Chapitre 1.5
Modéliser une chronologie dynamique pour l'Égypte ancienne
Faire parler les textes et les objets

Anita QUILES

Institut français d'archéologie orientale, Pôle archéométrie, Le Caire, Égypte.

1 Introduction

L'histoire des Égyptiens anciens est découpée en trois grandes périodes d'unité séparées par des périodes intermédiaires avant d'entrer dans le monde hellénistique. Bien que ce découpage historique soit accepté de tous, aucun consensus n'existe pour restituer une chronologie absolue fine, règne par règne. Cette distorsion est due à la nature des sources disponibles mais surtout au rapport que les anciens Égyptiens entretenaient avec le temps historique. En effet, lorsqu'un souverain accédait au trône, son règne marquait le début d'un nouveau décompte (l'an 1) qui s'achevait l'année de sa mort. Pour relater un événement du passé, les Égyptiens renvoyaient à l'année de règne du souverain, *« l'an 2 de Snéfrou »*, *« l'an 8 de Thoutmosis III »*. Très tôt, des propositions ont été faites pour essayer de raccrocher ces temps historiques à une échelle absolue. Par l'analyse des sources textuelles, de synchronismes avec d'autres civilisations, ou de données astrochronologiques (Aubourg, 1995), et suivant le principe du *dead-reckoning* qui consiste à partir d'un point absolu à reconstruire une chronologie en additionnant les durées des règnes et l'ordre de succession des rois, des 'dates' ont été proposées pour une majorité de souverains (von Beckerath, 1999 ; Shaw, 2000 ; Hornung *et al.*, 2006 ; Vymazalova et Barta, 2008). Mais il suffit d'une imprécision ou d'une erreur sur un règne pour que la chronologie vacille. L'émergence des méthodes de datations radiométriques dans les années 50, notamment la datation par le carbone 14, a ouvert des perspectives nouvelles, renouvelées par le développement de la spec-

trométrie de masse par accélérateur dans les années 90. Il est désormais possible de produire de grands jeux de données ouvrant la voie à l'application d'outils statistiques puissants, en particulier la statistique bayésienne. Ces deux approches ont mené à des résultats divergents et d'intenses débats (Hornung *et al.*, 2006 ; Bronk Ramsey *et al.*, 2010). Tout l'enjeu est maintenant de poser un dialogue productif entre les approches historiques et archéométriques en les inscrivant dans une même chaîne de raisonnement, au sein d'un modèle statistique confrontant des données hétérogènes, issues de sources textuelles, historiques, archéologiques comme des données analytiques. C'est l'ambition du projet MERYT[1].

2 Les *a priori* de la donnée archéologique et historique

Pour construire un modèle chronologique, il faut en premier lieu en bâtir l'ossature, qui dans notre étude est la chronologie relative. Restituer un état dynamique de la liste de succession des rois et des estimations les plus précises de la durée de leurs règnes revient à rassembler les attestations d'années de règne disponibles pour chaque souverain au travers des textes, des sources historiques et archéologiques. Le corpus d'étude est inhomogène. Il rassemble plusieurs centaines de sources documentaires, annales chronographiques, sources textuelles biographiques, monumentales, graffitis, etc., dont la qualité est variable, certaines faisant consensus alors que d'autres subsistent parfois seulement par des archives photographiques discutées. Le dépouillement de ces archives va la plupart du temps se traduire par une information parlée *« d'après les sources, le règne d'Amenhotep III a duré entre 37 et 38 ans, il succède à Thoutmosis IV »*, *« le règne de Thoutmosis II a duré au moins 2 ans, mais peut être jusqu'à 13 ans »*.

L'information archéologique présente donc cette double propriété d'être à la fois subjective et dynamique. Subjective, car elle ne traduit qu'un état de nos connaissances à un instant donné. Nous ne connaissons pas *toute l'information*. Et cette information disponible est tributaire de paramètres orientés, les choix dans l'organisation d'une fouille, les outils disponibles pour faire un relevé, etc. Elle n'est par ailleurs absolument pas reproductible. Nous ne rencontrerons jamais deux mêmes qualités d'informations pour des documentations issues de deux contextes différents. Enfin, elle est dynamique dans le sens où l'état de nos connaissances continue d'évoluer alors même que nous cherchons à le figer à un instant donné. Cette contrainte temporelle est essentielle car elle impose d'intégrer une variable dynamique dans le modèle, en autorisant une implémentation de données inédites en temps réels.

3 La datation radiocarbone en contexte de fouille

Des jeux de données nouveaux peuvent être obtenus par la datation ^{14}C d'artefacts organiques prélevés lors de missions archéologiques en cours de fouille actuellement et dont les contextes archéologiques sont parfaitement documentés, ou au sein de collections muséales contextualisées. Chaque échantillon daté doit, *a priori*, c'est-à-dire avant même de réaliser le prélèvement, pouvoir être rattaché à un règne ou une période historique très courte de l'histoire égyptienne. Pour pouvoir intégrer ces résultats dans

[1] Projet ANR Meryt – ANR-19-CE27-0010 – https://www.ifao.egnet.net/archeometrie/anr-meryt/.

le modèle, plusieurs écueils doivent être surmontés. Bien dater un échantillon implique une démarche intégrative, permettant au préalable de comprendre ses compositions intrinsèques, identifier ses matrices, mais aussi caractériser ses états d'altérations et d'éventuelles contaminations, pour ajuster les protocoles de nettoyage en vue de datations ^{14}C. Mais il est aussi primordial de pouvoir parfaitement appréhender la relation entre la date de mort de l'organisme analysé, qui sera représentée par l'âge ^{14}C, et l'événement historique que l'on cherche à lui associer. L'exemple du textile est une problématique récurrente sur les chantiers de fouille en Égypte où ils sont très fréquemment mis au jour. Parfois, il s'agit de tissus déposés quasiment neufs dans une tombe, alors que d'autres ont pu être recyclés et avoir eu une vie avant leur abandon. La datation ^{14}C fournira la date de mort de la plante de lin, et ce possible « temps de vie » de l'objet devra être pris en compte dans le traitement statistique de la datation. Un textile déposé neuf donnera une datation plus précise, un textile usé nécessitera de convoluer sa densité* d'âge à une autre distribution* tenant compte de cette incertitude archéologique. Ainsi, chaque datation doit être prise dans sa singularité, et selon une première approche bayésienne qui permet de l'associer de la façon la plus juste possible à l'événement historique qu'elle représente. Ensuite, il faut l'intégrer au sein de l'ensemble de datations auquel elle participe, et la mettre en relation avec d'autres analyses qui peuvent par exemple, lui être, *a priori*, contemporaines, antérieures ou postérieures, de sorte de pouvoir *a posteriori*, dater l'événement global par une unique densité d'âge intégrant toute la complexité de données. La qualité du modèle produit reposera en particulier sur le nombre de datations, et il est donc essentiel, non pas de réaliser des analyses singulières, mais bien de construire des ensembles rassemblant des jeux de données statistiques.

4 Le modèle bayésien

En considérant les données archéologiques comme information *a priori** aux datations physiques, il est possible de combiner l'ensemble pour produire des distributions *a posteriori* rassemblant toute l'information. En ce sens, la statistique bayésienne offre clairement les meilleures possibilités de modélisation. Les données rassemblées sont de natures différentes. Il y a d'abord les données archéologiques, traduites principalement sous une forme parlée. L'ordre de succession des rois et les estimations plus ou moins précises de la durée de chacun de leurs règnes, auxquels viendront s'ajouter les « manques d'informations », par exemple de possibles règnes non documentés, ou des règnes connus mais pour lesquels aucune source écrite ou archéologique ne permet d'estimer la durée. Il y a ensuite les datations physiques, exprimées sous forme de distributions de lois de probabilité (âge ^{14}C sous forme gaussienne, et densité d'âge calibrée). Chercher à faire parler l'ensemble implique de pouvoir traduire toutes les données dans une même langue, c'est-à-dire sous forme de lois de probabilités. Il faut donc identifier les traductions mathématiques les mieux adaptées aux informations archéologiques pour restituer l'état de nos connaissances particulier à chacun des règnes. Cette traduction faite, nous produirons un modèle chronologique intégrant tous les indices chronométriques disponibles.

5 Le logiciel de modélisation OxCal

Plusieurs logiciels ont été développés ces vingt dernières années pour modéliser des séries de datations ^{14}C par une approche bayésienne. C'est le cas en particulier du logiciel open-source OxCal[2] développé par le Pr. Christopher Bronk Ramsey de l'Université d'Oxford (Bronk Ramsey, 1995, 2001, 2009a, 2017 ; Bronk Ramsey et Lee, 2013), qui repose sur des techniques d'échantillonnages MCMC à partir de l'algorithme Metropolis-Hastings. OxCal permet de calibrer les dates ^{14}C, et offre la possibilité de nombreuses constructions de modèles chronologiques intégrant différents types d'événements archéologiques. La démarche de calibration d'une datation ^{14}C est en soit, un processus bayésien. Plusieurs outils peuvent ensuite être utilisés pour modéliser une série d'analyses ^{14}C. Tout d'abord pour structurer un modèle*, une datation est entrée par l'outil *R_Date*, qui renvoie sa calibration, toutes les courbes actuellement utilisées étant disponibles (Bronk Ramsey, 2001). L'outil *Phase* permet d'assembler des séries de dates associées à un même événement, sans ordonnance temporelle entre elles. Aucun *a priori* temporel n'est donc posé sur l'ordre chronologique de ces analyses, au contraire de ce que propose l'outil *Sequence*, qui va *a priori* ordonner les distributions suivant un sens imposé (Bronk Ramsey, 2001). Surtout, OxCal va permettre de simuler des distributions temporelles pour des événements qui ne sont pas directement datés, mais qui sont les moments historiques que nous cherchons à figer dans le temps. L'analyse d'échantillons associés à un règne sans que l'on sache précisément quelle partie de ce règne, datera *a priori* tout moment du règne, alors que l'événement recherché sera la date d'accession au trône de ce même souverain. Avec l'outil *Boundary*, utilisé pour fixer des transitions de phases (Bronk Ramsey, 2009a), il est possible de simuler une distribution temporelle pour ce début de règne. Prenons le cas du roi R2, qui fut précédé d'un roi R1 pour lequel cinq datations associées à son règne ont été réalisées, ce même second règne étant représenté par trois analyses. Les datations sont associées à tout moment des règnes respectifs. *Boundary("Debut R2")* simulera la transition de phase continue entre la fin du règne de R1 et le début de R2, soit la distribution temporelle associée à l'accession au trône de R2 (Figure 1a).

```
Sequence("Chronologie")
{
 Boundary("Debut R1"){color="brown";};
 Phase("Regne 1")
 {
  R_Date("R1_D1", 4100,30);
  R_Date("R1_D2", 4120,30);
  R_Date("R1_D3", 4080,30);
  R_Date("R1_D4", 4105,30);
  R_Date("R1_D5", 4095,30);
 };
 Boundary("Debut R2"){color="brown";};
 Phase("Regne 2")
 {
  R_Date("R2_D1", 4050,30);
  R_Date("R2_D2", 4070,30);
  R_Date("R2_D3", 4080,30);
 };
 Boundary("Fin R2"){color="brown";};
};
```

[2] https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/OxCal.html,

D'autres outils offrent une grande disponibilité de combinaisons possibles, comme par exemple *After()* ou *Before()* qui contraignent un groupe d'analyses à être postérieur ou antérieur à un événement donné.

Ces structures de modèle traceront les *a priori* aux âges ^{14}C, alors intégrées comme lois de vraisemblance, et il conviendra de valider ou non le modèle *a posteriori*. Pour cela, des facteurs dits d'agréments sont calculés par le logiciel, de façon individuelle pour chaque datation (Ai), mais aussi pour l'ensemble du modèle (Am). Ils mesurent la robustesse du modèle et valident ou infirment les *a priori* initiaux (Bronk Ramsey, 2001).

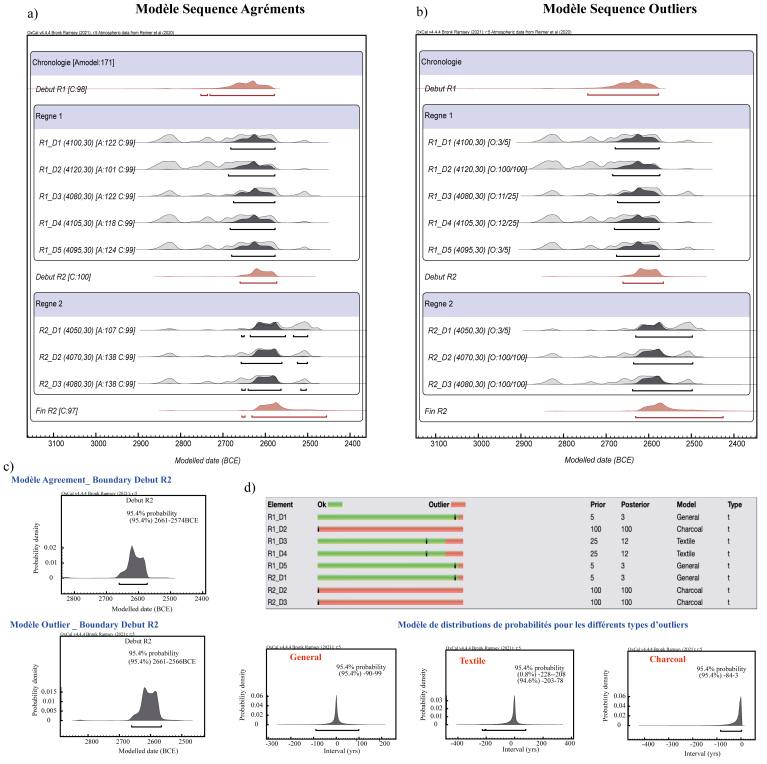


FIG. 1 : Exemple de construction de modèle mettant en séquence continue deux règnes R1 et R2, avec le logiciel OxCal a) Modèle avec calcul des facteurs d'agréments b) Modèle avec intégration d'outliers c)comparaison des distributions temporelles obtenues pour l'accession au trône de R2 d) évaluation des lois de probabilités associées aux différents modèles d'outliers.

Au sein même de ces structures, il est ensuite indispensable de réfléchir à la façon d'intégrer chaque datation individuellement. Comme nous l'avons expliqué précédemment, le lien entre une datation ^{14}C et l'événement historique que l'on cherche à dater n'est pas trivial, et surtout, n'est ni systématique ni reproductible. L'analyse de graines déposées en offrande auprès d'un défunt date précisément, effectivement, l'enterrement de cet individu. Dans ce cas la densité d'âge ^{14}C gaussienne issue de l'analyse des graines est la représentation statistique juste de l'événement. Le textile usagé servant de linceul au corps d'un individu mort sous le règne du souverain R1, pré-date l'année du règne de R1 durant laquelle l'individu est décédé. Son lien avec la date d'accession au trône, événement historique que l'on chercher à contraindre, est à la fois limité par la durée de son règne, mais aussi par l'âge effectif du tissu au moment de la mort de l'individu. Il faut donc pondérer cette densité par une loi de probabilité légèrement dissymétrique, donnant plus de poids aux tirages précédents la valeur moyenne, mais n'excluant pas de rester autour de celle valeur (Figure 1 d). De la même façon, des charbons de bois retrouvés dans un foyer ne peuvent que pré-dater l'occupation. Si le bois est de courte durée de vie, alors ils peuvent être considérés comme de bons marqueurs, mais s'il s'agit de bois à longue duré de vie, il faudra pondérer ses densités d'âge par des densités exponentielles capables de décaler les densités d'âge vers le plus récent, suivant une durée qu'il nous revient d'évaluer (par exemple la durée de vie moyenne de ces arbres).

Toutes ces densités de pondérations sont appelées *outliers* et OxCal propose différentes possibilités pour les représenter individuellement (Bronk Ramsey, 2009b). Il est ainsi possible de fixer le type de loi de probabilité associé, l'échelle de temps sur laquelle les tirages MCMC vont se déplacer, et pour chaque date, la probabilité qu'elle soit un *outlier* (Figure 1b).

6 Études de cas

Deux études de cas illustrent comment établir la chronologie de fréquentation d'un site associée à un événement historique très précis, puis comment modéliser la chronologie d'une période historique.

6.1 Étude chronologique du site de Baharya, Égypte

Les sites témoignant d'une fréquentation permanente dans l'oasis de Bahariya sont nombreux et bien préservés. Un programme de fouilles archéologiques a été mené de 1999 à 2014 conjointement par l'Ifao et l'Université de Strasbourg, sous la direction de Frédéric Colin. L'étude chronohistorique visait à déterminer la chronologie des occupations humaines en croisant les données archéologiques (stratigraphiques, céramiques, numismatiques) et radiocarbone, pour fixer dans le temps, au sein des cinq périodes archéologiques identifiées sur le site, la transition climatique mise en évidence par les études paléoenvironnementales (Colin *et al.*, 2020). À l'aide d'OxCal, les résultats ^{14}C d'échantillons venant d'un bâtiment principal ont été organisées suivant leur attribution stratigraphique lors de l'échantillonnage. Ils ont été regroupés au sein de deux *Phases* A et B d'occupation du bâtiment, la seconde phase étant elle-même divisée en deux niveaux 1 et 2. L'ensemble a ensuite été encadré par des *Phases* de

Construction et de *fin d'occupation* du bâtiment. Trois *a priori* principaux étaient disponibles, en complément des données stratigraphiques :

a) L'étude céramologique a identifié des amphores de type Dressel 2/4 dans les niveaux de fin d'occupation du bâtiment, dont on sait qu'elles se raréfient à partir de la deuxième moitié du deuxième siècle de notre ère pour totalement disparaitre un siècle plus tard.

b) Deux pièces de monnaies retrouvées dans les couches de constructions du site sont respectivement frappées de l'an 2 de l'empereur Hadrien et de l'empereur Domitien.

c) La transition climatique est attestée par l'étude sédimentologique entre les deux Phases A et B.

Chacun de ces *a priori* a été traduit sous forme de loi de probabilités (Colin *et al.*, 2020, Figure 5) :

a) En accord avec la qualité de la donnée céramologique, cette contrainte a été simulée de sorte de rester relativement flexible dans le modèle. Elle est intégrée comme *terminus ante quem* (TAQ), à l'aide de l'outil *Before()*, combinant une loi exponentielle et une loi uniforme allant de 150 EC à 250 EC.

b) Les dates de frappe, 29 août 117 et 28 août 118 EC pour Hadrien, et entre 81 et 96 EC pour Dominitien, fournissent des *termini post quos* à l'occupation du bâtiment. Elles sont intégrées dans la Phase *Construction* du modèle par la combinaison d'une fonction *After()* et d'une loi de distribution normale.

c) La période de transition climatique a été simulée à partir d'une fonction en rampe allant de zéro jusqu'à une probabilité maximale correspondant au moment où la transition est effective (*Zero_Boundary/Boundary*). Cela intègre la dimension d'évolution dans le temps de ce changement climatique.

Le modèle obtenu intègre donc à la fois les données stratigraphiques, paléoclimatiques, numismatiques et céramologiques. Il montre que l'assèchement du climat expérimenté par les agriculteurs du désert s'est produit entre 133 et 214 EC (2σ), soit entre les règnes d'Antoninus Pius et de Caracalla (II^{e}-III^{e} siècle EC) (Colin *et al.*, 2020, Figure 6). Cet exemple vise surtout à exposer comment la modélisation de fréquentation d'un site peut permettre de simuler une densité d'âge associée à un événement historique précis, qui peut ensuite être intégrée dans un modèle chronologique général.

6.2 Modèle chronologique dynastique

La 18^{e} dynastie, au sein de laquelle ont régné les rois Thoutmosides, Amenhotep ou encore Toutankhamon, est une période historique bien documentée de l'histoire égyptienne, à la fois par la richesse des sources documentaires qui nous sont parvenues, et pour la conservation d'objets et la disponibilité de matériel archéologique sur de nombreux sites et en musée. Elle offre un cas d'étude pertinent pour développer une preuve de concept (Quiles *et al.*, 2013), qui pourra ensuite être appliquée à des périodes moins bien contraintes.

D'abord, il s'agit de rassembler nos *a priori* sur la chronologie de cette dynastie. L'ordre de succession des rois fait consensus et la durée de la plupart des règnes est relativement bien établie, à l'exception de ceux de Thoutmosis I^{er}, Thoutmosis II et Horemheb pour lesquels des incertitudes d'une dizaine d'années demeurent. Des dates sothiaques, c'est-à-dire des correspondances entre un jour du calendrier civil égyptien et la réapparition de l'étoile Sirius dans le ciel, sont attestées pour les règnes d'Amenhotep I^{er} et de Thoutmosis III.

Nous pouvons tirer de ces informations un squelette chronologique ordonnant les treize règnes successifs, et traduire les durées de règne sous forme de lois de probabilité. Celles précisément connues sont représentées par des distributions uniformes strictes, traduisant un état de connaissances certain. Celles pour lesquelles une incertitude demeure ont été pondérées sur les queues de distributions par des lois de *student* centrées sur la durée maximale de règne envisagée. Prenons pour exemple le règne de Thoutmosis II, que certains envisagent de deux années alors que d'autres vont jusqu'à 13. Cela signifie qu'il a effectivement duré au moins deux ans et pourrait s'être étendu jusqu'à 13 ans, chaque année supplémentaire étant un peu moins probable que la précédente. Nous avons reproduit cette information en combinant des fonctions *After(2)* & *Before(13+T(5))* (Figure 2a).

Les contraintes apportées par les datations sothiaques peuvent être converties en années calendaires, puis intégrées dans le modèle à l'aide de *C_Date*.

Des séries de datations associées précisément aux règnes de Thoutmosis III et Toutankhamon ont ensuite été réalisées sur des objets organiques de courte durée de vie (alfa, palme, graines), provenant du cimetière est de Deir el-Medineh et conservés au musée du Louvre. Cette qualité d'échantillonnage est exceptionnelle car elle date avec précision les enterrements ayant eu lieu dans chacune des tombes investies. Les datations ont été combinées par événement, puis rassemblées au sein de *Phase* associées aux règnes concernés.

L'ensemble a finalement permis de modéliser une chronologie complète de cette dynastie, simulant une densité d'âge pour l'accession au trône de chaque roi, ces distributions temporelles rassemblant des données archéologiques, historiques, textuelles, astrochronologiques et archéométriques (Figure 2b, Quiles *et al.*, 2013).

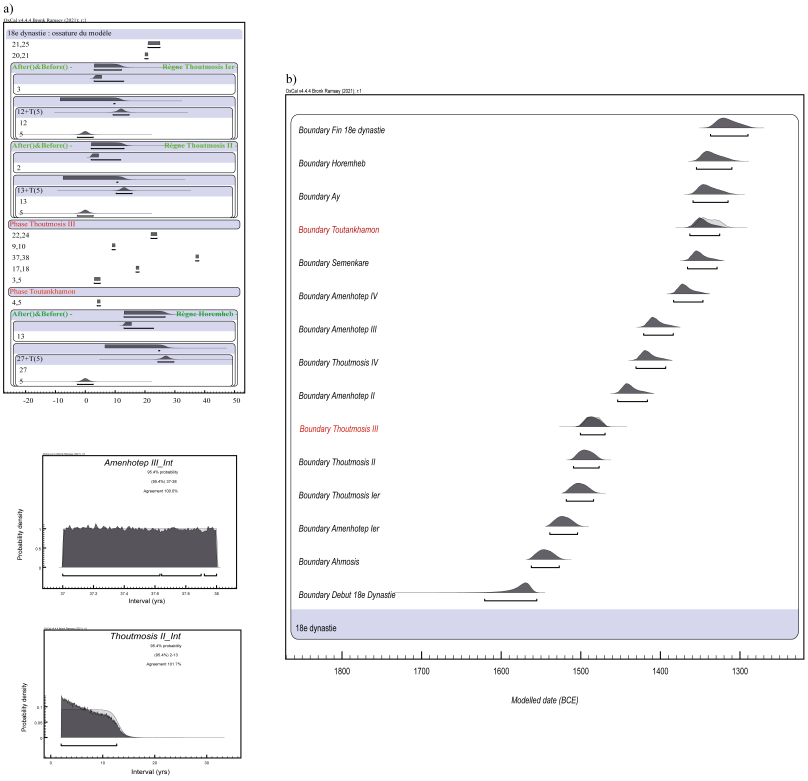


FIG. 2 : Modèle chronologique pour la 18^{e} dynastie égyptienne. (a) Les durées de règnes ont été traduites sous forme de lois de probabilité suivant l'état de nos connaissances (lois en créneau ou loi combinée). (b)Pour chaque règne, une densité d'âge associée à la date d'accession au trône du roi a été simulée.

7 Un modèle intégré et dynamique

Les deux exemples de modélisation présentés ouvrent la voie à des constructions plus complexes, intégrant davantage de paramètres spécifiques, pour l'appliquer aux périodes moins bien documentées de l'histoire égyptienne. Concernant les *a priori*, il va en particulier falloir modéliser des absences d'informations, règnes manquants, ou règnes possiblement parallèles par exemple. Les densités de vraisemblance portées par les âges ^{14}C devront aussi être plus spécifiquement pondérées, la disponibilité des matériaux ne permettant que rarement de produire de larges séries sur de même nature d'échantillons à courte durée de vie comme des graines ou de l'alfa (Quiles *et al.*, 2021). Il faudra aussi mettre en cohérence différentes séries d'analyses associées à un même règne, et pouvoir *a priori* les organiser. Enfin, l'émergence d'un modèle unique imposera d'intégrer chacun des modèles dynastiques en prenant en compte les possibles chevauchement entre certains groupes de rois.

La complexité de ce modèle augmentera avec l'hétérogénéité des données mais c'est aussi ce qui en assurera la robustesse. L'inférence bayésienne garantira une approche dynamique et ce modèle sera donc capable d'évoluer à tout moment, d'intégrer des donnés inédites dès lors qu'une information nouvelle sera rendue disponible, qu'il s'agisse d'une nouvelle attestation de règne, d'un modèle chronostratigraphique de fréquentation inédit, ou encore d'ajout de datations ^{14}C contextualisées.

En résumé

Afin de modéliser vos données ^{14}C pour répondre à des problématiques archéologiques ou historiques :

- Toujours réfléchir, lors de l'échantillonnage, au lien entre la mort de l'organisme daté et l'événement historique que vous cherchez à fixer dans le temps.
- Toujours s'assurer que les *a priori* intégrés dans le modèle ont été obtenus indépendamment des datations ^{14}C.
- Quand la disponibilité de terrain le permet, privilégier la réalisation de séries de datations associées aux mêmes contextes archéologiques, et réalisées sur des échantillons de natures différentes.
- Garder en tête qu'un modèle traduit un état des connaissances dynamique, et qu'il est susceptible d'évoluer dès lors que de nouvelles données seront disponibles.