

## **Vers une architecture écologique inspirée des caves souterraines. Exemple de l'inertie thermique des caves souterraines moldaves et des nouvelles approches géothermiques et par puits canadien**

### ***Towards an ecological architecture inspired by underground cellars: An example of the thermal inertia of Moldovan underground cellars and new geothermal and Canadian well approaches***

Joël Rochard<sup>1</sup>

<sup>1</sup> VitisPlanet, Bouilly, France

**Résumé.** La quête d'abris souterrains est l'une des formes d'habitat humain les plus anciennes, offrant un refuge dans des environnements extrêmes tels que les déserts et les régions polaires. Dans la plupart des régions viticoles, à une profondeur de 6 à 7 mètres, la température se stabilise entre 10 et 16 degrés Celsius. Cette inertie thermique agit comme un système de climatisation naturelle, favorable à l'élaboration et à la conservation des vins. Les anciennes caves, qu'elles soient creusées dans la pierre ou construites avant l'ère de la climatisation, possédaient souvent des caractéristiques architecturales permettant de maintenir des températures optimales. En Moldavie, des caves creusées à la main et mécaniquement durant l'époque soviétique créent des conditions idéales pour le vieillissement des vins à une température constante d'environ 12 degrés, réduisant ainsi les besoins énergétiques. L'architecture bioclimatique moderne vise à optimiser les conditions thermiques ainsi que la gestion de l'eau et de l'énergie. Des constructions enterrées exploitent l'inertie thermique, tandis que des systèmes comme la géothermie avec des sondes verticales et le puits canadien utilisent l'énergie géothermique pour réguler la température intérieure, fournissant chaleur en hiver et fraîcheur en été.

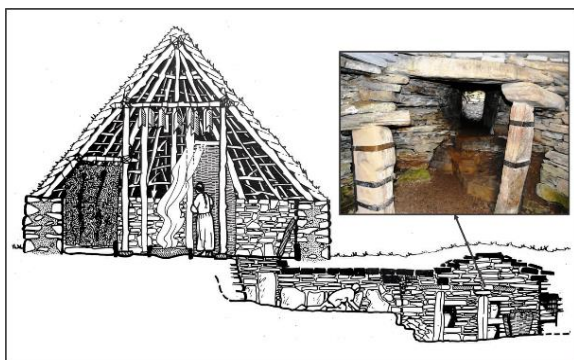
**Abstract.** The search for underground shelters is one of the oldest forms of human habitation, providing refuge in extreme environments such as deserts and polar regions. In most wine-growing regions, at a depth of 6 to 7 meters, the temperature stabilizes between 10 and 16 degrees Celsius. This thermal inertia acts as a natural air conditioning system, favorable for the production and preservation of wines. Ancient cellars, whether carved into rock or built before the era of air conditioning, often had architectural features that allowed for optimal temperature maintenance. In Moldova, cellars dug by hand and mechanically during the Soviet era create ideal conditions for aging wines at a constant temperature of about 12 degrees, thus reducing energy needs. Modern bioclimatic architecture aims to optimize thermal conditions as well as water and energy management. Underground constructions exploit thermal inertia, while systems such as geothermal energy with vertical probes and earth- to-air heat exchangers use geothermal energy to regulate indoor temperature, providing heat in winter and coolness in summer.

# 1. Introduction

## 1.1. Inertie thermique dans l'histoire des hommes

La recherche d'abris souterrains est une pratique ancestrale qui témoigne de l'ingéniosité humaine face aux défis environnementaux. L'inertie thermique du sous-sol a joué un rôle crucial dans la survie des hommes préhistoriques, notamment à l'entrée des grottes (figure 1). Ces espaces naturels offraient un refuge, permettant de réguler la température intérieure malgré les variations climatiques extérieures, de stocker des ressources et de créer des environnements de vie plus confortables. Par exemple, dans les déserts arides, les écarts de température entre le jour et la nuit peuvent être extrêmes, rendant la vie en surface

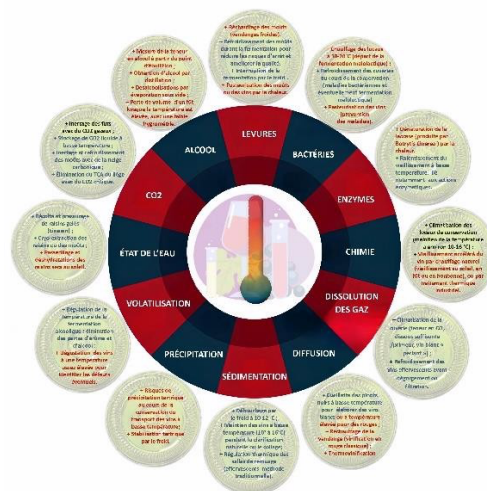
difficile. Les grottes, en revanche, maintiennent une température plus stable, protégeant ainsi leurs habitants non seulement de la chaleur écrasante, mais aussi des tempêtes de sable fréquentes. Au contraire, dans les climats froids, les tempêtes de neige et les températures glaciales rendent la vie à la surface particulièrement périlleuse. Les abris souterrains, tels que les igloos ou les refuges creusés dans la neige, offrent une protection contre le vent glacial et minimisent la perte de chaleur. Au-delà de ces considérations pratiques, le calme, le recueillement et le sentiment de sécurité qu'offraient ces habitats souterrains ont probablement favorisé une dimension mystique, liée à la représentation des humains et de la nature, qui se retrouve dans l'art préhistorique.



**Figure 1.** Utilisation de l'inertie thermique du sous-sol par les hommes au cours de la préhistoire à l'entrée des grottes, schéma adapté de [www.freepik.com](http://www.freepik.com)) et dans l'abri souterrain de Rennibister en Écosse (environ 400 av. J.-C.), schéma adapté de [www.historicenvironment.scot](http://www.historicenvironment.scot)

En ce qui concerne l'œnologie, les premiers vignerons ont dû, par empirisme, comprendre progressivement l'importance de la température pour éviter la dénaturation du vin, notamment par acétification. Plus tard, grâce aux civilisations antiques et, un peu après, à l'œnologie moderne, les effets du froid et de la chaleur sur les vins ont été mieux compris. Ainsi, les vignerons ont commencé à exploiter l'inertie thermique des caves pour bénéficier de la fraîcheur en été et de la chaleur en hiver. À partir du milieu du 20e siècle, le développement de nombreuses technologies thermiques a permis aux œnologues d'assurer une maîtrise qualitative optimale tout au long du processus

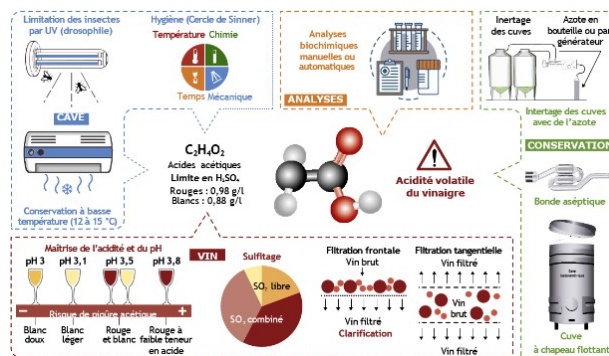
d'élaboration des vins, avec depuis quelques années des impératifs liés à la réduction de l'impact sur l'effet de serre (figure 2) [1] [2].



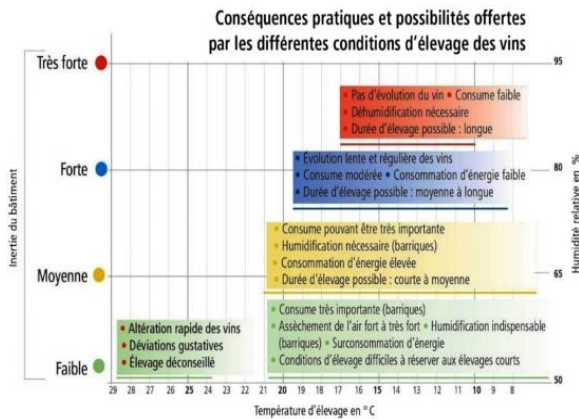
**Figure 2.** Principaux effets thermiques au cours d'élaboration des vins. Bien souvent, le choix de la température optimale au cours d'une étape de la vinification représente un compromis entre les actions favorables et défavorables de la température sur le moût ou le vin. Schéma J. Rochard (Téléchargement du schéma <https://www.dropbox.com/sc/fi/gh3lczuwmb17iqhiyuvmj/Principaux-effets-thermiques-au-cours-d-laboration-des-vins-d-apr-s-J.-Rochard-6792x6858-13584x13716.jpg?rlkey=6f77izdx420u19kn4ys2e8dvo&dl=0>)

## 1.2. Impératifs qualitatifs des vins

La conservation du vin à une température stable comprise dans un créneau de 10 à 16 °C est cruciale pour préserver ses qualités organoleptiques, garantir un vieillissement optimal et éviter les altérations microbiologiques (figures 3 et 4). Les caves anciennes, qu'elles soient issues de l'extraction de la pierre ou construites avant l'avènement de la climatisation, intégraient des formes architecturales traditionnelles qui permettaient de maintenir une température adaptée à l'élaboration et la conservation des vins. Les murs en pierre épais et l'inertie thermique du sous-sol atténuaient les fluctuations thermiques. Chaque région viticole a ainsi développé des caves adaptées notamment à la géologie et aux conditions climatiques locales.



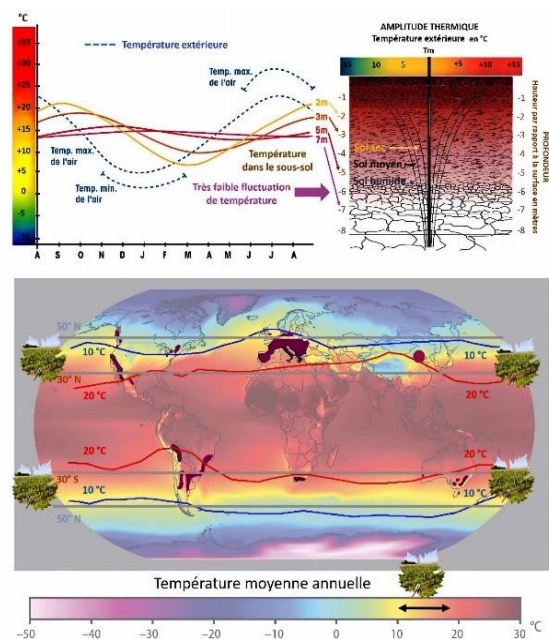
**Figure 3.** Éléments-clés, dont la maîtrise de la température ambiante, pour éviter l'élévation de l'acidité volatile des vins, d'après J. Rochard, schéma [www.oeno.tm.fr](http://www.oeno.tm.fr) [3]



**Figure 4.** Impact de l'inertie thermique du bâtiment sur l'élaboration des vins, Source [www.gironde.chambre-agriculture.fr](http://www.gironde.chambre-agriculture.fr)

### 1.3. Inertie thermique du sous-sol

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) désignent à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technologie qui vise à l'exploiter. L'inertie thermique du sous-sol provient de plusieurs facteurs liés aux propriétés des matériaux géologiques et à la dynamique thermique de la Terre.



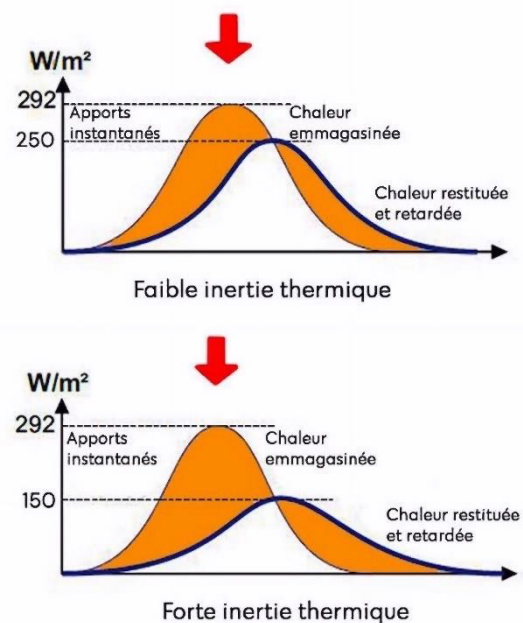
**Figure 5.** En haut : Exemple de profil de température à différents niveaux du sous-sol dans le Vaucluse ([www.archi.climatic.free.fr](http://www.archi.climatic.free.fr)) et amplitude des températures en fonction de la profondeur et de l'humidité, schéma J. Rochard adapté de J.L. Izard ; en bas : Carte mondiale des températures moyennes annuelles en surface avec les principales régions viticoles, J. Rochard adaptée de [www.encyclopedie-energie.org](http://www.encyclopedie-energie.org)

Les sols et les roches possèdent une capacité de stockage thermique spécifique élevée, ce qui leur permet d'absorber et de stocker une quantité significative de chaleur sans subir de changements rapides de température. Par ailleurs, le sol agit comme un isolant naturel, ce qui signifie que les variations de température extérieures mettent plus de temps

à se transmettre aux couches profondes. Cela permet aux sous-sols de conserver une température relativement stable, comparativement aux variations en surface. Ainsi, on constate que l'amplitude des fluctuations décroît avec la profondeur ; à 6 ou 7 mètres sous terre, la température se stabilise autour de la moyenne annuelle des températures de l'air (11 à 16 degrés pour la plupart des régions viticoles). L'inertie thermique peut être utilisée avec différentes approches : bâtiment enterré, puits canadien et géothermie, basse énergie (figure 5).

### 1.4. Inertie des matériaux de construction

Au-delà de la variation des températures au cours de l'année, il est également important de prendre en compte la variation thermique entre le jour et la nuit et d'un jour à l'autre au cours de la semaine. L'inertie thermique d'un matériau fait référence à sa capacité à emmagasiner et à restituer la chaleur. Les matériaux à forte inertie, comme la pierre ou la terre, absorbent la chaleur durant la journée, lorsque les températures sont plus élevées, et la libèrent progressivement pendant la nuit, lorsque l'air devient plus frais (figure 6).



**Figure 6.** Comparaison entre une faible et forte inertie thermique d'un bâtiment, [www.ticad.fr](http://www.ticad.fr)

Cette propriété est particulièrement bénéfique, car elle permet de décaler le pic de chaleur à un moment où les conditions extérieures sont plus agréables. Dans des maisons construites en pierres ou en terre, par exemple, cette inertie thermique contribue à maintenir une température intérieure stable et confortable, même lors de variations climatiques importantes. Une bonne inertie thermique du bâtiment (sans isolation intérieure) peut être obtenue par l'utilisation de matériaux denses (pierre, béton). La brique de type « monomur » alvéolaire de grande épaisseur (40 à 50 cm) est également intéressante. Néanmoins, elle nécessite une main-d'œuvre spécialement



formée. En effet, les briques s'emboîtent et ne sont jointes que par un mortier mince (figure 7).



**Figure 7.** Principe de l'inertie thermique adapté de [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com) et exemple des briques alvéolaires « monomur » de grande largeur (Photo [www.travaux.com](http://www.travaux.com)), de la pierre du Gard au Château des Hospitaliers et d'un doublage intérieur avec de la pierre locale au Château de Malleret dans le Médoc (photos J. Rochard).

## 2. Elaboration des vins par les civilisations anciennes

La poterie, l'un des plus anciens artisanats humains, a joué un rôle crucial dans les sociétés anciennes. Le terme "poterie" désigne des vases et récipients domestiques ou culinaires fabriqués en terre cuite poreuse, qui peuvent être laissés bruts ou recouverts d'une glaçure pour améliorer leur imperméabilité et leur esthétique. L'argile, matière première essentielle, est utilisée pour créer des poteries destinées à stocker et transporter des aliments, facilitant ainsi la vie quotidienne et le développement de l'agriculture. Elle se forme à partir de la poussière de roche qui, au fil de millions d'années, est transportée par le vent et l'eau jusqu'aux rivières et fleuves sous forme de limon et de vase. Ces sédiments se déposent ensuite sur les berges ou au fond de la mer. Une fois séchés, ces dépôts forment l'argile. Les hommes préhistoriques ont probablement remarqué très tôt qu'une terre laissée près du feu gagnait en solidité et en dureté, en perdant notamment l'inconvénient de se diluer dans l'eau. L'archéologie a identifié, dans toutes les sociétés, des poteries d'abord non cuites, puis cuites au feu.

À l'époque préhistorique, les humains utilisaient probablement de l'argile malaxée à la main ou disposée sur des paniers tressés, qui était durcie au soleil ou dans des cendres chaudes pour créer de solides récipients. Au Paléolithique supérieur, il y a environ 30 000 ans, des objets en terre cuite, y compris des statuettes, étaient déjà fabriqués. À l'époque des chasseurs-cueilleurs et au début du Néolithique, il y a environ 10 000 ans, la fermentation naturelle des fruits, tels que les raisins, entreposés à proximité des habitations a probablement donné naissance à des boissons alcoolisées. Cependant, lorsque ces liquides étaient conservés à température ambiante dans des récipients ouverts, l'oxygène pouvait favoriser la

formation de vinaigre, surtout en présence de bactéries d'acétification. L'évolution des contenants, grâce à des innovations dans l'utilisation de l'argile en boudin (poterie au colombin), a permis de mieux contrôler la conservation du vin et d'éviter sa transformation en vinaigre, en enterrant et en bouchant le contenant. Un peu plus tard, l'introduction du tour de potier entre 3 500 et 3 450 av. J.-C. au Proche-Orient et entre 3000 et 2000 av. J.-C. en Chine a marqué une révolution dans la production de poterie, permettant de réaliser des formes plus régulières et sophistiquées, comme les amphores. Cette innovation a considérablement amélioré la conservation des liquides et permis le transport du vin dans le bassin méditerranéen (figure 8).

### 2.1. Kveris en Géorgie

En Géorgie, la présence d'argile et de bois a sans doute favorisé le développement de la technique de façonnage par colombin, qui consiste à superposer des boudins d'argile roulés, avec un col resserré dans la partie supérieure, permettant le bouchage (figure 9). Ainsi, se sont développés les *qveris*, de grands récipients utilisés pour la fermentation et la conservation du vin, dont les vestiges datent probablement de plus de 6 000 ans avant notre ère. Une fois la fermentation terminée, la cuve était scellée avec un couvercle en pierre ou en bois, accompagné d'un joint d'argile pour éviter l'oxydation et les risques de piqûre acétique. Ces récipients étaient souvent enterrés, ce qui réduisait le transfert d'oxygène à travers les parois tout en maintenant une température fraîche, grâce à l'inertie thermique souterraine, peu propice au développement des bactéries. Ainsi, l'histoire de la poterie illustre comment l'homme a progressivement compris les processus d'élaboration du vin, tout en adaptant les récipients pour réguler la température et limiter le transfert d'oxygène, un élément propice au développement des bactéries acétiques.



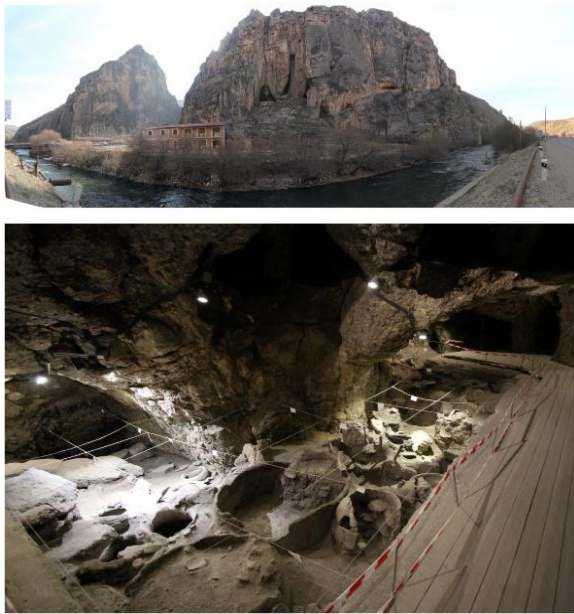
**Figure 9.** Élaboration du vin dans des *qveris* en Géorgie, Schéma J. Rochard, adapté de [www.vinearth.com](http://www.vinearth.com), [www.voyage-georgie.com](http://www.voyage-georgie.com), [www.bagratrtrip.com](http://www.bagratrtrip.com) et Musée du vin de Qvevri en Géorgie.

### 2.2. Grotte d'Areni en Arménie

Le site archéologique d'Areni-1, en Arménie, a révélé une découverte remarquable : un chai de vinification âgé de 6 100 ans (figure 10). Cette découverte offre un éclairage direct sur les pratiques viticoles de l'époque néolithique, une période caractérisée par des avancées



significatives dans l'agriculture et la domestication des plantes.



**Figure 10.** Grotte archéologique située près du village d'Areni, au sud de l'Arménie, dans la région de Vayots Dzor le long de la rivière Arpa. En haut : Panorama du site, en bas : Vestiges de l'ensemble de vinification.

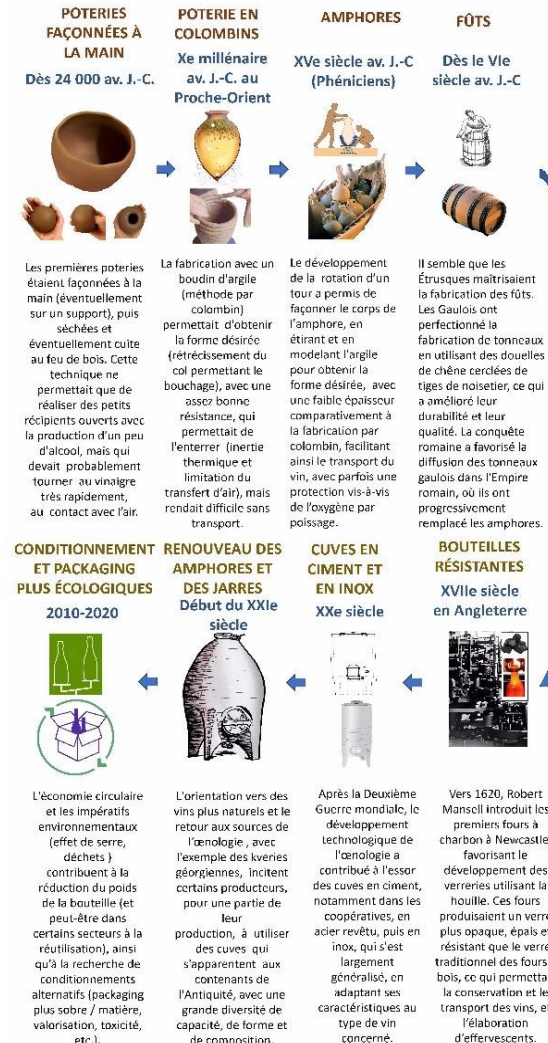
Ce chai comprend un pressoir rudimentaire, preuve des premières techniques de vinification. Par ailleurs, la présence d'une cuve en argile sur le site indique que les habitants de la région avaient déjà acquis une certaine compréhension des processus nécessaires à l'élaboration du vin. Ils savaient également tirer parti de l'inertie thermique de la grotte pour réguler la température, un atout précieux tant pour la vinification que pour leur vie au quotidien [4].

### 3. Période de l'Antiquité

#### 3.1. Emergence des amphores

Apparues au III<sup>e</sup> millénaire avant J.-C. au Proche-Orient, les amphores ont été adoptées par les Phéniciens vers 1500 avant J.-C. Fabriquées en terre cuite, elles étaient modelées sur un tour, séchées au soleil, puis cuites. Pour les rendre étanches, on ajoutait de la poix ou de la cire. Leur conception, avec un pied pointu, facilitait leur manipulation et leur empilement. Ces récipients emblématiques de l'Antiquité, étaient principalement conçues pour le transport du vin et d'autres denrées alimentaires (huile d'olive, bière, etc.). Souvent abandonnées après leur utilisation, elles ont contribué à former des monticules de débris, comme le mont Testaccio à Rome. Récemment, certains vignerons ont commencé à réutiliser des jarres en terre cuite pour la vinification, profitant de leurs avantages, tels que la limitation des intrants, une meilleure oxygénation, une inertie thermique favorable et une préservation des caractéristiques aromatique.

Pour vinifier et élever leur vin, les civilisations antiques utilisaient de grandes jarres en terre cuite, appelées « Dolia », d'une capacité d'environ 3000 litres, avec une hauteur pouvant atteindre 2 mètres. Ces jarres, dont les parois intérieures étaient enduites de poix, étaient souvent enterrées dans les jardins des maisons.

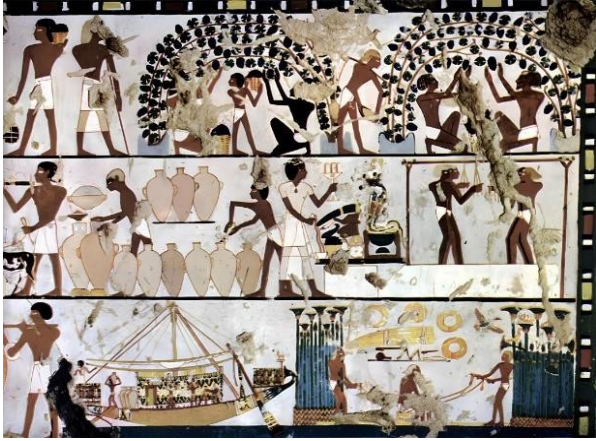


**Figure 8.** Évolution des contenants d'élaboration et de conditionnement des vins depuis l'origine, schéma J. Rochard.

#### 3.2. Égyptiens

La viticulture en Égypte ancienne, documentée par des fresques et des inscriptions, révèle une civilisation pionnière en œnologie (figure 11). Le vin jouait un rôle central dans la société égyptienne antique, tant sur le plan culturel que religieux. Dès 3500 av. J.-C., des traces de viticulture apparaissent, avec des pépins et des jarres découvertes dans des tombes royales comme celle de Scorpion Ier. Les recherches ont révélé que la plupart des vins produits étaient blancs ou rosés. Le vin rouge, considéré comme le plus précieux, était souvent réservé aux pharaons et à l'élite. Le vin blanc était plus couramment consommé par le reste de la population.

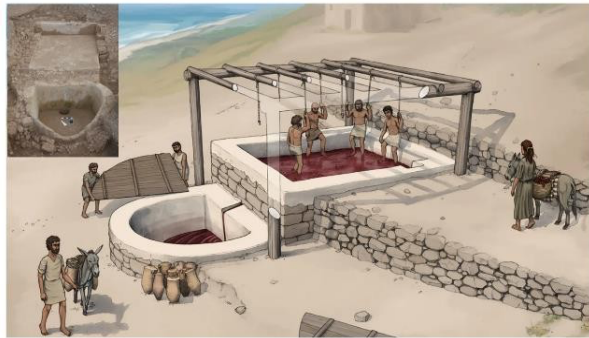
Les vins n'étaient pas exclusivement issus de la fermentation du raisin. Pour modifier leur goût ou améliorer leur conservation, les vignerons ajoutaient des figes, des dattes, de la grenade ou du miel, créant des boissons sucrées similaires aux vins liquoreux actuels. Ces ajouts permettaient une meilleure conservation et masquaient les défauts comme l'oxydation.



**Figure 11.** Fresque égyptienne de la tombe de Khâemouaset, grand prêtre sous le règne d'Amenhotep Ier, vers -1500 avant J.-C. Cette fresque illustre le traitement du raisin, depuis la vendange jusqu'à la mise en amphores et le transport. © The Yorck Project.

### 3.3. Phéniciens

Des archéologues ont mis au jour à Tell el- Burak, à environ 8 km au sud de la ville côtière de Sidon au Liban, le plus ancien pressoir phénicien connu, datant du 7<sup>e</sup> siècle av. J.-C (figure 12).



**Figure 12.** Reconstitution du pressoir phénicien de Tell el- Burak au Liban, vu depuis le sud-est. Illustration du projet Tell el- Burak ; dessin de O.Bruderer.

Ce site éclaire les techniques viticoles antiques et le rôle central des Phéniciens dans la diffusion du vin en Méditerranée. Il se compose d'un bassin rectangulaire, d'un mur d'enceinte et d'une fondation en dalles de pierres plates et d'un bassin semi-circulaire. Lorsque les Phéniciens ont construit ce pressoir, ils ont probablement utilisé du plâtre mélangé à de la chaux et des fragments de poterie écrasée. Les Phéniciens ont joué un rôle important dans la diffusion de la vigne dans la région méditerranéenne et leur tradition de consommation de vin s'est transmise en Europe et en Afrique du Nord [5] [6].

### 3.4. Grecs

Des découvertes archéologiques à Dikili Tash attestent de l'élaboration de vin dès le III<sup>e</sup> millénaire avant J.-C (figure 13). Les Grecs ont adopté la viticulture à partir de la Crète, puis ont étendu la culture de la vigne à travers le continent. Les premiers conseils sur la viticulture apparaissent dans les écrits d'Hésiode au VIII<sup>e</sup> siècle av. J.-C., et des législations pour protéger la qualité des vins locaux ont été instaurées. Pour contenir et consommer le vin, les Grecs utilisaient divers récipients. Le linos servait à écraser les grappes et à récupérer le moût, qui était ensuite fermenté dans un pithos. Le transfert du moût se faisait dans des outres en peaux de chèvre, utilisées uniquement pour de courtes distances à cause de leur influence sur le goût du vin. En raison de la libération de gaz carbonique durant la fermentation, l'accès aux salles contenant les pithos était strictement réglementé. Pour le transport sur de longues distances ; les amphores étaient employées, les plus anciennes retrouvées à Canaan datent du XIV<sup>e</sup> siècle av. J.-C. Lors des symposia, le vin, jugé très lourd, était souvent mélangé avec de l'eau. Les premiers récipients utilisés étaient les dinos, mais ils étaient vite remplacés par des cratères plus pratiques. Le vin était ensuite décanté dans des oenochés avant d'être servi dans des vases à boire tels que le canthare, le skyphos ou le kylix.



**Figure 13.** Ancien pressoir à raisin, vieux de plus de 3 500 ans à Vathypetro, dans l'île grecque de Crète, photo Manolis Afrathianakis.

### 3.5. Romains

Pour produire du vin, les Romains déversaient le raisin dans un fouloir, d'où le moût s'écoulait dans une cuve en contrebas. Ensuite, on plaçait les grappes sous le pressoir et on les ceinturait d'une grosse corde. Le levier du pressoir était manœuvré à l'aide d'un treuil. Le moût s'écoulait sur la dalle du pressoir et dans une seconde cuve. Une fois qu'il avait décanté, on le plaçait dans des jarres enterrées jusqu'au col, disposées en rangées dans un cellier (figure 14). Enfin, le vin était transvasé dans des amphores, où on le faisait vieillir. Au début du I<sup>er</sup> siècle avant notre ère, les Gaulois appréciaient fortement le vin, comme en témoignent les millions de tessons d'amphores retrouvés sur les sites d'habitat, bien que la production vinicole se concentrait alors en Italie [7]. Après la conquête des Gaules, des fermes vinicoles ont vu le jour dans tout l'Empire romain, Rome devenant un grand consommateur de vin en raison de son pouvoir d'achat élevé. Pour répondre à la demande, les vignobles se sont étendus dans



diverses régions, notamment sur les côtes tyrrhéniennes et adriatiques, à Barcelone, en Narbonnaise, dans la vallée du Rhône, ainsi qu'en Égypte, en Turquie et en Algérie.



**Figure 14.** Elaboration du vin par les romains, schéma adapté de [www.alamy.com](http://www.alamy.com)

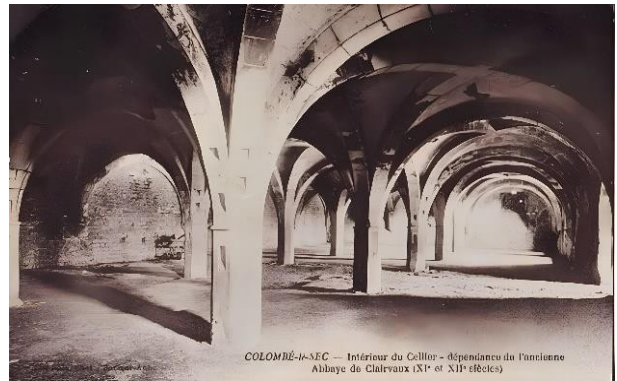
#### 4. Période médiévale

##### 4.1. Développement du fût

À partir du III<sup>e</sup> siècle de notre ère, l'amphore a progressivement été remplacée par le fût, ce qui imposait une meilleure maîtrise thermique compte tenu de la perméabilité du bois, afin d'éviter une trop grande perte de vin par évaporation, ainsi que le développement d'une piqure acétique. Les caves anciennes, construites avant l'utilisation de la climatisation, intégraient des formes d'architecture traditionnelle qui permettaient naturellement de bénéficier de la fraîcheur en été et de la chaleur en hiver grâce, notamment, à l'utilisation de l'inertie thermique du sous-sol et de murs en pierre très épais qui atténuaient la variabilité thermique interne. Ainsi, chacune des régions viticoles, en fonction du climat local et des matériaux disponibles, a su développer des habitats vigneronniers qui associaient les conditions thermiques optimales, pour l'élaboration des vins, en associant parfois d'autres productions agricoles et l'habitation.

##### 4.2. Caves cisterciennes

L'ordre cistercien est né d'une réforme de l'ordre bénédictin. Robert de Molesme, Albéric et Étienne Harding sont considérés comme les fondateurs de l'abbaye de Cîteaux. Ils souhaitaient revenir à une observance plus stricte de la règle de saint Benoît, mettant l'accent sur la pauvreté, le travail manuel et la simplicité. En 1112, Bernard de Clairvaux rejoint l'ordre et devient rapidement une figure centrale de cet ordre monastique. Sous son influence, l'ordre connaît une expansion rapide, avec la fondation de nombreuses abbayes en Europe.



**Figure 15.** Carte postale du Cellier aux moines, grange viticole cistercienne de l'Abbaye de Clairvaux qui élabore le Champagne Monial à Colombey le Sec dans la Côte des Bar.

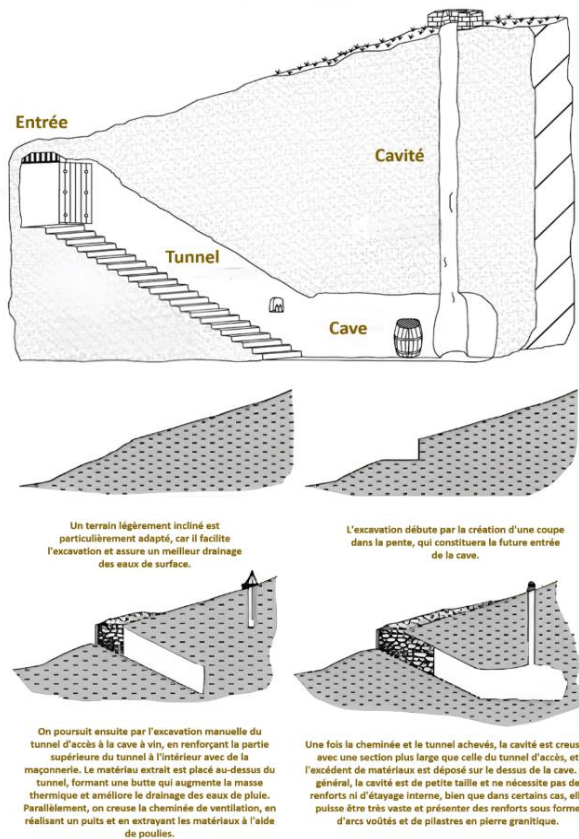
Parmi les nombreuses granges forestières, agricoles et viticoles que l'Abbaye de Clairvaux a établies au sud de la Champagne (à l'époque bourguignonne), le Cellier aux Moines de Colombé-le-Sec abritait les moines convers, qui furent les premiers à produire des vins de la Côte des Bar (figure 15). L'architecture cistercienne, un style du XII<sup>e</sup> siècle, s'inspire de saint Étienne Harding, le troisième abbé de Cîteaux, et a été promue par saint Bernard de Clairvaux. À cette époque, le style roman avait atteint sa maturité, mais, dès la seconde moitié du siècle, les cisterciens ont initié une transition vers le gothique. Les maîtres d'œuvre cisterciens devaient trouver un équilibre entre la construction en pierre, nécessaire pour réduire les risques d'incendie, et la création d'espaces élevés et lumineux, en accord avec leur spiritualité, tout en maîtrisant les coûts des chantiers. La croisée d'ogives, également utilisée pour les caves, s'est révélée être une solution efficace comparativement à la voûte romane (diminution du besoin en pierre, augmentation de la hauteur de l'édifices) [8].

##### 4.3. Caves traditionnelles à Aldea de San Esteban en Espagne

La construction des caves traditionnelles à Aldea de San Esteban, qui remonte souvent à plusieurs siècles, débute par le choix d'un site avec une géologie favorable, avec par exemple des sols argileux. Des outils manuels sont utilisés pour creuser l'espace de la cave, suivis de l'érection des murs en matériaux locaux pour obtenir une bonne isolation thermique.

Une voûte est installée pour renforcer la structure et assurer une circulation d'air adéquate. Les murs et le sol sont lissés pour éviter la stagnation de l'eau. Des zones sont aménagées pour le stockage des fûts, avec éventuellement un espace de dégustation. Des ouvertures sont créées pour la ventilation, et une entrée est conçue pour faciliter l'accès de la cave (figure 16). Ces étapes illustrent le savoir-faire des vignerons d'Aldea de San Esteban [9].





**Figure 16.** Étapes de construction d'une cave traditionnelle à Aldea de San Esteban en Espagne, traduction et schéma J. Rochard, adapté de I. Cañas, et al., photo María José Yravedra.

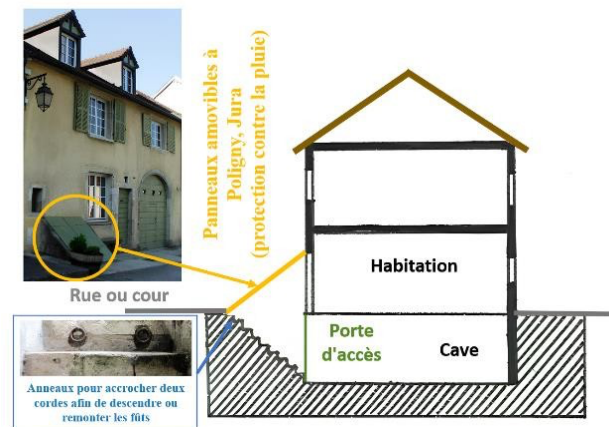
#### 4.4. Centre historique Palmenti di Pietragalla en Italie

Les caves traditionnelles du Parc urbain des caves (Rutt') à Pietragalla, en Italie, datent principalement de la période médiévale, bien que certaines structures puissent remonter à l'Antiquité. Leur construction s'est intensifiée entre le 13<sup>e</sup> et le 16<sup>e</sup> siècle, lorsque la production de vin est devenue une activité économique importante dans la région. Ces caves ont été conçues pour tirer parti des conditions géologiques locales, offrant un environnement idéal pour la vinification et le stockage du vin (figure 17).



**Figure 17.** Parc urbain des caves (Rutt') dans le centre historique de Palmenti di Pietragalla en Italie, photo A. Malito [www.fr.italiani.it](http://www.fr.italiani.it)

#### 4.5. Maison vigneronne avec une cave enterrée



**Figure 18.** Plan schématique en coupe d'une maison vigneronne avec une cave enterrée, schéma J. Rochard, adapté de [www.habitemosterritoires-bfc.fr](http://www.habitemosterritoires-bfc.fr)

C'est la maison du petit vigneron ou du métayer viticulteur. On la rencontre dans les villes et les bourgs, plus rarement dans les villages, et se caractérise par une cave totalement enterrée où le vigneron presse la vendange, vinifie et pratique le vieillissement et la mise en bouteille du vin. Cette cave permet de conserver le vin dans de bonnes conditions de température, d'hygrométrie et d'obscurité. Elle comporte assez souvent un soupirail qui permet d'assurer une ventilation et éventuellement un dispositif avec deux anneaux fixés dans la marche supérieure qui permettent de descendre ou remonter les fûts avec deux cordes. On y accède de l'extérieur par



quelques marches parfois recouvertes de deux panneaux amovibles en bois ou en fer, habituellement refermés sur le trottoir ou dans la cour, afin de les protéger de la pluie, tout en sécurisant la circulation des passants (figure 18).

## 5. Caves du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles

### 5.1. Création de grandes caves

Au cours du XIX<sup>e</sup> et du XX<sup>e</sup> siècle, l'évolution des pratiques viticoles et la demande croissante ont favorisé la création de grandes caves, en réponse aux activités de négoce et un peu plus tard à l'émergence des coopératives. Les négociants cherchaient des solutions pour stocker de plus grandes quantités de vin, tandis que les coopératives permettaient aux petits vignerons de mutualiser leurs ressources et d'accéder à des infrastructures adaptées [10]. Les caves étaient souvent construites en tenant compte des spécificités géologiques des régions viticoles, soit en étant directement creusées dans la roche mère, offrant une régulation thermique, soit par excavation depuis la surface pour maximiser l'utilisation de l'espace. Il était également courant de réaménager des cavités souterraines issues de l'extraction de matériaux. Ces espaces offraient des conditions idéales pour le vieillissement du vin, permettant aux vignerons d'augmenter les volumes produits tout en améliorant la qualité. Ainsi, cette période a marqué une transformation majeure de l'architecture des caves et a dynamisé la culture viticole.

### 5.2. Caves de Tokaj en Hongrie

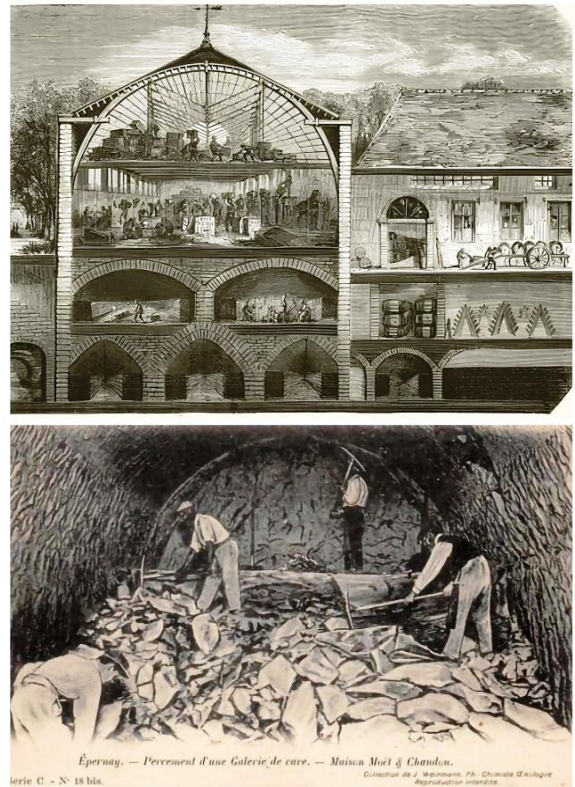
Située sur les contreforts de la chaîne montagneuse de Zemplén, cette région pittoresque déploie un paysage romantique, classé Patrimoine mondial par l'UNESCO. Ce cadre enchanteur abrite également un véritable labyrinthe de caves, qui témoigne d'une riche tradition viticole. Souvent creusées à la main dans des formations volcaniques, certaines de ces caves datent du XIII<sup>e</sup> siècle et illustrent l'ingéniosité humaine.



**Figure 19.** Caves à Tokaj en Hongrie photo György Darabos, [www.whc.unesco.org](http://www.whc.unesco.org)

Leur conception exploite les propriétés thermiques uniques des roches volcaniques, créant un environnement stable et frais, parfait pour la maturation du vin (figure 19).

### 5.3. Caves d'Épernay en Champagne



**Figure 20.** Moët et Chandon à Épernay, en Champagne, en haut : schéma de la disposition des caves, Les Merveilles de l'Industrie de Louis Figuier Furne, Jouvot vers 1880 ; en bas : Percement manuel d'une galerie de cave, coll. J. Weinmann, [www.champagne-patrimoine-mondial.org](http://www.champagne-patrimoine-mondial.org)

L'architecture des caves est conçue pour répondre aux spécificités de l'élaboration de vins effervescents par la méthode traditionnelle, concernant notamment la manutention et de travail du vin, ainsi que le stockage des bouteilles à basse température (prise de mousse, vieillissement, remuage) [11]. Les anciennes caves sparnaciennes se répartissent sur plusieurs niveaux, avec le « bas- cellier » destiné à accueillir des fûts. Ces premières caves sont réalisées en maçonnerie, dotées de voûtes adaptées à la fragilité de la craie. Les caves inférieures, ou « caves froides » sont creusées dans la craie et voutées en forme de berceau pour favoriser la ventilation. Au XIX<sup>e</sup> siècle, l'utilisation en surface de charpentes métalliques a permis de diminuer les contraintes sur le sol. Pour le creusement, une tranchée à ciel ouvert est adoptée lorsque les terrains de recouvrement manquent. En revanche, pour les caves creusées en profondeur dans la craie homogène, des techniques de percement de tunnels sont utilisées, tenant compte de la cohérence de la craie et de la présence éventuelle d'eau (figure 20) [12]. Elles sont des composantes du classement patrimoine mondial UNESCO de la Champagne.

### 5.4. Nouvelle cave souterraine à Châteauneuf-du-Pape

Le processus traditionnel de construction d'un tunnel se compose de plusieurs phases essentielles. Initialement, on

procède à l'excavation à l'explosif, où des substances explosives sont employées pour creuser la roche. Cette opération d'abattage est réalisée par étapes successives, conformément à un schéma de tir soigneusement planifié pour réduire au minimum les excès d'excavation et les vibrations. Les perforations sont effectuées par des machines automatisées, tandis que la mise en place des charges explosives est confiée à des experts formés.

Dans les formations rocheuses plus tendres, des engins d'attaque ponctuelle peuvent être utilisés pour creuser le sol sans avoir besoin d'explosifs. Ensuite, la purge consiste à éliminer les blocs instables du plafond et du front de taille à l'aide d'outils manuels. Parallèlement, le marinage implique l'enlèvement et l'évacuation des déblais à l'aide de pelles mécaniques et de camions-bennes. Enfin, un système de soutènement, qu'il soit temporaire ou permanent, est mis en place près du front de taille pour assurer la stabilité et la sécurité de l'ouvrage. En 2019 une nouvelle cave des Côtes du Rhône a été développée dans un sol de safre (grès tendres à l'origine de produits sableux), avec une méthode de creusement mécanique. L'ouvrage se compose d'un tunnel principal desservant une quarantaine d'alvéoles connecté à des caves préexistantes (figure 21).

## 5.5. Caves issues de l'extraction de matériaux de construction

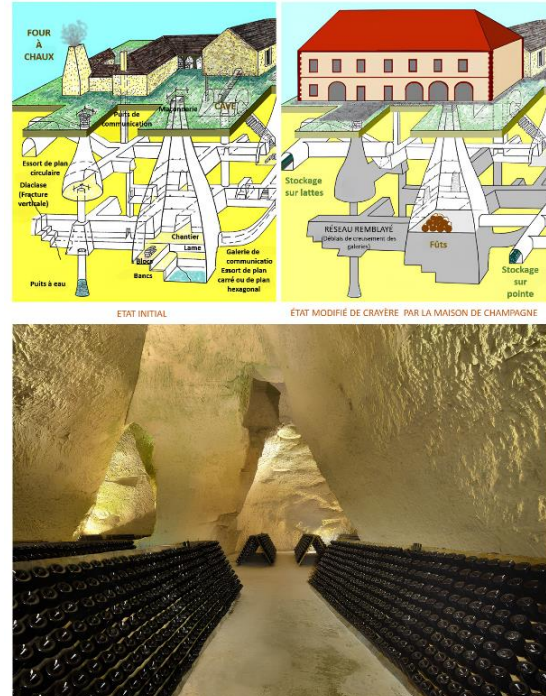
### 5.5.1. Crayères champenoises

Les Crayères de Reims constituent un vaste ensemble de galeries souterraines creusées dans la craie, qui se trouve sous la ville de Reims, notamment sous la colline Saint-Nicaise, composante du classement patrimoine mondial UNESCO de la Champagne. Cette craie, une roche sédimentaire formée il y a environ 70 millions d'années, a été exploitée depuis l'époque romaine pour de nombreux usages.

L'extraction de la craie qui a commencé dès l'époque gallo-romaine et a évolué au fil des siècles, a été réalisée selon des méthodes manuelles qui ont permis de créer des cavités impressionnantes, atteignant parfois jusqu'à 30 mètres de profondeur. La craie extraite a joué un rôle essentiel dans la construction de nombreux bâtiments à Reims et dans ses environs, en plus d'être utilisée pour la fabrication de chaux vive, un matériau de liant crucial avant l'essor du ciment. Elle a également trouvé des applications agricoles, servant d'amendement pour les sols, et même pour le blanchiment des étoffes.



**Figure 21.** Creusement mécanique cave Châteauneuf-du-Pape, par l'entreprise Besson, [www.espaces-souterrains.fr](http://www.espaces-souterrains.fr)



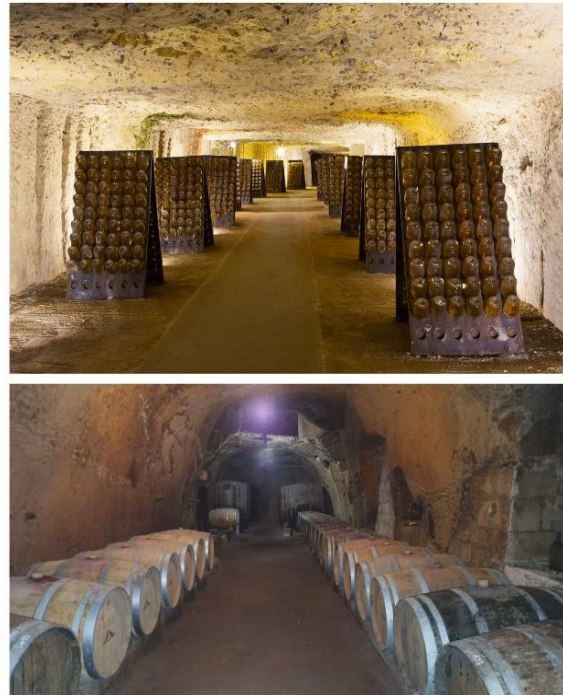
**Figure 22.** Schéma d'une crayère Champenoise de la colline de Saint-Nicaise à Reims (état initial et modifié par la Maison de champagne) [www.champagne-patrimoine-mondial.org](http://www.champagne-patrimoine-mondial.org) et photo d'une crayère du Champagne Taittinger, photo Michel Jolyot, collection Coteaux, Maisons et Caves de Champagne, [www.whc.unesco.org](http://www.whc.unesco.org).



À partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, avec l'essor du Champagne, les crayères ont pris une nouvelle dimension en tant qu'espaces de stockage et d'élaboration des vins (température constante de 10 à 12 °C et humidité élevée). Charles Heidsieck a été un pionnier en 1867, lorsqu'il a acquis des crayères s'étendant sur plusieurs kilomètres, et c'est à partir du XIX<sup>e</sup> siècle que d'autres grandes maisons de champagne, telles que Veuve Clicquot et Taittinger, ont commencé à investir ces galeries pour y entreposer leurs bouteilles (figure 22). Aujourd'hui, ces crayères abritent encore des millions de bouteilles qui y vieillissent pendant plusieurs années, créant ainsi un lien entre tradition et innovation dans la viticulture. Durant la Première Guerre et la Seconde Guerre mondiale, les crayères ont également joué un rôle crucial en tant qu'abris pour les civils et les soldats. Depuis le 4 juillet 2015 les Crayères de Reims sont reconnues comme un bien inscrit sur la liste du patrimoine mondial sous le titre « Coteaux, maisons et caves de Champagne » ce qui participe à l'attractivité oenotouristique de la région. La gestion de ces galeries est essentielle, car des affaissements peuvent survenir dans la ville, nécessitant des recherches préalables avant tout nouveau chantier et parfois même des consolidations par des pieux [12].

### 5.5.2. Caves de tuffeau de la vallée de la Loire la vallée

Le tuffeau des caves du Val de Loire, une roche sédimentaire datant de l'ère secondaire (90 millions d'années), est le matériau de prédilection pour de nombreuses constructions ligériennes. Il contient des fossiles marins, tels que des ammonites et des bivalves, qui témoignent de l'ancienne présence de la mer. L'exploitation des carrières a débuté dès l'Antiquité, mais c'est au XI<sup>e</sup> siècle que les bâtisseurs de cathédrales et de châteaux ont commencé à extraire des blocs de pierre, un processus qui a duré jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle. Les ouvriers, appelés "perreyeux", traçaient une rainure autour du bloc à détacher, généralement de dimensions 3 m sur 2,50 m. Ils creusaient la rainure jusqu'à 30 ou 40 cm de profondeur et y inséraient des coins de bois, frappés méthodiquement pour faire tomber le bloc. Après cela, les blocs étaient débités sur place avec de grandes scies pour être hissés à l'extérieur. Après l'arrêt de l'extraction au XV<sup>e</sup> siècle, les galeries ont été utilisées pour l'élevage de vers à soie, puis pour la culture de champignons de Paris. La température constante (10°C à 12°C) et l'humidité élevée (85%) des caves en font un environnement idéal pour l'élevage des vins (figure 23). Ces caves traditionnelles s'intègrent dans le classement du patrimoine mondial Unesco du Val de Loire.



**Figure 23.** Caves issues de l'extraction du tuffeau du Val de Loire, région classée patrimoine mondial UNESCO ; en haut : Saint Roch à Rochecorbon, l'AOC Vouvray, photo [www.maisonlacheateau.com](http://www.maisonlacheateau.com) en bas Domaine de Nerleux à Saumur Champigny, photo J. Rochard.

### 5.5.3. Moldavie

En Moldavie, de nombreuses caves, issues d'anciennes carrières de calcaire, représentent une attraction touristique majeure du pays, ont été creusées à la main puis mécaniquement durant la période soviétique. Elles offrent des conditions optimales pour le vieillissement des vins, notamment des effervescents, à une température constante d'environ 12 degrés, réduisant ainsi les besoins en climatisation (figure 24). En 1952, suite à l'extension du vignoble moldave pendant la période soviétique, la question de la conservation et du vieillissement du vin a été soulevée en Moldavie. Deux figures importantes de la viticulture moldave, Petru Ungureanu et Nicolae Sobolev, ont proposé d'exploiter les galeries des carrières de Cricova, d'où provenait la pierre de construction. Au cours des années 50, face à un manque de caves à vin, l'idée d'utiliser ces anciennes carrières pour stocker et faire vieillir le vin est née. Les tunnels de Cricova existent depuis le XV<sup>e</sup> siècle, période durant laquelle le calcaire a été extrait pour la construction de la ville de Chisinau. Le réseau compte 120 kilomètres de routes labyrinthiques réparties sur environ 53 hectares d'espace souterrain. La largeur des galeries varie entre 6 et 7,5 mètres, tandis que leur hauteur se situe entre 3 et 3,5 mètres. La profondeur des caves, selon le relief, varie de 35 mètres à l'entrée jusqu'à 80 mètres. Le complexe de caves de Mileștii qui s'étend sur 250 kilomètres, dont seulement 120 kilomètres sont actuellement exploités, est le plus vaste du monde. En 2007, ces caves ont été inscrites au livre Guinness des records en tant que plus grande cave à vin en nombre de

bouteilles, avec une collection atteignant 2 millions de bouteilles.

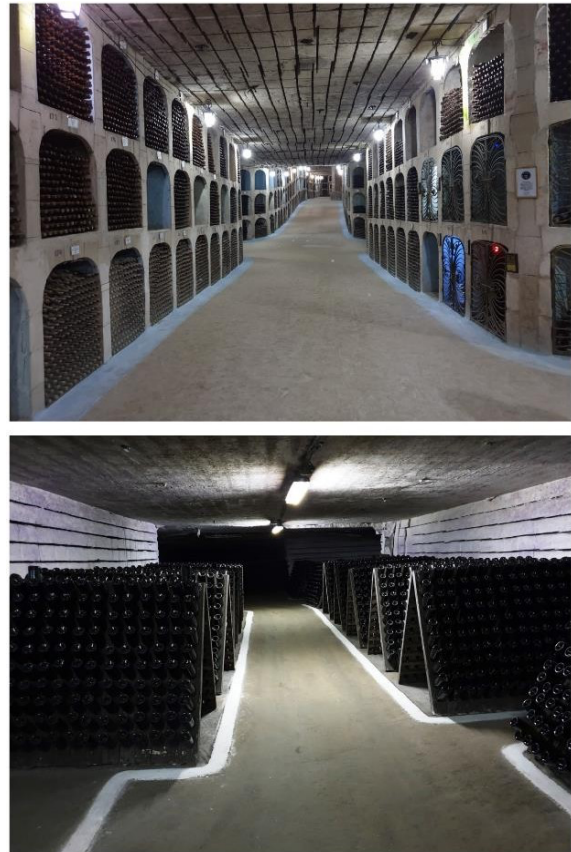
## 6. Nouvelles caves écoconçues

### 6.1. Enjeux

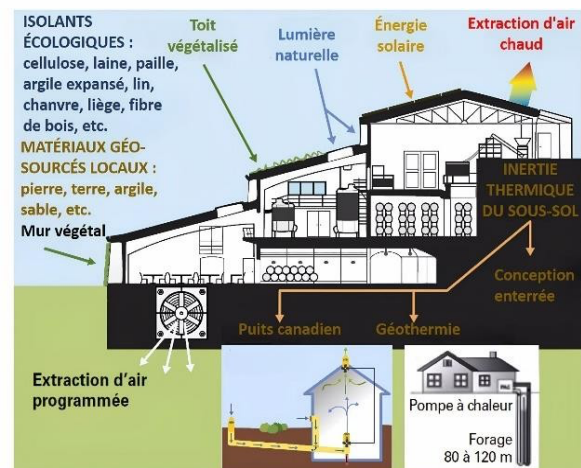
Qu'elles soient traditionnelles ou modernes, les caves et chais représentent des vitrines emblématiques pour les vignerons, les domaines viticoles et les négociants. L'architecture de ces lieux de production viticole constitue des supports d'identité esthétique, voire artistique, de plus en plus valorisés par l'œnotourisme [13]. Au-delà de l'image, les normes et réglementations, ainsi que les aides financières, intègrent progressivement des prérequis durables, une évolution qui doit être prise en compte pour les nouvelles caves. L'écoconstruction, ou construction durable englobe la création, la restauration, la rénovation et la réhabilitation de bâtiments, en veillant à respecter la durabilité à chaque étape de leur cycle de vie, y compris durant leur utilisation (chauffage, consommation d'énergie et d'eau, production de déchets et d'effluents). Cette approche intègre également une dimension esthétique et patrimoniale, privilégie l'utilisation de ressources locales et respecte le personnel ainsi que les populations locales. Concernant les aspects thermiques, il est essentiel de tirer parti de l'inertie des murs et du sous-sol pour réduire les besoins énergétiques. Au-delà des matériaux de construction, des solutions comme l'implantation souterraine, l'utilisation de toits végétaux, la géothermie ou les puits canadiens s'inscrivent également dans une approche bioclimatique [14].

### 6.2. Caves souterraines

Un bâtiment viticole enterré présente plusieurs avantages significatifs. Au-delà de la régulation naturelle de la température, grâce à l'inertie naturelle du sol, cette configuration diminue l'emprise au sol, ce qui est particulièrement bénéfique dans les zones où l'espace est limité. L'implantation souterraine contribue à prolonger la durée de vie de la structure, en la protégeant des intempéries et des variations climatiques extrêmes. Cette approche favorise également une meilleure intégration paysagère et offre la possibilité d'utiliser des transferts gravitaires, ce qui réduit la consommation d'énergie liée aux pompes, optimisant ainsi l'ensemble du système de gestion des moûts et des vins (figure 25) [15].



**Figure 24.** Caves issues de l'extraction de blocs calcaires en Moldavie, en haut Cricova, en bas Milestii Mici.



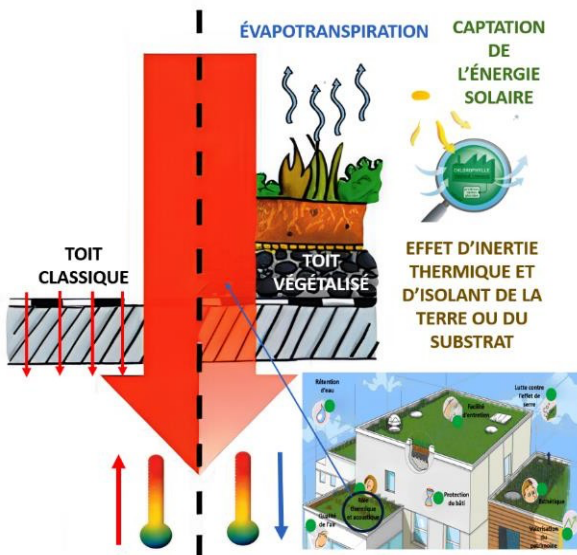
**Figure 25.** Principales pistes d'écoconception et d'optimisation thermique d'une cave, d'après J Rochard.

### 6.3. Inertie et isolation thermique d'un toit végétalisé

#### 6.3.1. Principe

L'isolation thermique d'un toit végétalisé repose sur plusieurs mécanismes qui favorisent le confort intérieur tout en réduisant la consommation d'énergie.





**Figure 26.** Phénomène d'isolation thermique d'un toit végétal, schéma J. Rochard, adapté de [www.cdn.paris.fr](http://www.cdn.paris.fr)

La couche de terre et de substrat contribue à une isolation et à un effet d'inertie thermique. Parallèlement les plantes absorbent le rayonnement solaire ce qui empêche une partie de la chaleur de pénétrer dans le bâtiment, réduisant ainsi la température intérieure pendant les mois chauds. De plus, l'évapotranspiration des végétaux contribue à refroidir l'air ambiant. En hiver, la végétation et le substrat agissent comme une barrière isolante, empêchant la chaleur de s'échapper vers l'extérieur (figure 26). En complément, un toit végétalisé favorise l'isolation phonique et assure une meilleure gestion de l'eau pluviale, en absorbant une partie des précipitations et en retardant leur évacuation.

### 6.3.2. Exemple du Château Haut-Bailly, cru classé de Graves



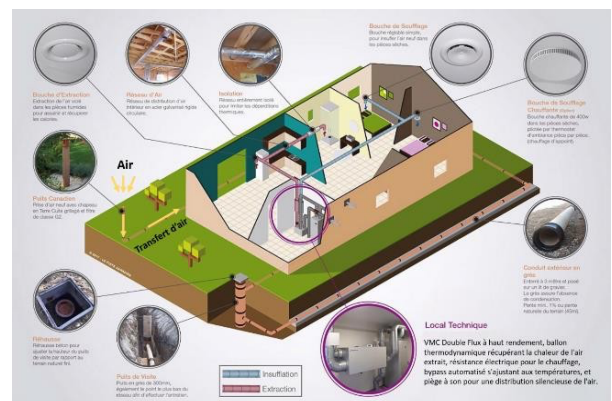
**Figure 27.** Coupe et photo de la cave du Chateau Haut- Bailly de Pessac-Léognan dans le bordelais, adaptées [www.haut-bailly.com](http://www.haut-bailly.com)

Conçue par l'architecte Daniel Romeo, le chai allie une optimisation technique et esthétique, tout en s'intégrant harmonieusement avec le Château et vignoble. À l'approche du domaine, le chai se révèle discrètement

entre les vignes, avec un bâtiment à 10 mètres de profondeur tout en élevant une partie à 8 mètres au-dessus du sol, avec un toit végétalisé qui conforte l'inertie thermique. L'architecture vise à créer un espace de sérénité et d'harmonie, en utilisant des matériaux nobles comme le béton, le bois et le verre. Les installations incluent une voûte circulaire sans pilier, 54 cuves gravitaires et un chai pour 900 barriques, le tout contrôlé par un système numérique. Un dispositif de récupération d'eau pluviale a également été mise en place (figure 27).

## 6.4. Puits canadien

### 6.4.1. Principe



**Figure 28.** Eléments constitutifs d'un puits canadien, schéma adapté de [www.lepuitscanadien.fr](http://www.lepuitscanadien.fr)

Le puits canadien utilise l'inertie thermique du sol avec des canalisations horizontales situées à une profondeur d'environ 1 à 2 mètres pour prétraiter l'air de ventilation des bâtiments. D'un point de vue pratique, la température du sol à faible profondeur est d'environ 15°C en été et 5°C en hiver. Ce dispositif peut être équipé de filtres anti-polluants et obligatoirement d'un siphon d'évacuation pour les eaux de condensation à l'intérieur des tuyaux (figure 28).

### 6.4.2. Exemple du Château Malleret dans la région bordelaise du Médoc

Le chai a été récemment rénové en respectant l'architecture traditionnelle, avec l'intégration d'un dispositif de puits canadien qui permet de bénéficier naturellement de l'inertie thermique du sous-sol (fraîcheur en été et chaleur en hiver). À partir des capteurs d'air extérieur, celui-ci transite par des canalisations souterraines vers un dispositif de déshumidification et de répartition pour être acheminé par des diffuseurs insérés dans les murs et au centre des zones à climatiser. Parallèlement, la cave a créé un système de double mur en pierre, avec une couche isolante au centre qui permet d'optimiser l'inertie thermique interne du bâtiment (figure 29).



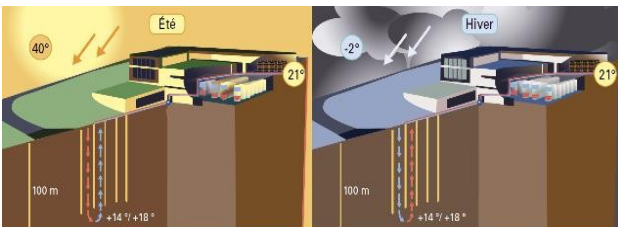


**Figure 29.** Vue extérieure des capteurs d'air du puits canadien au Château de Malleret, photo J. Rochard.

## 6.5. Géothermie par captage vertical

### 6.5.1. Principe

Le principe d'une pompe à chaleur (PAC) géothermique sur sondes verticales repose sur la circulation d'un fluide dans des tubes en polyéthylène enfouis à environ 100 mètres de profondeur, ce qui permet d'échanger de l'énergie avec le sol (figure 30). En surface, la PAC transfère la chaleur du sol vers le bâtiment pour le chauffer ou inversement pour le refroidir. Elle couvre les besoins en chauffage, refroidissement et eau chaude sanitaire, et peut s'adapter à différents types de bâtiments. Ce « géocooling » permet aussi de rafraîchir le bâtiment sans utiliser la PAC. Les systèmes géothermiques sont efficaces, avec un coefficient de performance (COP) pouvant atteindre 5. Leur longévité est élevée ; elle dépasse 50 ans pour les sondes et est d'environ 20 ans pour la PAC. Cependant, le coût initial est important, ce qui justifie une étude de faisabilité par des professionnels coutumiers du secteur viticole.



**Figure 30.** Application de la géothermie dans les caves, qui permet de bénéficier de l'inertie thermique du sous-sol (fraîcheur en été et chaleur en hiver), d'après Bodegas Regalia de Ollauri dans la Rioja, Espagne, [www.marquesdeteran.com](http://www.marquesdeteran.com), schéma [www.oeno.tm.fr](http://www.oeno.tm.fr)

### 6.5.2. Exemple de la Bodega Gramona dans la région du Penedès en Catalogne



**Figure 31.** Bodega Gramona dans la région du Penedès en Catalogne, Espagne ; schéma J. Rochard, photo [www.gramona.com](http://www.gramona.com)

L'ensemble de la cave est recouvert d'un toit végétal, ce qui conforte l'inertie thermique du bâtiment partiellement enterré, tout en favorisant une gestion efficace des eaux pluviales. Une installation géothermique équipée de sondes verticales reliées à une pompe à chaleur permet de fournir du chauffage en hiver et du refroidissement en été. Le jardin patrimonial et écologique du toit végétal met en avant la diversité des cépages et des plantes locales, sensibilisant ainsi les visiteurs à l'importance des espèces végétales du terroir viticole. Des panneaux photovoltaïques installés sur le toit convertissent la lumière solaire en électricité, réduisant la dépendance énergétique et optimisant l'utilisation des ressources renouvelables. Enfin, l'éclairage naturel, conçu en forme de tas de bouteilles, maximise la lumière naturelle tout en étant protégé du soleil, et est complété par des lampes LED pour garantir une consommation énergétique réduite tout en créant une ambiance agréable (figure 31).

## 7. Conclusion

Au fil de l'histoire, les humains ont su tirer parti de l'inertie thermique du sol et du sous-sol pour améliorer leur confort de vie. Cette approche permet d'atténuer les excès de chaleur en été et de froid en hiver. Il est probable que, par empirisme, les premiers élaborateurs de vin aient rapidement compris qu'une température basse et constante pouvait limiter l'altération du vin, avec notamment le risque de formation de vinaigre. Ainsi, des pratiques anciennes, telles que l'utilisation de récipients enterrés, de grottes et de caves souterraines, illustrent la diversité des savoir-faire liés à l'inertie souterraine, parfois reconnus comme patrimoines mondiaux par l'UNESCO.

Cependant, au cours de l'âge d'or de la modernité, au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, l'avènement de la climatisation et la disponibilité d'énergie bon marché ont souvent conduit à des architectures de caves et de chais en surface, pour lesquels l'inertie thermique était peu valorisée. Depuis quelques décennies, face à la hausse des coûts énergétiques et à la prise de conscience des impacts environnementaux, notamment vis-à-vis de l'effet de serre, les professionnels se tournent de plus en plus vers des solutions écologiques. Ainsi, les caves éco-conçues

valorisent à nouveau l'inertie thermique du sous-sol grâce à des techniques telles que, les constructions enterrées ou souterraines, les toitures végétalisées, ainsi que l'utilisation indirecte de la température constante du sous-sol par le biais de systèmes tels que les puits canadiens et la géothermie à sonde verticale. Au final, ces approches favorisent une démarche plus durable et contribuent à un meilleur équilibre thermique, tout en préservant la qualité des vins [16] [17].

## 8. Références

1. A. Brugirard et J. Rochard, Aspects pratiques des traitements thermiques des vins, Editions Œnoplurimédia, coll. Avenir Œnologie (1991)
2. D. Marengo et J. Rochard, Besoins thermiques d'une cave : Principe, base de calcul et exemples, Revue des œnologues, 145 S, novembre (2012)
3. J. Rochard, Vins et vinaigres, un voyage au cœur des saveurs fermentées, Revue des œnologues, 195, Avril (2025)
4. N. Hovhannisyanyan et al., Multidisciplinary investigation of identity of the "Areni" grape variety, BIO Web of Conferences, 5 (2015), [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2015/02/bioconf\\_oiv2015\\_01013.pdf](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2015/02/bioconf_oiv2015_01013.pdf)
5. J. Rochard, J.-A.-S. Touma, De la civilisation phénicienne à la viticulture moderne, Revue des œnologues, 178, janvier (2021)
6. A. Orsingher, S. Amicone, J. Kamlah, H. Sader, C. Berthold, Chaux phénicienne pour vin phénicien, Antiquité, 94 (2020)
7. E. Dodd, L'archéologie de la production de vin dans l'Italie romaine et préromaine, Revue américaine d'archéologie, vol. 126, (juillet 2022), 443-480, DOI : 10.1086/719697 Institut archéologique d'Amérique (2022) <https://ajaonline.org/state-of-the-discipline/4508/>
8. J. Rochard, Héritage spirituel et innovations médiévales, Revue des œnologues, à paraître. I. Cañas, J. Cid Falceto, F. R. Mazarrón, Bodegas subterráneas excavadas en tierra: Características de los suelos en la Ribera del Duero (España), Informes
9. I. Cañas, J. Cid Falceto, F. R. Mazarrón, Bodegas subterráneas excavadas en tierra: Características de los suelos en la Ribera del Duero (España), Informes de la Construcción, 64 (2023)
10. J. M. Touzard, Les caves coopératives dans la transformation du vignoble languedocien, Etudes Héraultaises, hors-série (2011), [https://www.researchgate.net/publication/262916400\\_Les\\_caves\\_cooperatives\\_dans\\_la\\_transformation\\_du\\_vignoble\\_languedocien/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/262916400_Les_caves_cooperatives_dans_la_transformation_du_vignoble_languedocien/citation/download)
11. CIVC, Construction durable en Champagne Comité Champagne, (2012), [www.champagne.fr](http://www.champagne.fr)
12. P. Tourtebatte, Guide de conservation des caves de champagne, Mission Coteaux, Maisons et Caves de Champagne- Patrimoine mondial, (2020), [https://www.champagne-patrimoinemondial.org/sites/default/files/transit/guide-de-conservation-des-caves\\_mission-cmcc\\_mai-2021-min.pdf](https://www.champagne-patrimoinemondial.org/sites/default/files/transit/guide-de-conservation-des-caves_mission-cmcc_mai-2021-min.pdf)
13. J. Rochard, Bases de l'Eco-œnotourisme : Du paysage à la conception des caves. CULTUR: Revista de Cultura e Turismo, 8(3), 47-60 (2014)
14. J. Rochard, Construire une cave écologique : aspects thermiques de la conception et l'architecture, Revue des Œnologues, 189 (2023)
15. J. Rochard, Architecture et conception durable d'une cave : concept, application et exemples, 43rd World Congress of Vine and Wine, BIO Web Conf, 56, (2023), [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full\\_html/2023/01/bioconf\\_oiv2022\\_02002/bioconf\\_oiv2022\\_02002.htm](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full_html/2023/01/bioconf_oiv2022_02002/bioconf_oiv2022_02002.htm)
16. J. Rochard, Traité de viticulture et d'œnologie durables, Editions Œnoplurimédia, coll. Avenir Œnologie (2005)
17. J. Rochard, S. Badet, J.-L. Berger, Petit précis du développement durable : la filière face aux nouveaux enjeux, Editions France Agricole (2024)