

CULTURE SISMIQUE LOCALE EN CRÈTE (GRÈCE) À L'ÂGE DU BRONZE

Georgia Poursoulis

Société DIA-gnosis, Chef de projet du pôle risques des Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, 9 rue des Frères Aviateurs Chotard - 30100 Alès, tel: (0030) 4 66 52 44 81, mobile 06 89 05 07 16, e-mail georgia.poursoulis@orange.fr

Mots-clés: Sismicité, Âge du Bronze, architecture de terre crue, construction sismo-résistante, Crète

Résumé: La Crète se situe géographiquement au droit de la zone de subduction de l'Arc Egéen, lieu où sont générés les séismes superficiels et intermédiaires. De ce fait, la tectonique a joué et joue encore un grand rôle dans le développement géologique de l'île et ce à plusieurs titres.

La sensibilité sismique de la Crète se marque aussi bien au niveau régional, du fait des séismes de chevauchements liés à l'enfoncement de la croûte continentale amincie le long du plan de Bénéioff, mais aussi au niveau local, par le jeu des innombrables failles qui découpent en damier les massifs montagneux de l'île. La sismicité de la Crète reste cependant majoritairement de nature locale, modérée et fortement récurrente (G. Poursoulis, 1999, 2000a, b).

Ces caractéristiques de la sismicité crétoise font que les Minoens à l'Âge du Bronze ont été en mesure de concevoir, améliorer et transmettre des techniques de construction à valeur sismo-résistante. On peut donc parler de culture sismique locale, selon les principes mis en évidence par les travaux menés au sein du CUEBC de Ravello depuis les années 80 (F. Ferrigni, 1989).

L'architecture Minoenne est une architecture mixte en maçonnerie de pierres et de briques de terre crue, complexe et sophistiquée, mise en œuvre selon des techniques de construction sismo-résistantes réfléchies et améliorées au fil du temps, s'appliquant à l'ensemble de l'édifice.

INTRODUCTION

La notion de "culture sismique locale" a été mise en évidence au début des années 80 par les travaux du Centre Universitaire pour les Biens Culturels (CUEBC) à Ravello en Italie. Ces travaux, réunissant de nombreux experts européens (F. Ferrigni, P.

Touliatos, P. De Maisonneuve, B. Helly, entre autres), ont permis de mettre en évidence un certain nombre de faits, relatifs à la connaissance du risque sismique par les sociétés anciennes ou traditionnelles. Ainsi, ces sociétés, confrontées à une sismicité récurrente, avec une période de retour entre les séismes de l'ordre de la génération humaine, ont été capables de prendre en compte ce risque dans la conception architecturale de leur habitat. Elles ont ainsi pu mettre au point par l'expérience un certain nombre de techniques de construction à valeur sismo-résistante et surtout elle les ont transmises aux générations suivantes ce qui a permis la persistance de la «culture sismique locale» ainsi développée. Cette capacité à transmettre la mémoire des événements naturels subis et surtout la raison de l'usage de certaines techniques constructives particulières est entièrement liée à la périodicité du séisme.

- En effet, un séisme survenant tous les trente ans, soit une génération humaine, laisse aux populations le temps nécessaire pour effectuer correctement les réparations, concevoir de nouvelles techniques de construction améliorant la résistance du bâti, expérimenter ces nouvelles techniques en les appliquant aux constructions nouvelles, enfin transmettre les connaissances accumulées à la génération suivante. Dans ces conditions, on peut supposer l'existence d'une culture sismique locale et en rechercher les traces.
- Un séisme survenant de manière trop rapprochée, avec une période de retour inférieure à la génération humaine ne laissera pas aux populations concernées suffisamment de temps pour effectuer correctement les réparations nécessaires. Le bâti en sera donc fragilisé car il ne sera pas correctement entretenu, ce qui augmentera d'autant l'intensité du séisme suivant. Le temps manquera également pour la réflexion et la mise en œuvre de nouvelles techniques de construction résistantes. Sans techniques, pas de savoir à transmettre et donc pas de «culture sismique locale».
- Le dernier cas de figure concerne les séismes dont la période de retour dépasse largement la génération humaine. Dans ce cas, le temps nécessaire aux réparations correctes est suffisant, on peut également concevoir et mettre en œuvre des techniques de construction résistantes, mais celles-ci ne perdureront pas au-delà d'une génération après leur expérimentation, car le souvenir du séisme et la transmission de cette mémoire du risque ne se fait pas de la deuxième à la troisième génération après l'événement. Dans ce cas également, il n'y aura donc pas de «culture sismique locale».

Ce que l'on peut déduire de cette constatation, c'est qu'il faut une situation sismique bien particulière, permettant la mise en place des techniques de constructions résistantes et leur transmission pour pouvoir parler de culture sismique locale. La question qui se pose maintenant est de savoir si la société minoenne, à l'époque du Bronze (3250-1050 BC), était capable de concevoir une telle culture sismique.

1. LE CONTEXTE SISMO-TECTONIQUE DE LA CRÈTE

Afin de répondre à cette question, nous allons dans un premier temps examiner rapidement le contexte sismo-tectonique de la Crète car, comme nous l'avons vu ci-dessus, beaucoup de choses dépendent de ce contexte.

1.1. La situation sismique de la Crète

La Crète se situe géographiquement au droit de la zone de subduction de l'arc Egéen (Fig. 1), à l'endroit où naissent les séismes superficiels et intermédiaires, au moment de la résorption, le long du plan de Benioff, de ce qui, à cet endroit de la mer Egée,

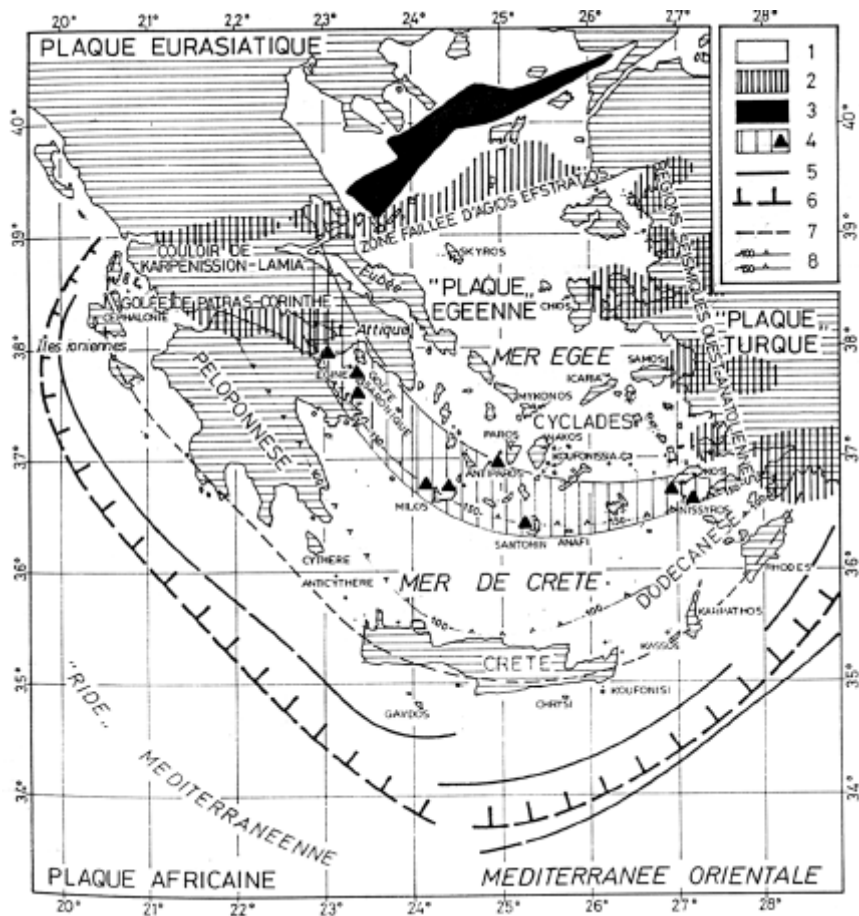


Figure 1. Zone de subduction de l'arc Egéen (J. Angelier, 1977).



Figure 2. Carte des foyers sismiques et des failles, superposée à la carte des sites archéologiques toutes époques confondues (G. Poursoulis, 1999, 2006).

est une croûte continentale amincie et non une croûte océanique (Mercier *et al.*, 1976). Cette situation rend la Crète sensible aux effets de la tectonique à plusieurs niveaux. D'une part, ce processus de la subduction produit des séismes de chevauchement, de portée régionale. D'autre part, la tectonique est responsable de la formation du relief qui en Crète occupe la plus grande surface de l'île. Ces reliefs sont d'ailleurs recoupés par un réseau très dense de failles multidirectionnelles qui les découpent en damier et dont le jeu est responsable des séismes de portée locale (Fig. 2), les plus nombreux à se manifester sur cette île, comme on le verra plus loin. Enfin la tectonique, par le double mouvement de bascule Sud-Nord et Ouest-Est, qu'elle fait subir à la Crète est responsable, de la surrection des côtes sud et ouest et parallèlement, de l'enfoncement des côtes nord et est.

1.2. La sismicité de la Crète

L'étude des enregistrements des séismes survenus en Crète entre 1913 et 1930 (E. Platakis, 1950) à partir des Annales de l'Observatoire d'Athènes, nous a permis de constater que la sismicité de la Crète était majoritairement de nature locale, modérée et récurrente.

Elle est locale parce que, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, le jeu des nombreuses failles qui découpe les reliefs crétois fait que sur 135 séismes survenus durant cette période de 17 ans allant de 1913 à 1930, 103 avaient un épicerentre situé sur l'île.

C'est une sismicité modérée du fait que les séismes ainsi enregistrés avaient une intensité allant de I à IV sur l'échelle Rossi-Forell, employée à l'époque et qui en compte X au maximum. Enfin, c'est une sismicité récurrente parce que les séismes surviennent de manière privilégiée dans certaines régions et dans certaines villes. Ainsi, Heraklion, la capitale, et Hiérápétra sur la côte sud-est de l'île (voir carte ci-des-

sus) sont le plus souvent touchées avec 46 séismes durant cette période de 17 ans. La ville de Chania, située sur la côte nord-ouest, est, quant à elle, affectée par 22 séismes. Une étude de la sismicité sur le long terme à partir des catalogues de séismes connus et avec l'aide de l'Observatoire d'Athènes pour des enregistrements sismiques allant jusqu'en 1964 a permis de confirmer cette tendance (Fig. 3). Par ailleurs, l'analyse de ces mêmes catalogues de séismes historiques (E. Platakis, 1950; P. Comninakis, E. Papazachos, 1982; E. Guidoboni, 1986) nous permet de déterminer que les séismes violents interviennent tous les 100 à 500 ans en Crète.

1.3. Les facteurs de risques

L'étude d'un séisme particulier, celui survenu le 22 février 1970 à Héraklion, nous a permis de déterminer trois facteurs de risque importants qui jouent un rôle dans la vulnérabilité des constructions en zone sismique. Ce séisme était de portée régionale, avec un épicerne située en mer, au large de l'îlot de Dia qui se trouve au nord de la ville d'Héraklion. Sa magnitude a été mesurée à 4,5 sur l'échelle ouverte de Richter et son intensité évaluée, après enquête sur le terrain, à IV-VII sur l'échelle Mercalli-Sieberg (Fig. 4).

1.3.1. La composition géologique du sol
Cet exemple du séisme de 1970 montre concrètement que la composition géologique du sol d'implantation des édifices est un élément essentiel de leur

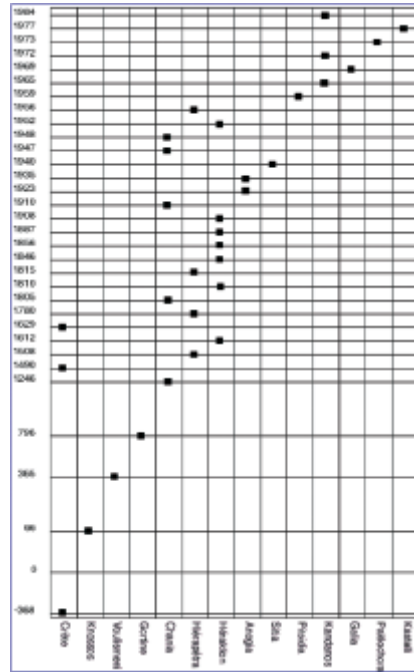


Figure 3. Graphique de la récurrence des séismes en Crète (G. Poursoulis, 1999).



Figure 4. Carte des isoséistes du séisme d'Héraklion en 1970 (G. Poursoulis, 1999, 2000a).

résistance au séisme. En effet, les dommages les plus importants ont été constatés dans la ville d'Héraklion et sa banlieue sud-est, situées sur des marnes détritiques. Au contraire, le village d'Epano-Archanès, situé sur les pentes de la colline calcaire du Youkta, au sud d'Héraklion, n'a subi aucun dommage. Il est même apparu que cette colline calcaire a joué un rôle de barrage, stoppant les ondes sismiques qui ne se sont pas propagées au-delà vers le sud.

1.3.2. La vulnérabilité des constructions

Ce que nous montre ce séisme particulier c'est que les édifices endommagés ont été essentiellement des bâtiments abandonnés ou mal entretenus.

1.3.3. La récurrence des séismes

Les bâtiments affectés en 1970 avaient été fragilisés par les effets, mal réparés, du précédent séisme survenu en 1956, soit 11 ans auparavant. Comme nous l'avons vu au début de cet article, 11 ans d'écart entre ces deux séismes est une période trop courte pour permettre aux populations de retrouver les moyens économiques nécessaires à la réparation efficace de leur habitat.

Cependant, en règle générale, la sismicité de la Crète, majoritairement locale, modérée et récurrente, permet aux habitants de cette île, depuis la plus haute antiquité, de concevoir des techniques de construction sismo-résistantes, de les expérimenter et de les transmettre aux générations suivantes. Nous allons voir que les Minoens à l'Âge du Bronze (3250-1050 BC), confrontés au problème sismique ont, en effet, su expérimenter ce type de techniques pour permettre à leurs édifices de résister, non seulement à cette sismicité locale modérée, mais aussi à la sismicité régionale plus violente puisque produisant des séismes de faible profondeur.

2. L'ARCHITECTURE MINOENNE

Avant de présenter l'architecture minoenne dans sa complexité et ses particularités constructives, il convient d'apporter quelques éléments chronologiques permettant de situer la civilisation minoenne, dans son environnement ainsi que les événements marquant de son histoire.

L'occupation de la Crète est connue depuis le Néolithique (Fig. 5). Les époques pré-historiques ayant été très peu investiguées sur l'île, on en sait très peu de choses. Dès le Néolithique, l'occupation se partage en une persistance d'exploitation des abris en grotte à des fins, à la fois d'habitat, sans doute encore itinérant, et d'inhumations, et un début d'installations plus pérennes avec des villages déjà très sophistiqués et complexes. L'époque dite du Minoen Ancien, qui fait suite au Néolithique, marque le début de l'Âge du Bronze en Crète ce dernier allant de 3250 BC à 1050 BC. Cet Âge

Date (BC)	Epoque	Principaux événements
7000-6500	Néolithique Acéramique	1 ^{ère} occupation à Cnossos
6500-5700	Néolithique Ancien	1 ^{ère} occup. à Palaikastro et Phaistos, nbreux habitats en grottes à Epano Archanes
5700-4700	Néolithique Moyen	
4700-3250	Néolithique Récent	1 ^{ère} occupation de la plaine du Lassithi
3250-2500	Minoen Ancien I	1 ^{ère} occupation à Kato Zakros, Gournia
2500-2300	Minoen Ancien II	1 ^{ère} occupation à Myrtyos Pyrgos et Phournou Korifi
2300-2100	Minoen Ancien III	1 ^{ère} occupation à Malia, Vassiliki et Tylissos
2100-1900	Minoen Moyen IA	
Début des échanges avec l'est de la Méditerranée		
Construction des palais de Phaistos, Malia et Knossos		
Multiplication des habitats sur l'ensemble de la Crète		
1900-1800	Minoen Moyen IB	
1800-1700	Minoen Moyen II	
1630-1628 date de l'éruption de Théra selon les analyses physico-chimiques		
1700-1600	Minoen Moyen III	
Transformation des palais et de quelques bâtiments ordinaires pour utiliser le nouveau plan découpé en îlots dynamiques		
Construction du palais de Kato Zakros		
Linéaire A utilisé à Cnossos		
1600-1500	Minoen Récent IA	Transformations au palais de Kato Zakros
1500: date de l'éruption de Théra selon la céramique trouvée à Akrotiri		
1500-1450	Minoen Récent IB	Autour de 1450 les trois palais de Malia, Phaistos et Zakros ont été incendiés et abandonnés
L'occupation en Crète est à son plus haut niveau vers 1500 BC		
Multiplication des habitats sur tous les sites occupés avec une forte concentration autour de Knossos		
1450-1400	Minoen Récent II	Phase très fortement associée au MRIB et peut ne faire qu'un avec elle
1400-1350	Minoen Récent IIIA1	Incendie de la partie Est de la Maison E à Malia
1350-1300	Minoen Récent IIIA2	
Apparition du Linéaire B sur tablettes d'argile, incendie à Knossos		
1300-1200	Minoen Récent IIIB	Quelques murs grossièrement construits apparaissent à Phaistos, construction du bâtiment oblique à Malia, construction grossière dans la partie Est de la Maison E de Malia, diminution du nbre d'habitats occupés sur l'ensemble de l'île, sauf à Epano Archanès où l'occupation continue. L'occupation se poursuit dans la partie Est du palais de Knossos après l'incendie et l'apparition des Mycéniens en Crète
1200-1050	Minoen Récent IIIC	Période de Crise, effondrement de l'occupation, Knossos continue de fonctionner mais c'est la fin de son pouvoir. Apparition des premières incinérations à Malia dans la Maison E (éléments étrangers d'origine Mycénienne)

Figure 5. Tableau chronologique (G. Poursoulis, 2003).

du Bronze en Crète a été divisé en trois grandes périodes, de manière quasi arbitraire, par Arthur Evans, le fouilleur de Knossos, au début du 20^{ème} siècle. Il s'agit donc du Minoen Ancien, du Minoen Moyen et du Minoen Récent qui termine l'Âge du Bronze en 1050 BC, puisque après nous tombons dans les périodes plus obscures du Proto-Géométrique et du Géométrique avec l'apparition du fer ou «Âge du Fer».

C'est donc durant cette phase de l'histoire communément appelée Âge du Bronze que se développe la civilisation Minoenne. Civilisation riche, florissante, entreprenante et inventive. Elle va dominer le bassin Méditerranéen et les échanges avec les pays voisins: la Mésopotamie et l'Égypte, bien sûr, mais aussi des pays actuels comme l'Afghanistan, la Syrie et l'Afrique, au sud. En Europe l'Italie, l'Espagne, les pays de l'Est et jusqu'à la Baltique au Nord, comme en témoignent les nombreuses matières premières importées (défenses d'éléphants de Syrie, lapis lazuli d'Afghanistan, albâtre d'Égypte, œufs d'autruches, ambre ...) et autres objets manufacturés retrouvés dans les palais minoens.

Ce développement des contacts et des échanges de ce peuple de marins avec ses voisins, va avoir une grande influence sur l'évolution interne et l'organisation politique et sociale de la société minoenne. En effet, la structuration politique en quatre grands centres administratifs gouvernant chacun une région de l'île, matérialisée par la construction des palais, intervient en 1900 BC, au moment des premiers contacts et échanges économiques avec l'Égypte. On passe alors d'une société de petites communautés indépendantes à une société organisée et dirigée par des centres administratifs que sont les palais (G. Poursoulis, 1999). Cela s'explique par le fait que les échanges avec l'Égypte se faisaient sous la forme de «tributs» payés au Pharaon en personne, directement par les princes des peuples voisins, reconnaissant la suprématie de l'Égypte, ou par ceux des peuples soumis à la domination Égyptienne. Par conséquent, la Crète pour échanger avec l'Égypte devait se structurer et envoyer des représentants ayant un pouvoir équivalent en termes de représentativité à celui des princes des autres états (G. Poursoulis, 1999).

La construction de ces palais, centres administratifs de première importance, gérant la production des matières premières et des denrées alimentaires, ainsi que la redistribution des richesses à chacun de ses subordonnés, en fonction du travail fourni, va donner lieu à des innovations techniques importantes, non seulement en matière d'esthétique mais aussi en matière de techniques de construction. De la même manière, la mise au point de techniques de construction innovantes donnera lieu, vers 1700 BC à des modifications importantes et fondamentales des édifices existants, avant tout les palais, mais aussi des maisons particulières, pour appliquer ces nouvelles techniques, comme nous le verrons plus en détail ci-dessous.

2.1. L'évolution de l'architecture minoenne

Les premières habitations construites apparaissent en Crète dès le Néolithique (4700-

3250 BC) et dès cette période-là, l'architecture se caractérise par un type d'habitations dites «maisons complexes» (Fig. 6a). Les premiers exemples en sont attestés à Knossos sous le palais (R. Treuil, 1983).

Il s'agit de bâtiments de plus de trois pièces, ce qui indique qu'il y a déjà une séparation des fonctions au sein de l'espace habitable. Ceci montre une société faisant preuve de réflexion et d'inventivité mais aussi une société capable de mobiliser une certaine richesse à la fois conceptuelle et économique.

Au Minoen Ancien I-II (3250 – 2300 BC), on constate que deux types de maisons complexes cohabitent: la maison au plan agglutiné sans organisation, les pièces et les maisons sont accolées les unes aux autres sans ordre apparent et sans que l'on puisse les distinguer les unes des autres (Fig. 6b). L'autre type est celui de la maison au plan organisé, généralement de forme carrée ou rectangulaire, ces maisons sont bien individualisées les unes des autres (Fig. 6c).

Finalement, au Minoen Moyen (2100 – 1900 BC), seul le type des maisons au plan régulier et organisé persistera, pour se complexifier d'avantage et aboutir à la forme des palais au plan rectangulaire, symétrique avec cour centrale.

2.2. La constitution d'un bâtiment minoen

Un bâtiment minoen présente donc un plan en carré ou en rectangle avec une cour centrale ouverte dans le cas des bâtiments palatiaux. Il dispose d'une base solide et épaisse en pierres, constituée d'un soubassement dont l'épaisseur est en moyenne

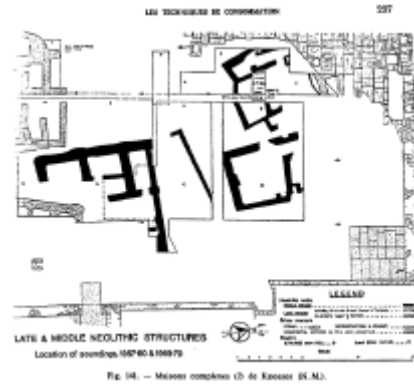


Figure 6a. Maisons néolithiques à Knossos, (R. Treuil, 1983).



Figure 6b. Plan du site de Myrtos Phournou Koriphi (P. Warren, 1972).



Figure 6c. plan du site de Vassiliki (A. Zoïs).

de 0,70 cm mais qui peut aller jusqu'à 1 à 3m dans certains cas. L'épaisseur de la base va dépendre du poids de la superstructure à supporter. La base est renforcée au départ des escaliers menant aux étages, par exemple. Au-dessus du soubassement est mise en place une superstructure plus légère constituée de briques crues dans la majorité des cas. Le bâtiment s'élève alors sur un seul étage, mais son emprise au sol est généralement importante du fait de la complexité de son plan et du nombre important des pièces qui le compose. Ainsi, pour les palais, qui représentent le summum de la complexité, la surface au sol est respectivement de 15.930 m² pour Knossos, 13.076 m² pour Phaistos, 8.780 m² pour Malia et 3.076 m² pour Zakros. Les techniques de construction employées sont les mêmes, quelle que soit la nature du bâtiment: maison individuelle ou édifice officiel, tel que le palais.

2.3. Un mur minoen type

De la même manière que précédemment, on peut décomposer structurellement un mur minoen en trois éléments qui sont les fondations, le soubassement et la superstructure.

- Les fondations se composent de pierres brutes: moellons ou galets, disposées en assises régulières, liées par un mortier d'argile. L'ensemble est recouvert d'un enduit de chaux.
- Le soubassement fut, dans un premier temps, construit lui aussi avec des blocs de pierre grossièrement équarris ou avec des moellons bruts. Il se compose de deux parements reliés entre eux par des poutres de bois. L'espace entre ces deux parements est comblé avec un remplissage constitué de toutes sortes de matériaux: de l'argile, des petites pierres, des tessons, des briques crues. Au moment de la construction des palais en 1900 BC, la pierre de taille fait son apparition avec l'usage, à des fins constructives, d'une nouvelle pierre: le grès dunaire. Plus tendre et donc plus facilement taillable en blocs réguliers, le grès va rapidement remplacer le calcaire dur ou calcaire bleu à rudistes, jusque-là utilisé pour la construction. L'usage de la pierre de taille apparaît comme une innovation technique, mise au point à l'occasion de la construction des palais. Elle va permettre une disposition des pierres en assises plus régulières, limitant au minimum la quantité de mortier d'argile de liaison entre blocs. Cela d'autant plus que le grès dunaire étant une calcarénite, une certaine carbonatation peut se produire avec le temps entre des blocs mitoyens, les solidarissant et supprimant ainsi les espaces entre blocs. On gagne alors en solidité de l'ouvrage et en résistance. Le soubassement est lui aussi recouvert d'un enduit de chaux, régulièrement renouvelé et qui va le protéger des attaques du temps.
- La superstructure est généralement construite en briques crues avec un chaînage tridimensionnel en bois constitué de poutres disposées horizontalement, verticalement et transversalement. Elle est, elle aussi, recouverte d'un enduit de chaux pour les mêmes raisons que le soubassement.

3. LES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION SISMO-RÉSISTANTES

La construction sismo-résistante traditionnelle répond à deux grands principes qui sont, d'une part, la très grande rigidité, c'est le cas des constructions en maçonnerie de nos régions; d'autre part, la très grande flexibilité, comme dans les constructions japonaises en bambou.

Les édifices Minoens correspondent au type de construction en maçonnerie traditionnelle massive. Cependant cette très grande rigidité n'exclut pas l'usage d'autres techniques de construction susceptibles d'augmenter la résistance du bâti. Ainsi, les bâtiments de l'Âge du Bronze en Crète présentent-ils un certain nombre de particularités de construction qui apparaissent comme autant de techniques de construction sismo-résistantes. Comparativement aux préconisations de construction proposées aujourd'hui par nos ingénieurs pour le bâti en maçonnerie, elles sont en parfaite adéquation avec ces solutions techniques modernes et s'appliquent à tous les éléments structuraux de l'édifice, depuis le choix du site d'implantation jusqu'à la superstructure.

Les solutions techniques employées par les Minoens sont des réponses aux contraintes mécaniques imposées par les conditions de sol et les mouvements des séismes.

Les techniques sismo-résistantes utilisées par les Minoens sont majoritairement de nature préventive, conçues et mises en place au moment de la construction des bâtiments. Cependant, les édifices existants ont été régulièrement transformés afin de bénéficier des nouvelles techniques mises au point.

3.1. Que faut-il faire pour que les édifices résistent?

De nos jours, les normes et règles de construction parasismiques donnent des indications sur la manière de construire les édifices, le but recherché étant la sauvegarde des personnes et non le zéro dommages aux édifices. Dans les sociétés traditionnelles, la construction sismo-résistante était le fruit de l'expérience éprouvée et transmise au fil des générations et des séismes successifs, lorsque la périodicité des derniers le permettait.

Pour reconnaître la qualité sismo-résistante des techniques de construction utilisées par les anciens, le seul moyen de procéder de manière scientifique est de partir de la connaissance que nous offrent les ingénieurs et de les comparer aux techniques anciennes. C'est pourquoi la présentation des techniques sismo-résistantes dans les édifices Minoens sera effectuée par une mise en parallèle avec ce que proposent les normes antisismiques modernes.

L'exemple du séisme de 1970 à Héraklion nous offre déjà un premier aperçu des bonnes pratiques en matière d'implantation et de résistance des édifices.

- En effet, le choix du site d'implantation est primordial. Un sol compact et sain est préférable, afin d'éviter les effets de site générés par la localisation sur un substrat sédimentaire meuble, ou sur un piton rocheux par l'amplification des ondes qui se concentrent au sommet.
- Par ailleurs, les matériaux utilisés doivent être également de bonne qualité et les techniques de mise en œuvre de ces matériaux, éprouvées pour leur qualité résistante.
- Enfin, le bâti doit être entretenu et réparé régulièrement de manière à lui conserver ses qualités et ne pas le fragiliser face au séisme.

3.1.1. Le choix du site d'implantation

L'une des premières précautions à prendre lorsque l'on veut construire en zone sismique c'est de bien sélectionner le site d'implantation pour ses qualités d'homogénéité et de dureté. Les sols rocheux compacts et sains sont les plus adaptés.

Le rocher naturel, à la pente des collines, est donc préférable car, du fait de sa rigidité, il permet la transmission des secousses. Au contraire, les alluvions et les positions hautes, sur les pitons, en réfléchissant et en concentrant les ondes à l'intérieur produisent une amplification des secousses, dangereuses pour les constructions (Fig. 7a, b).

Les habitats Minoens sont systématiquement établis sur le rocher naturel, souvent calcaire, généralement à la pente des collines ou en terrain plat. Les Minoens ont su choisir les meilleures conditions d'implantations de leurs habitats pour une bonne résistance des constructions (Fig. 8).

3.1.2. Le choix des fondations

Les normes antisismiques proposent d'employer des fondations différentes selon la profondeur à laquelle se situe le sol solide et sain.

- Des fondations à faible profondeur

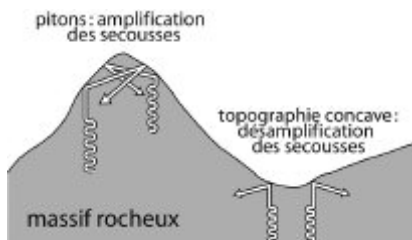


Figure 7a. Effet topographique (M. Zacek, 1996).

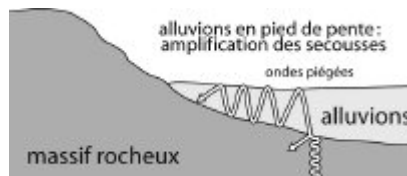


Figure 7b. Effet de site alluvionnaire (M. Zacek, 1996).

- Semelles de fondation de types filantes, isolées ou radier général
- Des fondations à grande profondeur
 - Fondations en puits, en pieux ou en barètes.

De la même manière, les Minoens ont expérimenté des solutions différentes selon la profondeur du rocher naturel sur lequel ils ont établi les fondations de leurs bâtiments.

- Des fondations superficielles
- Des fondations à faible profondeur
- Des fondations à grande profondeur

a) Les fondations superficielles

Lorsque le rocher naturel affleure, les fondations des édifices Minoens sont quasi-inexistantes. Cependant, le rocher naturel peut être taillé pour permettre l'ancrage des murs (Fig. 9).

b) Les fondations à faible profondeur

Sur un sol compact et homogène à faible profondeur, les normes parasismiques modernes préconisent l'usage de fondations superficielles simples du type semelle de fondation:

- a - la semelle filante
- b - la semelle isolée
- c - la semelle en radier général (Fig. 10a)

Deux de ces solutions furent expérimentées par les Minoens:

- La semelle filante (Fig. 10b)
- Le radier général

En effet, dans les palais minoens, des socles sont disposés à la base des sous-bassements des murs de façade, faisant



Figure 8. Environnement rocheux et implantation en pente de colline du site de Macryallos au sud-est de la Crète (G. Poursoulis, 1999, 2000a).



Figure 9. Rocher naturel taillé pour l'ancrage de murs, site du palais de Phaistos (G. Poursoulis, 1999, 2000a).



Figure 10a. Semelles de fondations: a - filante, b - isolée, c - radier général (M. Zacek, 1996).



Figure 10b. Semelle de fondation filante au palais de Phaistos (photo L. Pernier, 1935).

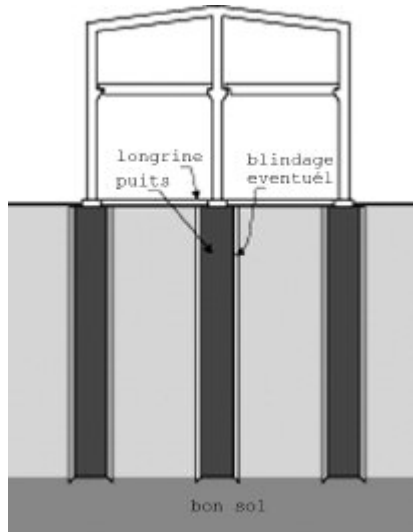


Figure 11a. Fondation en puits (M. Zacek, 1996).



Figure 11b. Fondation en puits au palais de Knossos (photo A. Evans, 1928).

office de semelle filante. On s'aperçoit, par exemple dans le cas de Phaistos illustré par la Figure 10b ci-dessus, que le rocher naturel à l'arrière de ce mur de façade correspondant à la pièce IX située au nord-ouest du bâtiment, se trouve à seulement 23cm de profondeur (L. Pernier, 1935).

La semelle de fondation en radier général, employée de préférence sur les sols solides à faible profondeur (M. Zacek, 1996), a été utilisée sur le site de Palaiastro Roussolakkos, à la base du bâtiment 1. Le rocher naturel sous-jacent a été nivelé et une véritable plate-forme régulière y a été établie, sur laquelle a été fondé le bâtiment.

c) Les fondations à grande profondeur

Lorsque le rocher naturel se situe à grande profondeur, les normes antisismiques proposent différentes solutions de fondations profondes:

- En puits (Fig. 11a)
- En pieux
- En barètes
- En étages enterrés formant caisson cloisonné rigide (Fig. 12a)

Ces fondations vont traverser les couches de terrain meuble jusqu'au sol solide.

Les Minoens ont expérimenté deux de ces types de fondations profondes:

- Les fondations en puits
- Les fondations en étages enterrés

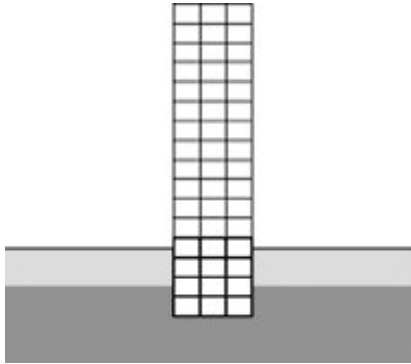


Figure 12a. Fondations en étages enterrés formant caisson cloisonné rigide (M. Zacek, 1996).



Figure 12b. Étages enterrés à Phaistos (photo D. Levis, 1976).

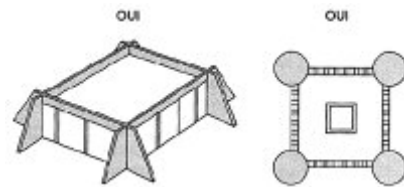


Figure 13. Fondations en étages enterrés formant caisson cloisonné rigide (M. Zacek, 1996).

Les fondations en puits ont été utilisées au palais de Knossos, où six puits maçonnés ont été creusés à 7m de profondeur afin d'atteindre le rocher naturel et fonder les murs de l'aile nord du palais (Fig. 11b).

Les fondations en étages enterrés sont une technique qui a été employée, aux palais de Zakros, de Malia, mais surtout au palais de Phaistos, nécessitée par la configuration des lieux. En effet, ce palais était à l'origine construit sur deux terrasses, ce qui induisait une différence de niveaux entre les deux parties de l'édifice, avec un système complexe et peu pratique d'escaliers intérieurs permettant la circulation entre les différentes pièces des deux terrasses. Composée de trois étages, la partie sud-ouest de ce palais, située sur la terrasse inférieure, a été entièrement comblée avec du béton fabriqué par les Minoens. Ils ont pu ainsi constituer une plate-forme afin d'établir l'ensemble du bâtiment sur un même et unique niveau (Fig. 12b).

3.1.3. La protection des angles des édifices

Lors du mouvement sismique, ce sont les angles des édifices qui souffrent le plus des effets combinés de la flexion, du cisaillement et de la torsion. Les normes antisismiques proposent des solutions pour protéger les angles des édifices en les renforçant (Fig. 13).

Dans les édifices minoens, on remarque l'existence d'espaces extérieurs entièrement clos, inaccessible aussi bien de l'intérieur que de l'extérieur, dans lesquels aucun objet ne fut trouvé durant la fouille et auxquels il fut, par conséquent, impossible d'attribuer

une fonction. Ces espaces clos sont justement situés en avant et à l'extérieur des angles de certaines pièces d'habitation (Fig. 14). On peut donc les considérer comme des renforcements des angles, protection qui durant le séisme va pouvoir subir les dégâts à la place des pièces d'habitation.

3.1.4. Les murs doubles, reliés

Les normes antisismiques indiquent, qu'en raison de la relative flexibilité des murs doubles, les deux parois doivent être mécaniquement reliées par des attaches (Fig. 15a). Ainsi, les murs extérieurs des édifices minoens sont constitués de deux parements reliés par des poutres de bois (Fig. 15b).

3.1.5. La superstructure chaînée

Les normes parasismiques modernes préconisent l'usage d'un chaînage en bois, formant un réseau tridimensionnel mécaniquement continu pour les constructions traditionnelles en maçonnerie.

La superstructure des édifices minoens comportait un chaînage en bois dont les poutres étaient intercalées entre les assises de briques crues dans les sens: horizontal, vertical et



Figure 14. plan du palais de Malia (G. Poursoulis, 1999, 2000a).

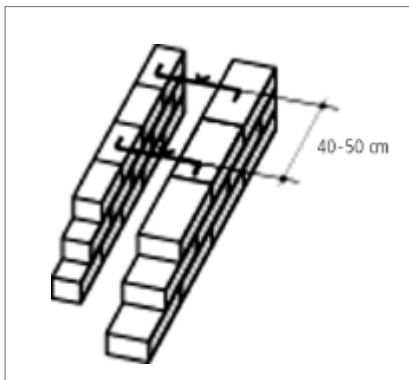


Figure 15a. Parements reliés par des attaches (M. Zacek, 1996).



Figure 15b. Murs doubles reliés par des poutres de bois, (Photo A. Evans, 1921).

transversal. Ces poutres étaient reliées entre elles par des chevilles de bois. L'existence de ces poutres a été déterminée par les cavités pleines de charbons de bois que les poutres ont laissé dans les murs des édifices incendiés.

3.1.6. Les encadrements des ouvertures

Lors d'un séisme, les forces exercées perpendiculairement au plan de la paroi produisent des fissures dues au cisaillement à la périphérie des ouvertures, lieux de concentration des contraintes. Les normes parasismiques préconisent donc l'usage d'encadrements rigides en bois, liés aux chaînages.

Les ouvertures des édifices minoens étaient encadrées de poutres de bois intégrées à la superstructure. La présence de ces encadrements en bois a été mise en évidence, là encore, par les empreintes laissées par le bois brûlé autour des ouvertures.

3.1.7. Des innovations techniques apportées progressivement

L'étude de l'évolution des édifices minoens montre que des innovations techniques ont été mises au point régulièrement. Ces innovations techniques ont été employées aussi bien pour la construction de nouveaux édifices que dans les édifices déjà existants après transformations.

a - La maçonnerie en pierres de taille

C'est Vers 1900 BC, au moment de la construction des édifices palatiaux, qu'apparaît la technique de la pierre de taille. Les Minoens commencent alors à utiliser le grès dunaire taillé à la place du calcaire bleu beaucoup plus dur et donc plus difficile à équarrir.

Le grès taillé sera employé principalement pour les soubassements des murs extérieurs mais aussi dans les parois intérieures comme renforcement à des endroits stratégiques:

- dans les angles des murs
- en piliers de soutènement
- en support d'escalier
- en support de la superstructure, là où plus lourde elle nécessitait un renforcement.

b - Le plan symétrique découpé en îlots dynamiques

C'est l'innovation technique la plus importante. Elle est introduite vers 1700-1600 BC et sera simultanément appliquée pour la construction de nouveaux édifices et dans les édifices existants, entraînant de lourdes et fondamentales transformations. Pour bien résister en zone sismique un édifice doit avoir un plan symétrique compact en cercle, carré ou rectangle. Les formes asymétriques en L, T, U, V, Z, ainsi que les édifices établis sur les pentes des collines ou sur des terrasses différentes doivent être divisés par des joints de séparation ou joints parasismiques disposés à la jonction des

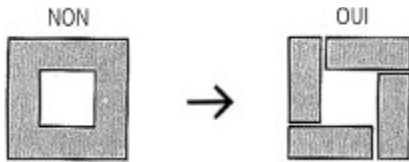


Figure 17a. Plan symétrique découpé (M. Zacek, 1996).

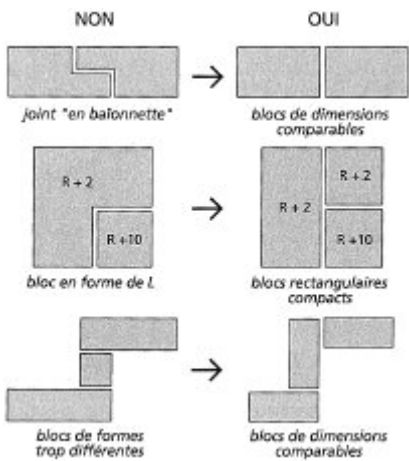


Figure 17b. Conception en blocs séparés par des joints parasismiques (M. Zacek, 1996).

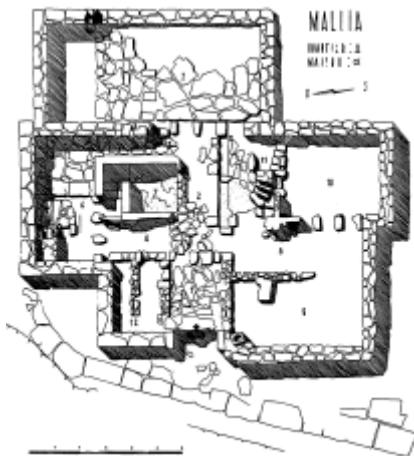


Figure 17c. Maison Da de Malia construite vers 1700 BC en appliquant le plan découpé en îlots dynamiques (G. Poursoulis, 1999, 2000a).

ailles des bâtiments ou à la limite des terrasses (Fig. 17a, b). Ces joints parasismiques vides ou pleins de matériaux compressibles, en désolidarisant les blocs, leurs permettent d'osciller librement, évitant ainsi les effets de torsion. Le plan des édifices minoens, carré ou rectangulaire, peut être découpé en un ensemble de blocs de construction séparés les uns des autres par des joints de séparation vides représentés par des espaces ouverts ou des voies de circulation telles que: les cours intérieures, les entrées, les voies de passage, les couloirs, les corridors, ou par des joints de séparation pleins tels que les murs en terre et en briques crues (Fig. 14).

Parallèlement à la mise en place du plan dynamique dans les édifices existants après transformations, les édifices nouvellement construits vers 1700-1600 BC présentent directement cette nouvelle conception architecturale, marquée par le dessin non linéaire des façades correspondant dans l'espace intérieur aux blocs différenciés et délimités par les joints de séparation que sont: les voies de circulation et les cours intérieures (Fig. 17c).

Par ailleurs, ce système de partition en blocs séparés pour un comportement dynamique des structures apparaît également à l'échelle des villes minoennes (Fig. 18).

CONCLUSION

La situation sismique de la Crète a permis aux Minoens d'expérimenter des

techniques de construction sismo-résistantes appliquées à tous les éléments des édifices. Ces techniques apparaissent conformes aux normes antisismiques modernes et répondent aux conditions mécaniques imposées par le sol et les sollicitations sismiques. Elles furent régulièrement perfectionnées au cours du temps et appliquées directement aux constructions nouvelles mais aussi au bâti existant en le modifiant, comme le montre l'évolution constructive du palais de Malia. Cette évolution des



Figure 18. Plan de la ville de Zakros découpée en îlots dynamiques (G. Poursoulis, 1999,2000a).

techniques sur l'ensemble de la durée de la civilisation Minoenne nous autorise à parler de Culture sismique locale.

Bibliographie

- Angelier J.: Sur l'évolution tectonique depuis le Miocène supérieur d'un arc insulaire méditerranéen: l'Arc Egéen, in *Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique*, vol. 3, 1977.
- Cominakis P., Papazachos E.: A catalogue of historical earthquakes in Greece and surrounding areas 479 BC-1900 AD, in *University of Thessaloniki Geophysical Laboratory Publication*, n° 5, 1982.
- Guidoboni E.: I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area Mediterranea, *Istituto Nazionale di Geofisica (ING)*, 1986.
- Mercier J.-L., Carrey E., Phillip H., Sorel D.: La Néotectonique Plio-Quaternaire de l'arc égéen externe et de la mer Egée et ses relations avec la sismicité (5^e Colloque International: la géologie des régions égéennes, 1975, Paris) in *Bulletin de la société géologique de France (7)*, t. XVIII, n° 2, 1976.
- Platakis E.: Les séismes de Crète, in *Kritika Chronika*, 1950.
- Poursoulis G.: La destruction des palais Minoens, thèse de doctorat (inédiée), 1999.
- Poursoulis G.: Des techniques sismo-résistantes dans les édifices de l'Age du Bronze en Crète, *actes des IV^e Rencontres du Groupe APS*, 2000a, p. 127-152.
- Poursoulis G. et al: Destruction des édifices minoens et sismicité récurrente en Crète (Grèce), *Géomorphologie: Relief, processus environnement*, 2000b n° 4, p. 253-266.
- Poursoulis G.: Archéosismicité et connaissance du risque sismique par les Minoens: de l'usage des catalogues de séismes historiques, *actes des V^e Rencontres du Groupe APS*, 2001, p. 11-38.
- Poursoulis G.: Geological Factors part in the Minoan Society Vulnerability Process (Crete-Greece), *actes du colloque international: "Environnemental dynamics and History in Mediterranean areas. Paris 1-5 Avril 2002"*, ed. Elsevier, 2003, p. 25-39.
- Poursoulis G.: The 1708 Manosque earthquake (France): a reading of its archaeological traces as a contribution to estimate the effects on buildings, *Meeting of the Working group «Archaeoseismology, Messine Italy, 10-11 juin 2004»* in *Journal of Seismology*, ed Springer, 2006a.
- Poursoulis G.: Reconnaissance des effets des séismes sur le bâti ancien et Lecture Archéologique des bâtis: le cas du séisme de 1708 à Manosque, *actes du Séminaire «La réduction de la vulnérabilité de l'existant face aux menaces naturelles»*, Université de Montpellier III, MASTER Pro. *Gestion des catastrophes et des risques naturels, Montpellier, 8 février 2005*, 2006b.
- Poursoulis G.: Les Minoens face aux séismes: fatalisme ou détermination?, *actes du 8^{ème} Congrès International des Etudes Crétoises, Elounda (Crète) 1-6 octobre 2001 Tome A4 Période Préhistorique*, ed. Etairia kritikon Istorikon Meleton, Héraklion, 2006c, p. 363-377.
- Poursoulis G.: Les facteurs géologiques et leur implication dans la vulnérabilité de la société minoenne, *actes des VI^e rencontres du Groupe APS «Archéosismicité et Vulnérabilité: Environnement, bâti ancien et société»*, Perpignan 4-5 octobre 2002, 2008a.
- Poursoulis G. et al: Le séisme de 1708 à Manosque (France): une approche pluridisciplinaire pour une estimation quantifiée de ses effets, *Actes des VI^e rencontres du Groupe APS: Archéosismicité et Vulnérabilité: Environnement, bâti ancien et société, Perpignan 4-5 octobre 2002*, 2008b.
- Poursoulis G. et al: La lecture archéologique des églises de Saint Sauveur à Manosque et de Saint Michel à Saint Michel l'Observatoire, *Actes des VII^e Rencontres du Groupe APS Archéosismicité et vulnérabilité du bâti ancien: La vulnérabilité des édifices recevant du public, Perpignan 20-21 mai 2005*, 2008c.
- Zacek M.: *Construire parasismique*, éditions Parenthèses, Marseille, 1996.

Curriculum

Georgia Poursoulis, Docteur en histoire de l'Université de Paris I Panthéon-Sorbonne. Manager de la société DIA-gnosis «Etudes et Conseils en Patrimoine bâti et sismicité». Chef de Projet du pôle risques des Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau. Spécialiste en archéosismicité et techniques traditionnelles de construction et de renforcement parasismique.