

Mémoire du bois : apport de la chimie à la connaissance de la charpente carbonisée de Notre-Dame de Paris

Chargée de recherche au CNRS, UMR 7209 Archéozologie, archéobotanique : Sociétés, Pratiques et Environnements (ASSPE), CNRS/MNHN, Paris.

Spécialiste d'une discipline dont on ne prononce le nom que rarement, la dendro-anthracologie, c'est-à-dire l'identification et l'étude des cernes des bois archéologiques carbonisés pour comprendre les modes d'exploitation de la forêt par les sociétés passées.

1 Les charpentes de la cathédrale de Notre-Dame

1.1. Quelques notions

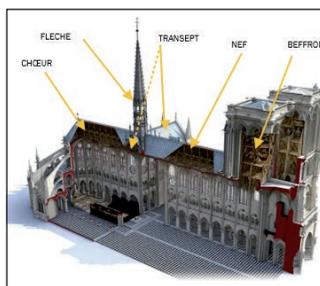
Notre-Dame de Paris ! Son nom à lui seul évoque un chef-d'œuvre architectural en pierre, véritable prouesse des artisans du Moyen Âge. Mais c'est oublier un peu vite que sa charpente retient l'intérêt des architectes depuis le XIX^e siècle. Bien qu'étant aujourd'hui l'une des charpentes médiévales les

mieux documentées, de nombreuses questions restent en suspens et nous amènent à nous interroger un peu plus sur le travail des hommes qui a conduit à l'édification de ce joyau.

La **figure 1** permet de localiser cette charpente au sein de l'édifice. On la retrouve à l'aplomb du vaisseau principal composé de la nef, du chœur et des bras du transept qui forment la traverse d'un plan en croix avec le vaisseau principal.

Figure 1

Localisation des charpentes dans Notre-Dame (Restitution de L. Stefanon in Sandron et Tallon 2019. Notre-Dame de Paris : neuf siècles d'histoire).



À cela s'ajoutent la flèche et les beffrois, tours de bois dans lesquelles les cloches sont suspendues. En dehors des beffrois et de la flèche, ces charpentes sont formées d'une succession de structures triangulaires que l'on appelle des fermes (figure 2).

1.2. État des connaissances

Une documentation récente a été réalisée par Cédric Trentesaux, architecte, et Rémi Fromont architecte en chef des Monuments Historiques, aujourd'hui en

charge de la restauration de la cathédrale. Leur relevé architectural (figure 3) a été mené entre 2014 et 2015. Très riche en détails archéologiques, ce travail apporte de nombreux renseignements sur les usages et les évolutions de la charpente, sur ses déformations, sur le repérage des réparations et sur l'étude des marquages et des systèmes de levage.

La figure 4 est un modèle numérique en 3D, réalisé par le groupe de travail « Écosystème numérique du chantier scientifique » (coord. L. de Luca). Cette figure montre que toutes les fermes ne sont pas construites selon le même modèle ; il existe une variabilité entre la nef, le chœur, les bras du transept mais aussi au sein de ces ensembles. Cette variabilité traduit le fait que nous n'avons pas affaire à « une » charpente mais à « des » charpentes, ce que montre d'ailleurs la figure 5, un autre modèle

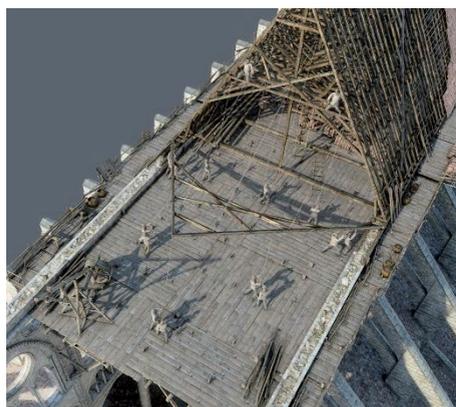


Figure 2

Assemblages et levages de fermes. À gauche : reconstitution réalisée dans le cadre de l'étude de la cathédrale de Bourges où un plancher a été installé pour permettre le montage des fermes et leur levage. © F. Epaud.

À droite : ferme reconstruite sur un modèle identique à la ferme n°7 de la nef de Notre-Dame (source : <https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr>).

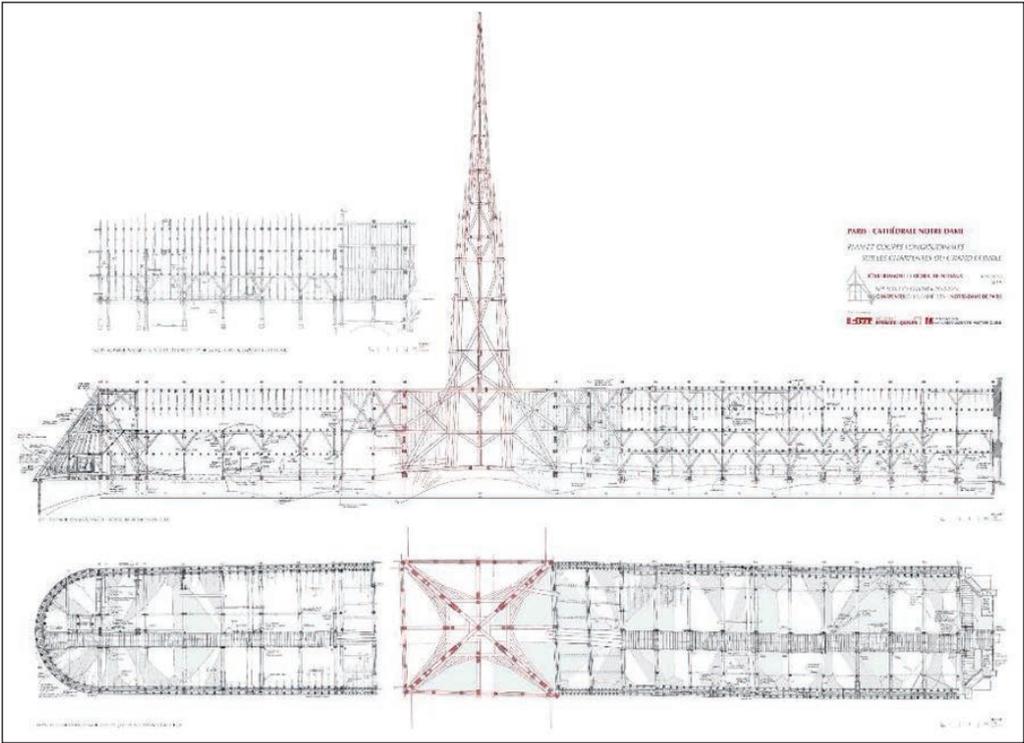


Figure 3

Relevé architectural réalisé par Fromont et Trenteseaux en 2015.

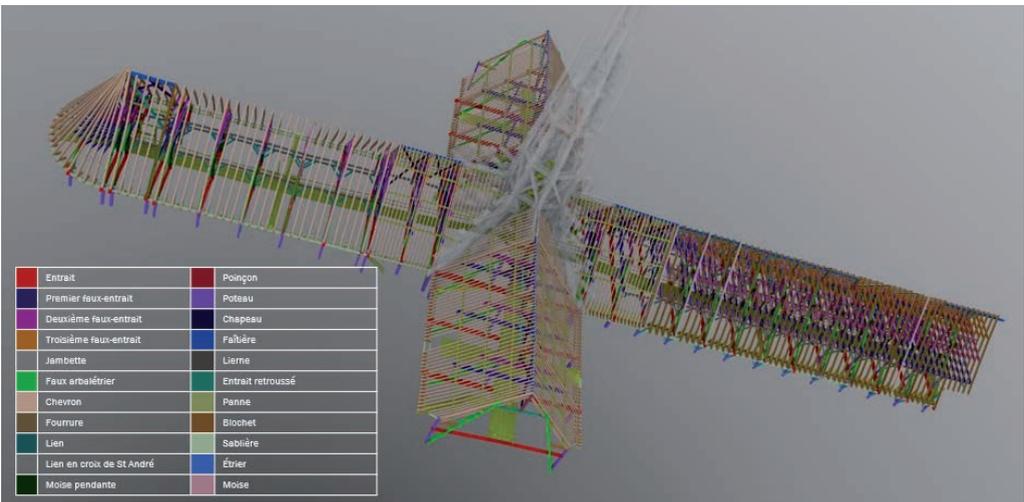


Figure 4

Modèle numérique 3D de la charpente. Un code couleur a été attribué à chaque pièce architecturale.
© K. Jacquot.

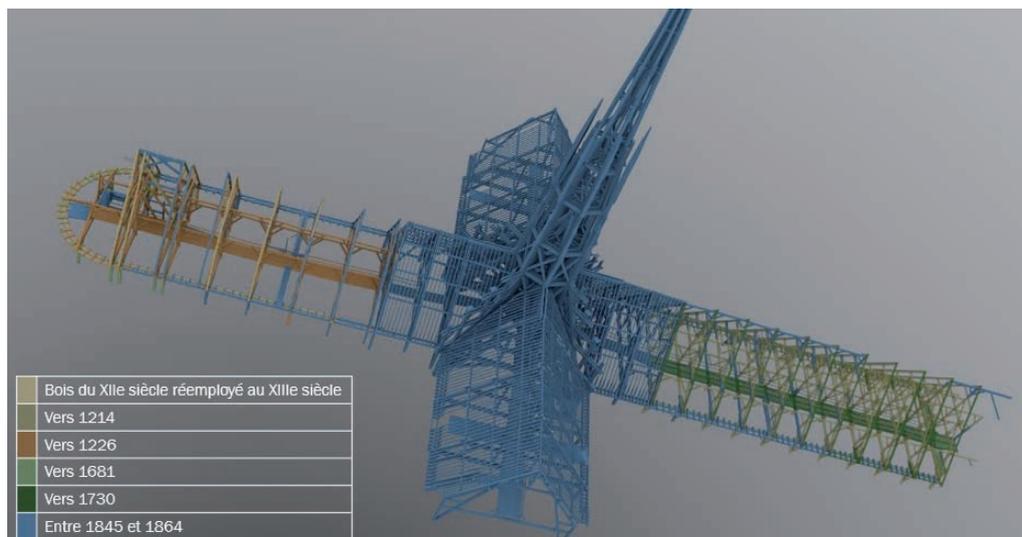


Figure 5

Modèle numérique 3D de la charpente et phasages chronologiques. En bleu, les fermes du transept et de la flèche qui datent de la grande restauration de 1860 de Viollet-le-Duc¹. Cette restauration a empiété sur deux fermes du chœur et trois de la nef. Le reste du chœur et de la nef est du XIII^e siècle, à l'exception de quelques ajouts et de réparations, également figurés en bleu. La charpente de la nef, plus perfectionnée, a été construite postérieurement. Enfin, une partie des bois du chœur réemploie ceux d'une première charpente de la fin du XII^e siècle, démantelée pour surélever les murs et donc, la toiture. © K. Jacquot.

réalisé en fonction des phases chronologiques de construction connues.

1.3. Des charpentes qui ont encore de nombreux secrets à révéler

L'histoire de ces charpentes est plutôt bien documentée ; elles font partie des grandes charpentes médiévales remarquables par leur conception, leur réalisation et par leur état de conservation.

1. Viollet-le-Duc : architecte collaborateur du concours lancé par la Commission des monuments historiques en 1843 pour trouver un projet de rénovation de la cathédrale alors délabrée.

Néanmoins elles restent mal connues dans les détails, et selon les termes de Fromont et Trenteseaux « *les anciennes descriptions précises et détaillées sont rares voire même parfois incohérentes et laissent ainsi de nombreuses interrogations* ». Parmi ces interrogations, certaines peuvent trouver leurs réponses grâce à l'étude des bois carbonisés. Il s'agit notamment d'identifier précisément les essences de bois² qui composent ces charpentes, d'approfondir la chronologie fine de leur réalisation, de caractériser la

2. Essences de bois : l'essence d'un bois désigne l'espèce ou la sous-espèce à laquelle appartenait l'arbre d'où provient ce bois.

forme, l'âge des bois et leur provenance géographique. Le dernier point n'est pas directement lié à la connaissance de la charpente mais plutôt au climat des XII^e et XIII^e siècles, période qui correspond à une amélioration climatique identifiée par les scientifiques et nommée « Anomalie climatique médiévale ». Pour chacune de ces questions, nous présentons ci-dessous les hypothèses de travail et les méthodes employées – entre autres, celle de la biogéochimie (**encadré**) – pour les tester.

2 L'arbre et la mémoire du bois

2.1. L'arbre, un enregistreur de son environnement

L'arbre est un enregistreur de son environnement, ce qui se traduit par exemple par sa physionomie (**figure 8**).

De même, le bois qui constitue le tronc de l'arbre, enregistre année après année certaines variations de l'environnement. Tous les ans, l'arbre forme un nouveau cerne de croissance en périphérie qui s'ajoute, à la manière de poupées

QU'EST-CE QUE LA BIOGÉOCHIMIE ?

La biogéochimie est une discipline qui se situe entre la chimie, l'écologie, la biologie et les géosciences (**figure 6**). Elle s'intéresse au fonctionnement des écosystèmes et notamment, au processus de transfert des éléments chimiques du monde abiotique – atmosphère, sédiments – au monde biotique à savoir les organismes vivants qui, à leur tour, vont retransmettre ces éléments à l'environnement. Nous allons donc particulièrement nous intéresser au cycle biogéochimique entre l'arbre et son environnement (**figure 7**).

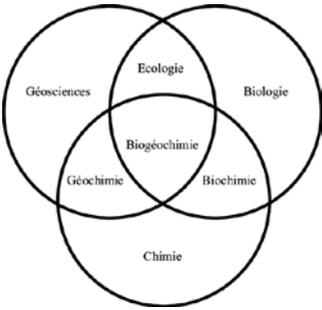


Figure 6
Présentation des domaines scientifiques mis en jeu dans la biogéochimie.

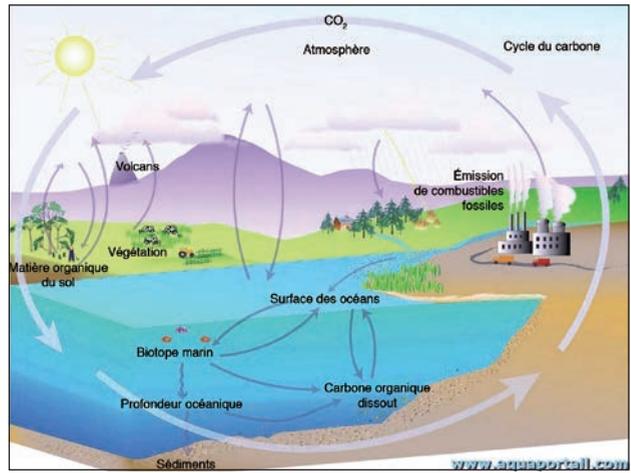


Figure 7
Processus de transfert par cycle du carbone.

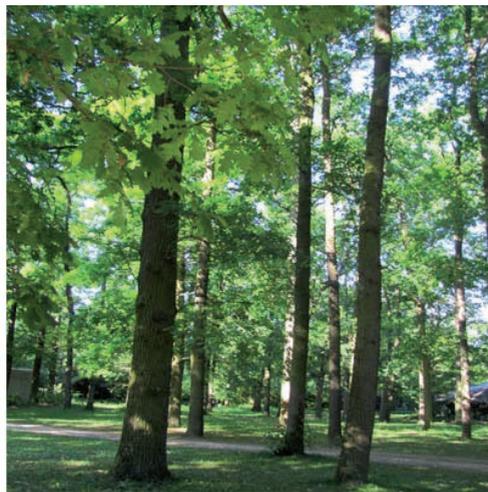


Figure 8

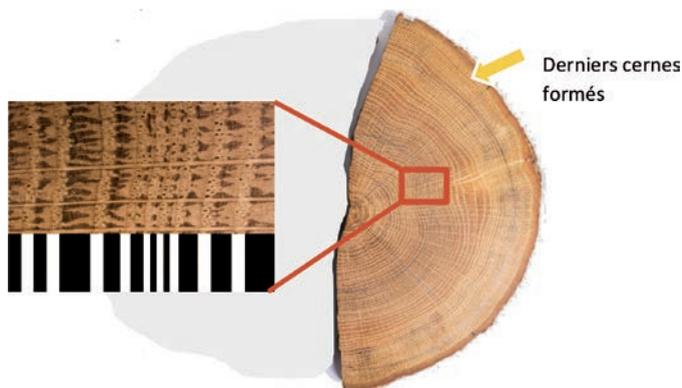
La physionomie d'un arbre dépend de la présence ou non d'autres individus à son voisinage (Source : <http://www.snv.jussieu.fr>). À gauche : un chêne isolé. Le tronc est trapu, les branches maîtresses démarrent assez bas et le houppier de l'arbre constitué des feuilles est extrêmement bien développé. En l'absence d'arbres concurrents, cet individu a pu croître sans gêne. À droite, des chênes de la même espèce constituent un boisement : les troncs sont élancés, droits et rectilignes, il n'y a pas de branches basses importantes et le houppier est extrêmement peu développé. C'est ici la conséquence de la présence de nombreux individus dans le voisinage.

russes, aux précédents. En milieu tempéré, l'arbre forme du bois au printemps et en été (figure 9), c'est-à-dire au cours de deux périodes pendant lesquelles la photosynthèse est effective. Au fil du temps, l'arbre va ainsi former une sorte de « code-barres » qui reflétera à la fois son potentiel génétique, son âge, son environnement (par exemple, la présence ou

l'absence d'arbres voisins, une maladie, un été sec, etc.). Ces largeurs de cerne, qui constituent un outil de datation, peuvent être combinées à d'autres indicateurs tels que les compositions chimiques, moléculaires, isotopiques, ce afin d'obtenir des données encore plus fines sur les modes de croissance, les zones de provenance du bois et le climat passé.

Figure 9

Vue d'une coupe transversale de chêne. Les anneaux concentriques sont les cerne du bois. On distingue ainsi à l'échelle d'un cerne (une année) un bois de printemps (schématisé par des bandes blanches) et un bois d'été (schématisé par des bandes noires) formant au fil du temps un « code-barres ». © A. Dufraisse.



2.2. Le bois et la carbonisation

Lors de la carbonisation, le bois subit des déformations anatomiques, mécaniques et chimiques. La **figure 10** présente une rondelle de « chêne sessile », carbonisée et non carbonisée. On constate une réduction de taille – le retrait du bois – avec l'apparition de fentes de retrait³. Le charbon est par ailleurs un matériau friable qui se fragmente, contrairement au bois. Il existe de même des modifications chimiques et isotopiques, invisibles à l'œil

3. Fentes de retrait : fente se formant dans le bois lorsque celui-ci perd par séchage, une partie de l'eau le composant.

nu en dehors de la couleur noire. Après carbonisation, l'information contenue dans le bois peut être modifiée. C'est pourquoi une partie des chercheurs du groupe de travail « Bois et Charpente » concentre ses efforts sur la calibration du signal en fonction des intensités de carbonisation subies par le bois.

2.3. Le bois, un outil de datation

Des arbres d'une espèce, qui ont poussé dans des conditions proches, (dans une même région et donc dans le même microclimat avec les mêmes sécheresses et les mêmes tempêtes) présentent



Figure 10

Rondelle de chêne non carbonisée (à droite) et carbonisée à 400 °C pendant une heure (à gauche). © CNRS.

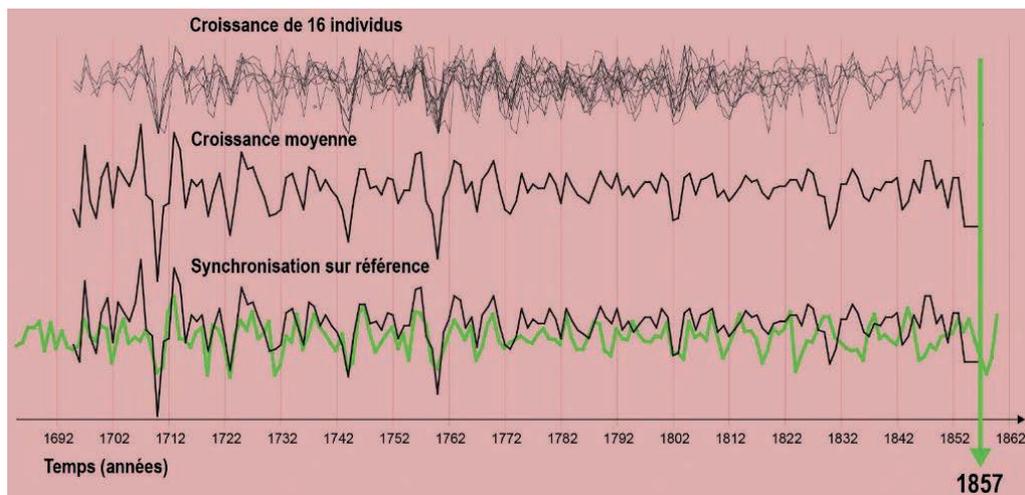


Figure 11

Traduction de code-barres en courbes de croissance. Les codes-barres ont été transformés en courbes de croissance avec les largeurs de cernes en ordonnées et le temps en abscisses. En haut, nous pouvons observer les courbes individuelles de seize échantillons archéologiques à partir desquels une courbe de référence moyenne a été construite et synchronisée avec la courbe de référence (en vert) en recherchant des portions communes. © O. Girardclos.

des codes-barres qui se ressemblent (figure 9). Fondée sur ce principe, l'étude des largeurs de cernes de plusieurs dizaines d'arbres d'une même région, contribue à construire un code-barres moyen pour servir de référence. De proche en proche, en intégrant des arbres de charpentes anciennes, des bois préhistoriques, on arrive à obtenir un code-barres moyen à l'échelle de l'ouest de l'Europe sur les huit mille dernières années et qui sert de référence (figure 11). Cette démarche permet de dater un bois trouvé en contexte archéologique et de connaître sa date d'abattage à l'année près si le dernier cerne est présent. Il est même possible d'estimer la saison d'abattage en fonction de la présence de bois de

printemps seul ou de bois de printemps et de bois d'été.

Si le dernier cerne est absent mais que l'aubier⁴ du bois est présent, il est possible de proposer une fourchette d'estimation. Enfin, lorsque l'aubier est totalement absent, la date est dite « *terminus post quem* » autrement dit, il s'agit de la date à partir de laquelle l'arbre a été abattu. Pour dater les bois d'une charpente, on se retrouve face à la contrainte de l'équarrissage – le fait de chercher à donner une section carrée au tronc pour obtenir une poutre (figure 12). En façonnant ainsi le bois, on peut effacer

4. Partie vivante de l'arbre située en périphérie du tronc dans laquelle la sève brute circule. Ce compartiment qui représente une vingtaine d'années chez le chêne, apparaît plus clair (figure 9).



Figure 12

Perte de l'information en fonction de l'équarrissage © O. Girardclos.

totalemment ou partiellemment les cernes périphériques, notamment l'aubier. La date d'abattage n'est alors plus à l'année près ; elle devient une fourchette de datation ou une date *post quem*.

3 Apport de la dendro-anthracologie à la connaissance du bois des charpentes et de son environnement

Revenons aux charpentes de Notre-Dame. Certains ont surnommé ces charpentes « forêt » parce que les milliers de bois qui ont servi à sa construction donnaient l'illusion d'une forêt construite en chêne (figure 13). On estime que 800 à 1 000 chênes ont été nécessaires à sa construction, chaque pièce importante provenant d'un arbre différent.

Quelles informations peut-on tirer de cette charpente carbonisée ? Cela peut sembler paradoxal mais c'est justement parce qu'elle est détruite et que les bois carbonisés ne sont pas réutilisables pour la reconstruction de la charpente

que l'on peut les découper et les étudier – bien entendu dans le respect de la conservation de certains éléments patrimoniaux, afin de répondre aux questions précédemment posées. Aujourd'hui, l'étude des bois carbonisés commence à peine et les réponses sont donc préliminaires.



Figure 13

La charpente de la nef de Notre-Dame, plus perfectionnée que celle du chœur, a disparu lors de l'incendie du 15 avril. © F. Epaud. A. Dufraisse.

3.1. L'essence de la charpente de Notre-Dame

Au moins trois espèces de chênes poussent dans la moitié nord de la France (*figure 14*) ; laquelle ou lesquelles ont été exploitées pour construire les charpentes de Notre-Dame ? On ne le sait pas... Pour répondre à cette question nous utiliserons à la fois l'ADN, qui ne sera conservé que sur les parties les moins carbonisées (*figure 15*) et l'anatomie du bois puisqu'elle est conservée pendant la carbonisation.

3.2. Combien de charpentes à Notre-Dame ?

Pour répondre à cette question, il convient d'affiner la chronologie en datant non seulement l'année d'abatage du bois mais aussi en déterminant quand il a été mis en œuvre. Pour ce faire, il nous a fallu mobiliser plusieurs indices issus des rôles

architecturaux : la localisation dans la cathédrale, les types de fermes, l'étude des assemblages pour réunir les pièces de bois et les marques laissées par les charpentiers.

La seconde contrainte, propre à Notre-Dame cette fois-ci, c'est la carbonisation qui va également induire une perte de matière dans les parties les plus périphériques, les premières exposées aux flammes ; non seulement le dernier cerne sera perdu mais les séquences dendrochronologiques (nos fameux codes-barres) risquent d'être raccourcies au point qu'elles pourraient correspondre à plusieurs parties de notre courbe de référence. C'est la raison pour laquelle la dendrochronologie sera couplée à la datation radiocarbone qui repose sur l'isotope du carbone 14 (*encadré*).

La datation ne servira pas uniquement au phasage chronologique ; elle permettra d'apporter d'autres informa-



Figure 14

Les trois espèces de chênes poussant dans la moitié nord de la France. De gauche à droite : le chêne pédonculé, le chêne sessile et le chêne pubescent. (Source : <http://www.snv.jussieu.fr>).



Figure 15

Chêne carbonisé en périphérie.

LA DATATION PAR LE CARBONE 14

Petit rappel ici sur ce que sont des isotopes. Deux atomes sont dits isotopes lorsqu'ils ont le même nombre de protons (marqué par la lettre Z), mais un nombre de neutrons différent (qui s'additionne pour donner la lettre A). Par exemple, pour le carbone, nous distinguons 3 isotopes (*figure 16*), le carbone 12, le carbone 13 et le carbone 14.

Dans l'atmosphère, la présence du carbone 12 est bien plus importante que celle du carbone 13. Le carbone 14 lui, est vraiment en quantité infime : il est donc bien difficile de le mesurer ! Tant qu'un individu est en vie, il absorbe le carbone de l'atmosphère selon le rapport de ces isotopes à une période donnée. À sa mort, les échanges de carbone avec la biosphère cessent. Or le carbone 14 est un isotope radioactif, contrairement au carbone 12 et au carbone 13 qui sont des isotopes stables. Autrement dit, leurs teneurs ne se modifient pas dans le temps – nous y reviendrons plus tard. Le carbone 14, lui, se désintègre en diminuant de moitié tous les 5 700 ans environ. Au cours de sa désintégration, il produit un isotope fils dit « radiogénique », ici l'azote 14. Ainsi, la datation par le radiocarbone a-t-elle pour but de mesurer la radioactivité résiduelle permettant de dater l'âge de la mort d'un individu.

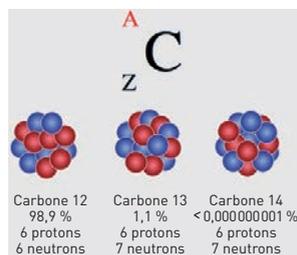


Figure 16

Le carbone et ses isotopes

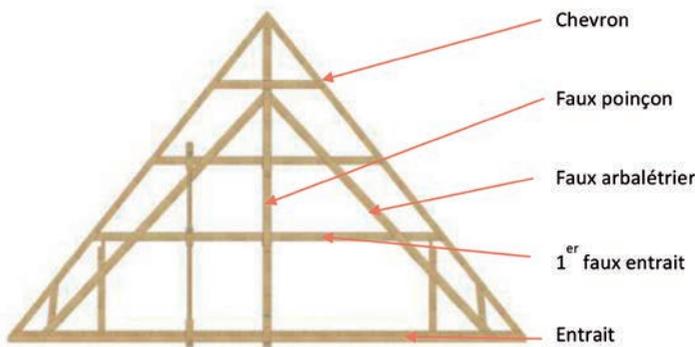
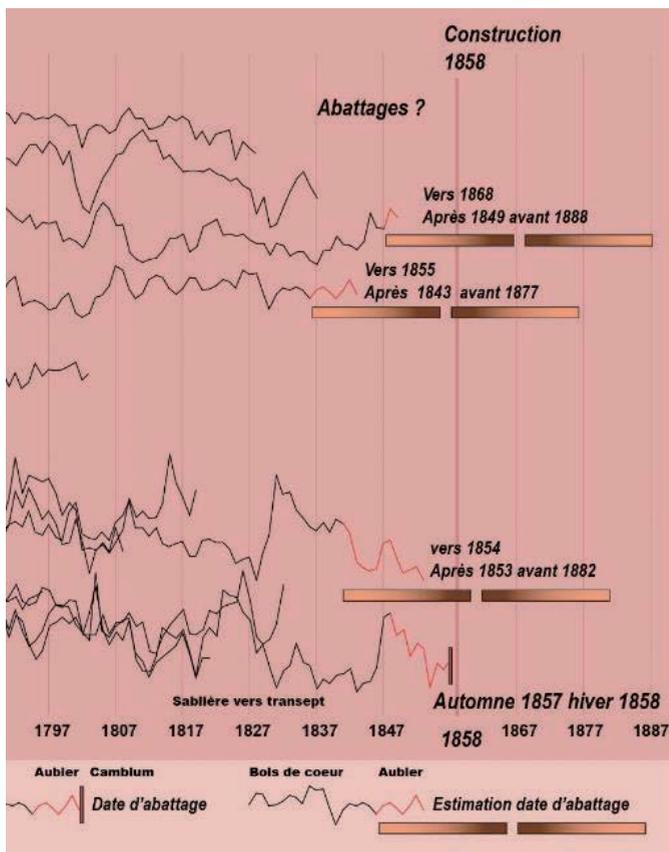
tions, entre autres sur le temps qui sépare l'abattage du bois de sa mise en œuvre lorsque les sources textuelles peuvent être mobilisées. *Figure 17*, en voici un exemple : il s'agit de la datation de plusieurs bois de la flèche de Viollet-le-Duc. Un seul de ces bois présente le dernier cerne (le cambium) ; celui-ci permet de le dater aux alentours de l'automne 1857/hiver 1858 puisque le dernier cerne était complet. Or, dans le journal des travaux de Viollet-le-Duc, une mention stipule que la flèche a été construite en septembre 1858. Ces données indiquent donc que le bois a été abattu seulement quelque mois avant sa mise en œuvre et qu'il n'a pas été séché avant d'être utilisé comme on le ferait aujourd'hui.

3.3. Sylviculture et provenance des bois de la charpente

La troisième grande hypothèse est celle de l'existence d'une sylviculture spécifique pour la période médiévale ; il faut entendre par là des pratiques de mise en gestion et de mise en valeur d'une forêt ou d'un boisement pour en obtenir un bénéfice économique. La *figure 18* reproduit le dessin d'une ferme avec le nom des plus grandes pièces ainsi qu'une photo de la charpente. Chaque pièce de grande dimension est réalisée à partir d'un seul tenant, c'est-à-dire à partir d'un seul tronc d'arbre. Parmi les éléments les plus grands, certaines pièces peuvent atteindre 14 m de long ; d'autres sont comprises entre 7 et 12 m. Les

Figure 17

Datation de plusieurs bois sur la flèche de Viollet-le-Duc. Certains bois ne présentent pas d'aubier (en noir), d'autres en présentent (en rouge) ; un seul bois présente le dernier cerne complet (ligne verticale). © O. Girardclos.



Pièces de charpente	Section moyenne des bois équarris (cm)	Diamètre du tronc à la base (cm)	Longueur (m)
Entrain principal	25 x 22 (N1 + N05-N11)	40	14
	29 x 24.5 (N02-N04)	45	
Chevron	16,5 x 16,5	30	11,8
1 ^{er} faux entrain	23,5 x 16	30	9,6
Faux arbalétrier	21 x 16	30	9,3
Faux poinçon	22,5 x 17,5	35	7,3



Figure 18

La ferme et ses différentes composantes : en haut à gauche, un schéma détaillé d'une ferme ; en haut à droite la photo d'une ferme ; en bas, un tableau contenant les mesures des différentes composantes. © F. Epaud.

sections équarries permettent d'évaluer les diamètres des troncs à la base autour de 30/40 cm voire, 45 cm. Nous avons donc affaire à des troncs d'arbres très élancés (en bas à droite, figure 18) qui correspondent à des arbres de plus de 25 m de haut, la partie supérieure, le houpier, n'étant pas exploitable.

La morphologie du tronc apporte des indices sur les conditions de croissance et de vie de l'arbre. Ici, typiquement, ils ont poussé dans un milieu dense. Par ailleurs, les données dendrochronologiques réalisées sur des échantillons prélevés avant l'incendie montrent que ces arbres étaient âgés de quatre-vingts à cent ans et n'étaient pas pluricentenaires comme on n'a pu souvent l'entendre.

Pour répondre à cette question de sylviculture, une première approche consiste à sélectionner certaines pièces après incendie pour en faire une étude de largeur de cernes sur toute la longueur et ainsi restituer, malgré l'équarrissage et la carbonisation, le profil d'élancements de départ qui pourra être comparé à des chênes actuels. Une seconde approche s'attache à déterminer la provenance géographique.

Ainsi, deux hypothèses de travail sont en cours : la première est que les bois proviennent du Bassin parisien et la seconde qu'une partie des bois a été peut-être transportée par voie fluviale (par bateaux ou par radeaux). Pour identifier l'origine géographique des bois, nous combinons les largeurs de cernes

(qui, on l'a vu, présentent des signatures communes à l'échelle d'une même zone géographique), la composition chimique et isotopique des bois (qui va refléter le substrat, l'ADN qui permet aussi de séparer géographiquement certains lignages) ou encore les sources textuelles.

Pour en venir plus précisément à la composition chimique et isotopique, nous allons nous intéresser aux éléments majeurs – comme le potassium, le calcium et l'aluminium qui sont des indicateurs du pH – et à l'isotope du strontium (*figure 19*).

La *figure 20* montre que l'arbre puise ses éléments nutritifs dans l'eau du sol pour nourrir et fabriquer ses tissus. De multiples études ont montré un lien entre la composition de la sève et celle du bois. Or, la composition de la sève va dépendre de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol laquelle dépend du pH du sol lui-même déterminé par le substrat. Les effets de la carbonisation sur la composition élémentaire ont été testés. Le graphe de la *figure 21* montre l'évolution du rapport manganèse sur potassium (ratio utilisé pour caractériser le pH d'un sol). Nous constatons que *i)* les teneurs en manganèse discriminent très largement les chênes ayant poussé sur sol acide, *ii)* l'écart se creuse entre les chênes sur sol calcaire et ceux sur sol acide avec l'augmentation des températures.

Venons-en aux isotopes du strontium (*figure 22*). Le strontium est un analogue du calcium qui est très bien

Tableau périodique des éléments chimiques

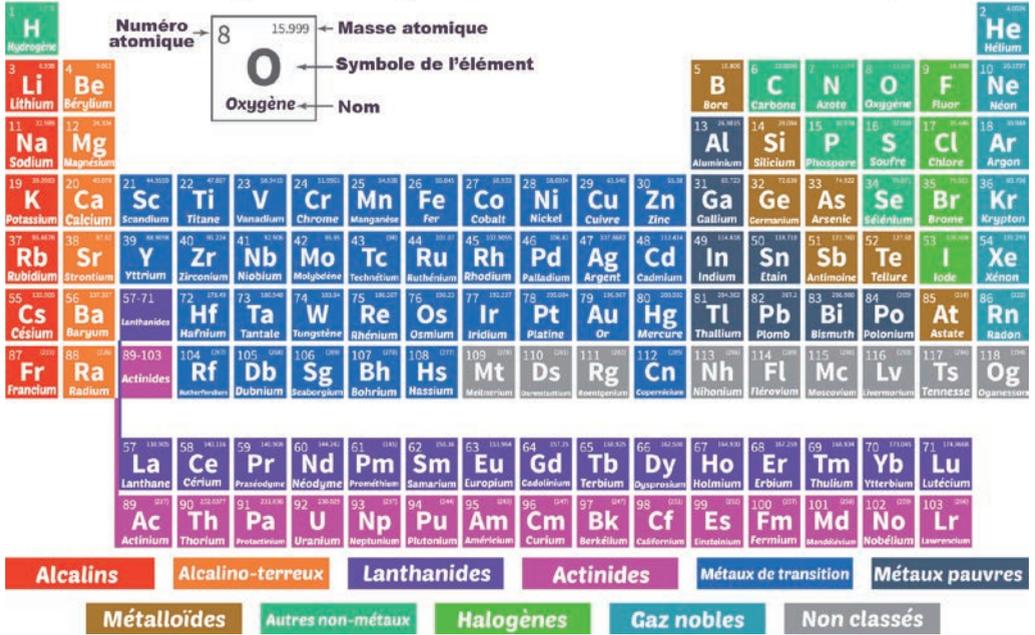


Figure 19

Tableau périodique des éléments chimiques (source : <https://www.listedemots.com/liste-elements-chimiques>).

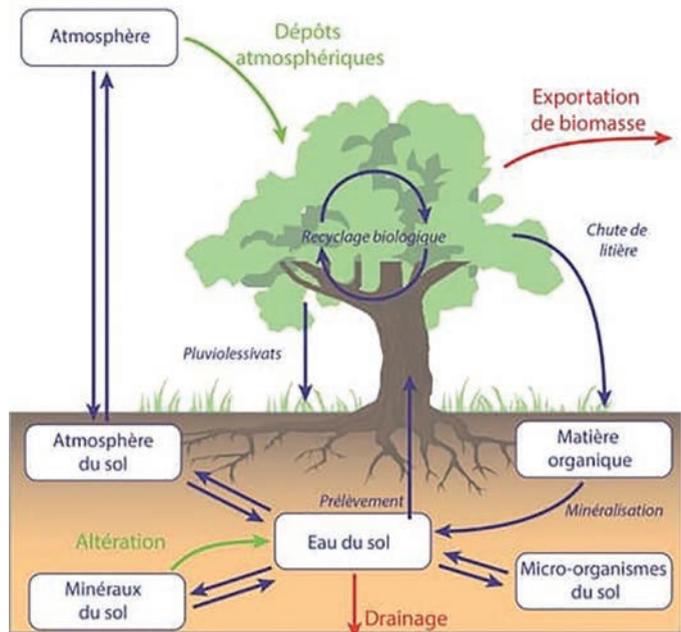


Figure 20

Cycle élémentaire de l'arbre.

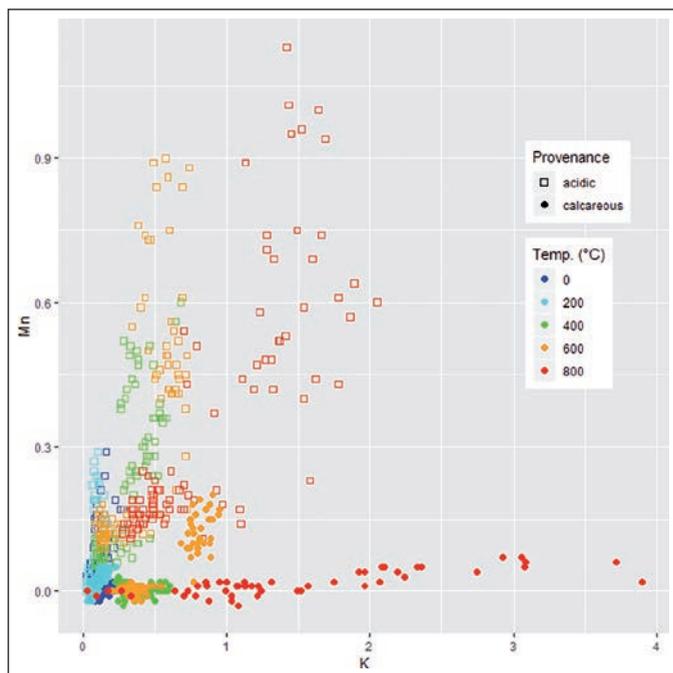


Figure 21

Évolution du rapport manganèse/potassium dans différents sols et à différentes températures (sols acides : carrés vides ; sols calcaires : ronds pleins). © A. Stulc Imbert, J.-L. Dupoue, S. Ponton.

absorbé par les plantes. De fait, le strontium l'est aussi. Le strontium possède quatre isotopes. Trois sont stables et le strontium 87 est radio-génique, car il provient de la désintégration radioactive du rubidium. Or, le rubidium est un analogue du potassium que l'on trouve sur des roches de type granite et donc, assez acides. Par conséquent, le strontium 87 est plus important sur ce type de roche et le rapport strontium 87/strontium 86 permet de discriminer les roches calcaires des roches acides.

La **figure 23** montre un exemple d'application dans la région du Pays basque espagnol sur des

chênes caducifoliés⁵ avec huit peuplements de chênes actuels sur des roches carbonatées⁶ (en bleu), et sur des roches silicatées⁷ (en rouge). Les résultats montrent des différences significatives entre les roches carbonatées et les roches silicatées.

Pour répondre à la question de la provenance géographique

5. Caducifolié : se dit d'un arbre qui perd ses feuilles l'hiver.

6. Roches carbonatées : roches composées d'au moins 50 % de carbonates. Un carbonate est un sel dont l'ion négatif est CO_3^{2-} (par exemple le bicarbonate de soude - CO_3HNa - est un carbonate).

7. Roches silicatées : roches dont la composition principale est le silicate - SiO_2 .

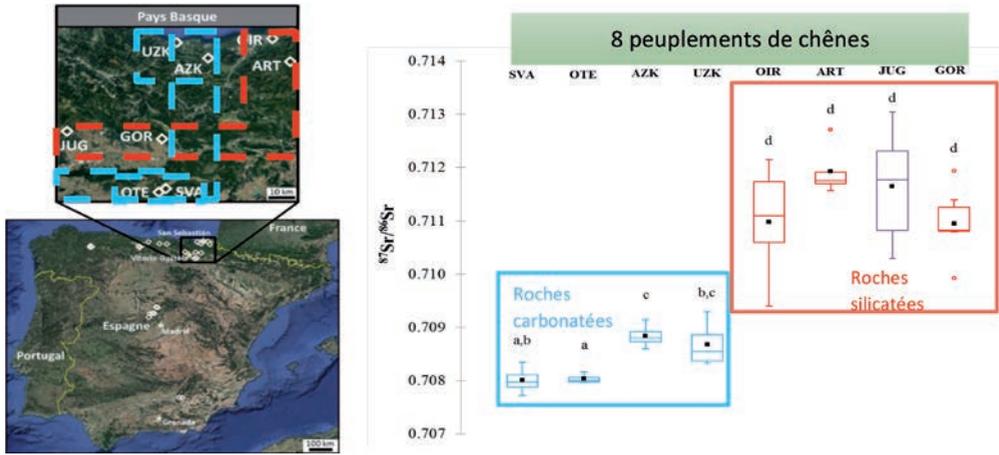


Figure 23

Rapport de strontium 87 sur strontium 86 (droite) en fonction de la localisation de groupes de chênes au Pays basque (gauche).

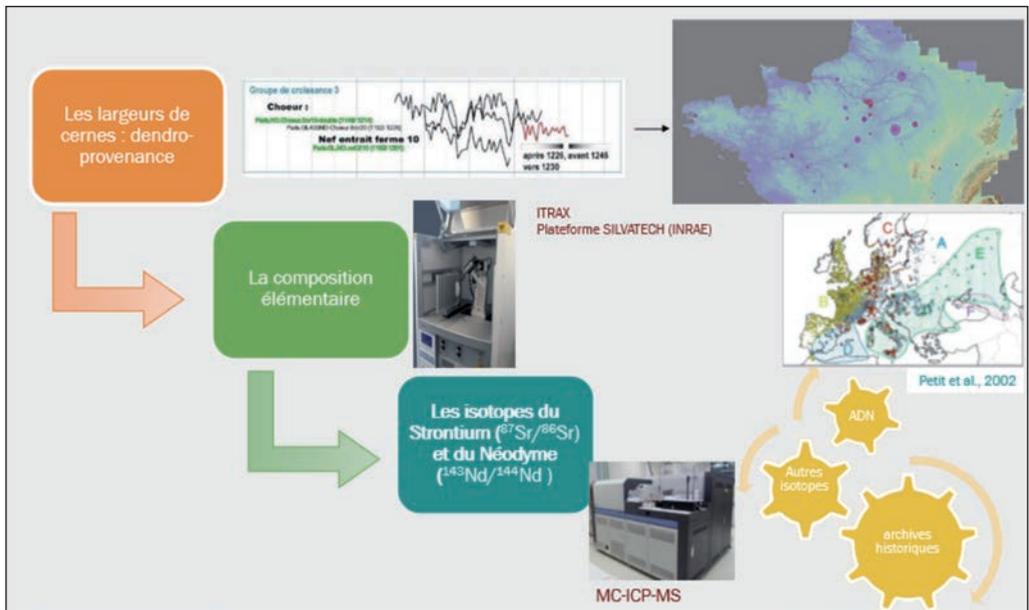


Figure 24

Les méthodes de datation en dendrochronologie, appliquées aux bois de Notre-Dame. © A. Dufraisse.

des bois de Notre-Dame, il est donc nécessaire de construire un référentiel des forêts de chênes situées dans le bassin de la Seine, ayant poussé sur des sols et des substrats contrastés. On y documente les

forêts, le diamètre et la hauteur des arbres. On prélève des carottes de bois pour y mener les analyses précédemment évoquées (figure 24). On prélève également les sols pour faire le lien entre carotte et sol.

Ces données vont servir de base de comparaison pour étudier les bois de Notre-Dame.

4 Le climat des XII^e et XIII^e siècles : un analogue au réchauffement climatique actuel ?

La dernière partie de ce chapitre ne concerne pas directement la connaissance de la charpente et de sa construction mais le climat médiéval. Les bois exploités pour la charpente de Notre-Dame ont en effet poussé au cours du XI^e/XII^e siècle, une période appelée « Anomalie climatique médiévale ». C'est une période d'amélioration climatique, identifiée en différents endroits du monde, qui est d'un intérêt majeur pour comprendre le réchauffement climatique que nous vivons actuellement, puisqu'elle intervient en l'absence d'activités humaines impactantes. Les rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène – qui dépendent du fonctionnement physiologique de l'arbre qui s'adapte au climat – sont pour cette étude les marqueurs choisis. Les isotopes de l'oxygène sont plutôt indicateurs de températures alors que les isotopes du carbone sont plutôt indicateurs des précipitations.

De manière générale, en dendroclimatologie, on travaille sur la cellulose, un des constituants du bois (pour rappel, le bois est essentiellement formé de lignine, cellulose et hémicellulose⁸). Chaque constituant présentant des

rapports isotopiques différents. C'est la raison pour laquelle la cellulose est toujours privilégiée comme objet d'étude. Il faut noter que la carbonisation devient un processus potentiellement gênant : elle va entraîner des réactions en cascade avec une dégradation progressive de la matière organique et en premier lieu, de la cellulose autour de 350/400 °C. Un travail de calibration du signal isotopique du carbone et de l'oxygène entre bois non carbonisé et bois carbonisé est en cours pour permettre d'extraire les données pertinentes nécessaires à caractériser le climat passé.

La **figure 26** est un exemple d'application récente utilisant l'oxygène du bois non carbonisé. Il concerne des chênes de la forêt de Fontainebleau et des poutres de la charpente du château qui ont été carottées. Les carottes ont été datées par dendrochronologie, la cellulose (**figure 25**) a été extraite cerne par cerne et la composition

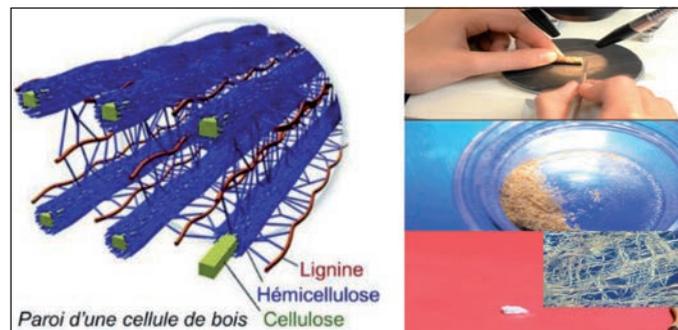


Figure 25

Disposition de la lignine, de l'hémicellulose et de la cellulose les unes par rapport aux autres dans une cellule de bois (à gauche). Les étapes de récupération de la cellulose, cerne par cerne (à droite).

8. Lignine, cellulose et hémicellulose : trois polymères organiques qui représentent les composés principaux du bois.

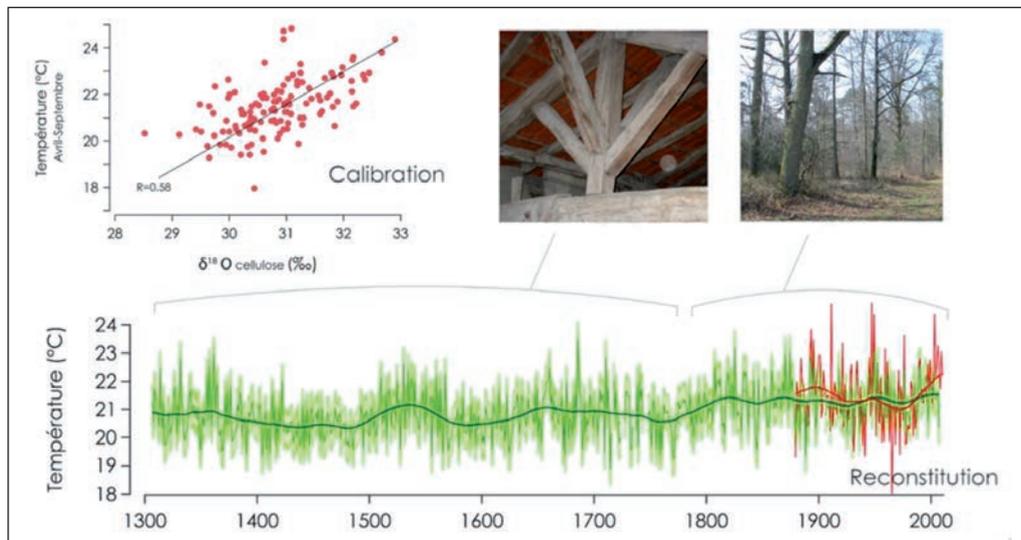


Figure 26

Exemple de l'utilisation des isotopes de l'oxygène pour étudier la température dans la forêt de Fontainebleau. En haut à gauche, la calibration entre les différences de rapport de ^{18}O et la température et en bas, la courbe de la température calculée en fonction de l'année. La courbe vert foncé est une restitution de la température avec les marges d'erreur en vert clair. La courbe en gras au milieu correspond aux données moyennes de la dendrochronologie et la courbe rouge, aux données météorologiques du site. © V. Daux.

isotopique de l'oxygène a été déterminée. Les différents rapports de l' ^{18}O sont liés à la température, ils sont transformés en échelle de température grâce à une calibration

faite avec des arbres vivants (*figure 26*). Cette reconstitution met en évidence le fait que les températures des dernières décennies sont plus élevées que celles des siècles précédents.

Conclusion et remerciements

Le projet « Mémoire du bois », appliqué aux charpentes de Notre-Dame de Paris, regroupe un collectif de chercheurs comprenant de nombreux spécialistes. Près de soixante-dix chercheurs travaillent aujourd'hui sur ces problématiques. Ils sont des spécialistes de l'étude des bois vivants, des bois archéologiques, carbonisés, non carbonisés, de l'écologie, de la génétique, du climat, de la datation. C'est aussi une belle opportunité pour eux de former des étudiants aux parcours universitaires en chimie, en biologie ou en archéologie.