

# La Grande Muraille de Chine : plus de 20 siècles de construction

école \_\_\_\_\_  
normale \_\_\_\_\_  
supérieure \_\_\_\_\_  
paris – saclay \_\_\_\_\_

Hélène HORSIN MOLINARO - Xavier JOURDAIN  
Sylvain LANGLOIS

Édité le 18/01/2019

*Élève de l'ENS Paris-Saclay, Sylvain Langlois, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon ; cette ressource est issue de ce dossier.*

La Grande Muraille de Chine désigne un ensemble de fortifications militaires construites, détruites pour certaines, reconstruites en différents endroits et en plusieurs fois, entre le V<sup>e</sup> siècle avant J.-C. et le XVI<sup>e</sup> siècle. Cet ouvrage défensif, classé au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1987 [1] est la plus grande structure architecturale construite par l'homme en longueur, en surface et en masse. Elle n'est néanmoins pas visible à l'œil nu de la lune puisque son épaisseur reste faible !

La Grande Muraille de Chine défend la frontière au nord de la Chine, elle part de la côte est au nord de l'agglomération de Pékin et se poursuit à l'ouest jusqu'au désert de Gobi. Ce mur fortifié n'est pas continu, et selon les différentes portions il est large de 5 à 7 mètres, haut de 5 à 17 mètres. La Grande Muraille parcourt environ 6 700 km, et plus de 8 850 km si les barrières naturelles comme les fleuves ou les montagnes sont incluses.



Figure 1 : La grande Muraille de Chine de l'ouest à l'est, sources [2] et [3]

Cette ressource propose de parcourir les vingt siècles de construction de la Grande Muraille de Chine, dont la durée de vie relative aux matériaux utilisés ne cesse d'étonner. À travers les périodes de son édification, seront balayés les objectifs de sa construction, le type d'architecture, les différents matériaux utilisés en donnant quelques valeurs de caractéristiques mécaniques, et les techniques mises en place. Enfin nous concluons sur la possibilité d'utilisation de ces matériaux à notre époque et s'ils peuvent être des modèles d'éco-matériaux.

## 1 – La Grande Muraille, une construction en matériaux naturels

La Grande Muraille de Chine fait partie de ces imposants ouvrages résistants au temps et fabriqués à partir de matériaux naturels comme la terre et la pierre, matériaux disponibles en grande quantité et partout sur le globe. Les constructions en terre et en pierre se sont développées sur les cinq continents, des ouvrages de ce type sont encore visibles partout dans le

monde. Construites entièrement en terre, on peut citer la Citadelle de Bam, en Iran, datant du V<sup>e</sup> siècle avant J.-C. (figure 2a) en adobe<sup>1</sup> (malheureusement détruite par un séisme en 2003), les Pyramides du Soleil et de la lune à Teotihuacan au Mexique, datant du II<sup>e</sup> siècle avant J.-C. (figure 2b) dont le cœur est fait d'adobe, elles étaient couvertes de peintures sur stuc ; construites en pierre les Pyramides de Gizeh, en Égypte, datant du XX<sup>e</sup> siècle avant J.-C. (figure 2c), et taillée dans la roche la Cité de Pétra, en Jordanie, datant du VI<sup>e</sup> siècle avant J.-C. (figure 2d).



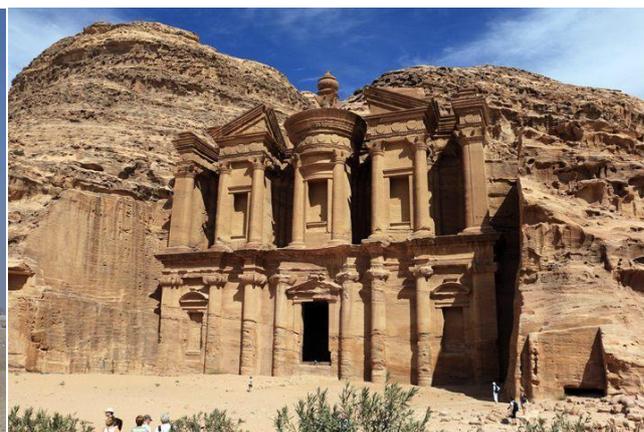
(a) Citadelle de Bam (V<sup>e</sup> av. J.-C.),  
source J. Dutilh, septlieues.free.fr



(b) Pyramide de la lune depuis la pyramide du Soleil  
(II<sup>e</sup> av. J.-C.), source valise-et-flemmardise.com



(c) Pyramides de Gizeh (XX<sup>e</sup> av. J.-C.),  
source J. Legrand, voyageur-independant.com



(d) Cité de Pétra (VI<sup>e</sup> av. J.-C.),  
source T. Llopis, autre-ailleurs.fr

Figure 2 : Quelques constructions en terre et en pierre à travers le monde

La construction de la Grande Muraille évolue en fonction des moyens et matériaux disponibles mais aussi au gré des alliances, des conquêtes, des invasions,... Sa description sera découpée selon les périodes historiques. Pour autant cette ressource pédagogique est axée sur les techniques et matériaux de construction et n'a pas pour ambition de retracer l'Histoire de la Chine.

## 2 – Période antérieure à l'unification du pays (XII-III avant J.-C.)

### 2.1 - Contexte des bribes de la muraille de Chine

Les peuples de cette région du monde construisent des murs depuis leurs plus anciennes dynasties. Certains s'élèvent toujours de nos jours alors qu'âgées de plus de 3 000 ans ; par

<sup>1</sup> Briques séchées au soleil, moulées à partir d'une terre malléable et souvent mélangée de paille. Elles sont façonnées manuellement à l'aide de moules prismatiques de dimensions variables [8].

exemple le mur de la période d'Erligang (XIII<sup>e</sup> siècle av. J.-C.), près de la ville actuelle de Zhengzhou, était une enceinte d'environ 7 km de circonférence et s'élève toujours à plus de 10 m de haut en certains endroits.

Au VIII<sup>e</sup> siècle avant J.-C., début de la période des Printemps et des Automnes<sup>2</sup>, la Chine est composée de multiples petits états, réunis sous l'égide des rois de la dynastie des Zhou orientaux (figure 3a). Au cours du temps, de grandes principautés se forment par des annexions d'États. Plusieurs royaumes indépendants sont constitués, se faisant la guerre ; la dynastie régnante n'est guère plus qu'un pouvoir symbolique. C'est le début de la période des Royaumes combattants qui durera jusqu'en 221 avant J.-C (figure 3b).

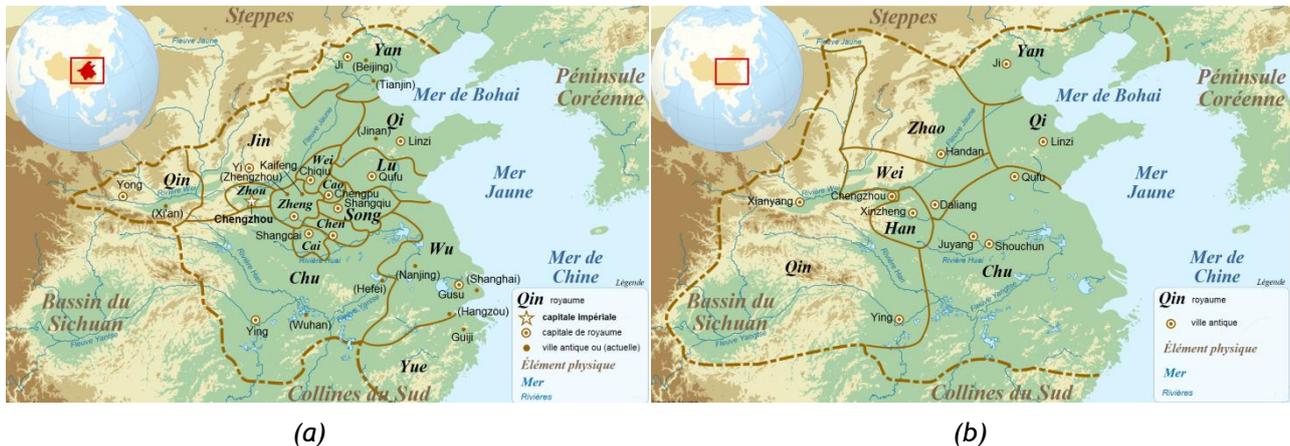


Figure 3 : (a) La Chine, V<sup>e</sup> avant J.-C. États principaux à la fin de la période des Printemps et Automnes, source [4], (b) La Chine à la fin des Royaumes combattants (350 av. J.-C.), source [5]

La construction de murailles est alors entreprise par différents États (des dynasties Yan, Zhao, Wei, Chu, Han, Qi, et Qin) pour se protéger des états voisins, ou des tribus non chinoises. La construction d'un mur au sud de l'état de Qi commence vers le V<sup>e</sup> siècle avant J.-C., des portions sont aujourd'hui encore debout (il existe une très ancienne référence littéraire sur un mur construit en 656 avant J.-C. par l'État de Qi au sud). Sur la frontière ouest de l'état de Wei, voisin du Qi, la construction d'un mur débute au milieu du IV<sup>e</sup> siècle avant J.-C., puis un deuxième mur s'érige sur la frontière est de l'état de Wei. Il est imité par les États de Yan et Zhao. Cette période marque donc la construction de différents murs, dans le but de se protéger des puissances voisines.

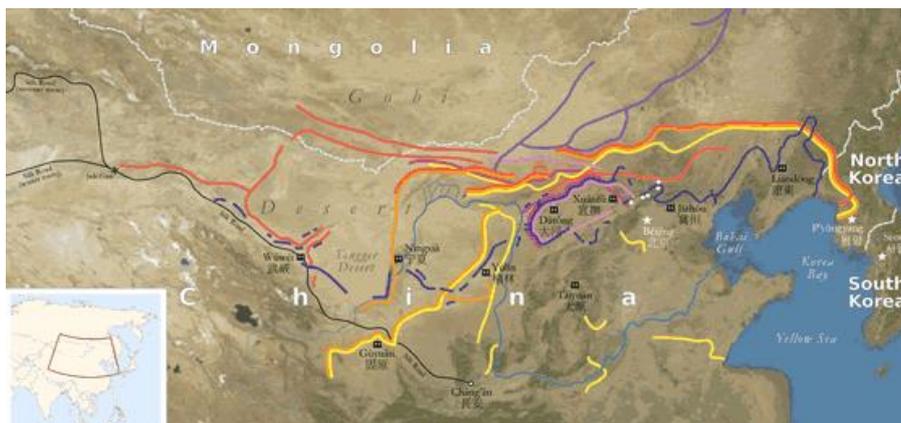


Figure 4 : Les différentes périodes de construction de la Grande Muraille : en JAUNE les constructions réalisées du V<sup>e</sup> siècle av. J.-C. au III<sup>e</sup> siècle av. J.-C., source [6]

<sup>2</sup> Du nom des « Annales des Printemps et des Automnes » de l'état de Lu, chroniques de tous les événements entre 722 et 481 avant J.-C.

## 2.2 - Première architecture de la grande muraille

### Une construction rudimentaire

Les murs étaient pour la plupart construits en terre battue, avec des pierres pour très peu de tronçons. Les murs ont été érigés avec parcimonie : les barrières naturelles comme les montagnes, les rivières ou les ravins étaient utilisés, aucun mur n'était alors construit. Très rarement, des tours de guet étaient flanqués à l'extérieur du mur. Les murs défensifs sont construits en ligne droite ou en U (figure 5) entourant l'intérieur de l'état, formant presque une place (d'où l'appellation de « mur carré » ou square wall). Les murs pouvaient servir également à marquer les frontières des territoires nouvellement acquis lors d'invasion.

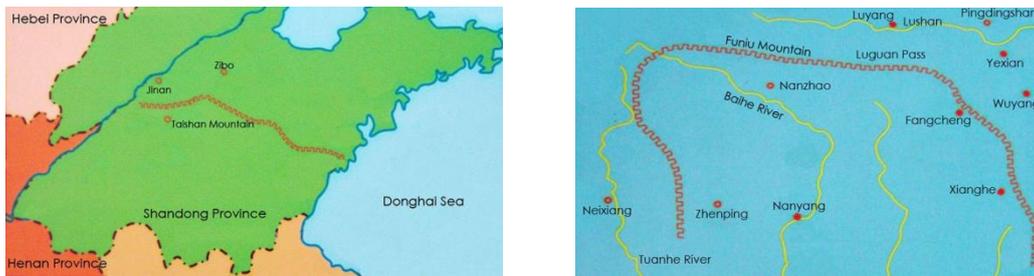


Figure 5 : Mur en ligne de l'état de Qi, et mur en U de l'état du Chu, source [7]

Les premiers murs sont en terre tassée. Le sol de ces régions a des caractéristiques particulières, c'est un fin loess<sup>3</sup> très poussiéreux qui s'agglomère aisément atteignant, une fois tassé, une dureté équivalente à la dureté de la pierre. Des vestiges sont encore visibles après plus de 20 siècles.



Figure 6 : Vestiges de mur aux portes du désert de Tengger et mur du couloir de Hexi restauré au XIV<sup>e</sup> siècle (6 m de haut et 3 m d'épaisseur), source [8]

### Constitution de la terre

Le matériau terre est constitué d'éléments gazeux, liquides et solides [9] :

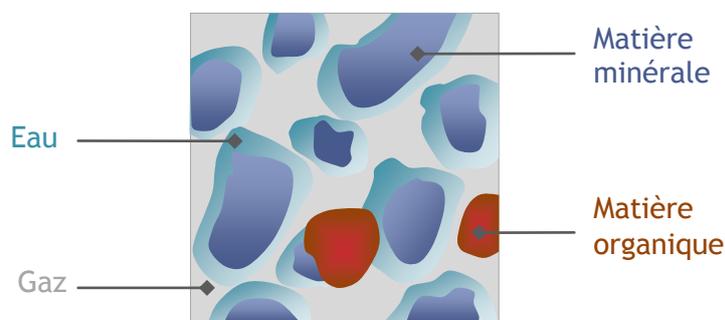


Figure 5 : Constitution de la terre, d'après [9]

<sup>3</sup> Dépôt éolien fin et homogène, de texture silteuse (= en feuillets), pauvre en sables, contenant 10 à 20% de carbonate de calcium [8]

- **Constituants gazeux** : les gaz localisés dans les cavités sont issus de l'air extérieur, ce sont les constituants de l'atmosphère de la terre. Ces gaz doivent être en quantité réduite dans la réalisation d'un mur en effet ils ne participent pas à la résistance de la terre.
- **L'eau** : pénètre le sol et est retenue dans la terre. Elle joue un rôle important dans les propriétés de celle-ci, en particulier dans la cohésion. Deux types de force sont à l'origine de la cohésion. Les liaisons chimiques que l'on trouvera par exemple dans les argiles, et dans une moindre mesure, la tension de surface air/eau. Ces phénomènes sont à l'origine du gonflement (les couches absorbées gonflent avec l'humidité et la terre augmente de volume) et du retrait (dû à l'évaporation de l'eau). L'eau joue également sur la plasticité d'un sol, une terre bien humidifiée peut se déformer sans se fissurer.
- **Constituants solides** : insolubles dans l'eau, ce sont :
  - **Les matériaux organiques** : principalement composés d'humus déposés à la surface de la terre sur une épaisseur de l'ordre de 5 à 35 cm, les matériaux organiques ont une structure ouverte et spongieuse et sont dotés d'une faible résistance mécanique. La nature acide des composants organiques peut avoir des effets corrosifs sur les matériaux au contact.
  - **Les matières minérales** : la terre est composée de très nombreuses matières minérales que l'on peut diviser en fractions granulaires. Tout d'abord les cailloux, un matériau grossier (taille comprise entre 20 et 200 mm) résultant de la désagrégation de la roche mère dont ils héritent des caractéristiques fondamentales (résistance mécanique). Puis les graviers dont la taille se situe entre 2 et 20 mm, résultant de la désagrégation de la roche mère et des cailloux, viennent ensuite les éléments sableux (taille comprise entre 0,6 et 2 mm), qui peuvent être siliceux, silicatés ou calcaires, cette dernière espèce étant très présente dans les sols chinois. Et encore les particules de silt (compris entre 2 µm et 0,06 mm) contribuant à la stabilité de la terre par sa friction interne, les argiles dont les particules ont une taille inférieure à 2 µm et enfin les colloïdes qui constituent une pâte collante enrobant les éléments sableux et les agrégeant.

L'étude des propriétés de la terre porte principalement sur quatre propriétés fondamentales où l'argile joue un rôle très important :

- la **granularité**, ou texture de la terre, quantité relative en cailloux, graviers, sables et particules fines ;
- la **plasticité**, ou aptitude de la terre à être modelée ;
- la **compressibilité**, ou potentialité de la terre de réduire au maximum sa porosité ;
- la **cohésion**, ou propriété des particules de la terre à rester associées.

L'origine des argiles provient de l'altération chimique des roches et plus précisément des minéraux silicatés. Les grosses molécules d'argiles, ou micelles, sont de fins cristaux de forme irrégulière ou hexagonale. Les micelles sont composées d'une structure feuilletée, attirées les unes aux autres grâce à une interaction électrique complexe. C'est la structure de ces centaines de feuillets, variant selon le type d'argile, les quantités d'eau adsorbé (interaction chimique) et absorbé (sans interaction chimique), leur épaisseur et leur écartement, qui déterminent les propriétés de l'argile (figure 6).

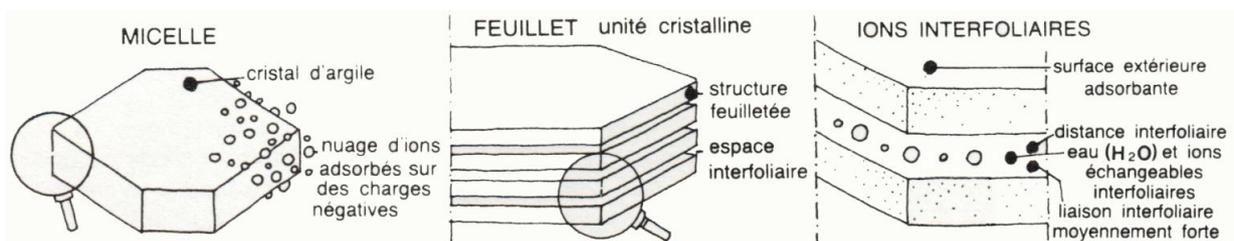


Figure 6 : Molécule d'argile, Structure feuilletée d'une micelle et interaction électrique, source [9]

Il existe de très nombreuses espèces d'argile, mais trois prédominent :

- La **Kaolinite**, stable au contact de l'eau, va déterminer la compressibilité de l'argile ainsi que sa cohésion. Elle est très présente en Chine. Une argile contenant beaucoup de Kaolinite présentera une couleur blanche. Les porcelaines de Chine, par exemple, sont fabriquées à partir d'une argile forte en Kaolinite.
- L'**Illite**, peu stable au contact de l'eau, ce qui crée des gonflements.
- La **Montmorillonite**, instable au contact de l'eau, ce qui génère de forts gonflements.

### Technique de construction des premiers pans de muraille

À cette époque, la principale technique utilisée était le pisé. Cette technique consiste à damer des couches successives de terre crue à l'intérieur d'un coffrage (figure 7). Il en résulte une superposition de couches visibles dans le motif du mur. La terre utilisée était généralement extraite dans l'environnement immédiat de la construction.



Figure 7 : Coffrage en rondin maintenu par les liens de paille torsadé pour le pisé, restauration d'un mur dans le désert de Gobi, source [8].

### Caractéristiques du pisé

Les propriétés du matériau terre fluctuent grandement en fonction de sa constitution, donc de sa zone d'extraction. Or, les murs en pisé érigés à cette époque en Chine, étaient distants de plusieurs milliers de kilomètres, il est donc impossible de caractériser de façon précise les différents murs datant de cette période. On retrouve malgré tout des valeurs caractéristiques dans la littérature [9] [10].

- **Résistance à la compression** : se mesure après 28 jours de séchage de 10 à 20 MPa si la terre n'a pas été mouillée, entre 0 et 5 MPa si elle l'a été ;
- **Résistance à la traction** : se mesure également après 28 jours de séchage, varie entre 0 et 5 MPa ;
- **Résistance à la flexion** : est d'environ 5 MPa ;
- **Résistance au cisaillement** : est d'environ 5 MPa ;
- **Capacité thermique massique** : est d'environ 850 à 980 J/kg.K ;
- **Conduction thermique** : de 0,8 à 0,9 W/m.K.

La construction des premières murailles s'est faite sans vraiment se soucier de leurs résistances. Les premiers pans de murs n'étaient pas réalisés pour avoir de fortes capacités défensives. Cependant, le pisé présente des propriétés de résistances étonnantes.

## 3 – Dynastie Qin (221-207 avant J.-C.)

### 3.1 - Rattachement des murailles du Nord

En 221 avant J.-C., l'État de Qin, première puissance militaire de la période de Royaumes Combattants unifie la Chine. Qin Shu Huang, seigneur de guerre, fonde alors la première dynastie impériale de la Chine et se proclame empereur ; il fera construire son célèbre mausolée de Lintong gardé d'une impressionnante armée de soldats, chars et chevaux en terre cuite.

La grande muraille de la dynastie Qin a été ordonnée par l'empereur afin de protéger la frontière nord du pays des invasions Xiongnu, tribu nomade, vivant dans l'actuelle Mongolie, constituée de redoutables cavaliers munis de puissants arcs.

L'empereur envoya 300 000 soldats au nord, sous le commandement du général Meng Tian, afin de repousser les invasions. Les territoires conquis ou défendus sont alors protégés par la construction de la première Grande Muraille qui raccorde entre eux les murs existants des trois états Qin, Zhao et Yan (figure 3b). La muraille ainsi constituée surnommée « la longue muraille de 10 000 li<sup>4</sup> » devait parcourir une longueur d'environ 5700 km.



Figure 8 : La grande Muraille sous la dynastie Qin, source [11]

### 3.2 - Les matériaux de construction : exploitation du terrain

Pour défendre les frontières, le général Meng Tian décida d'utiliser le terrain à son avantage. Afin de relier les pans de murs déjà existants, il profita des barrières naturelles comme les pics de montagnes et les fleuves, tel que le fleuve jaune, et fit construire des murailles qui traversèrent les montagnes et les déserts. Les constructions devaient être rapidement érigées et pour autant solides. Les matériaux locaux ont été exploités, la diversité des terrains a sans doute compliqué l'entreprise.

#### Terrains alluviaux

Les plaines et les terrains alluviaux reprenaient la technique de construction du pisé. Si le temps et les ressources existaient, des tours de guets en terre crue pouvaient être construites en complément des murailles.

<sup>4</sup> Le li est une unité de mesure chinoise dont la valeur fut variable au cours du temps et des régions. Actuellement on considère que 1 li = 500 m environ.

## Montagnes

Les montagnes sont très présentes à l'ouest de la Chine. Une terre argileuse permettant de construire en pisé se faisait rare alors que les pierres dans les terrains montagneux sont une ressource abondante. Dans un premier temps, les pierres étaient assemblées sans mortier, arrangées correctement, les murs pouvaient atteindre 6 m de haut. Par la suite, des mortiers à base de terre crue ont été utilisés afin d'éviter que la végétation n'envahisse les murailles. Trois grands types de pierres étaient utilisés :

- Le **granite** : naturellement abondant, il était beaucoup utilisé pour les constructions. Le granite appartient au groupe de roches magmatiques, issues de la cristallisation de différents matériaux provenant du magma terrestre dont le refroidissement lent en profondeur donne lieu à sa texture caractéristique présentant des cristaux visibles à l'œil nu (quasiment). Sa masse volumique varie entre 2 600 et 3 000 kg/m<sup>3</sup>, sa porosité entre 0,1 et 0,3%, sa résistance en compression entre 80 et 270 MPa, et sa résistance à la traction est d'environ 3 MPa.
- Le **calcaire** : se forme sur les continents par lente sédimentation des éléments microscopiques obtenus par précipitation, ou par le brusque dégazage d'une eau souterraine arrivant à l'air libre et formant des pierres de types calcaires. Le calcaire présente une résistance à la compression plus faible que le granite, environ 50 MPa. Sa masse volumique est d'environ 2 600 kg/m<sup>3</sup>.
- Le **grès** : est une roche sédimentaire, issue de l'agrégation de grains de sable. On mesure une résistance à la compression de 40 à 110 MPa. Sa masse volumique est d'environ 2600 kg/m<sup>3</sup>.

La masse volumique des murailles construites à partir de pierre est bien supérieure à celles construites en pisé, les sols devaient donc être stables afin d'éviter les glissements de terrain.



Figure 9 : Ruines de la Grande muraille de Qi dans les Monts Dafeng, source [12]

## Désert

Avec beaucoup de sable, et peu d'autres matériaux, construire dans les déserts est moins évident. La solution était d'utiliser le sable argileux du sol, le gravier, et les plantes désertiques tel que le tamarix aphylla (figure 10).

La technique basique de construction ressemble fortement au pisé. Un coffrage était réalisé (probablement avec du bois importé), une première couche de gravier et de sable argileux

étaient déposée puis comprimée. Une large épaisseur de végétaux morts (tamarix pourris) était alors installée puis comprimée, et les alternances de couches étaient répétées. Les végétaux morts servaient de liant, améliorant considérablement la résistance de l'ensemble de la structure. En utilisant cette combinaison de matériaux, les murs créés étaient particulièrement solides capables de résister dans le temps.



Figure 10 : Tamarix dans le désert de Gobi

## 4 - Dynastie Han (206 avant J.-C.-220 après J.-C.)

### 4.1 - Restauration de la muraille

En 210 avant J.-C., l'empereur Shi Huangdi meurt et la dynastie Qin s'éteindra peu après, non sans avoir cédé des territoires depuis cet événement (figure 11). En 202 avant J.-C., un ancien soldat se proclame empereur de la dynastie Han. L'entretien de la Grande Muraille des Qin est abandonné. La position défensive via l'utilisation de murs, adoptée lors de la précédente dynastie contre les Xiongnu franchissant la frontière, est abandonnée. Après une humiliante défaite en 200 avant J.-C., les Han achète la paix par des tributs et des « mariages d'alliance » de princesses chinoises avec les chefs des Xiongnu ; usage qui perdurera environ sept décennies.

Finalement, l'empereur Wudi décida d'attaquer les envahisseurs venus du nord. À partir de 130 avant J.-C. plusieurs expéditions furent lancées, les anciens murs des Qin furent restaurés et raccordés, puis étendus au fur et à mesure des conquêtes, prémices de la route de la soie. Repoussant les Xiongnu dans le désert de Gobi, la Grande Muraille a été prolongée dans cette région. Au cours de son long règne, l'Empereur Wudi fit édifier près de 1 000 kilomètres de murs, ainsi la Grande Muraille atteignait une longueur de plus de 6 000 km.



Figure 11 : Carte de la Chine à la fin de la dynastie Qin, source [11]

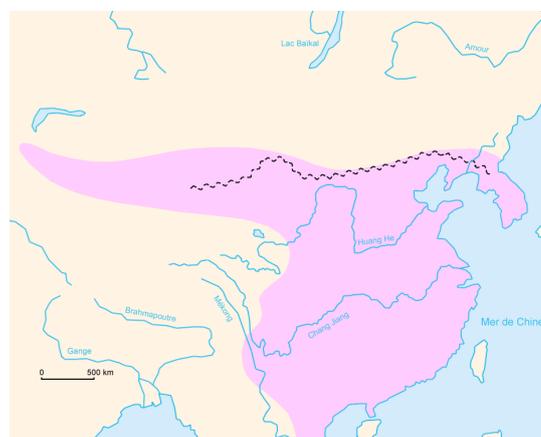


Figure 12 : Empire des Han occidentaux (206 av. J.-C.-25 ap. J.-C.), source [13]

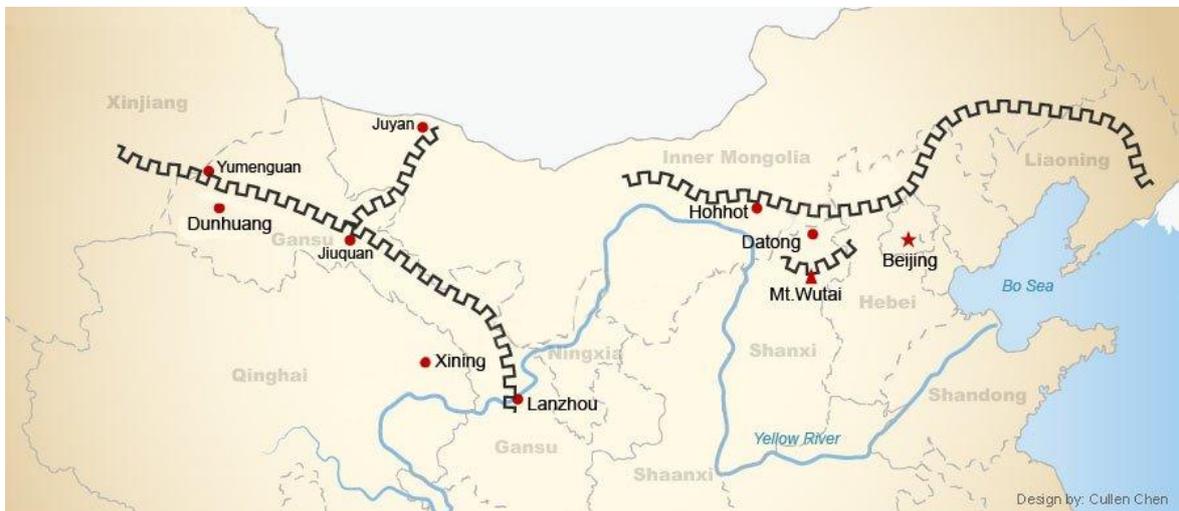


Figure 13 : La Grande Muraille sous la dynastie Han, source [11]

#### 4.2 - Nouveauté architecturale

La matière première dépendait de la nature du terrain traversé, cependant le tracé des murailles était réalisé afin de tirer profit des configurations stratégiques naturelles du terrain. La nouvelle muraille érigée dans le désert de Gobi se distingue par les matériaux utilisés et leur agencement. Du sable tamisé étaient extraits des graviers, les murs sont alors érigés par couches alternées et tassées de graviers, terre et végétaux (roseau, tamarix).



Figure 14 : (a) Empilement de graviers, terre et roseaux, (b) ruines de la Grande Muraille de la dynastie des Han à Dunhuang, source [14]

Des innovations ont lieu. En général, les premières constructions sont les tours de guet et les forts qui sont ensuite reliés avec des murs si nécessaire. Aux abords des murs, une tranchée était creusée puis comblée de sable, les traces laissées par les éventuels envahisseurs s'y lisaient. Si du bois était disponible, un champ de pieux acérés placé à proximité de la muraille gênaient les cavaliers ennemis lors des attaques frontales.

Une autre nouveauté architecturale résidait dans les tours de guets (figure 15). Placées en des points stratégiques et disposant de signaux codés, il était très rapide de prévenir des attaques Xiongnu. Les tours de guet étaient parfois placées très loin en territoire Xiongnu, régulièrement positionnées sur un axe perpendiculaire à la muraille, elles n'étaient pas reliées par des murs. Quelques soldats y étaient stationnés et envoyaient des messages codés aux troupes stationnées à la muraille, avec des systèmes de drapeaux et d'allumage de feux selon la luminosité. Ainsi les informations essentielles, comme le nombre d'ennemis, transitaient plus rapidement qu'avec un cavalier et directement au gouvernement central.



Figure 15 : Ruines d'une tour de guet datant de la dynastie Han à Dunhuang, source [15]

La Muraille érigée par la dynastie Han était non seulement défensive contre les invasions du nord mais aussi protégeait la route de la soie antique reliant l'Empire et les régions occidentales.

## 5 - Période de troubles pour la Grande Muraille (220-1368)

Au 1<sup>er</sup> siècle après J.-C., les Xiongnu se divisent. Un des deux groupes est enclin à cohabiter avec la Chine. Au déclin de la dynastie Han, même si l'Empire doit épisodiquement encore lutter contre les Xiongnu, il fait principalement face à une période de chaos, de rébellions et guerres civiles lorsque les différents états ont cherché à étendre leurs territoires.

### 5.1 - Les périodes des Six Dynasties (220-589)

À la fin de la dynastie Han, survient la période des Trois Royaumes (220-280). Les Royaumes du Shu, du Wu et du Wei (figure 16) se font continuellement la guerre, l'entretien des grandes murailles est abandonné. En 280, l'Empereur du Wei de la dynastie Jin occidentaux (265-316) après avoir conquis le royaume du Wu, réunit la Chine. À l'effondrement de la dynastie Jin occidentaux, sa continuité perdue par la dynastie Jin Orientaux (317-420) parvenue à prendre le pouvoir dans le sud alors qu'au nord commence la période des Seize Royaumes (317-439), période d'affrontements qui continuera durant l'époque des Dynasties du Nord et du Sud (420-589). Elle s'achève avec la dynastie Sui (581-618) qui entreprend la réunification de la Chine, qui sera accomplie sous la dynastie Tang, et de grands travaux dont la reconstruction et l'extension de la Grande Muraille.

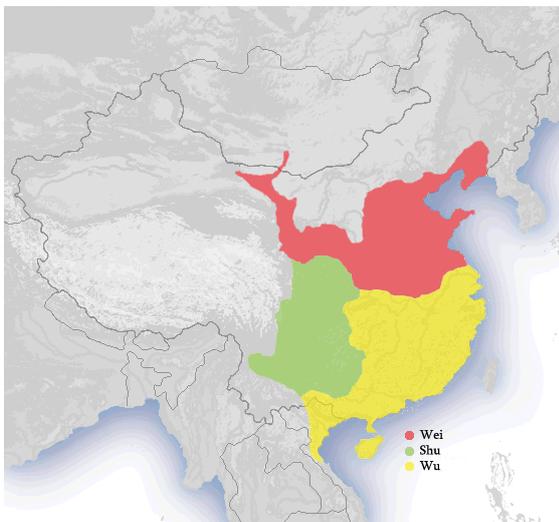


Figure 16 : Les Trois Royaumes en 262 ap. J.-C., source [16]



Figure 17 : Empire de la dynastie Sui, source [17]

## 5.2 - Dynastie Tang (618-907)

La dynastie Tang permit la stabilisation de l'Empire fraîchement réunifié, les conquêtes extérieures reprirent. En 755 la dynastie bascula après un soulèvement réprimé, elle s'achèvera en 907, l'Empire en pièces. Durant cette période de paix entre les tribus du Nord et du Sud, peu de murailles seront construites, seuls les murs préexistants au nord seront restaurés si besoin. La dynastie Tang était une grande puissance militaire, suffisante pour protéger ses frontières des tribus nomades du nord et sa politique était plus offensive que défensive, les murs supplémentaires n'étaient pas nécessaires.

## 5.3 - Dynasties Liao et Song (960-1279)

À la chute de la Dynastie Tang, la période des Cinq Dynasties et des Dix Royaumes (907-979) marque une époque de désordres politiques. Dans le nord, cinq Dynasties vont se succéder alors qu'au sud, une dizaine d'états indépendants sont fondés.

La dynastie Liao (907-1125) règne sur l'Empire Khitan situé dans le nord de la Chine actuelle et les steppes mongoles. Le premier Empereur Taizu adopte une posture défensive et ordonne la construction de murs le long de la frontière avec le Royaume de Bohai (ou Balhae) afin de bloquer ses velléités d'extension ; ces murs étaient en terre tassée mélangée d'une faible quantité de graviers. Les attaques des tribus nomades au nord du pays reprenant après des décennies de paix, les Empereurs Shengzong (972-1031) et Xingzong (1016-1055) entreprennent la construction de murailles, 735 km seront ainsi érigés. Ce sont de simples murs de faible hauteur (1 à 2 m) constitués de la terre de la tranchée située à l'extérieur (figure 19). Les tranchées d'environ 2 m de large et de 1 à 2 m de profondeur suivies du mur, devaient barrer l'invasion des cavaleries. Environ 70 forts sont répartis le long du mur pour abriter les troupes.



Figure 18 : Empire Khitans et tribus voisines en 900, source [18]

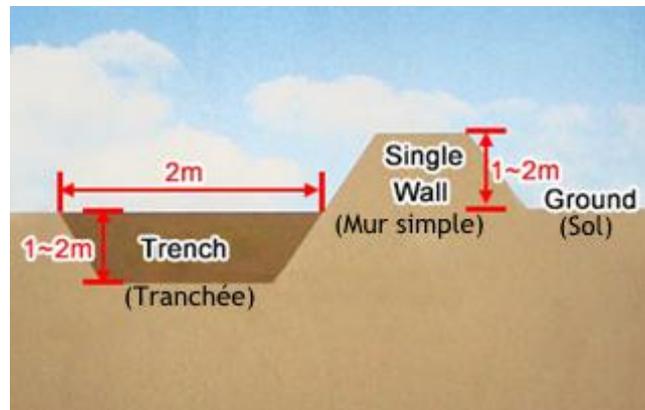


Figure 19 : Structure des murailles de la dynastie Liao, source [7]

Les relations entre les dynasties Liao et Song sont en premier lieu pacifiques, puis les relations se détériorent à partir de 976 pour aboutir à un traité en 1005 où les Song sont amenés à verser des tributs au Liao. Les tribus mandchous Jürchens de la dynastie Jin mettent fin à l'Empire Khitan en 1125.

La dynastie Song (960-1279) s'étend sur deux périodes : celle des Song du Nord (960-1127) où l'Empire règne sur une grande partie de la Chine (figure 20) et celle des Song du Sud (1127-1279). La grande Muraille a continué à contenir les envahisseurs venus du nord jusqu'à l'intrusion de la dynastie Jin en 1127. La dynastie Song du Sud n'a pas édifié de murs sur son territoire. Malgré l'usage nouveau de la poudre à canon la dynastie Song sera vaincue et l'Empire Mongole prendra possession de la Chine en 1279 fondant la dynastie Yuan.



Figure 20 : L'Empire Song en 1111, source [19]

### 5.4 - Dynastie Yuan (1271-1368)

La dynastie Yuan est la première dynastie aux origines non chinoises à contrôler la Chine à nouveau unifiée. La Grande Muraille avait su préserver la Chinois des invasions durant plus de 1500 ans. La dynastie Yuan d'origine Mongole ne construisit que très peu de sections de mur.

## 6 - Dynastie Ming (1368-1644)

La plus grande partie de la Grande Muraille restante a été construite sous la dynastie Ming et est connue sous le nom de Grande Muraille de Ming. Principalement érigée au XVI<sup>e</sup> siècle, elle atteindra alors sa longueur maximale de 8 850 km en incluant les barrières naturelles (6 260 km de murs, 360 km de tranchées, 2 230 km de barrières naturelles montagnes ou rivières).

### 6.1 - La nécessité d'une muraille ultra-défensive

Sous le commandement du chef rebelle chinois Zhu Yuanzhang, qui deviendra le premier Empereur de la dynastie Ming, la dynastie des Yuan s'est effondrée. Repoussant les mongoles défaits au nord, la frontière était souvent harcelée. De grands projets de construction ont été mis en œuvre, la Chine a prospéré pendant la dynastie Ming et sa puissance militaire a augmenté. La Grande Muraille a été systématiquement restaurée, étendue, doublée, agrandie pour empêcher toute nouvelle invasion des tribus du nord.



Figure 21 : Carte de la Chine sous la dynastie Ming, source [11]

La puissance offensive de leurs adversaires était telle que la dynastie Ming n'a eu d'autre choix que de se défendre avec le plus grand mur possible. C'est donc un rôle défensif que l'on attribue à la Muraille à cette époque qui en plus d'être prolongée, a été complétée : agrandissement des murs existants, doublement de certaines portions, et constructions de tours de défense, chemins de ronde,...

La construction de la Muraille n'a jamais cessé durant le règne de la dynastie de Ming. Le mur a été divisé en neuf districts frontaliers afin d'établir neuf garnisons (drapeaux rouges, figure 22) chargées de la rénovation et de la gestion efficace du mur. Par la suite, deux garnisons supplémentaires ont été positionnées près de Pékin et presque 100 000 officiers et soldats étaient stationnés dans ces onze garnisons.

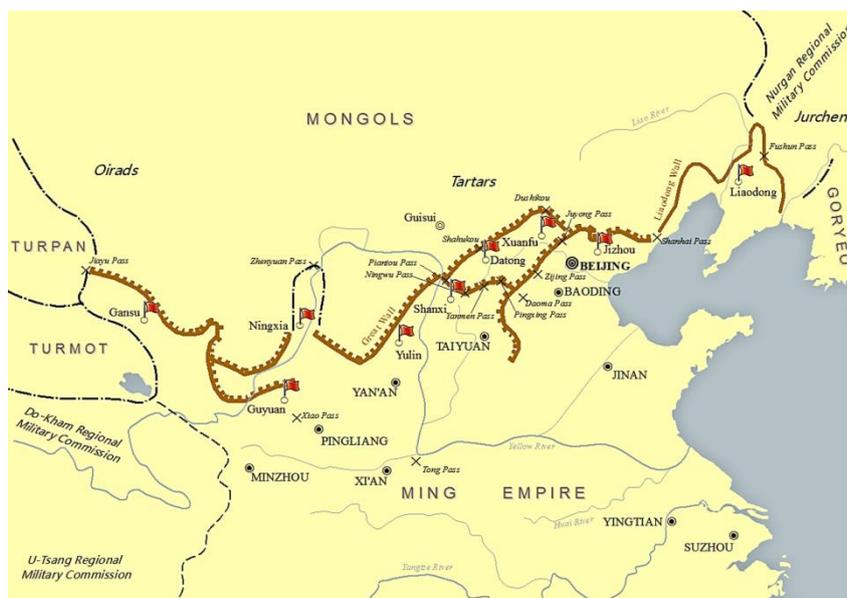


Figure 22 : La muraille et les neuf garnisons sous la dynastie Ming, source [20]

## 6.2 - Une toute nouvelle architecture

La muraille de la dynastie Ming construite en une centaine d'années, est la muraille la plus récente et aussi la plus connue. Les hauts murs construits en briques et en pierres suivaient généralement les lignes de crêtes des reliefs traversés. Tours et arsenaux étaient régulièrement aménagés. Une grande portion de la muraille des Ming est encore en bon état aujourd'hui, elle a largement inspiré des films tel que « La Grande Muraille » de Zhang Yimou en 2016, ou des jeux-vidéos comme Tomb Raider.



Figure 23 : La Grande Muraille de Chine sur le site de Mutianyu juillet 2006, source [21]

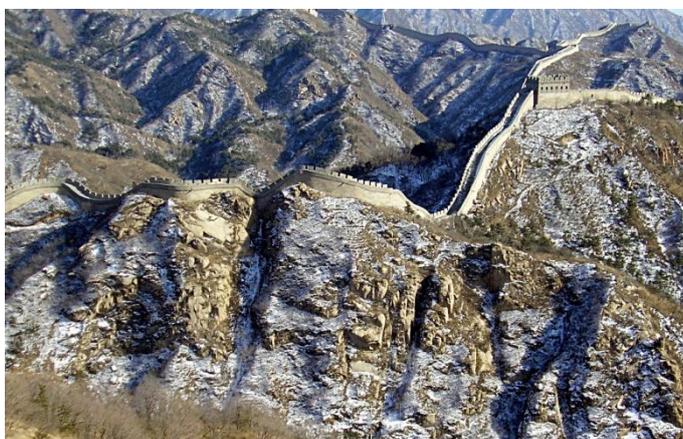


Figure 24 : La Grande Muraille l'hiver près de Pékin, source [22]

## Le chemin de ronde

La muraille est principalement constituée d'un chemin de ronde à créneaux pouvant faire 9 m de large, et en moyenne 5 à 6 m. S'adaptant au relief, son tracé suit la ligne de crête dans les zones montagneuses, la muraille est haute de 7 à 8 mètres. La largeur de circulation est suffisante pour le passage à cinq cavaliers de front ; ainsi la muraille n'est plus seulement un rempart elle est aussi une route permettant un déplacement rapide des soldats.

Les sols dallés de briques comportaient des portions avec escaliers (figure 25), sous le chemin de ronde, l'épaisseur étaient comblée d'un mélange de terre et de gravier, le soubassement était réalisé avec des pierres et du sable. Des gargouilles, taillées dans des pierres, permettaient le drainage de l'eau qui, évacuée vers l'extérieur, glissait au sol sur des pierres l'empêchant de saper les fondations. Pour protéger les gardes qui patrouillaient sur des portions de muraille sans tours, des portions de murs perpendiculaires ont été fabriqués (figure 26). Coté intérieur de la Muraille, des portes et des escaliers permettaient d'y accéder (figure 28).



Figure 25 : Portion de chemin de ronde avec escaliers, source [2]



Figure 26 : Murs de protection sur le chemin de ronde, source [2]

Des parapets surmontaient des parties clefs du mur, et certaines portions comportaient des créneaux des deux côtés (figure 23) ou seulement coté extérieur (figure 25). Les parapets pouvaient mesurer 1,8 m de haut avec des créneaux pour tirer des flèches et de larges trous tous les 3 ou 4 m (figure 27) pour lancer des bombes remplies de poudre à canon, qui explosaient au contact du sol.



Figure 27 : Créneaux et trous de boulets, source [2]

## Tours

Les tours avaient trois rôles : défensif, abris pour les soldats et stockage d'armes et de nourriture ; au début du XVII<sup>e</sup> siècle 750 000 soldats gardaient la Grande Muraille (soit 150 hommes au kilomètre !). Les tours pouvaient être hautes de plus de 15 m, réparties tous les

100 m en moyenne (un arc pouvait envoyer une flèche à environ 50 m). Les tours construites sous la dynastie Ming font partie intégrante de la muraille, elles sont dans l'alignement de la muraille dans la région de Pékin (figure 28) ou excentrée dans la région du Shanxi (figure 29).

Les tours de guet comportaient deux zones : en partie basse le stockage et le stationnement des soldats, la partie haute et son parapet en créneaux accessible par des échelles permettait de guetter les éventuels attaquants et de se défendre par tirs de canons ou de flèches. Un petit abri pouvait être érigé en partie supérieure (figure 28). Si des envahisseurs parvenaient sur le chemin de ronde, l'entrée dans les tours ne pouvait se faire qu'un par un, ainsi les soldats chinois qui y étaient réfugiés pouvaient se défendre plus aisément.

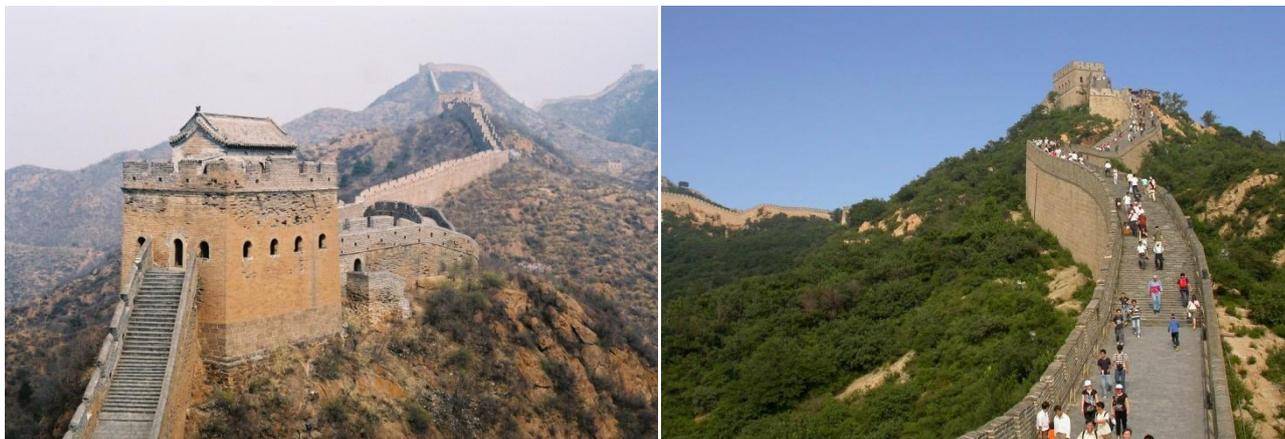


Figure 28 : Tours à Jinshanling et Badaling, sources [23] et [24]

Les tours de flanc excentrées du mur en direction des ennemis, sont de section carrée avec ou sans abri sur sa partie supérieure. Des rampes côté intérieur permettaient l'accès à des chariots. Les mêmes fonctions sont assurées par cette tour, son intérêt est de permettre de continuer à défendre la position même si des attaquants escaladaient la muraille, le tir parallèle à la ligne de défense reste possible. A contrario, depuis cette tour, le chemin de ronde a une visibilité moindre.



Figure 29 : Tour de flanc, source [2]

### Les passes

Implantées à proximité des centres importants, les passes permettaient la circulation surveillée des populations. Ces structures sont une innovation de la période Ming, cependant elles représentaient une faiblesse dans la muraille aussi la surveillance en était-elle renforcée : hauts et épais murs sur plusieurs lignes, double porte en bois massif, surveillance par d'imposantes tours.



Figure 30 : Passe de Jiayuguan, partie occidentale de la Grande Muraille, source [25]

### 6.3 - Matériaux de construction

Quelques portions de murs en zone montagneuses, où la pierre était largement disponible, ont été érigées en pierres taillées et mortier. Cependant la pierre taillée, en particulier en granite, était principalement utilisée pour construire les fondations des murs afin de garantir la stabilité, et les rebords des parapets (figures 25 et 27). La grande Muraille sous la dynastie Ming a en effet principalement été érigée en brique et mortier.

#### La brique

La construction en briques crues, aussi appelées adobes, est l'une des plus anciennes techniques de construction (voir introduction de la partie 1). Des moules en bois sont remplis d'un mélange d'argile, d'eau et de débris végétaux. Démoulée la brique est alors séchée au soleil pendant environ 15 jours. La brique crue se dégrade vite, un enduit pisé ne la protège pas d'une pluie abondante. La cuisson des briques résout ce problème.

Cuire une brique consiste à vitrifier la matière, il faut donc la chauffer à une température comprise entre 900 et 1 150 °C pendant huit à quinze heures selon le type d'argile utilisé. Les briques sont ensuite refroidies lentement, afin d'éviter les fissures. Des briques insuffisamment cuites seront trop tendres et risqueront de s'effriter, et si la température est trop élevée, l'argile se déforme et donne une matière vitreuse.

La brique constituant la Grande Muraille est de grandes dimensions, environ quatre fois plus grosse que la brique moderne, elle pesait 10,5 kg et mesurait approximativement 37 cm x 15 cm x 9 cm. Sa taille permet une construction plus rapide. Les briques étaient façonnées à partir de terre siliceuse et d'eau, mises en forme dans des moules en bois et séchées au soleil (figure 31) ; les briques se rétractent durant le processus de séchage. Elles étaient ensuite installées dans des fours à bois durant trois jours et trois nuits pour leur cuisson et leur refroidissement. Des fours de la période Ming permettant de cuire les briques ont été retrouvés, témoignant ainsi de la technique de l'industrialisation de la production (figure 32).



Figure 31 : Moulage, séchage et mise au four de briques, source [2]

Le matériau doit aussi contenir du sable ou d'autres matières pour maintenir la cohésion. Le pourcentage d'argile pure en déterminera les propriétés mécaniques.



Figure 32 : Four de l'époque Ming dans la province du Hebei, source [2]

### Caractéristiques de la brique cuite

On peut associer des caractéristiques mécaniques à ces briques cuites, qui dépendront très largement de la composition et du type d'argile utilisé dans les briques [30] :

- **Résistance à la compression** : dans la littérature, on trouve une résistance à la compression comprise entre 10 et 20 MPa ;
- **Dilatation thermique** : est de 0,005 mm/m.°C, soit la moitié de celle du béton ;
- **Gonflement à l'humidité** : (déformation générée par la rétention d'eau) est inférieur à 0,1 mm/m ;
- **Retrait au durcissement** : inexistant.

Les tronçons en briques de la dynastie Ming sont donc très stables. Le pavement des remparts était constitué de quatre à six couches de briques. Plus de 3,8 milliards de briques ont été fabriquées pour les besoins du mur.

### Appareillage du mur

Les murs constituant la muraille de Chine sont montés en panneresse, c'est-à-dire que le côté de la brique le plus long est visible, contrairement au montage en boutisse. Les angles sont en besaces, en effet les éléments en panneresse dans un pan sont en boutisse dans l'autre.

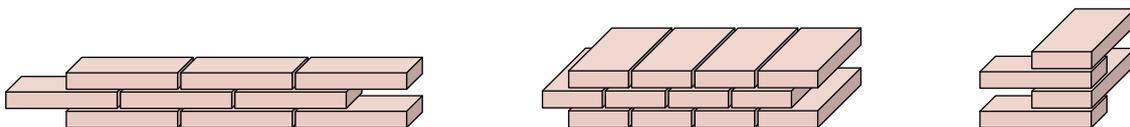


Figure 33 : Appareillage en panneresse, en boutisse et angle en besace

### Mortier au riz gluant

Le mortier lie les pierres ou les briques les unes aux autres, il assure la cohésion et la répartition des charges. Les mortiers à base de chaux et de sable sont utilisés en Chine depuis fort longtemps, certainement depuis le X<sup>e</sup> siècle avant J.-C., souvent pour la construction de tombeaux [27]. La composition des mortiers varie selon les régions et les époques ; le riz gluant est entré dans l'élaboration du mortier de la Grande Muraille lui conférant des qualités qui expliquent sa bonne conservation au regard de son âge.

Des équipes de recherche se sont penchées sur la tenue et la blancheur du mortier de la Grande Muraille. Des prélèvements de mortier ont été faits sur une portion de la muraille datant de 1372, située à Jia Yuguan, dans la province du Gansu. La méthode de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier<sup>5</sup> et la diffraction à rayon-X [24] ont pu mettre en évidence la présence d'amylopectine et d'amylose dans le mortier, composants principaux de l'amidon du riz.



Figure 34 : Mortier de la muraille

### Composition du mortier

Des tests ont permis de déterminer sa composition :

Chaux CaO	Silice SiO <sub>2</sub>	Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxyde de magnésium MgO	Dioxyde de souffre SO <sub>2</sub>	Dioxyde de titane TiO <sub>2</sub>	Oxyde ferrique Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
83,23 %	8,07 %	5,52 %	0,00 %	1,34 %	0,10 %	1,44 %

Figure 35 : Composition du mortier de la muraille située à Jia Yuguan

Des résultats similaires ont été trouvés sur d'autres parties de la muraille [28]. Le mortier était composé d'environ 3% de son poids en riz gluant [26].

En comparaison, la composition chimique moyenne d'un clinker de type Portland obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile est :

Chaux CaO	Silice SiO <sub>2</sub>	Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxyde ferrique Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
68 %	23 %	7 %	2 %

Figure 36 : Composition chimique clinker type Portland

### Caractéristiques du mortier au riz gluant

Des équipes de recherche chinoises ont reproduit un mortier au riz gluant avec la même composition. Ils ont ensuite pu faire différents tests sur celui-ci afin de déterminer ses propriétés [26].

Addition de riz	Absorption de l'eau	Résistance à la compression à 28 jours [MPa]
Sans	41 %	2,26
1 %	63 %	9,50
3 %	58 %	9,73
5 %	51 %	9,77

Figure 37 : Résistance à la compression à 28 jours du mortier en fonction de la proportion de riz gluant

<sup>5</sup> IRTF ou FTIR pour Fourier Transform InfraRed spectroscopy

La résistance du mortier au riz gluant est bien plus élevée que celle du mortier sans ajout organique. À noter que le mortier sans riz a une composition bien différente des mortiers actuels. En France, les mortiers normalisés ont une résistance à la compression comprise entre 32,5 et 52,5 MPa. Un mortier moderne réalisé sans précaution aura une résistance en compression comprise entre 10 et 45 MPa suivant le pourcentage et le type de ciment utilisés.

Le mortier au riz gluant présente une microstructure homogène et très dense (figure 38). Ce qui est très différent des mortiers classiques qui ont une structure moins dense, et donc un plus fort passage d'air qui jouera un rôle important pour la carbonatation<sup>6</sup>. On peut comparer les vues microscopiques d'un ciment non organique et organique (figure 39a et 39b).

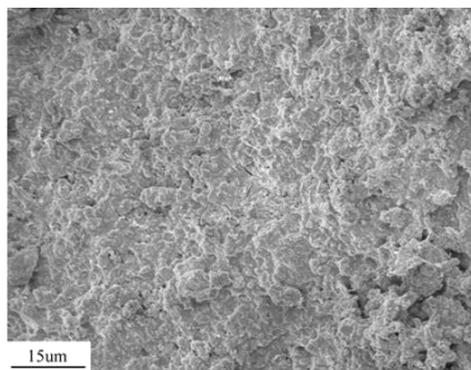


Figure 38 : Vue microscopique du mortier au riz gluant, source [29]

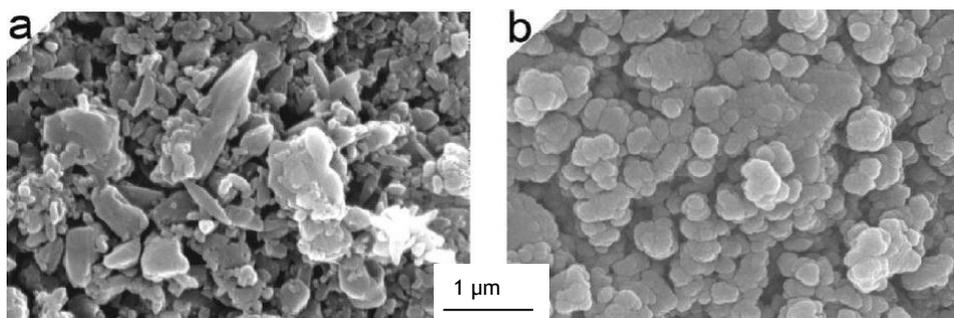


Figure 39 : (a) Mortier non organique, (b) mortier au riz gluant, source [28]

Il semble que le fait de rajouter du riz permette d'augmenter la formation de calcite<sup>7</sup>. En effet, les molécules d'amidon permettent de limiter la croissance des cristaux de portlandite, et ainsi permettent à la calcite de mieux s'étendre et de limiter la carbonatation.

## 7 – Conclusion

Les équipes de recherche qualifient l'ajout d'élément organique à un élément minéral comme l'une des grandes innovations de l'époque. Les recherches actuelles sur les mélanges organique/minéral en matière de matériaux de construction ne sont donc pas une nouveauté !

L'utilisation première des mélanges minéral/organique dans la construction pourrait être pour la restauration des maçonneries anciennes, parfaitement adaptés moins agressifs que des matériaux à base cimentaire. Les restaurations reprenant les compositions des matériaux d'origine se développent actuellement. Par exemple, la restauration de la basilique Sainte Sophie d'Istanbul

<sup>6</sup> La carbonatation de la pâte de ciment est un phénomène qui dégrade les bétons armés et est notamment responsable de la corrosion des armatures en abaissant le pH de la solution interstitielle.

<sup>7</sup> La calcite permet de colmater, immédiatement après formation du ciment, les pores dus au retrait de l'eau.

dans les années 1950 par une épaisse couche de ciment à prise rapide dans le but renforcer les murs, a eu l'effet contraire : trop rigide il n'a pas absorbé les mouvements de la structure et est devenu cassant, le ciment est tombé entraînant des briques de la maçonnerie. Cette intervention qui a aggravé la situation du monument a été éliminée. Les briques d'origine, parfaitement conservées, ont été réinstallées et le ciment a été remplacé par un mortier de composition identique à celui d'origine du VI<sup>e</sup> siècle. Celui-ci après analyses, s'est révélé être composé, comme beaucoup de mortiers anciens, de chaux et d'eau mais aussi de fragments de briques qui sont l'élément clef de sa résistance. La brique crée des liens chimiques particuliers avec la chaux car elle contient des cendres volcaniques et du carbonate de calcium, éléments qui génèrent des liaisons à la fois fortes et durables avec le mélange classique du mortier. Cette réaction chimique en fait un mortier que l'on appelle pouzzolanique du nom d'une roche volcanique de la région de Pouzzoles (Italie) [30]. Elle se rapproche du caementum romain.

Aujourd'hui, des mélanges minéral/organique commencent à être employés de différentes manières dans le milieu du bâtiment. Que ce soit l'amidon de riz ou d'autres végétaux comme le maïs, les matériaux organiques servent par exemple pour la fabrication de bioplastique ou encore de colle. L'amidon pourrait ainsi être utilisé comme liant pour la réalisation de panneaux de fibres de bois pour l'isolation. Ces panneaux permettraient de valoriser des résidus de bois liés par une colle d'amidon, et ainsi obtenir un matériau complètement végétal et donc renouvelable.

De nouveaux matériaux durables s'inscriraient dans une démarche d'écoconception sous réserve de présenter un intérêt à être développé [31] :

- En premier lieu, l'impact environnemental d'un nouveau matériau éco-conçu se doit d'être moins élevé que l'impact des matériaux existants devant être remplacés ou améliorés.

Le ciment, liant actuel des bétons, est utilisé pour ses propriétés mécaniques. Cependant c'est un matériau dont la ressource première, la chaux, est d'origine fossile donc épuisable, et dont la production nécessite beaucoup d'énergie et est polluante en émission de Gaz à Effets de Serre (GES) puisque le ciment est obtenu par cuisson et donc décarbonatation du calcaire. L'impact environnemental du béton est donc important.

L'amidon est issu des produits et sous-produits céréaliers ; sa culture et son extraction nécessitent moins d'énergie que pour le ciment, mais occuperait des terres et il ne faudrait pas impacter leur rôle premier de produire de la nourriture. Un liant à base d'amidon utilisé pour du béton destiné à des applications particulières, pourrait présenter un impact environnemental moindre, sous condition de répondre aux conditions d'emploi et de durabilité.

- En second lieu, un nouveau matériau éco-conçu se doit d'avoir des propriétés mécaniques et/ou thermiques équivalentes (ou meilleures !) que celles des matériaux existants devant être remplacés ou améliorés. Hors des applications spécifiques, un béton éco-conçu qui n'aurait pas de réelles qualités thermiques ne pourraient pas présenter une résistance à la compression moindre.
- Enfin un nouveau matériau éco-conçu se doit de répondre au critère de durabilité. D'après les recherches effectuées sur les monuments de Chine comportant du mortier au riz gluant, la plupart sont encore debout. Malgré les nombreux séismes de cette région du monde dont certains de fortes amplitudes, ces bâtiments présentent une bonne résistance grâce en particulier à la durabilité du mortier au riz gluant.

L'étude des techniques de constructions de la Grande Muraille de Chine a permis de mettre en lumière un éco-matériau découvert il y a des milliers d'années et capable de concurrencer des matériaux classiques dans certains domaine de la construction. Il devrait donc être intéressant de

se pencher sur la possibilité d'utiliser des bétons à liant amidon dans le domaine de la construction moderne.

## Références :

[1]: <http://whc.unesco.org/fr/list/438/>

[2]: L'histoire cachée de la Grande Muraille de Chine, Arte, 64 minutes, <https://www.youtube.com/watch?v=2u8MDue3HFQ>

[3]: fuzheado – Flickr: IMG\_6940, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13978529>

[4]: Yug – Travail personnel, With some data from: Le Monde Chinois, Gernet, p58., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15564717>

[5]: Chinese\_plain\_5c.\_BC-fr.svg: Yugderivative work: Zunkir (talk) – Ce fichier est dérivé de : Chinese plain 5c. BC-fr.svg:, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18466318>

[6]: <http://www.chinevoyage.com>

[7]: <https://www.travelchinaguide.com>

[8]: Chine, la Grande Muraille, Arte 48 minutes, <https://www.youtube.com/watch?v=jBrIWSgHJyo>

[9]: Traité de construction en terre, Hubert Guillaud, Hugo Houben, Editions Parenthèses

[10]: <http://www.nunc.fr/pise.html>

[11]: <https://www.chinahighlights.com>

[12]: Rolfmueller – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4388026>

[13]: Like tears in rain – Own work (using Image:AsiaBlank.png and the book Daniel Schwartz and Luo Zhewen ; «The Great Wall of China», Thames and Hudson, London, 1990), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2041040>

[14]: Bairuiling - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34811375>

[15]: The Real Bear [CC BY 2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>)], via Wikimedia

[16]: Ismoon (talk) 21:35, 19 November 2013 (UTC)derivative work:Saam Gwok 262 CE.png (talk) 20:41, 19 November 2013 (UTC) – retouché d'après Saam Gwok 262 CE.png, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29728273>

[17]: Ian Kiu – Travail personnel, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3082893>

[18]: Flappiefh – Original map by Talessman. Raster map from Natural Earth., CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29217952>

- [19] : Derivative work: Augusta 89 – China 11a.jpg: User:LiDaobingChina - Song Dynasty - cs.svg: User:Mozzan, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26776357>
- [20]: SY - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63531605>
- [21] : Nicolas Perrault III – Travail personnel, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11726877>
- [22] : Andreas Tille - This image is the original work of Andreas Tille. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=76859>
- [23]: Georgio – Photographie personnelle, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1997932>
- [24]: Snowyowls, [user:snowyowls/gallery](https://commons.wikimedia.org/wiki/user:snowyowls/gallery)
- [25]: Sigismund von Dobschütz – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7925396>
- [26]: Tests and Analysis of the Compressive Performance of an Integrated Masonry Structure of a Brick-Stem-Insulating Layer, Suizi Jia, Yan Liu, Wan-lin Cao, Zhongyi Zhou and Yuchen Zhang 4, 2016
- [27]: Traditional mortar represented by sticky rice lime mortar, One of the great inventions in ancient China, YANG FuWei, ZHANG BingJian†, PAN ChangChu & ZENG YuYao, 2009
- [28]: Material characteristics of ancient Chinese lime binder and experimental reproductions with organic admixtures, Peng Zhao, Marie D. Jackson, Yun-sheng Zhang, Guangyan Li, Paulo J.M. Monteiro, Lin Yang, 2015
- [29]: Properties, characterization, and decay of sticky rice-lime mortars from the Wugang Ming dynasty city wall (China), Ya Xiaoa, Xuan Fu, Haibing Gu, Feng Gao, Shaojun Liu, 2014
- [30]: <https://gloria.tv/video/3cqa7bX9GHci1cdpfemiVvs2p>
- [31]: Vers un béton à liant d'amidon, Constance Meurice, [https://seminairematériaux.files.wordpress.com/2014/01/bibliographie\\_constance-meurice.pdf](https://seminairematériaux.files.wordpress.com/2014/01/bibliographie_constance-meurice.pdf)