Cahiers du PoCa
architecture post-carbone
2021 – 2022

Logements collectifs en terre crue : le matériau à l'épreuve de la densité

Alex Arnou, Elsa Frangeard,
Léo Pommereul

École d'architecture
de la ville & des territoires
Paris-Est

Logements collectifs en terre crue : le matériau à l'épreuve de la densité

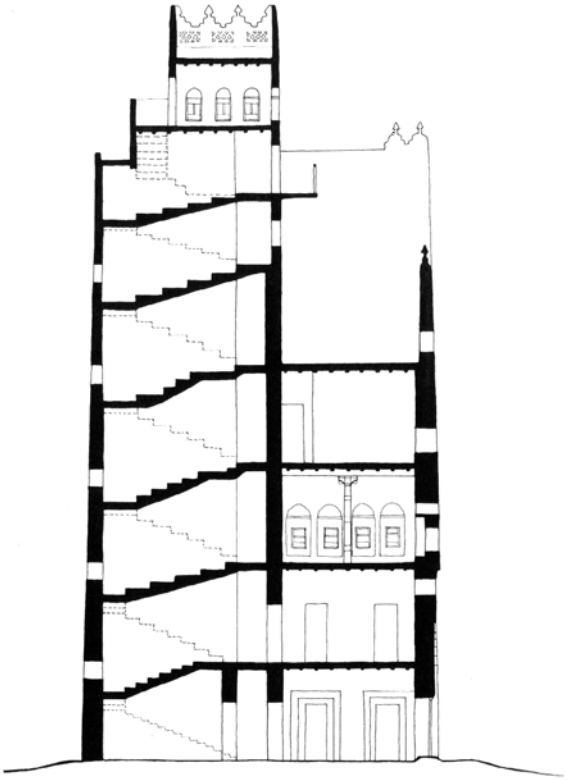
Commanditaire de l'étude
Erwan Harmard, GPEM, UGE

Étudiants
Alex Arnou
Elsa Frangeard
Léo Pommereul

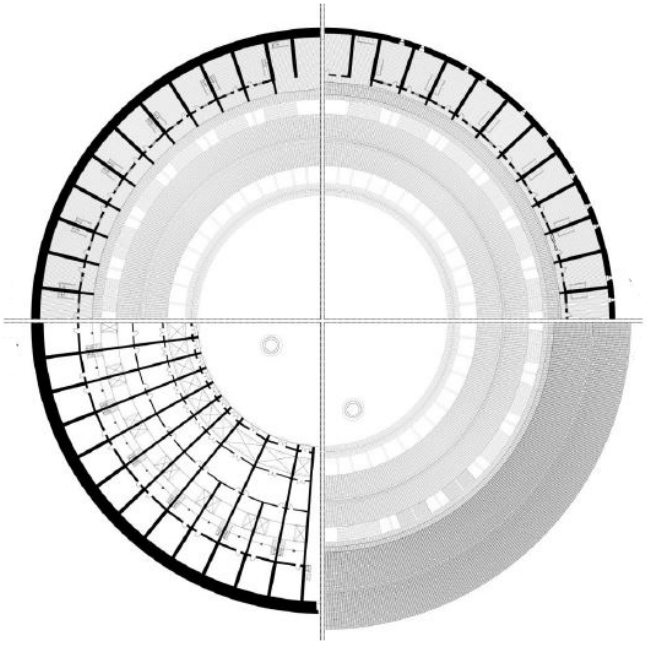
Cahiers du PoCa
architecture post-carbone
2021 – 2022

École d'architecture
de la ville & des territoires
Paris-Est

C. Le bâtiment



Coupe d'un immeuble à Shibam, Yemen



Plan d'un tulou, Fujian, Chine.
1662-1722,
Pingue County.

Systèmes structurels

Construire en terre crue implique des réflexions sur les systèmes structurels les plus pertinents pour ce matériau. D'une manière générale, la terre permet de construire des éléments verticaux continus, ponctuels, rectilignes ou courbes. Elle peut aussi se mettre en œuvre sous forme d'arche ou de voûte. Il existe donc différents moyens de l'utiliser en structure.
Dans le cadre de l'étude, différentes architectures vernaculaires, aux systèmes structurels différents, ont orienté le développement des quatre variantes. Il s'agit de la longère en bauge à la façade structurelle, certains immeubles canuts lyonnais en pisé et leurs refends, les tulous chinois avec leur structure circulaire et la médina nord-africaine à l'étalement en nappe. Bien que ces architectures aient servi de référence, l'objectif de l'étude n'est pas de concevoir des édifices néo-vernaculaires. C'est pourquoi, ces principes ont été adaptés au contexte contemporain et local.
Comme dit précédemment, la terre crue en construction impose la mise en œuvre de larges épaisseurs de matière. Du fait de la forte densité de ce matériau et des quantités abondantes à mettre en œuvre, le poids propre des éléments constructifs en terre crue est très important[19]. Cette problématique a des conséquences directes sur le fonctionnement structurel du bâtiment. En effet, quel sont les systèmes structurels les plus optimaux à adopter avec de la terre crue porteuse et quelles spatialités génèrent ces systèmes ? Les facteurs d'optimisation à considérer sont à la fois structurels, opérationnels et économiques. Dans le cas d'un marché public pour un chantier de grande envergure, il semble nécessaire de privilégier des solutions structurelles rapides à ériger et dont la mise en œuvre est techniquement et économiquement maîtrisée.

Les fondations

Les propriétés physiques de la terre crue génèrent des contraintes de conception aussi bien sur le plan horizontal que vertical. D'abord, chaque mur porteur en terre implique un dimensionnement massif des sections de fondations, car la semelle de celle-ci doit toujours être plus large que l'élément porteur. Dans le cas précis de l'îlot B11, les conditions géotechniques ne nécessitent pas des ancrages aux sols trop profonds[20], ce qui permet de limiter le volume des fondations à réaliser. En revanche, dans des situations où les sols sont plus meubles et qui nécessitent des fondations profondes, la terre peut avoir de réels impacts sur la quantité nécessaire de béton à couler pour soutenir l'édifice. D'une manière générale, la terre crue porteuse implique l'utilisation de plus de matière, en comparaison avec un autre matériau structurel conventionnel. En d'autres termes, l'application de la terre crue en structure nécessite forcément l'utilisation de béton ou de matériaux stabilisés en fondations. Dès lors, est-il judicieux de la mettre en œuvre dans ce cas de figure si cela nécessite, en contrepartie, une forte consommation de matériaux carbonés ? Y a-t-il un effet de seuil ?

19 Voir également la partie sur les éléments Murs et les diagrammes pp. 120-121.

20 Nous avons réalisé un pré dimensionnement des descentes de charges et croisé ce calcul avec les informations du rapport géotechnique réalisé pour la ZAC.

Préfabrication
La maison des plantes de Ricola, dessinée par les architectes Herzog et de Meuron et construite à Laufen (Suisse) est l'un des plus grands bâtiments du monde en pisé autoporteur avec 110 m de longueur, 29 de largeur et 11 de hauteur. Pour relever ce défi technique et économique, l'artisan Martin Rauch a mis au point un procédé de préfabrication de blocs de pisé dans une halle située à 5 km du chantier.
© Ricola AG, Markus Bülher-Rasom

Mécanisation et préfabrication

À l'heure actuelle, les moyens de mise en œuvre de la terre crue sont principalement traditionnels, c'est-à-dire majoritairement manuels et peu mécanisés. Les chantiers sont souvent de plus petites échelles, par rapport à la commande initiale, et souvent participatifs car ils nécessitent beaucoup de main d'œuvre. De plus, les chantiers comprenant du gros œuvre doivent se faire à la belle saison pour protéger la matière première des intempéries. L'ensemble de ces facteurs implique donc des temps de chantier longs et séquencés.
Ainsi, la construction en terre crue peut nécessiter à la fois l'emploi de plus de matière et de plus de temps pour la mettre en œuvre. Ces deux facteurs réunis génèrent d'avance un allongement des délais de construction. La commande initiale, qui est une opération de marché public, se base sur un processus de projet conventionnel et un calendrier a priori peu compatible avec ces contraintes.
Par ailleurs, on peut dire que l'état actuel de la filière ne permet pas la réalisation opérationnelle des quarante logements en terre crue porteuse dans l'intervalle économique et temporel fixé par la maîtrise d'ouvrage. Aujourd'hui, on ne sait pas qui pourrait construire un projet de telle envergure dans le Grand Ouest.

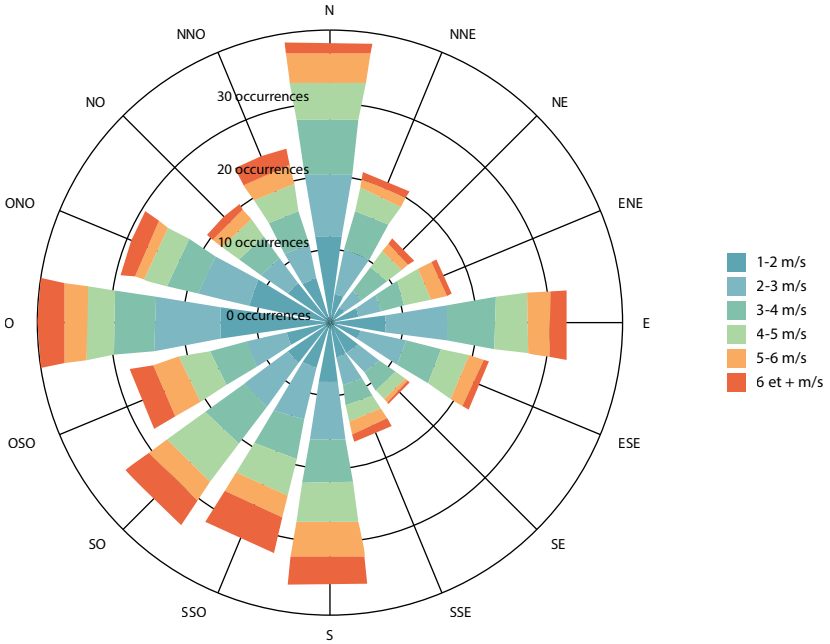
Variabilité du matériau et normalisation

Les compositions granulométriques et argileuses ainsi que l'état hydrique des terres de construction peuvent être très variables d'un terrain à un autre, dépendant de sa pédologie[21]. Ces caractéristiques ont un impact direct sur les propriétés physiques des terres crues. En fonction de la composition d'une terre, une technique de construction sera privilégiée plutôt qu'une autre car plus facile à mettre en œuvre. De plus, selon les caractéristiques de la terre trouvée sur site et les techniques maîtrisées par le maçon, il faut parfois ajouter de l'eau, des fibres ou du sable (enduits et BTC) pour permettre son utilisation.
Il est impossible de parler des propriétés de la terre crue de manière générale, c'est pourquoi sa mise en œuvre est bien empirique et variable d'un chantier à l'autre. Ceci explique également l'absence de normalisation et d'industrialisation de ce matériau. Or, il paraît nécessaire de mettre en place une réglementation, notamment de dimensionnement structurel, pour démocratiser la construction terre à plus grande échelle[22] et rendre son application plus facile et généralisable. Cela permettrait, entre autres, de contrôler son surdimensionnement structurel et, implicitement, la rentabilité de sa mise en œuvre.

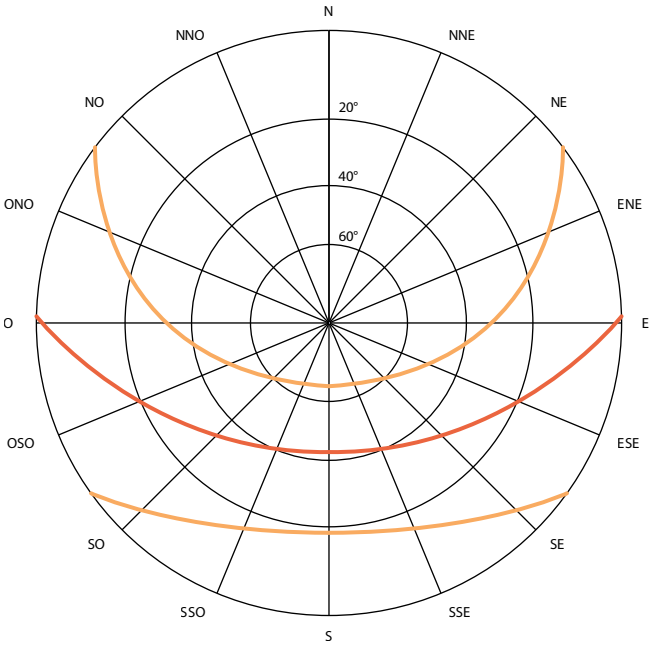
Mais comment faire ? Quelles formes peut prendre cette normalisation ? Nous ne pouvons pas y répondre dans le cadre des quatre projets présentés, mais ces questions nous intéressent car elles paraissent primordiales pour le développement de la filière.

21 Étude scientifique des sols.

22 Aujourd'hui, au-delà des préconisations des guides de bonnes pratiques, l'appel à un bureau de contrôle est nécessaire et la réalisation d'une ATEx peut être requise.



Vitesses, fréquences et directions du vent à Rennes.
Année 2017
Source : uve-rennesmetropole.fr



Course du soleil à Rennes.
Source : Andrew Marsh

Réversibilité et résilience

Le système structurel du bâtiment influence, d'une manière ou d'une autre, son évolutivité. Ici, on considère sa durée de vie ainsi que ses potentiels changements d'usages. Penser l'édifice au cours du temps, pour les cinquante ou cent prochaines années, implique de considérer la pérennité des systèmes constructifs mis en œuvre, l'évolution du climat de son site d'implantation mais aussi les évolutions possibles du territoire alentour.

La durée de vie d'un bâtiment est un sujet primordial dans un contexte de transition environnementale et génère plusieurs questions. L'édifice doit-il durer le plus longtemps possible ? Si oui, cela nécessite-il un entretien régulier ? Quels seront les impacts de sa fin de vie ? Si sa déconstruction est nécessaire, quels en seront les effets ?
La terre crue a ici un avantage majeur. Si un bâtiment composé de terre crue non stabilisée venait à être déconstruit, le démantèlement in situ de ces éléments ne générerait pas d'impact néfaste pour l'environnement. La terre pourrait alors retourner à son état d'origine. De plus, le réemploi des autres matériaux, notamment des éléments structurels en bois et des vitrages, pourra être grandement encouragé. D'autre part, les architectures vernaculaires locales témoignent de la pérennité des édifices en terre dans la région s'ils disposent d'une protection et d'un entretien adéquats.

Les questions de résilience programmatique sont prédominantes lorsque l'on cherche à construire un projet vertueux. Les usages et les modes de vie évoluent, et si toute la structure d'un bâtiment doit être modifiée au moindre changement de programme, alors son empreinte carbone ne cesse d'augmenter.
Plus spécifiquement, l'évolution des besoins sur ce territoire urbanisé imposera peut-être dans les prochaines décennies un changement d'usage pour les bâtiments. On pourrait par exemple imaginer la conversion des logements en bureaux. Par ailleurs, le sujet de réversibilité programmatique devient d'autant plus important lorsqu'on travaille avec des matériaux à plus faible résistance mécanique et donc aux contraintes structurelles importantes.
Finalement, la résilience programmatique va de pair avec la durée de vie du bâtiment. Plus ce dernier a une longévité importante, plus il est pertinent voire nécessaire de penser, dès sa conception, à sa potentielle réversibilité. Les quatre projets explorent ces thématiques avec différentes approches.
Un système structurel en façade génère un plan libre à l'intérieur du bâtiment, ce qui permet plus facilement sa réversibilité programmatique. En revanche, si la façade porteuse est en terre crue, elle nécessite alors une protection contre les aléas climatiques ainsi qu'un entretien régulier pour optimiser sa longévité.
Une solution structurelle en refends est plus contraignante pour l'évolution de la fonction du bâtiment car ces derniers scandent le plan. Néanmoins, la mise en place de refends en trumeaux viennent contrebalancer cette rigidité du plan et permettent plus de malléabilité dans la configuration des espaces. Par ailleurs, s'ils sont en terre crue, ils n'ont pas besoin de protection contre les intempéries et jouent le rôle de masse

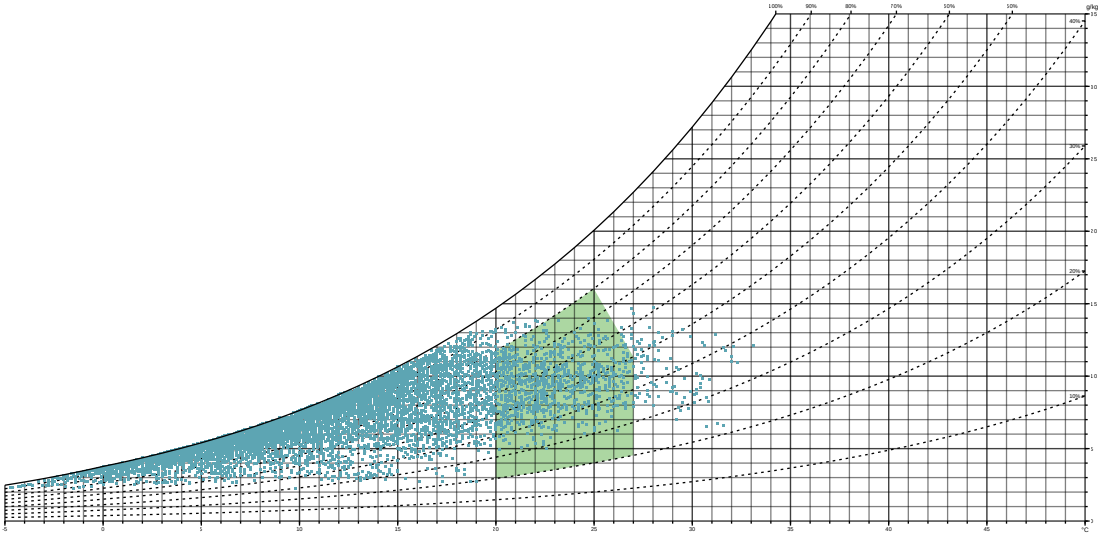


Diagramme de confort à Rennes en 2022
Ce diagramme psychrométrique montre la répartition sur une année type de la température et taux d'humidité de l'air extérieur à Rennes. La zone verte correspond à la zone de confort hygrothermique.
Source : climate.onebuilding.org
Moyenne établie selon les années les plus représentatives entre 1973 et 2021.

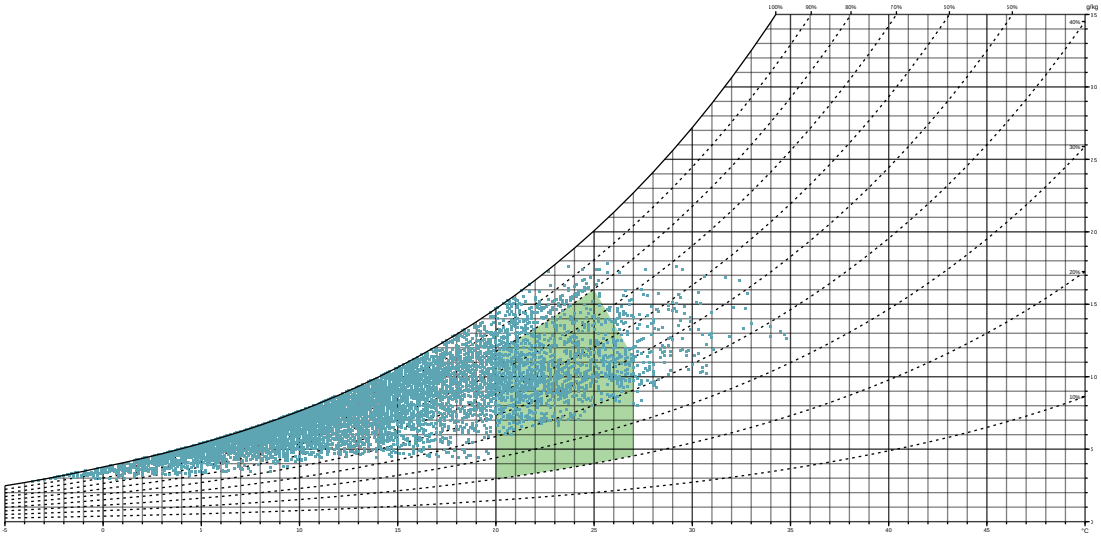


Diagramme de confort à Rennes en 2050
Avec les prévisions climatiques les plus défavorables du GIEC (scénario RCP 8.5), on s'attend à ce qu'il fasse de plus en plus chaud et de plus en plus humide. Les conditions restent toutefois assez favorables.
Source : climate.onebuilding.org
Projection réalisée avec Meteonorm

thermique et acoustique au sein de l'édifice. D'autre part, l'îlot et les barres recourent à une ligne intermédiaire de poteaux en bois pour permettre plus de flexibilité dans les (re)configurations spatiales.
Par l'utilisation d'un système structurel en grille et l'utilisation systématique de parois non porteuses entre les porteurs ponctuels, le projet de la nappe laisse également la place à un remaniement des cloisonnements pour d'autres types de logements ou d'autres programmes. Les porteurs en forme de croix restent très présents et nécessitent qu'on appuie la composition du plan sur eux pour en tirer parti. En outre, la nature ouverte de cette configuration suggère une potentielle agrégation qui compléterait cette nappe d'un peu plus de surface construite.

Principes bioclimatiques

La conception architecturale bioclimatique consiste à intégrer dès le début du projet les données climatiques du site d'implantation. Le design fait appel à des principes qui traitent notamment des questions d'orientation, d'éclairement, de ventilation et d'isolation des espaces. D'autre part, l'évolution du climat des prochaines décennies est également à prendre en compte lorsque l'on conçoit un bâtiment habitable pour cinquante ou cent ans.
Certains de ces principes sont appliqués pour les quatre variantes, tandis que d'autres sont spécifiques à chaque projet.
Voici ceux qui ont été privilégiés dans la conception :

- l'orientation des pièces de vie, cuisine et séjour, vers le sud ;
- de grandes ouvertures pour les façades sud ;
- des logements traversants, sauf dans le cas des plots où les logements bénéficient d'une double orientation ;
- une ventilation naturelle pour tous les espaces ;
- un éclairage naturel direct ou indirect pour toutes les pièces, sauf pour les pièces d'eau des typologies en barres ;
- des espaces extérieurs pour tous les logements : jardins privatifs, terrasses, balcons ou loggias.

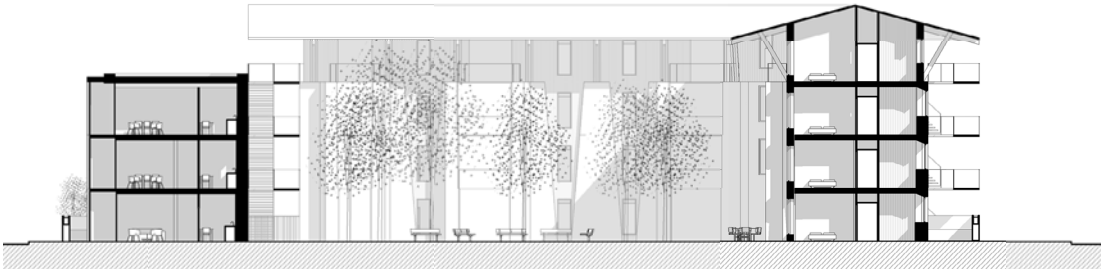
D'une manière générale, l'épaisseur de l'édifice détermine la distance entre l'enveloppe et chacun des espaces intérieurs. La variation de cette épaisseur influe sur la dimension et l'organisation des logements et des espaces communs au sein du bâtiment. Cela a également un impact sur l'éclairage et la ventilation naturels de ces derniers. Les quatre variantes de projet testent plusieurs épaisseurs de gabarits, ce qui amène à utiliser des principes bioclimatiques différents.
Par exemple, l'accès à la ventilation naturelle peut se faire soit par l'ouverture de fenêtres, soit par la présence de tour à vent au-dessus des pièces à ventiler, soit par un patio central hors d'eau mais aéré.
Les projets de la nappe et des barres sont orientés : leur implantation sur la parcelle implique des orientations spécifiques des logements tandis que ceux des plots et de l'îlot, dans leur morphologie urbaine, le sont moins. Cependant, la gestion des ouvertures et l'organisation des typologies de logement, pour ces deux projets, tirent au maximum parti de leurs implantations urbaines respectives.

L'îlot

Plan rez-de-chaussée

10 m

N



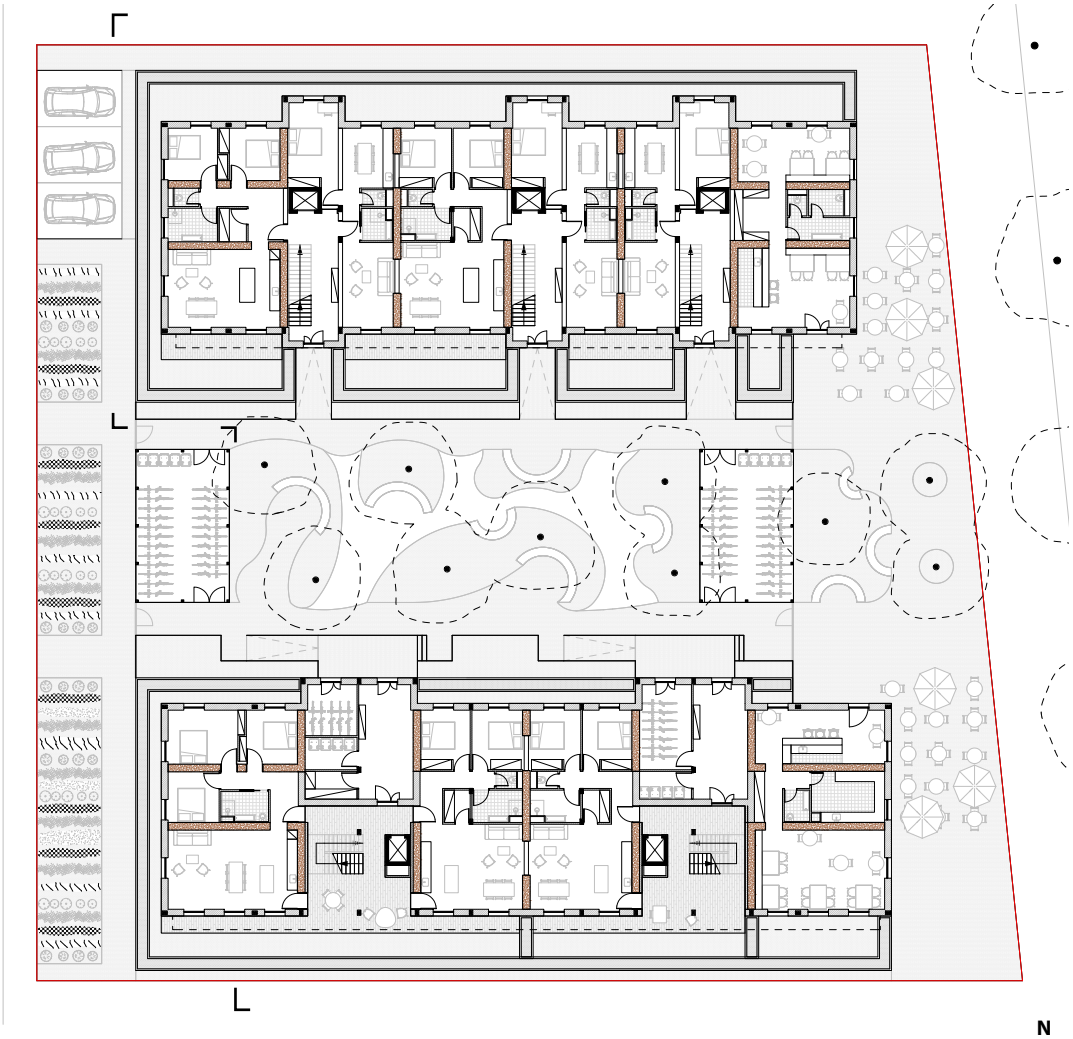
Coupe

Plan étage courant

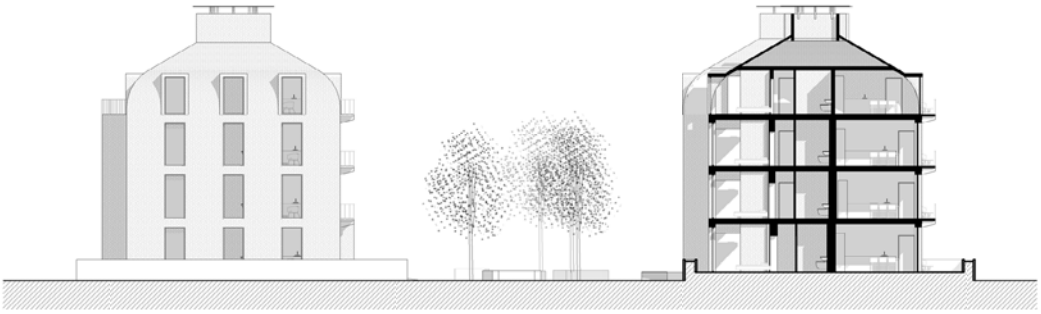
Le choix d'une enveloppe porteuse est le choix structurel le plus immédiat lors de la conception d'un bâtiment en terre : c'est le schéma qu'adoptent la plupart des architectures vernaculaires (longères bretonnes, tulous chinois, tours yéménites, entre autres). Ici, les plis effectués par les ouvertures en façades sud créent des contreforts qui améliorent la stabilité de l'ouvrage.
Le bâtiment est très fin afin de maximiser la luminosité et la ventilation des espaces. Les appartements sont distribués par une coursive extérieure qui se détache du bâtiment afin de garantir l'intimité des habitants. Ce choix permet de réduire le nombre d'escaliers et d'ascenseurs, et les coûts carbone, d'investissement et d'entretien qui y sont liés. En revanche, cela induit une structure secondaire pour supporter les passerelles.

Le niveau R+3 est réalisé en ossature bois afin de ne pas surcharger l'édifice, et supporte un « chapeau » qui protège à la fois les façades en terre et la coursive. Afin de laisser pénétrer plus de lumière en cœur d'îlot, la partie sud du bâtiment en est décoiffée.

Les barres



Plan rez-de-chaussée



Coupe

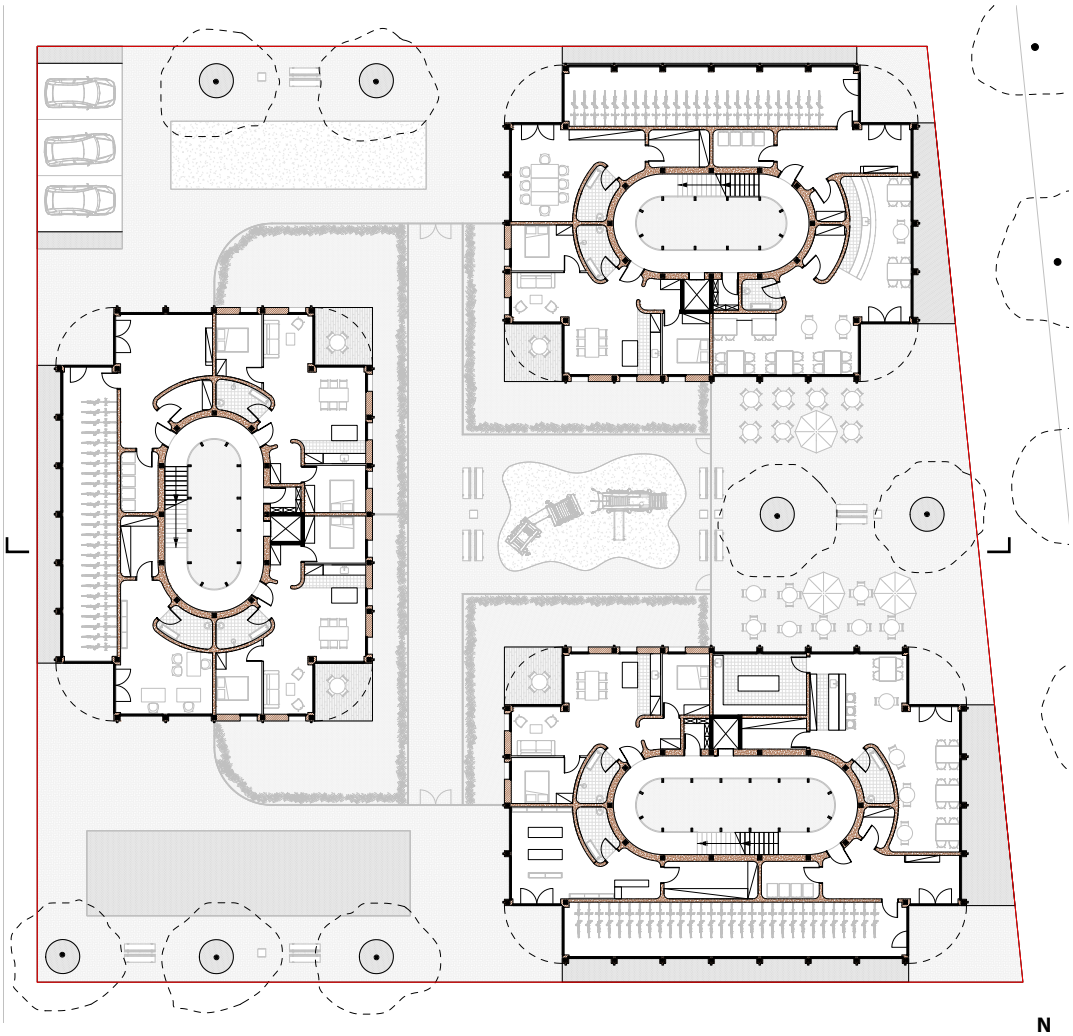
Plan étage courant

10 m

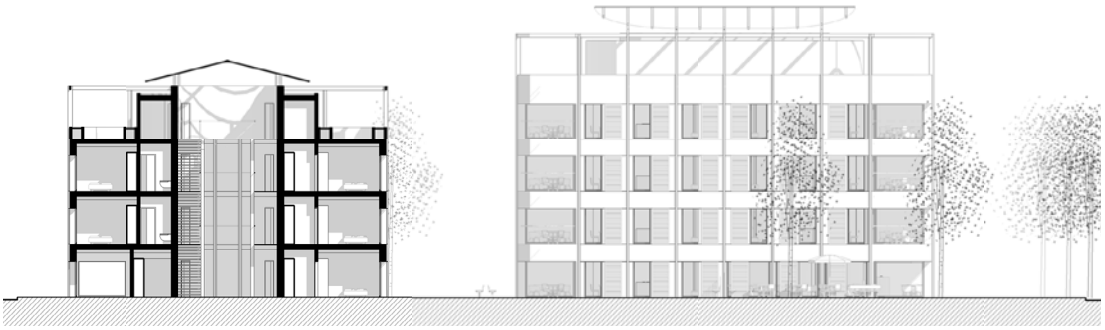
N

Dans cette option, une succession de refends porte les planchers et sépare les différents appartements. Ce système structurel se retourne aux extrémités de chaque barre afin de stabiliser l'ouvrage et d'éviter des pignons aveugles. Les appartements sont toujours traversants mais avec cette fois une plus grande épaisseur. Les salles d'eau ont été placées dans la partie centrale des barres, afin de privilégier l'apport de lumière naturelle dans les pièces de vie. Un dispositif de tours à vent permet, par tirage naturel, de ventiler ces pièces avec moins de dispositifs techniques. L'épaisseur est plus adaptée à une distribution par noyaux, qui desservent deux ou trois appartements par niveau. Ce dispositif est plus confortable qu'une coursive extérieure, mais il nécessite un plus grand nombre d'ascenseurs et d'escaliers.

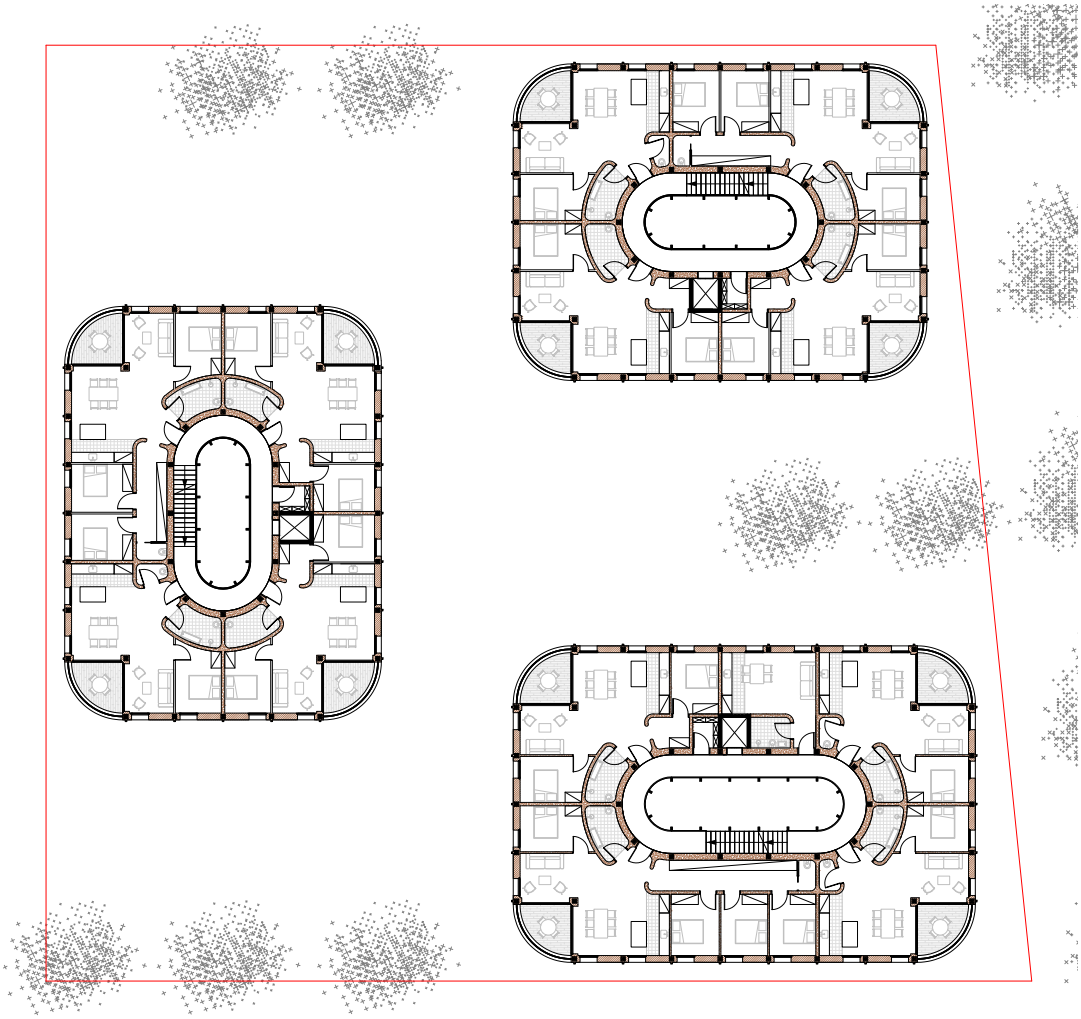
Les plots



Plan rez-de-chaussée



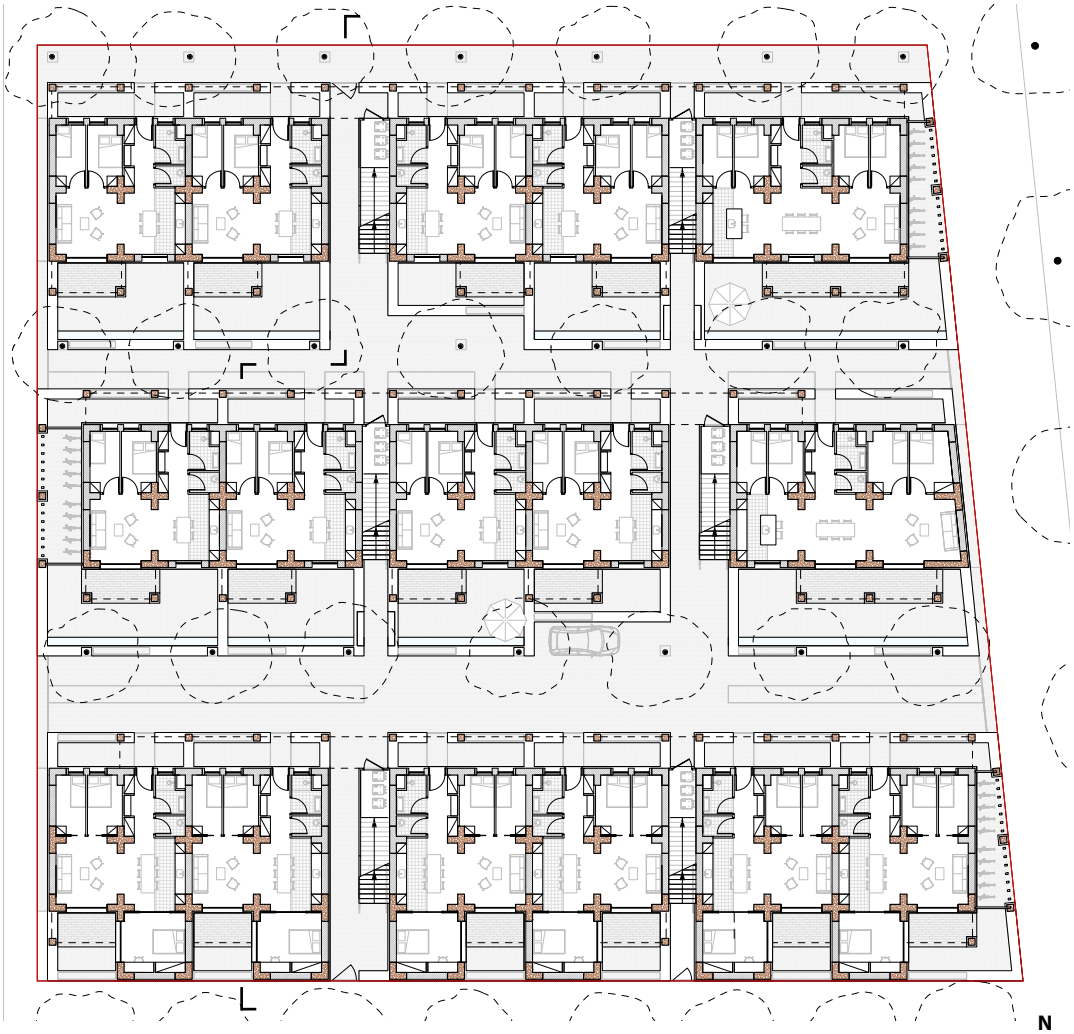
Coupe



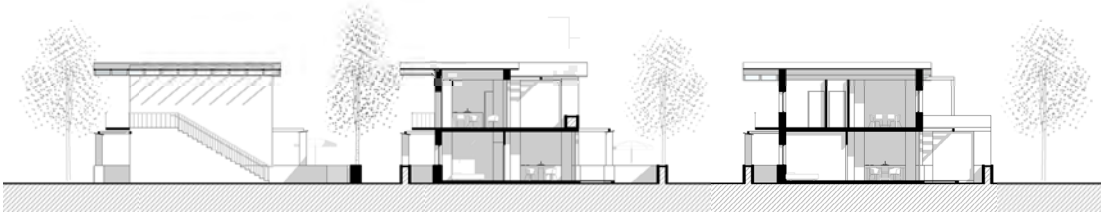
Plan étage courant

Ce projet se base sur une structure poteaux-poutres en charpente bois. Les murs extérieurs et les planchers sont constitués de caissons remplis de terre allégée afin de garantir l'isolation du bâtiment, une certaine inertie thermique et acoustique, et garantissent également le contreventement du bâtiment.
Chaque plot est composé d'un patio de distribution central qui permet d'accéder à quatre ou cinq appartements par niveau. A l'exception du studio, tous bénéficient d'une double orientation. La cour permet de ventiler naturellement et d'éclairer en second jour les pièces d'eau, situées dans une épaisseur de service.
Le rez-de-chaussée de cette forme urbaine génère des espaces ouverts, une grande partie des locaux en rez-de-chaussée est donc dédiée à des locaux de service, commerces et garage à vélos.

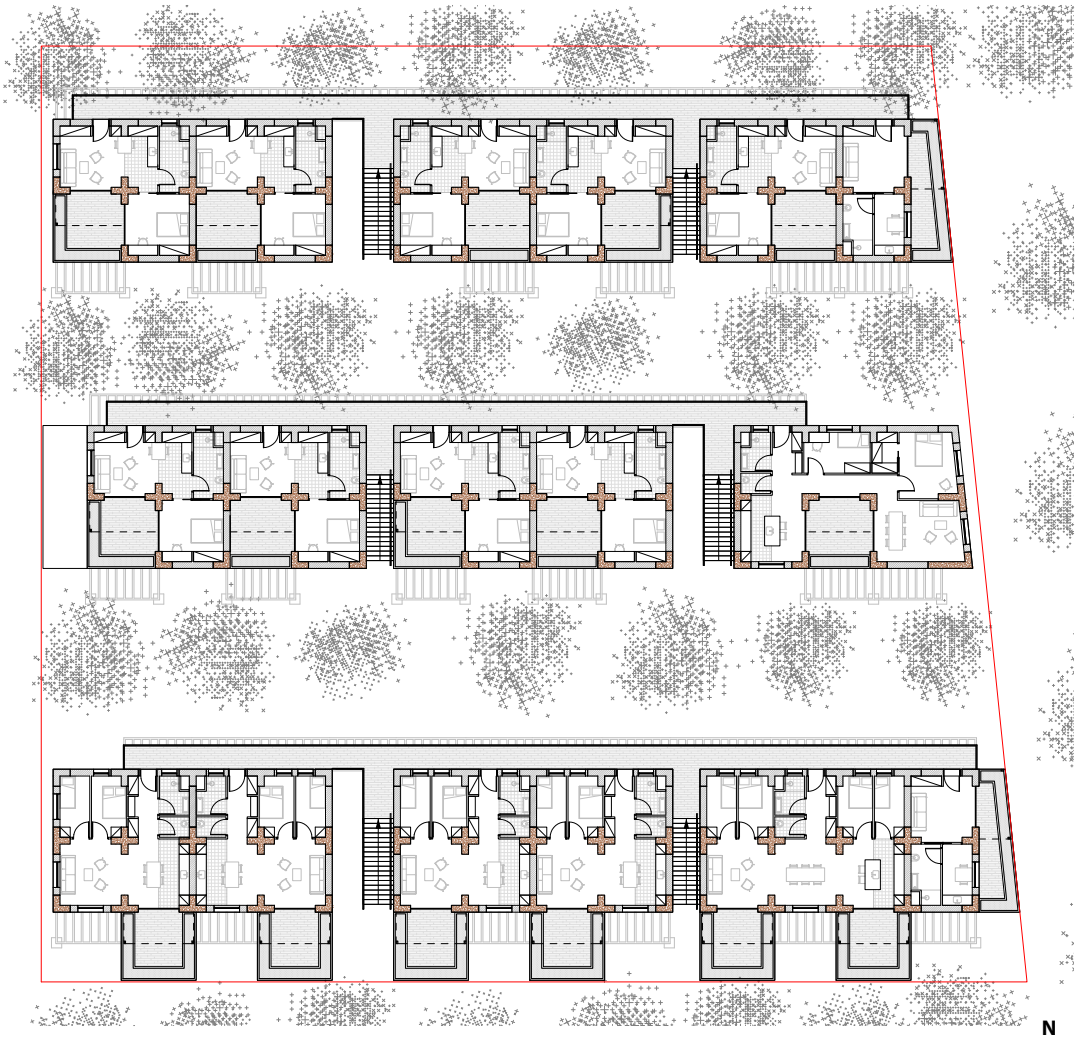
La nappe



Plan rez-de-chaussée



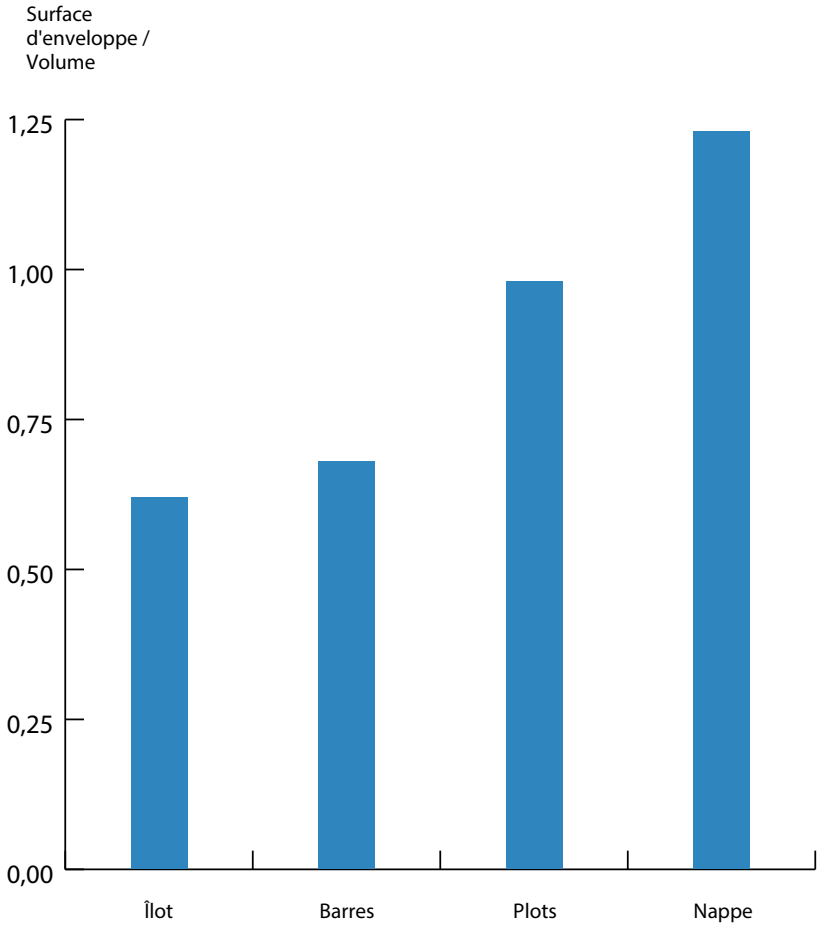
Coupe



Plan premier étage

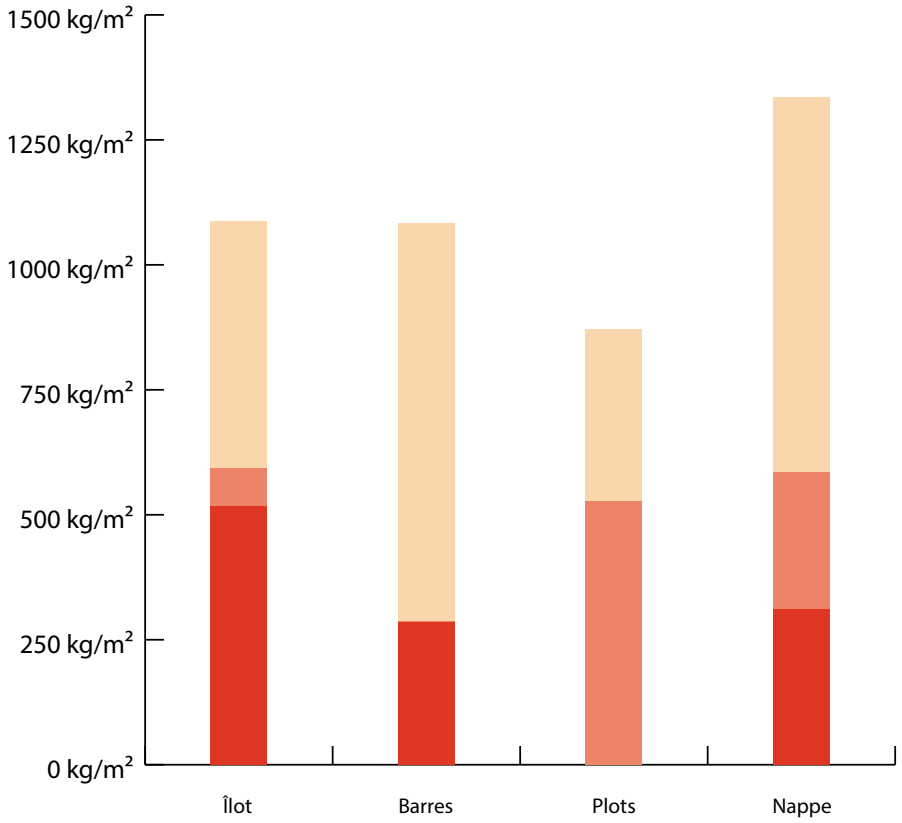
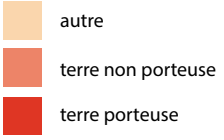
Ce projet est basé sur une grille de piliers auto-stables en forme de +, de T ou de L. Ces éléments porteurs sont réalisés en terre crue sur les façades exposées au rayonnements solaires directs, et en bottes de paille sur les façades ombragées, afin d'utiliser les qualités d'inertie et d'isolation respectives de ces matériaux. Toutes les pièces bénéficient d'une ouverture directe sur l'extérieur.
Les habitants du rez-de-chaussée accèdent à leur appartement directement par les venelles, ce qui apparente leur expérience à celle de la maison individuelle, dont la désirabilité est encore importante aujourd'hui. Une des venelles est accessible aux véhicules pour des besoins de service ou de secours. A l'étage, trois coursives de distribution desservent les appartements par le côté nord. Ce projet fait le choix de se passer d'ascenseurs, imposés à partir du troisième étage.

Compacité



La compacité peut préfigurer les performances thermiques des différentes propositions, mais cela dépend également de la composition de l'enveloppe. La mesure de la quantité d'enveloppe par m² de plancher est également un bon indicateur du coût de construction.
Les barres et l'îlot sont les propositions les plus compactes. Les plots, avec leur cour considérée comme extérieure, déploient un peu plus de surface d'enveloppe. La nappe, pour réduire les vis-à-vis et garantir un éclairement généreux, a fait le choix d'une morphologie beaucoup plus morcelée.

Masse



Ce graphe représente une estimation de la masse de matière utilisée dans chaque proposition, rapportée à la surface de plancher. Les barres et l'îlot ont un poids total identique mais l'utilisation d'une enveloppe porteuse utilise beaucoup plus de terre. On constate qu'il est possible d'utiliser une quantité considérable de terre sans pour autant en avoir l'usage structurel. Pour les plots, ce choix permet de réduire la quantité d'autres matériaux, et en fait le projet le plus léger au m². Le projet de la nappe, pour lequel nous avons considéré de grandes surfaces d'enduits notamment du fait de l'utilisation d'une enveloppe en paille, utilise également beaucoup de terre non porteuse.