les dates d'événement sont *a priori*, avant l'obtention des dates, uniformément réparties sur le temps, dans un intervalle défini par le début T_a et la fin T_b, appelé "période d'étude". Le caractère « uniforme » de cet *a priori* vient du fait qu'il est difficile de déterminer le rythme réel avec lequel les événements se sont accumulés au cours du temps. En revanche, on peut estimer le début, la fin et la durée d'une phase sur la base des dates *a posteriori* des événements θ dans la phase.

Dans les logiciels comme BCal et OxCal (Buck *et al.*, 1996, 1999 ; Bronk Ramsey, 1995, 2001, 2009a), les début et fin de phase sont estimés à partir de paramètres supplémentaires appelés « boundaries », mais qui ont pour inconvénient de provoquer *a priori* un resserrement des dates dans la phase en favorisant les dates les plus précises. La modélisation des données chronologiques dans ChronoModel évite d'introduire ces paramètres supplémentaires pour caractériser les débuts et fin de phase. En effet, une date imprécise peut aussi contenir une information fiable tandis qu'une date très précise peut être en réalité non fiable, c'est-à-dire fausse à cause d'erreurs inconnues (Lanos & Philippe, 2018). Dans ChronoModel, le début et la fin de phase sont alors déterminés comme la date minimale et la date maximale de l'ensemble des dates d'événements appartenant à la phase.

2.3 L'information temporelle *a priori*

Afin d'améliorer notre connaissance sur la date d'un événement par le biais de la modélisation bayésienne, il est nécessaire de fournir autant d'informations préalables que possible. Ceci est accompli en « contraignant » les événements (lorsque cela est

possible) et/ou les phases par des relations d'ordre temporel. Ces relations d'ordre peuvent être définies de différentes manières : ordre stratigraphique (relations stratigraphiques observées sur le terrain) ou par des changements de critères stylistiques, techniques ou architecturaux dont l'évolution dans le temps est connue. Ces relations de datation relative vont agir directement sur les dates des événements cibles. Par conséquent, dans un projet de modélisation, des modèles de phase distincts (multi-phasage) peuvent être définis sur la base de différents critères, de sorte qu'un modèle de phase peut en croiser un autre. Dans la présente étude, nous avons créé une structure de phase ordonnée pour chaque séquence archéologique stratigraphique de sorte que chaque niveau archéologique (ou regroupement de niveaux qui partagent la même technologie lithique et qui sont reliés par des remontages) dans la séquence constitue une phase unique. Dans la séquence d'un site donnée, chacune des phases de niveau est liée aux phases voisines par une relation d'ordre temporel. Ces structures de phases spécifiques à chaque site se croisent avec le système de phasage construit pour les différentes cultures archéologiques définies en France pour la partie du Paléolithique supérieur qui nous intéresse. Dans ce multi-phasage, un événement θ qui est estimé avec une mesure individuelle de ^{14}C, peut potentiellement appartenir à une phase dans un système (un niveau archéologique dans la séquence stratigraphique d'un site donné) ainsi qu'à une phase dans le second système (sa culture archéologique associée dans la séquence de phases culturelles). Un événement qui provient d'un site à composante unique (c'est-à-dire d'un site qui ne possède qu'un seul niveau culturel), n'est inclus que dans une seule structure de phase, à savoir la séquence de phases culturelles. Un tel réseau de contraintes temporelles contribue de manière significative à améliorer la précision et la fiabilité des estimations *a posteriori*. Ce système de structures de phases entrecroisées est rendu possible de manière très souple par le modèle de date d'événement dans ChronoModel.

2.4 Datations aberrantes (*outliers*)

Contrairement aux logiciels BCal et OxCal, CM ne dispose pas d'une fonction spécifique pour détecter les valeurs aberrantes (hors tendance, ou *outlier**) afin de les éliminer avant de reprendre l'analyse. En fait, dans CM, tous les artefacts datés liés à un même événement cible sont supposés *a priori* perturbés en raison de sources d'erreurs inconnues. Ces perturbations potentielles sont modélisées par des paramètres de variance individuelle (dite aussi variance irréductible*) associés aux dates individuelles (data) dans le cadre hiérarchique bayésien du modèle de date d'événement (Lanos et Philippe, 2017). Pour chaque mesure chronométrique, CM attribue une densité de probabilité *a priori* à la variance individuelle. Ainsi, le modèle de date d'événement dans ChronoModel permet de pénaliser automatiquement les mesures chronométriques dont les dates calibrées sont éloignées de la date d'événement cible ou en contradiction avec la stratigraphie. On peut évaluer la présence d'une valeur aberrante en examinant la distribution *a posteriori* de la variance individuelle associée à la date calibrée. Comme l'a montré la présente étude, le modèle chronologique contenant tous les âges ^{14}C et le modèle où les valeurs aberrantes identifiées ont été retirées ont produit des résultats essentiellement identiques (Banks *et al.* 2019, tableau 3, p. 204). Ceci est dû à la robustesse* du modèle de date d'événement lorsqu'il est confronté à des mesures aberrantes ou à des contradictions stratigraphiques.

2.5 Saisie des données et construction de la structure du modèle chronologique

Nous renvoyons le lecteur à la documentation de ChronoModel (www.chronomodel.com) pour obtenir des informations sur la manière de saisir les données chronométriques (c'est-à-dire de créer des événements), de regrouper les événements en phases, d'imposer des contraintes temporelles et d'effectuer les calculs bayésiens *via* les méthodes numériques MCMC (Monte Carlo par Chaînes de Markov). Des instructions détaillées et des exemples sont donnés dans les manuels d'utilisation qui sont disponibles dans la section téléchargements (https://chronomodel.com/download-chronomodel-software-mac-windows) pour chaque version du logiciel. Les données traitées dans notre exemple sont rassemblées dans le tableau 2 (Banks et al, 2019, p. 193–197).

2.6 Calibration des mesures de radiocarbone

Chaque mesure (âge) radiocarbone doit être calibrée en date calendaire, ce qui est accompli avec une courbe de calibration. Plusieurs courbes sont disponibles dans CM, et nous avons utilisé ici la courbe IntCal13 (Reimer *et al.*, 2013) (*cf.* 12, section 3)

2.7 Calculs numériques et distributions *a posteriori*

En général, nous ne pouvons pas calculer les distributions *a posteriori** de manière analytique, en résolvant directement les intégrales multiples associées à la densité de probabilité jointe* des variables du modèle global, sachant les données observées. En pratique, les calculs sont basés sur des méthodes numériques Monte Carlo par Chaines de Markov (MCMC), dont les paramètres sont réglables par l'utilisateur. Sans rentrer dans les détails techniques du calcul, on peut dire que le calcul MCMC consiste à tirer aléatoirement (à échantillonner) un jeu de valeurs pour les variables du modèle (date chronométriques, dates d'événement, erreurs individuelles) en fonction des densités de probabilité mises en jeu dans le modèle global (combinant vraisemblance des mesures, densités *a priori* et contraintes temporelles). Ceci constitue une itération MCMC, autrement dit un scénario chronologique possible pour les dates d'événement. Ce tirage est répété un très grand nombre de fois (typiquement 10 000, 100 000, voire 1 million de fois ou plus), ce qui produit pour chaque variable une série de valeurs appelée chaîne de Markov, valeurs que l'on peut visualiser avec la fonction *History plot* dans ChronoModel. L'expression « chaine de Markov » décrit le processus aléatoire qui permet de passer des valeurs d'une itération aux valeurs de l'itération suivante. Finalement, la densité de probabilité *a posteriori* sera estimée pour chaque variable à partir de ces valeurs échantillonnées au cours du calcul MCMC. Dans ChronoModel, on utilise une méthode à noyau gaussien pour estimer cette densité (Silverman, 1986) (*cf.* 7 & 8). En fait, le calcul MCMC fournit une estimation de la densité jointe *a posteriori* de toutes les variables impliquées dans le modèle, sachant les données (de mesure, de datation). Mais les densités d'intérêt sont les distributions *a posteriori* marginales* : c'est la distribution *a posteriori* d'une variable (date d'événement par exemple) quelles que soient les autres variables du modèle sachant les données. Ainsi on regarde les résultats séparément, variable par variable. On peut aussi regarder la densité associée à un couple de variables pour évaluer la corrélation *a posteriori* des variables. Mais l'examen des densités dans des dimensions supérieures ou égales à trois

pose de réelles difficultés de représentation et d'exploitation sur le plan chronologique. Ce point constitue encore une question ouverte.

Nous renvoyons le lecteur aux sections 4.2 et 4.3 du Manuel de l'utilisateur de ChronoModel v1.5 (disponible à l'adresse www.chronomodel.com) pour une description détaillée des diverses méthodes utilisées dans ChronoModel pour effectuer les calculs MCMC. Le point le plus important à évaluer est de savoir si la simulation MCMC a atteint la convergence. A l'heure actuelle, aucune fonctionnalité de CM ne permet d'effectuer automatiquement une telle évaluation, c'est donc à l'utilisateur d'effectuer ce travail. A cette fin, il existe trois outils dans ChronoModel qui peuvent être utilisés : le tracé de l'historique des tirages MCMC, la courbe du taux d'acceptation, et la courbe de corrélation entre les valeurs successives des tirages. Ces trois outils sont décrits en détail dans le manuel de l'utilisateur de ChronoModel v1.5 (disponible sur http://www.chronomodel.com). Un autre moyen consiste à examiner des chaînes de Markov parallèles, chacune calculée avec des valeurs de graine aléatoire de départ différentes. Si les distributions *a posteriori* estimées par les différentes chaînes sont très similaires, cela indique que l'équilibre a été atteint. Si l'équilibre n'est pas atteint, le nombre d'itérations de la période de « chauffage » (burn-in + période dite d'adaptation) doit être augmenté (voir le manuel de l'utilisateur).

2.8 Expression des résultats statistiques

Pour chaque distribution marginale *a posteriori* d'une variable, les résumés statistiques peuvent être donnés par :

1) l'intervalle de crédibilité* (IC) : il s'agit de l'intervalle le plus court qui contient par exemple 95 % des valeurs échantillonnées de la chaîne de Markov.

2) la région HPD* : il s'agit de la ou des plages de dates calendaires de plus forte densité de probabilité dans la distribution *a posteriori*. Ainsi, chaque date incluse dans une région HPD possède une densité *a posteriori* plus élevée qu'une date en dehors de cette région. Elle peut être caractérisée soit comme un intervalle (si la densité est unimodale), soit comme une union d'intervalles (si la densité est multimodale).

3) la moyenne* et l'écart-type* : c'est la moyenne (arithmétique) et l'écart-type des valeurs de la chaîne de Markov.

4) la médiane* Q2 : il s'agit de la valeur de la variable qui partage les valeurs observées en deux parts égales. Autrement dit, 50 % des valeurs de la chaîne sont inférieures à Q2 et 50 % sont supérieures à Q2.

Par exemple, dans la présente étude, les valeurs Q2 de l'écart-type *a posteriori* associé à chaque mesure chronométrique ont été examinées : on observe qu'une majorité de ces valeurs sont inférieures à 400 ans avec une plus petite population caractérisée par des valeurs bien supérieures à 400 ans. Ce sont les datations qui fournissent ces très fortes valeurs qui sont alors considérées comme aberrantes (*cf.* supra).

2.9 Le multi-phasage dans ChronoModel

Dans ChronoModel, comme on l'a vu au niveau de l'information temporelle *a priori*, il est possible de créer un multi-phasage afin de croiser des contraintes d'ordre sur le temps selon plusieurs critères qui peuvent être à la fois stratigraphiques, typologiques ou culturels. Par exemple, un phasage culturel peut recroiser un phasage stratigraphique dans le sens où certains événements cibles peuvent être attribués à ces deux phasages. Ces phasages apparaissent séparés sur la scène des phases dans ChronoModel. Un tel réseau de contraintes, lorsqu'il est possible, peut améliorer de manière significative la précision des estimations des dates dans le modèle.

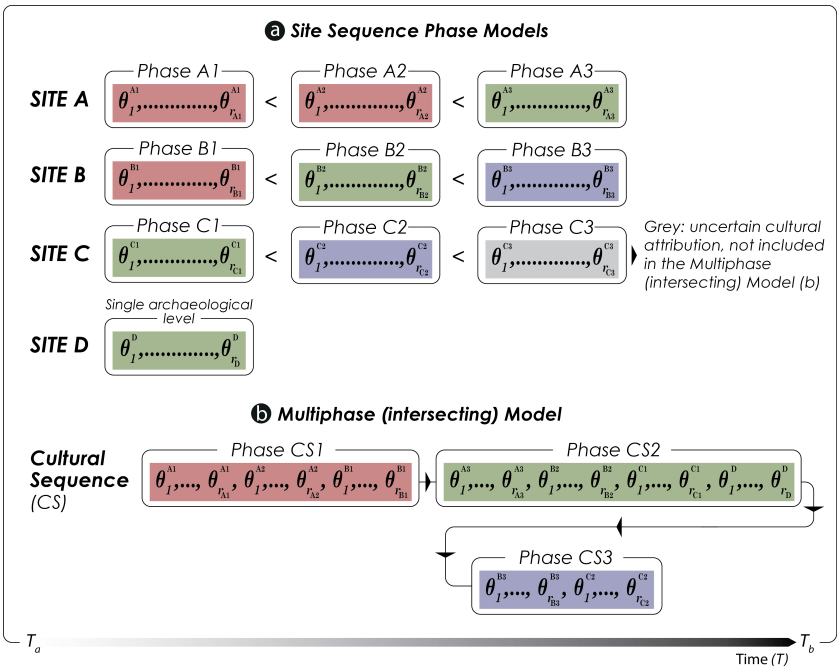


FIG. 2 : Exemple de multi-phasage (cf. section 3) illustrant la manière dont les dates d'événement sont contenues dans les différents modèles de phase. Pour les modèles de phase en (a), chaque phase représente un niveau archéologique observé, et les différentes couleurs représentent une attribution typo-technologique (culture archéologique), l'exception étant la phase C3 en gris. Le symbole < représente la succession stratigraphique, les phases de gauche étant plus anciennes (stratigraphiquement inférieures) que celles de droite. Le modèle multiphase (intersection) (b) est composé d'une succession de phases, chacune représentant une tradition typo-technologique unique (c'est-à-dire une culture archéologique). Chaque phase est ainsi constituée de dates d'événements provenant de tous les contextes archéologiques attribués à la tradition typo-technologique correspondante. Les flèches entre les phases culturelles représentent la succession temporelle des cultures archéologiques observées dans les archives archéologiques régionales. Ces contraintes d'ordre multi-phases agissent sur les dates d'événements, ce qui permet une nette amélioration de la précision de la chronologie.

L'exemple de la figure 2, qui est à la base du modèle mis en place dans notre exemple (Banks *et al.*, 2019) montre cinq phasages différents. Nous avons 4 séquences stratigraphiques A, B, C et D constituées de phases(contextes stratigraphiques) contenant chacune un ou plusieurs Events (pouvant eux-mêmes comporter une ou plusieurs da-

tations chronométriques). Et nous avons une séquence culturelle composée de 3 phases en contrainte de succession. Ainsi, un même événement peut appartenir à une phase stratigraphique d'un site et en même temps appartenir à une phase culturelle. On peut bien sûr avoir le cas d'événements qui n'appartiennent qu'à un seul phasage. Ces relations d'antéro-postériorité entrecroisées permettent de bien contraindre les données (les dates d'événement θ échantillonnées au cours du calcul MCMC devront respecter toutes ces contraintes temporelles en même temps) et donc d'obtenir des estimations *a posteriori* de date plus précises.

3 La chronologie du paléolithique supérieur en France (32–21 ka cal BP)

Les 143 mesures ^{14}C retenues ont été rentrées dans ChronoModel 2.0 (Lanos et Dufresne, 2019b) en utilisant la structure de phases entrecroisées décrite en figure 2. La première composante du modèle d'âge est composée de sites individuels caractérisés par de multiples niveaux archéologiques délimités sur le plan stratigraphique, sécurisés sur le plan contextuel et à partir desquels des mesures fiables de ^{14}C ont été obtenues. Chaque niveau archéologique est défini comme une phase et des contraintes stratigraphiques de succession sont placées entre chaque phase. Après examen approfondi du contexte archéologique et de la qualité des âges radiocarbone, nous avons retenu un total de treize séquences archéologiques (après élimination des datations aberrantes) (Banks *et al.*, 2019, figure 1). Pour trois sites, les analyses taphonomiques indiquent que les artefacts se sont déplacés entre les niveaux, bien que ces déplacements verticaux soient mineurs. Pour ces sites, les niveaux archéologiques qui partagent une industrie lithique commune, et donc une attribution culturelle commune, ont été regroupés en une seule phase, de sorte que la séquence stratigraphique finale était composée de ces phases "agglomérées".

Parallèlement à cet ensemble de séquences stratifiées, nous avons construit une autre séquence de phases chronologiquement ordonnées (contraintes par la succession) (Banks *et al.*, 2019, figure 2), dont chacune correspond à une tradition typo-technologique (i.e., une culture archéologique ; par exemple, Gravettien récent, Solutréen supérieur, etc.). Chaque âge radiocarbone contenu dans la séquence archéologique du modèle d'âge est également attribué à la phase de la structure parallèle du modèle d'âge qui correspond à l'attribution culturelle du niveau archéologique d'où provient l'âge. Par conséquent, un âge ^{14}C peut appartenir à deux phases : une phase d'une séquence stratigraphique et une phase chrono-culturelle. Cette structure multi-phasage entrecroisée permet d'incorporer toutes les données chronologiques pertinentes dans le modèle, ce qui permet d'exploiter l'ensemble des données disponibles en un seul traitement bayésien. Par exemple, dans ce modèle multi-phasage, les datations provenant de sites à niveau unique (donc non stratifiés) peuvent être incluses dans le phasage chrono-culturelle et peuvent donc contribuer à la chronologie finale, chose qui n'est pas possible avec d'autres logiciels.

Les contraintes stratigraphiques employées dans le modèle d'âge sont des transitions dures (c'est-à-dire sans chevauchement), alors que nous savons que les transitions culturelles n'étaient pas des événements instantanés. Cette utilisation de transitions

dures (relation d'ordre imposée entre les dates) est toutefois appropriée étant donné que la résolution chronologique des mesures du radiocarbone pour le Paléolithique supérieur reste large (typiquement de l'ordre de 100 à 300 ans) et englobe plusieurs générations humaines. De plus, cette étude se concentre uniquement sur les archives archéologiques françaises sur une durée approximative de 10–15 ka. Cette focalisation géographique restreinte évite les problèmes associés à des corrélations erronées entre des transitions culturelles potentiellement non synchrones sur une plus vaste zone géographique composée de régions séparées par de grandes distances et/ou des barrières naturelles importantes. Par conséquent, en gardant ces questions à l'esprit, nous estimons que l'utilisation de transitions dures entre les phases du modèle est appropriée. Au fur et à mesure que des données supplémentaires sur le radiocarbone deviendront disponibles, le nombre de séquences archéologiques bien datées augmentera certainement et des analyses qui évaluent la variabilité régionale potentielle au moment des transitions entre des phases culturelles spécifiques dans notre zone d'étude pourraient devenir possibles.

La plage d'étude a été choisie très large pour ne pas imposer de contraintes fortes sur les dates d'événement, soit de 40 à 15 ka cal BP. Les paramètres MCMC consistent en 3 chaînes MCMC, 1000 itérations pour le « chauffage » et 500 itérations par batch d'adaptation, avec un maximum de 20 batchs, et 100 000 itérations d'acquisition avec un pas de sélection (*thinning*) tous les 10 ans. L'examen des distributions d'écart-type individuel *a posteriori* sur les dates a permis de détecter les datations *outlier* (environ 18% du total des dates). Nous avons exécuté ce modèle de deuxième génération, exempt des valeurs aberrantes, avec les mêmes paramètres de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) que ceux utilisés pour le modèle initial. Les résultats obtenus avec ce modèle de deuxième génération restent quasiment identiques au modèle initial, ce qui illustre les propriétés de robustesse discutées plus haut.

Les intervalles chronologiques des phases typo-technologiques (barres horizontales pleines), délimités par les intervalles HPD des distributions *a posteriori* de début et de fin de phase, sont représentés sur la figure 3. Ces résultats sont présentés avec la courbe du ^{18}O de la calotte glaciaire du Groenland (Rasmussen *et al.*, 2014). Cette courbe nous permet de comprendre la variabilité climatique survenue au cours de chaque phase culturelle et aussi d'identifier quelles transitions culturelles sont synchrones avec un changement climatique majeur. Par exemple, on voit que la dernière moitié du Gravettien moyen coïncide avec l'évènement Heinrich 3 entre 30–29k cal BP, un évènement caractérisé par les conditions froides et sèches dans l'ouest de l'Europe. Une hypothèse est que l'apparition du faciès Rayssien du Gravettien moyen coïncide avec le début de cet évènement climatique et des analyses sont en cours afin d'évaluer sa pertinence. De même, la transition entre le Proto-Solutréen et le Solutréen ancien corrèle avec le début de l'évènement Heinrich suivant, nommé Heinrich 2, il y a 25,5k cal BP. On observe aussi des changements culturels qui coïncide avec des améliorations climatiques, comme la transition vers le Gravettien récent vers 29k cal BP et les interstades 4 et 3. Enfin, il est aussi important de voir qu'il y a des transitions culturelles qui ne correspondent à aucun changement climatique.

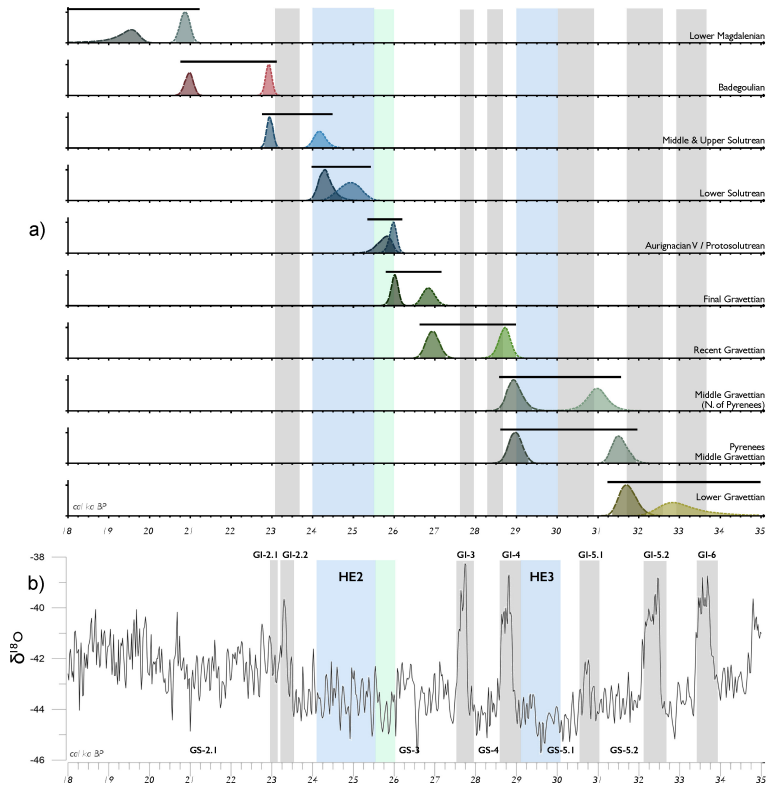


FIG. 3 : Distributions *a posteriori* de début et fin pour chaque phase typo-technologique (culturelle) produite par le modèle d'âge dont les valeurs aberrantes ont été exclues (deuxième génération).
a) Les barres horizontales pleines au-dessus des distributions de début et de fin (en pointillé) représentent les intervalles les plus courts dans lesquels se situent le début et la fin d'une phase à un niveau de confiance de 95%.
b) Enregistrement d18O du NGRIP (Rasmussen *et al.*, 2014). Les intervalles chronologiques des événements de Heinrich (HE) 3 et 2 utilisés dans cette étude (voir texte) sont représentés en bleu. L'intervalle en vert précédant immédiatement le HE2 représente une période de refroidissement de l'océan (Naughton *et al.*, 2009). Les interstades du Groenland sont indiqués en gris.

Un des objectifs d'un certain nombre d'études archéologiques est de comprendre pourquoi les adaptations des chasseurs-cueilleurs Paléolithiques ont changé et de rechercher quels sont les facteurs qui ont influencé ces changements. Un moyen de poursuivre cette ligne d'investigation est de reconstruire les niches écologiques exploitées par ces cultures paléolithiques et de comprendre si et comment les changements technologiques et comportementaux sont en lien avec les dynamiques de ces niches écologiques. Les informations concernant les contextes paléoclimatiques sont clés dans ces études de niches écologiques car les algorithmes qu'on utilise pour les estimer emploient des données paléoenvironnementales (Banks 2017 ; Banks *et al.*, 2021). Afin d'assurer que nous employons des données paléoenvironnementales pertinentes dans nos estimations de niches du passé, nous avons besoin de chronologies précises et robustes. Les méthodes Bayésiennes sont donc cruciales dans les études qui s'intéressent aux processus

et mécanismes des trajectoires culturelles et qui essayent de comprendre les relations culture-environnement du passé.