

# RESPONSIVE FACADES

OHLHOFF RABAN - 000457528

Bachelier en architecture 3ème année

Atelier Digital Fabrication Studio

ULB-Faculté d'Architecture La Cambre-Horta  
Place Eugène Flagey 19,  
1050 Bruxelles



# TABLE DES MATIÈRES

ENJEUX	3
PROCESSUS	3
ABSTRACT	4
HYPOTHÈSE	7
ÉTAT DE L'ART	7
CONCLUSION	9
APPROCHE	10
OBJECTIFS	10
ÉTAPE 1 : SCÉNARIO	12
ÉTAPE 2 : ANALYSE DES SYSTÈMES ET MÉCANISMES VARIÉS	16
ÉTAPE 3 : CONCEPTION DES MODULES CINÉTIQUES	35
ÉTAPE 4 : MÉCANISMES DE RÉGULATION	48
ÉTAPE 5 : SIMULATION	59
CONSLUSION	66
SUITE	67
LOGICIELS UTILISÉS	68
BIBLIOGRAPHIE	71



# ENJEUX

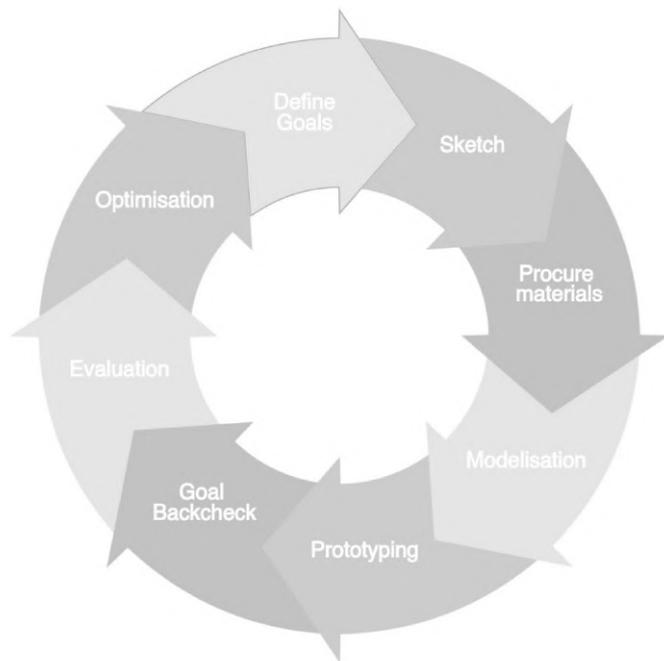
Ce book sert d'outil de documentation et de synthèse pour les recherches effectuées dans le cadre du sujet choisi pour le deuxième trimestre 2020 dans l'atelier Digital Fabrication Studio. Ce Studio pose des questions interdisciplinaires entre technologie, recherche et architecture qui peuvent être développées librements, sans être contraintes de rester dans des domaines limités. Il s'agit en effet de développer des hypothèses sur l'avenir de l'architecture en prenant en compte l'ensemble des domaines qu'il peut être intéressant de relier en vue du processus de conception du projet. Dans chaque aspect de ce processus, il est important de prendre en compte l'analyse des nouvelles connaissances scientifiques et de mener des recherches approfondies sur les acquis de la science actuelle. Néanmoins, il est tout de même important de baser l'expérimentation sur les inventions qui ont émergés au cours de l'histoire.

Les principaux enjeux de cet atelier ne sont pas d'inventer de nouveaux objets mais plutôt d'approfondir l'étude d'un sujet spécifique avec toutes les publications et recherches existantes afin de formuler une hypothèse de recherche pertinente. Il s'agit ensuite d'entamer un processus d'expérimentation qui sera accompagné d'une documentation détaillée. Le but de ce processus sera d'apporter des réponses aux questions posées auparavant. De cette manière, le cycle d'expérimentation fera progresser la recherche et pourra éventuellement aboutir à une solution objectivée, mais soulèvera dans tous les cas de nouvelles questions qui pourront être poursuivies par la suite.

Le fonctionnement de l'atelier est fortement lié au Fablab de la Faculté d'architecture et donne ainsi accès à de nombreux outils et moyens de conception et d'expérimentation numériques. Ce lieu fonctionnera également comme une bibliothèque de connaissances partagées par chaque individu et favorisera donc la genèse de connaissances collectives. En raison de la restructuration autour de l'épidémie Covid-19, l'atelier est transposé dans l'espace virtuel. Cela nécessite une révision du processus d'expérimentation.

# PROCESSUS

En raison de la situation contraignante d'isolement social, l'expérimentation et la recherche sont largement effectuées de manière numérique à l'aide de logiciels spécialisés. L'accès aux imprimantes 3D et autres outils Fablab n'étant plus assuré, la fabrication des modèles se fait presque entièrement virtuelle grâce aux outils de conception CAD paramétrique, de sorte que la présentation des objets sera également assurée à l'aide de logiciels de rendu. Tout cela nécessite une familiarisation importante avec les logiciels qui seront envisagés d'être utilisés.



Représentation schématique de la démarche poursuite

Une attention particulière dans le choix des logiciels à utiliser est accordée à l'emploi des logiciels sous licence open source. Dans ce contexte, je me suis familiarisé avec l'utilisation et le fonctionnement des outils suivants : FreeCAD (modélisation paramétrique 3D), LibreCAD (conception CAD 2D), Blender (modélisation et rendu 3D), Arduino (codage), Antimony (modélisation paramétrique 3D nodebased), GIMP (manipulation d'images), GeoGebra (manipulateur mathématique) pour ne citer qu'une sélection. Une liste exhaustive des logiciels utilisés pour réaliser ce travail est jointe en annexe.

## ABSTRACT

Si l'on compare les éléments architecturaux d'un bâtiment avec les corps présents dans la nature, on constate un certain nombre de similitudes. Les façades de nos bâtiments peuvent être considérées comme l'équivalent des peaux animales et végétales, partageant les mêmes fonctions principales : régulation de la température, aération, absorption de l'énergie solaire, protection contre la pluie et limite entre l'intérieur et l'extérieur. Ces fonctions sont remplies dans l'exemple naturel par une adaptation cinétique de la peau avec des poils hérissés, une ouverture ou une fermeture des pores ou l'agrandissement de la surface pour transformer l'énergie solaire en énergie utile pour l'organisme. L'idée de s'inspirer de la nature et d'examiner ce qui peut être appliqué de manière bénéfique en architecture ou en technologie est appelée la bionique.

Cette logique a conduit à la conception de façades mobiles qui peuvent s'adapter aux changements de l'environnement, qui n'est jamais constant. Ces réflexions ne sont pas nouvelles mais ne sont appliquées que dans de cas rares ou pour des pavillons d'exposition inhabités.

La recherche et l'expérimentation sont centrées sur la question de l'utilité de l'architecture cinétique pour l'habitant. Ce degré d'utilité peut être analysé à une échelle micro ou bien à une macro-échelle. Il s'agit de simuler et d'observer les avantages et les inconvénients en termes de facteurs qui affectent une pièce mais aussi ce qui pourrait être avantageux pour tout un quartier ou même toute une ville. Afin de pouvoir mener à bien cette recherche, il est essentiel de faire l'inventaire des différentes exemples dans le domaine de l'architecture cinétique, qu'elles soient réalisées ou purement théoriques.

Afin de pouvoir délimiter et concrétiser des exemples d'architecture adaptée au contexte, je concentrerai mon exploration sur l'utilisation de ces mécanismes au niveau des façades. En effet, ces éléments du projet construit qui constituent la limite entre l'extérieur et l'intérieur sont intéressants pour cette analyse car ils s'agit des composants à rôle structurel réduit pour la majorité des cas, ce qui permet une certaine liberté et donc une complexité au niveau de leurs fonctionnalités qu'ils peuvent adopter. Grâce à cette éventuelle multifonctionnalité, une flexibilité d'adaptation en fonction du contexte peut apporter des avantages pour l'ensemble du projet. Enfin, il est également important de ne pas nier l'importance de l'esthétique dans le métier de la construction. C'est pourquoi l'analyse des avantages et des inconvénients ne porte pas seulement sur la fonctionnalité mais aussi sur l'aspect visuel tel que perçu par l'habitant et l'observateur.

Le travail consiste en plusieurs étapes consécutives. Tout d'abord, un scénario est établi en tenant compte des changements climatiques actuels et en formulant les défauts énergétiques des enveloppes architecturales habituellement utilisées. Ensuite, il est temps de passer à l'étape de l'analyse d'exemples concrets et de leurs avantages et inconvénients. Après cela, la phase d'expérimentation peut être entamé avec la recherche des différentes formes que peuvent prendre ces mécanismes en deux comme en trois dimensions. L'étape suivante consiste à développer différents mécanismes de gestion pour s'adapter aux changements contextuels et à les classer selon leurs modes de fonctionnement. L'expérimentation est conclue par la phase de simulation au cours de laquelle les éléments imaginés sont appliqués à des situations réelles pour démontrer leur fonctionnement.

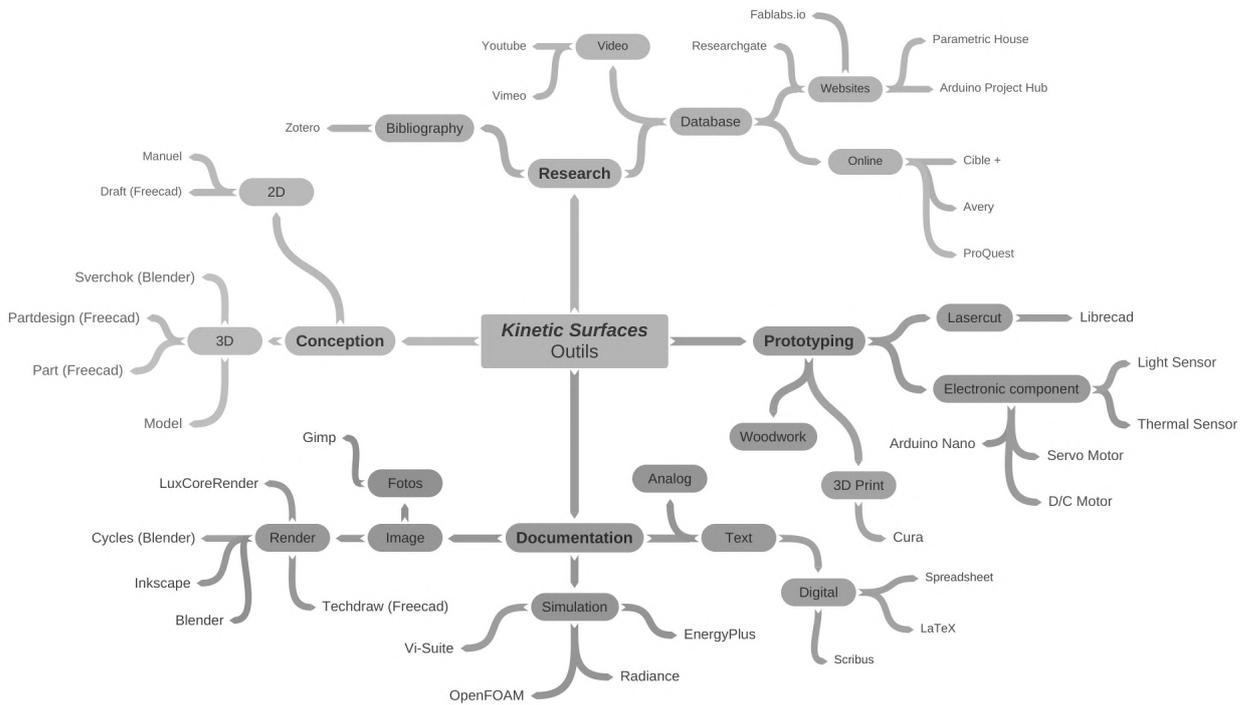
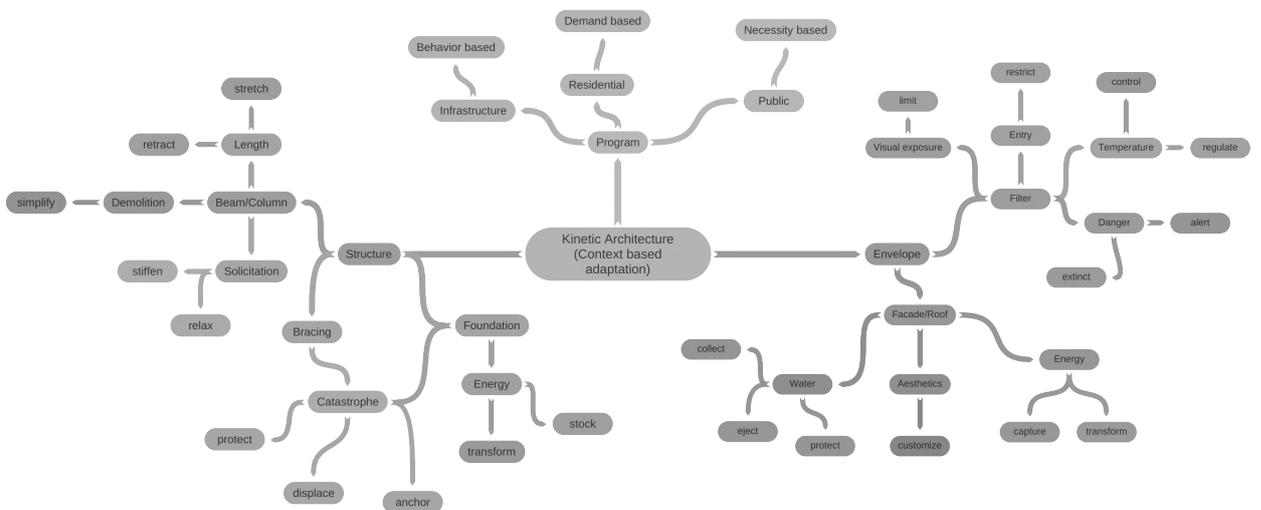


Diagramme des outils utilisés selon leurs fonctionnalité

Diagramme des fonctionnalités possibles d'une architecture cinétique



# HYPOTHÈSE

La tendance à rendre l'architecture moins statique et à favoriser les mécanismes qui rendent les bâtiments sensibles aux changements de contexte s'est répandue dans le monde entier. Ce concept ne fait décidément plus seulement parti des scénarios fictifs. Il est d'autant plus important de s'interroger sur le rôle que cette architecture mobile a pris aujourd'hui. Ces structures ne voient-elles pas le jour uniquement comme le résultat d'une recherche artistique ou esthétique? Repoussées aux façades des bâtiments et contraintes à rester en deux dimensions, jouent-elles peut-être seulement un rôle décoratif? Qu'en est-il des bénéfices fonctionnels pour l'utilisateur? La valeur ajoutée esthétique vaut-elle les inconvénients éventuels de ces façades?

Toutes ces questions nécessitent une analyse des techniques cinétiques existantes mais aussi l'expérimentation de nouvelles approches pour atteindre une certaine adaptabilité souhaitée. Enfin, une conclusion sur l'utilité de ces structures de façade peut être tirée en pesant les avantages contre les inconvénients des mécanismes élaborés pendant la phase d'expérimentation.

# ÉTAT DE L'ART

Il n'est pas aisé de cerner les premières idées d'architecture cinétique dans l'histoire de la construction. Les ponts-levis sont considérés comme les premières approches à ce mode de construction. Cependant, on pourrait aussi abstraire une simple porte avec des charnières comme élément cinétique ou les pierres qui couvraient les accès aux habitations de nos ancêtres. En général, une œuvre architecturale devient cinétique dès qu'elle perd son caractère statique. Cela signifie que nous ne connaissons pratiquement aucun exemple d'architecture contemporaine qui ne soit pas caractérisé comme étant au moins partiellement cinétique. Il est donc important ici de définir le terme plus concrètement avec une adaptation appropriée au contexte architectural actuel : une œuvre d'architecture qui se veut cinétique doit prendre en compte le contexte et y adapter son mouvement. L'élément régulateur est de préférence réactif sans interaction humaine. Si ce n'est pas le cas, l'information contextuelle peut être régulée par une décision de l'individu pour créer un effet cinétique. Un exemple historique remarquable dans le contexte de cette définition est le vélum déployable du Colisée du Rome antique. Cette structure amovible servait de protection contre les changements climatiques tels que le soleil et la pluie. La définition contemporaine de la cinétique en architecture émerge du mouvement futuriste du début du XXe siècle, qui était dans un premier temps purement théorique. Aux alentours des années 1940, les premières expérimentations concrètes ont été menées avec un succès relativement modéré.

Notamment les recherches menées par *Buckminster Fuller* ou encore les maisons héliotropiques sont des exemples de cette période. Ici, l'orientation n'est plus prédéfinie comme dans les maisons classiques mais peut être modifiée en fonction de l'angle solaire au cours de la journée. Le *Revolving Solarium* et la *Villa Girasole* sont des exemples de ce type d'architecture. Une trentaine d'années plus tard, les ingénieurs et architectes *William Zuk* et *Roger Clark* ont popularisé le concept d'architecture cinétique avec la publication de leur livre du même nom. Parmi les réalisations contemporaines importantes, citons les façades des tours *Al Bahar* à Abou Dhabi avec un axe de force horizontal et une forme triangulaire, l'Institut du monde arabe à Paris avec des ouvertures en iris, le *Media-TIC* à Barcelone avec ses coussins gonflables ou encore le *Thematic Pavillion* à Yeosu où des lamelles d'ouverture imitent les branchies.

« *An architecture can adapt to changes taking place within a set of pressures acting upon it and the technology that provides the tool for interpretation and implementation of these pressures* »

(ZUK & C LARK)

Il est à ce stade temps d'introduire le deuxième sujet fortement lié à la cinétique responsive : la bionique. Le terme bionique est composé des mots biologie et technique. Il décrit la manière d'employer des matériaux et des techniques en tenant compte des exemples naturels. Ce concept a d'abord été exploré dans la recherche militariste, mais acquis un statut important dans de nombreux domaines scientifiques en dehors du militaire entre autre en médecine, mathématiques, robotique, ingénierie, design et politique. La bionique est appliquée dans presque tous les domaines, à différentes échelles et d'innombrables façons variés. Elle a donc également trouvé une place importante dans l'architecture. Depuis le début de l'humanité, la principale source d'inspiration a été l'exemple naturel. On peut citer une multitude d'exemples historiques tels que la colonne égyptienne, les maisons rudimentaires en briques de terre crue, l'art gothique et l'art nouveau. Des réalisations plus contemporaines à caractère bionique sont également présentes sous une large gamme. *Santiago Calatrava* oriente souvent ses explorations architecturales autour d'inspirations naturelles ainsi que *Norman Foster*, *Herzog et de Meuron*, *Nicholas Grimshaw* et *Mick Pearce* pour n'en donner qu'une sélection.

Le modèle naturel peut servir d'inspiration de différentes manières : au niveau de l'organisme, du comportement ou de l'écosystème. Une source d'inspiration naturelle peut être appliquée à une recherche formelle, ce qui est souvent le cas en architecture. Mais cet aspect n'a que peu d'intérêt pour ce travail. Les applications pertinentes pour cette analyse sont celles qui concernent le comportement ou l'écosystème. C'est-à-dire qu'il s'agit de s'inspirer des applications dans les domaines des sciences techniques ou naturelles comme l'ingénierie, la mécanique, la chimie ou la physique.

## CONCLUSION

Les notions romantisées de ces deux termes peuvent être distinguées dans le contexte architectural. L'architecture cinétique est devenue le symbole d'une tendance futuriste. Un mouvement architectural qui prend l'aspect mobile de certains éléments pour exprimer une finalité artistique. Le *Bund Finance Center* de *Foster et Heatherwick Studio* en est un exemple. La partie esthétique ou artistique mérite certainement d'être prise en compte dans la conception d'une façade cinétique, mais elle est rarement suffisante pour former un élément justifiable et optimisé. La fonctionnalité pour l'utilisateur doit être fondamentale. Toute cette critique de la dénaturation du terme est également applicable à l'architecture biomimétique. Ici, la tendance à l'imitation formelle conduit à oublier la motivation fondamentale de s'inspirer de la nature.

*Milwaukee Art Museum*  
*Calatrava*  
Architecture cinétique et  
bionique



*Bund Finance Center*  
*Foster et Heatherwick Studio*  
Architecture cinétique  
artistique



C'est pourquoi j'estime qu'il est important de revenir à une manière d'imitation fonctionnelle. Plutôt que de s'inspirer d'une forme naturelle, nous devrions revenir à puiser l'inspiration de modes de fonctionnements, des logiques intrinsèque à un organisme ou même à un écosystème. La beauté de la forme suivra naturellement.

Ces critiques influencent évidemment la manière de progresser et d'évaluer les différents types de structures cinétiques qui sont développés pendant la phase d'expérimentation.

## APPROCHE

Dans le cadre de cette recherche, l'aspect cinétique et la bionique guident la démarche à pied égale. Comme expliqué précédemment, le champ d'éléments dans lequel l'expérimentation s'inscrit est aussi large que possible et intègre principalement des inspirations des sciences naturelles et mécaniques. Par exemple, la question de l'apport énergétique des modules de façade. Les modules utiliseront-ils directement l'énergie des rayons du soleil? Ou bien cela se fera-t-il à l'aide de simples câbles qui distribuent le courant électrique? Ou au niveau fonctionnel du mécanisme : On pourrait imaginer des mécanismes basés sur des réactions physico-chimiques ou des systèmes qui sont régulés par divers microprocesseurs et récepteurs. Tout cela en adéquation avec les différentes approches de la bionique, du fonctionnement comme un seul organisme ou plutôt comme un écosystème.

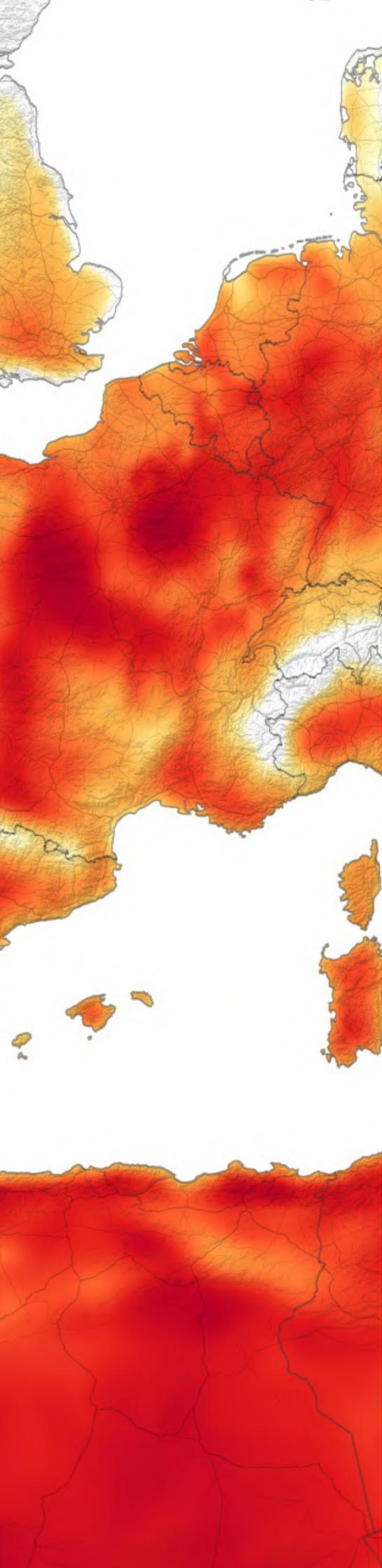
## OBJECTIFS

L'objectif de ce travail est de formuler des réponses aux hypothèses de recherche et ainsi d'interroger l'architecture cinétique dans l'application en façade. Une évaluation des avantages ainsi que des inconvénients permet de tirer une conclusion sur l'utilité de ces structures.

Le travail est contraint de rester théorique et la partie expérimentale sera principalement simulée numériquement en respect de la situation actuelle de l'épidémie CoVid-19. Il est donc évident que cette recherche fournira la base scientifique et expérimentale pour les travaux ultérieurs de l'année prochaine, qui consisteront en la réalisation d'une des structures qui s'est avérée la plus efficace entre les différents systèmes simulés.

Le deuxième objectif de cette expérimentation est l'effort de puiser l'inspiration pour les mécanismes des différents champs et de tenter de franchir les frontières entre les disciplines.





## ÉTAPE 1 : SCÉNARIO

Notre climat sur terre n'est pas stable. Il y a une variation naturelle entre le jour et la nuit, d'un mois à l'autre, l'été et l'hiver, et à plus grande échelle, de la période glaciaire aux périodes interglaciaires. Il s'agit de fluctuations dues à des processus biologiques et physiques équilibrés.

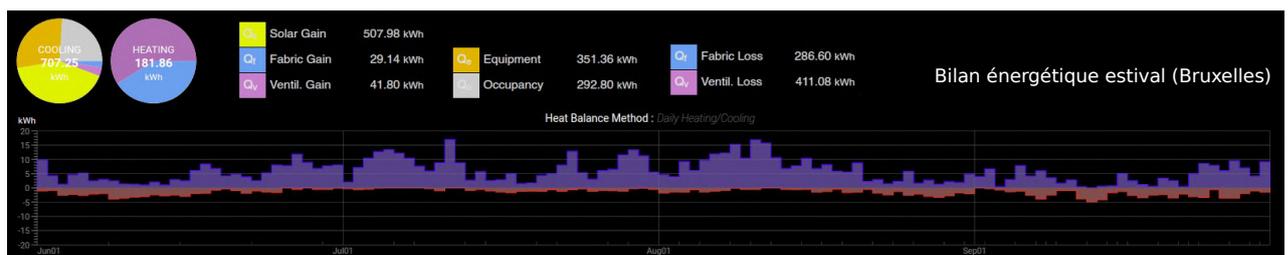
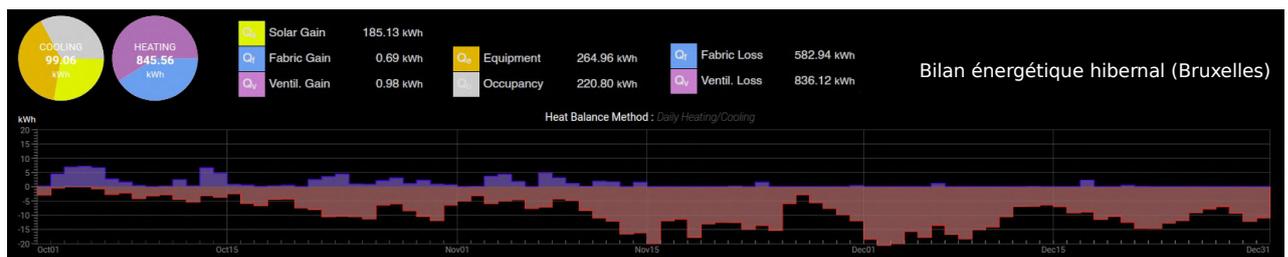
Depuis la révolution industrielle du 18e siècle, l'augmentation de la production et du nombre de la population mondiale a montré des effets déséquilibrants qui se rajoutent aux variations naturelles. Le climat mondial tend à s'extrémiser, favorisé par des réactions chimiques en chaîne. Aujourd'hui, la gravité de la situation qui menace l'existence de l'homme sur terre ne fait aucun doute. Le monde scientifique décrit trois principes généraux pour contrer cette tendance : l'adaptation, la mitigation ou la transformation.

Depuis le début du millénaire, nous savons avec certitude que le changement climatique est une réalité incontestable, avec des conséquences pour la planète et les hommes qui nécessitent d'urgence un changement de notre comportement. Il est clair que l'homme doit s'adapter aux changements environnementaux. Mais est-ce suffisant ? L'espèce humaine est dotée d'un pouvoir d'adaptation extraordinaire et unique, mais pour pouvoir contrer ces tendances qui menacent la vie sur terre, il est nécessaire de poursuivre des stratégies de mitigation voire de transformation pour inverser les dégâts causés au fil des dernières décennies et revenir à un état d'équilibre. Ces objectifs sont certainement exigeants et nécessitent des approches radicalement différentes de la politique environnementale actuelle. D'une manière générale, ils nous présentent trois stratégies de transformation : la sobriété, l'efficacité et la résilience.

Le secteur de la construction est l'un des principaux émetteurs de carbone dans l'atmosphère, bien que des concepts tels que la construction passive montrent que cela n'est pas nécessaire et qu'il est possible de réduire la consommation d'énergie primaire non-renouvelable de manière drastique en utilisant des techniques *low-tech*. Ces approches alternatives en architecture sont basées sur l'optimisation de l'utilisation des sources d'énergie renouvelables gratuites. C'est-à-dire principalement les gains solaires. En réduisant la consommation d'énergie fossile ou fissile, et en compensant le reste par l'utilisation et la transformation de l'énergie solaire en énergie utile pour le chauffage ou l'électricité, les bâtiments passifs ont un bilan énergétique très réduit, voire positif. Les stratégies de la passivité sont très diverses et une explication approfondie risque de dépasser le cadre de ce travail. C'est pourquoi je me concentre sur l'utilisation des apports gratuits par le rayonnement solaire. En effet, l'utilisation optimale de l'énergie solaire est celle qui ne passe pas par des équipements intermédiaires de transformation d'énergie comme les panneaux photovoltaïques, car ils sont toujours liés à des pertes d'un certain pourcentage causées par l'énergie grise ou l'inefficacité du mécanisme. Dans les années à venir, le nombre de jours d'ensoleillement va augmenter, ce qui signifie que nos maisons seront exposées au rayonnement solaire pendant de plus longues périodes. Cela est certainement avantageux en hiver pour réduire les besoins de chauffage mais devient un problème en mi-saison et en été, amplifié par l'augmentation de l'épaisseur d'isolation de nos maisons ces dernières années. Conformément aux principes d'efficacité, il s'agit donc d'augmenter les apports solaires en hiver et inversement en été de réduire le risque de surchauffe afin de ne pas perdre les économies d'énergie par une climatisation intensive. En outre, les rayons du soleil ne fournissent pas seulement de la chaleur par le biais du rayonnement infrarouge, mais aussi de la lumière visible.

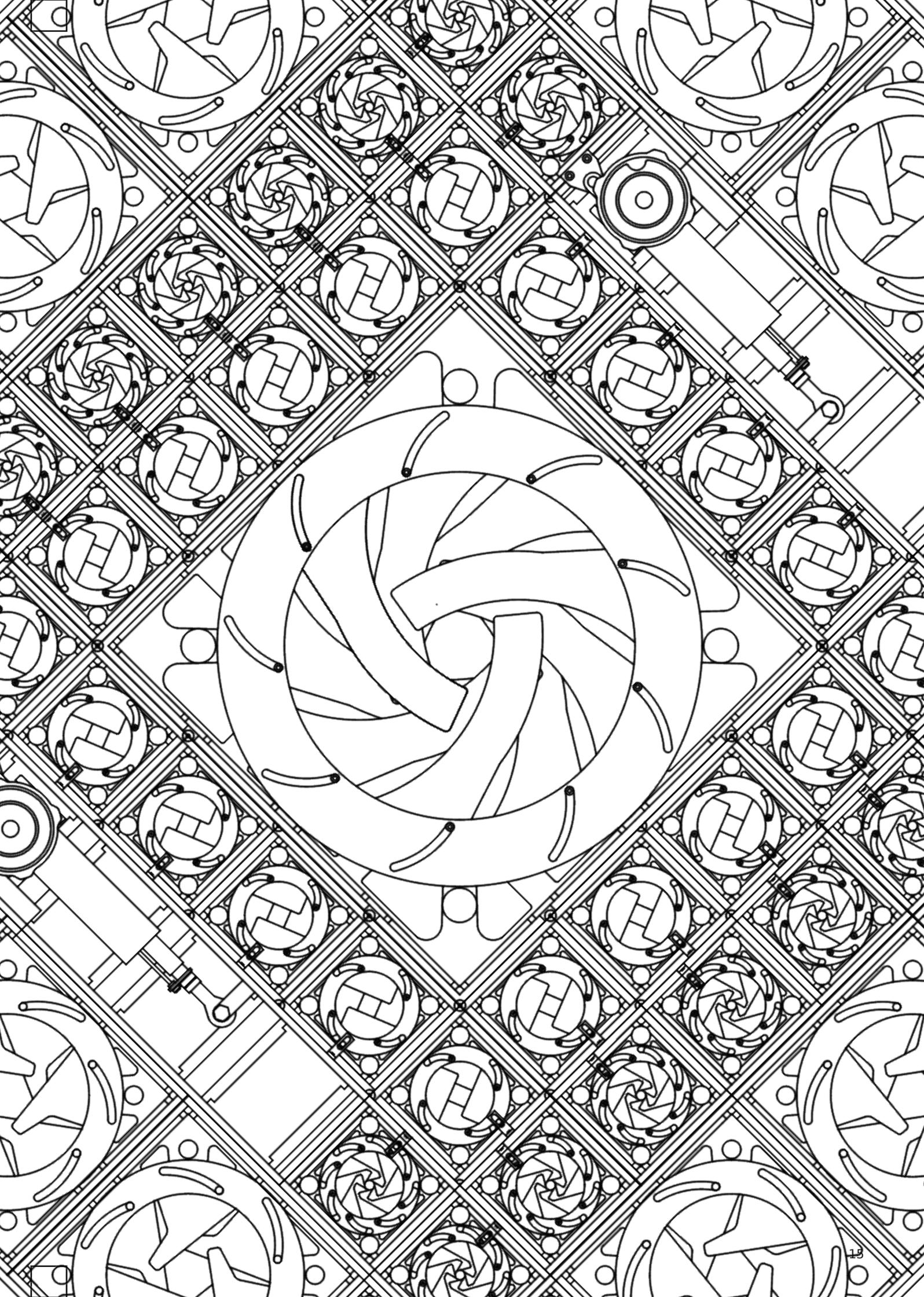
Il est donc possible de réduire les besoins en chauffage, climatisation et éclairage artificiel tout en travaillant à l'optimisation de l'utilisation du rayonnement solaire.

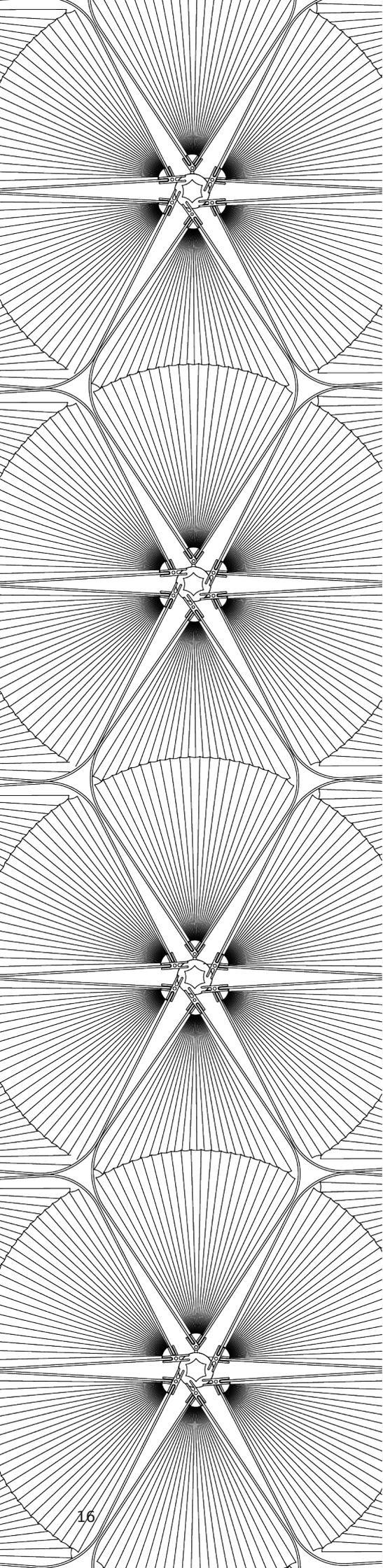
Comme expliqué précédemment, les besoins en énergie et en éclairage varient selon l'heure de la journée, le mois de l'année et les années. Toutes ces réflexions donnent un sens très fonctionnel aux façades responsives, en particulier lorsqu'il s'agit de brise-soleil adaptatifs pour réguler la perméabilité de l'enveloppe architecturale à l'exposition solaire.



Les schémas ci-dessus montrent la situation énergétique en hiver et en été simulées pour une pièce de 24 m<sup>2</sup> d'un volume de 84 m<sup>3</sup> située à bruxelles. La façade sud est percée de deux fenêtres de 1,7 m<sup>2</sup> et leurs coefficients de transmission thermique sont de 1,2 W/m<sup>2</sup>K pour les vitres et de 0,18 W/m<sup>2</sup>K en moyenne pour le reste de l'enveloppe isolée. Dans cet exemple, les fenêtres sont constituées d'un double vitrage standard avec un coefficient de transmission solaire de 72 %. Comme attendu, la principale consommation d'énergie en hiver est due aux besoins de chauffage et à la perte thermique de l'enveloppe. Les gains solaires en hiver sont relativement faibles.

En été, on observe un inversement du bilan énergétique: le besoin de chauffage est fortement réduit mais l'énergie nécessaire au refroidissement s'est d'autant augmenté. La consommation totale d'énergie comparée entre l'hiver et l'été est donc presque équilibrée. L'étape 5, à la fin du travail, montre ce qu'un filtre cinétiquement adaptatif peut apporter pour augmenter les gains solaires et la lumière visible en hiver et réduire le risque de surchauffe et d'éblouissement en été.





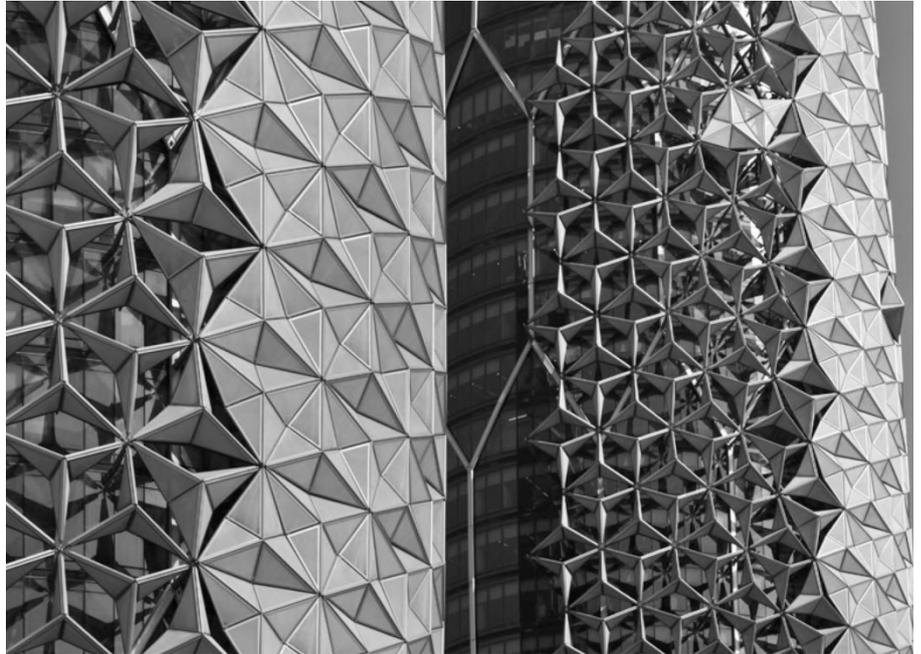
## ÉTAPE 2 : ANALYSE DES SYSTÈMES ET MÉCANISMES VARIÉS

La base de ce travail est basée sur l'analyse des mécanismes existants. Il s'agit d'étudier les différentes manières dont ils fonctionnent au niveau technique. L'avantage de se concentrer sur les structures cinétiques existantes est qu'il n'est pas nécessaire de s'appuyer sur des hypothèses simulées mais de pouvoir évaluer les résultats réels. La sélection des systèmes étudiés sera constituée de créations architecturales contemporaines et ne sera pas limitée à un certain pays et donc pas non plus à certains climats. Pour cette raison, l'analyse doit tenir compte des différents contextes.

Afin d'évaluer l'utilité des exemples, différents critères doivent être pris en compte. Le premier est le niveau d'optimisation technique du mécanisme, ensuite il est important d'examiner l'utilité au niveau de l'utilisation architecturale. Ceci peut être accompagné d'une évaluation du caractère esthétique en fonction du contexte mais aussi de l'environnement vécu par l'habitant. Ce dernier point est bien sûr subjectif.

Ce travail d'analyse permettra de cristalliser les principales caractéristiques avantageuses pour les façades cinétiques et guidera donc la conception des mécanismes des étapes suivantes.

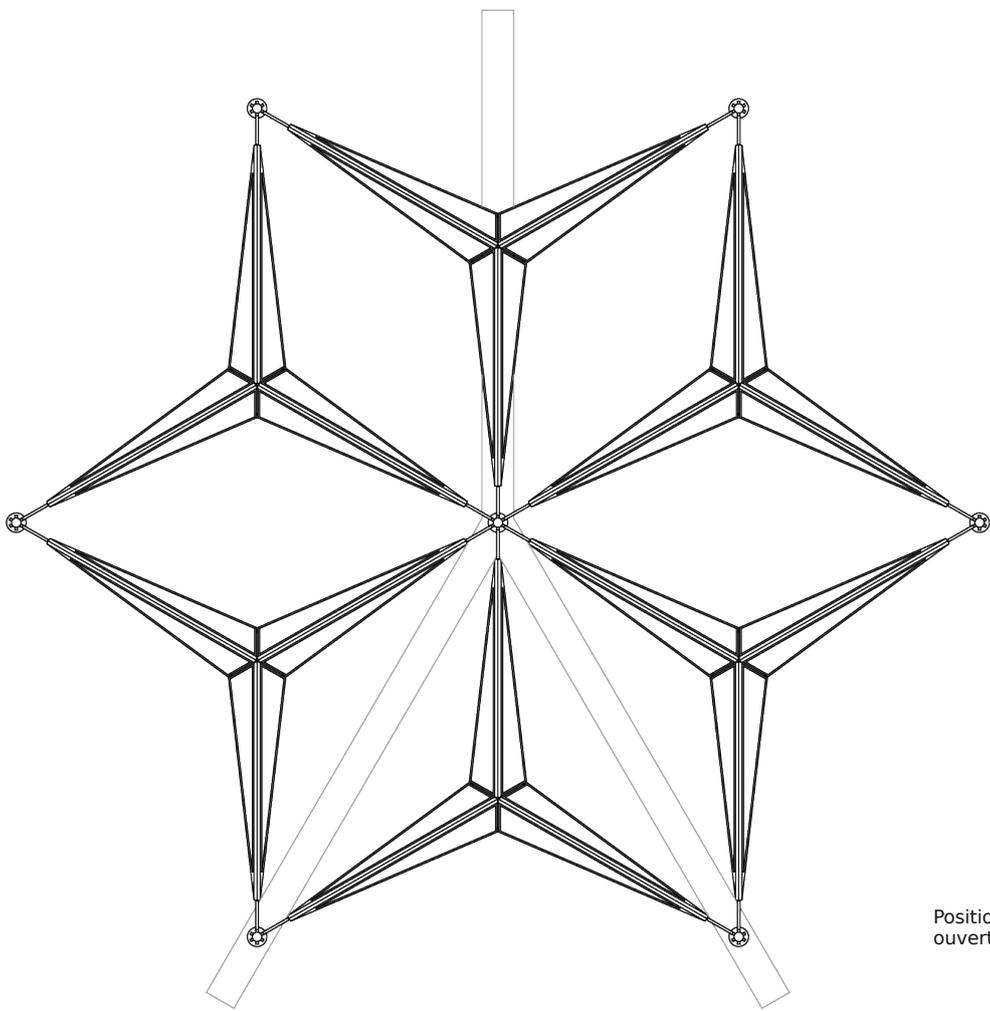
MODULES PLIÉS INDUIT  
PAR UNE FORCE  
MÉCANIQUE  
[RÉALISATION]



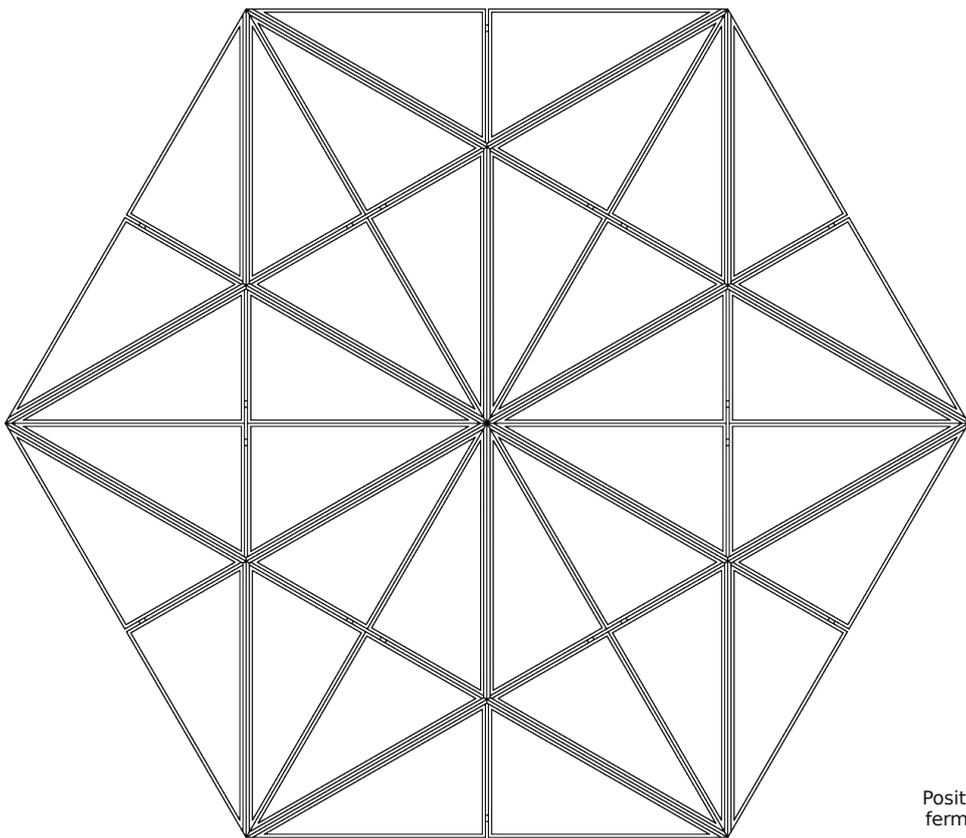
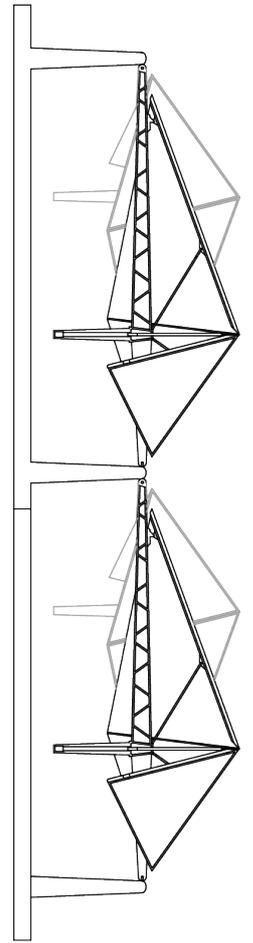
## AL BAHAR TOWERS ABU DHABI

Ce mécanisme est constitué de triangles isocèles dont les pans sont reliés par des connexions linéaires. Les modules sont pliés de manière convexe par ces bissectrices et de manière concave par la ligne reliant le milieu des côtés et le centre de gravité. Avec une force perpendiculaire appliquée au centre du triangle, la forme est capable de se plier et avec la force inverse de se déployer. Il en résulte une légère translation des sommets et une augmentation de la transparence de chaque module. Les modules sont assemblés à l'aide d'une superstructure hexagonale autour de chacune des deux tours. Seule la façade orientée vers le nord n'est pas enveloppée. Chaque module est régulé indépendamment des autres et tire son énergie en partie des panneaux solaires du toit.

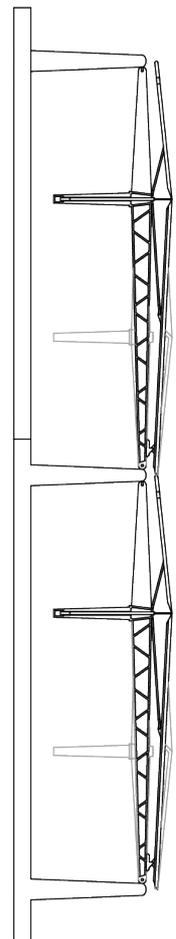
Les Émirats arabes unis sont situés au Moyen-Orient, ce qui signifie un climat subtropical et aride, avec des températures moyennes comprises entre 20 et 31 degrés Celsius. Grâce à des capteurs de température, de temps et de lumière, un système central (BMS) coordonne les degrés d'ouverture de chaque moucharabieh individuellement. Les tours sont principalement occupées par des bureaux et présentent donc un taux d'occupation maximum pendant la journée et restent inoccupées du soir au matin. L'emploi des façades cinétiques dans cet exemple est pertinent car le risque de surchauffe est très élevé dans les conditions climatiques d'Abu Dhabi. Une enquête menée à posteriori montre que 54 % des occupants décrivent l'atmosphère intérieure comme agréable, un tiers sont neutres à l'égard de ce nouveau système *high-tech* et 14 % considèrent le climat intérieur comme désagréable. En ce qui concerne la lumière naturelle, 20 % des occupants sont insatisfaits. Les principales raisons de ces pourcentages d'insatisfaction sont dues au refroidissement excessif et à l'impossibilité pour l'utilisateur de régler la façade en fonction de son grès.



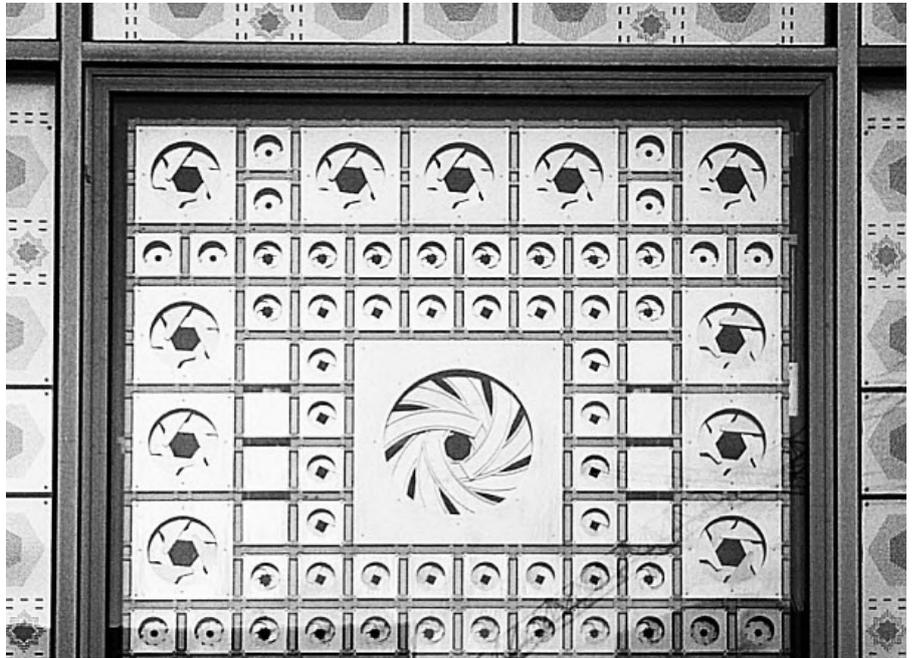
Position ouverte



Position fermée

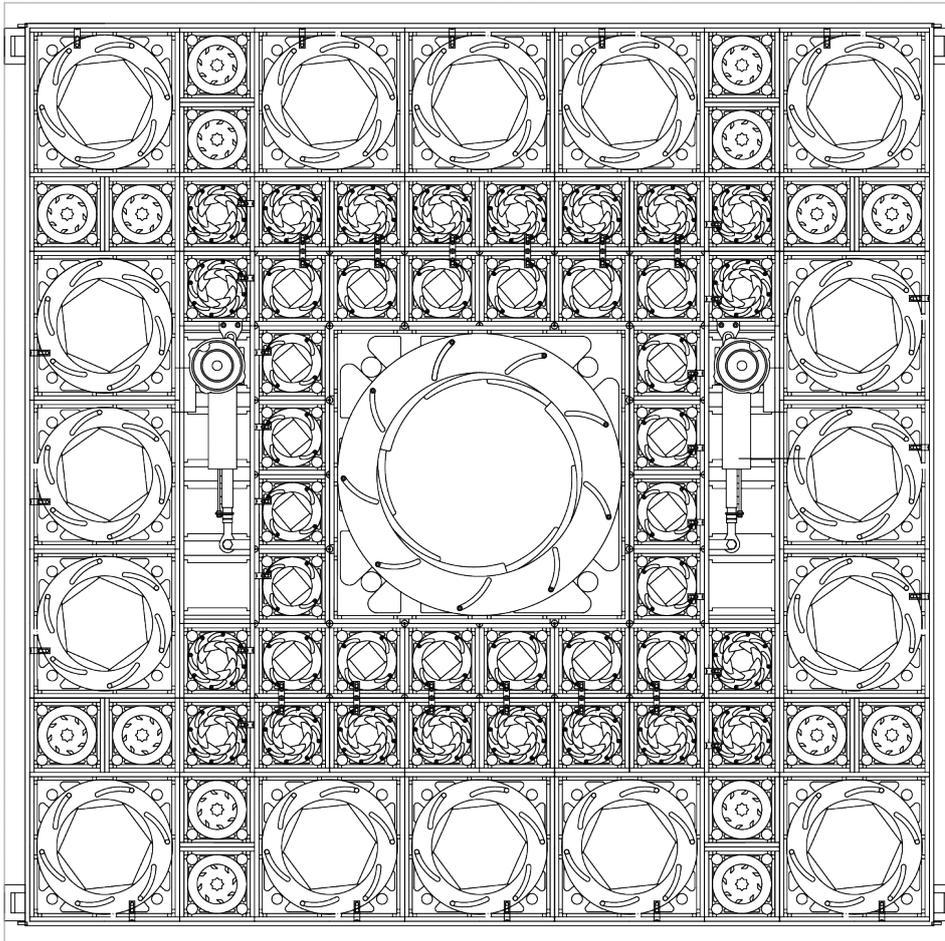


MODULES FRAGMENTÉS  
TOURNÉS INDUIT PAR  
UNE FORCE MÉCANIQUE  
[RÉALISATION]

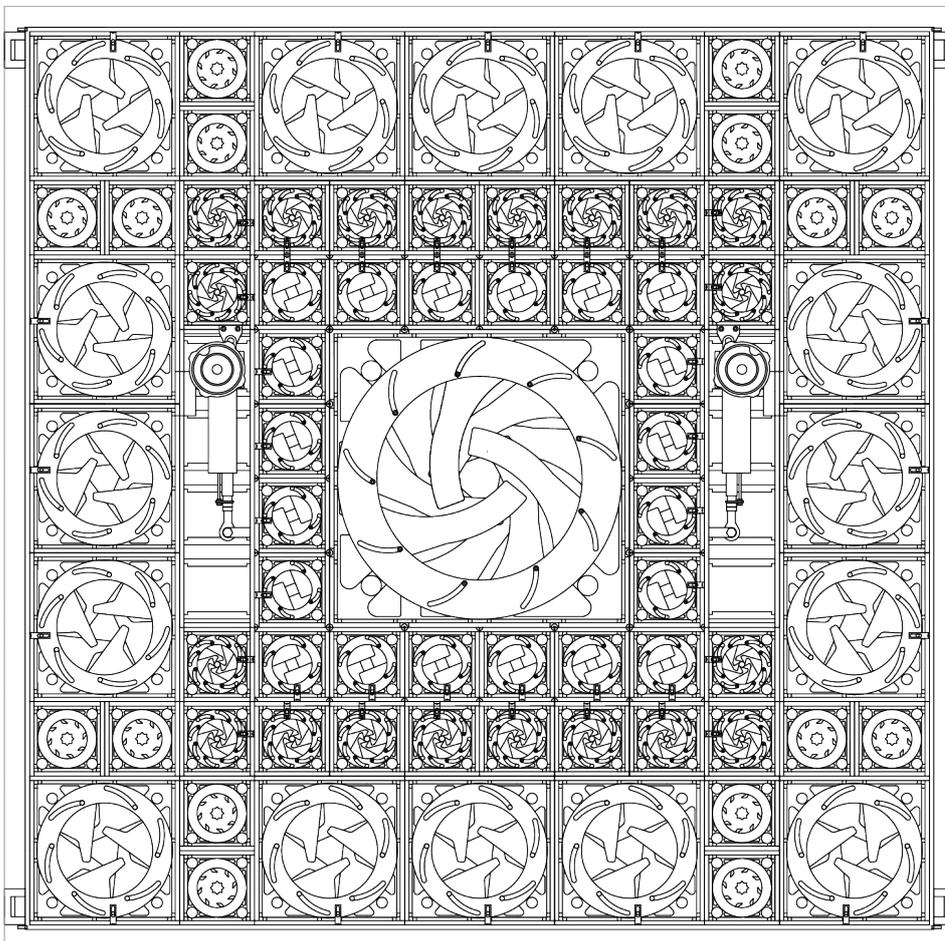


## INSTITUT DU MONDE ARABE PARIS

Dans cet exemple, qui est également fortement lié à la symbolique arabe des moucharabiehs, les modules sont constitués de diaphragmes de différentes formes et tailles. Une seule force mécanique par supermodule est traduite en rotation des anneaux extérieurs respectifs de chaque sous-diaphragme. Cette rotation oblige les lamelles circulaires à tourner autour de leurs points d'ancrage et donc à fermer l'ouverture ronde. Il s'agit d'un bâtiment occupé uniquement pendant la journée et situé dans un climat océanique dégradé à Paris. Les températures extérieures varient entre 9 et 16 degrés. La façade, composée de 25 000 modules par *Jean Nouvel*, a fait l'objet de critiques car la durée de fonctionnement de ces mécanismes n'était pas adaptée au bâtiment et était donc partiellement hors service après une période de fonctionnement relativement courte. Les mécanismes présentent une complexité principalement due aux exigences esthétiques du projet. Après une rénovation récente, l'ouverture des modules est réglée de manière autonome et intelligente. Cela signifie que les différents diaphragmes peuvent être ouverts en fonction du niveau de rayonnement solaire et permettent ainsi de créer différentes atmosphères à l'intérieur. Ceci est un grand avantage pour un projet multifonctionnel. La régulation intelligente permet également de réduire les coûts de la consommation d'énergie de refroidissement en été.



Position ouverte



Position fermée

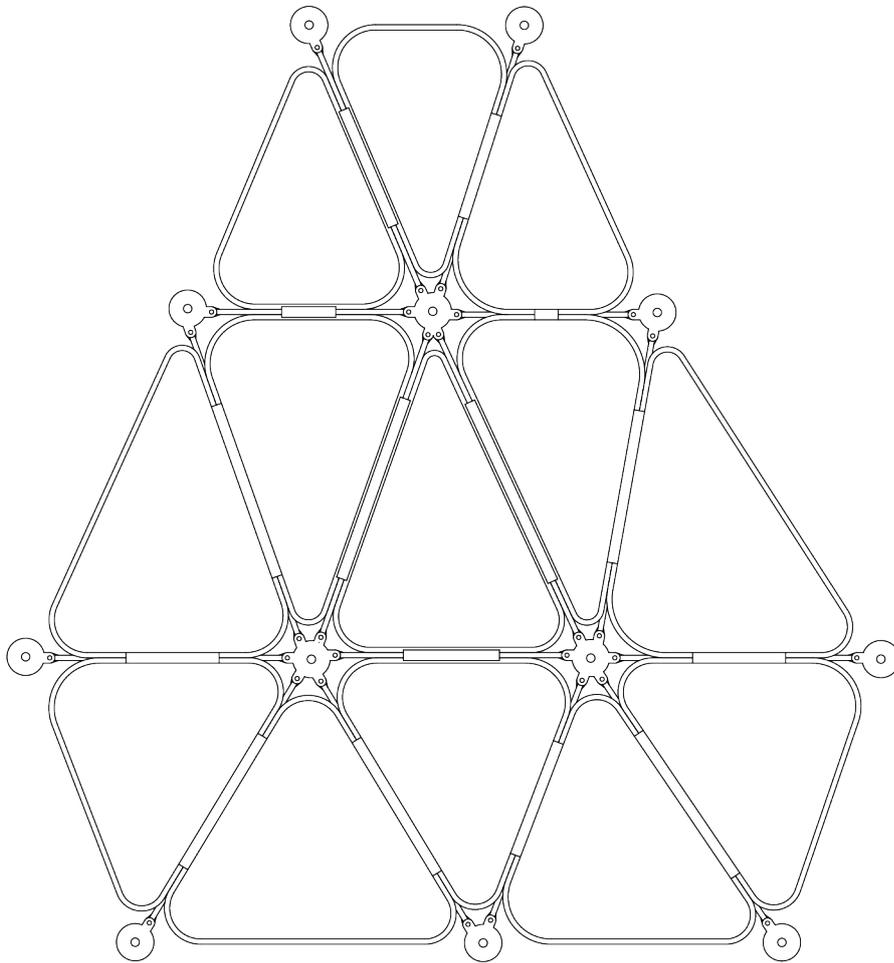
MODULES GONFLABLES  
INDUIT PAR UNE FORCE  
PNEUMATIQUE  
[RÉALISATION]



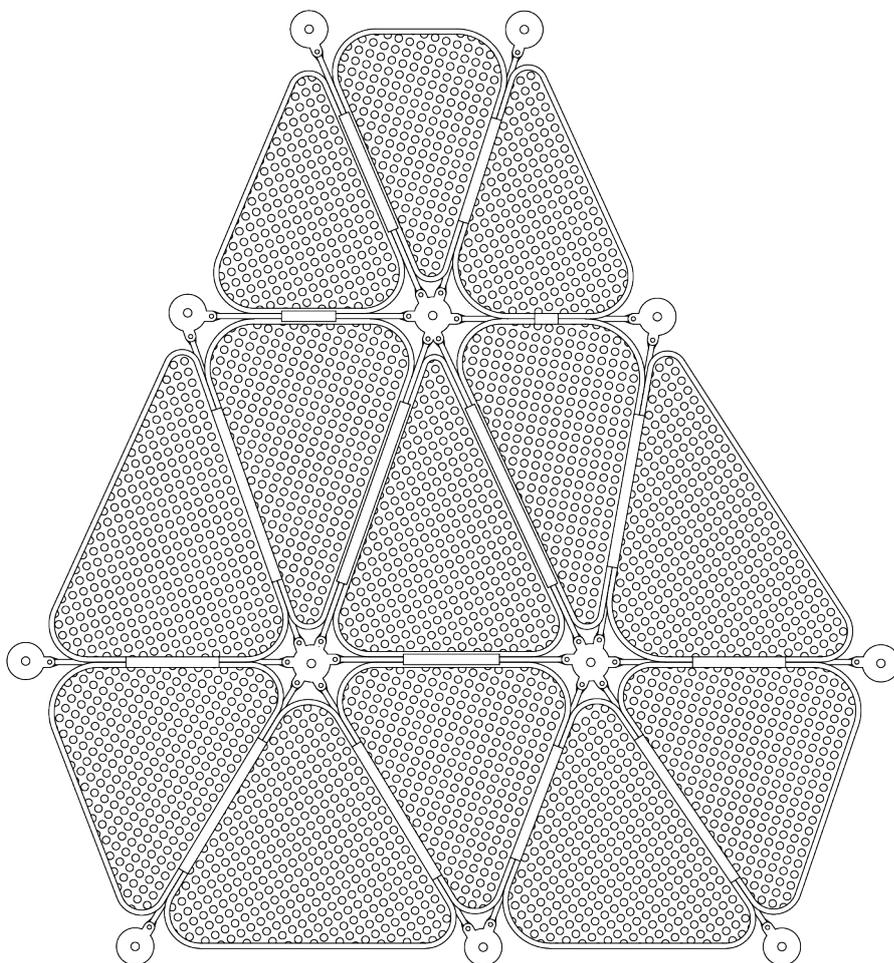
## MEDIA-TIC BARCELONE

La façade sud-est du Media-Tic est constituée de triangles non réguliers comportant chacun quatre couches. À l'aide de pompes pneumatiques, les coussins peuvent être gonflés et dégonflés, ce qui modifie les caractéristiques de transparence des modules à la lumière du jour, conditionnées par les motifs des deux couches intermédiaires, qui à leur tour laissent passer ou rétrouvent le flux lumineux. Les coussins sont fabriqués en éthylène tétrafluoroéthylène, ce qui permet une légèreté et une perméabilité aux rayons du spectre visible. Le degré de transmission de la lumière à travers les modules est réglable par une variation du débit d'air en pulsion. Les concepteurs de ces mécanismes revendiquent également une augmentation des performances d'isolation grâce à ce filtre. Cependant, des doutes subsistent quant au caractère isolant thermique, car une continuité des cuisses n'est pas donnée. La chaleur de l'intérieur peut facilement s'échapper par les vides laissés ou, à l'inverse, le froid peut s'infiltrer. Cette approche reste néanmoins intéressante car il ne s'agit pas d'une application de force mécanique comme dans les exemples précédents, ce qui entraînerait une usure des éléments et donc une réduction de leur durée de vie.

Ce principe de façade responsive, régulée en fonction du niveau de luminosité ainsi que de la chaleur environnante, montre une adaptation originale au climat méditerranéen de Barcelone et permet au bâtiment de réduire drastiquement la consommation d'énergie primaire habituellement utilisée pour contrer les effets de la surchauffe. Les architectes soulignent également le bilan énergétique du projet, qui se trouve approché au standard passif (*nearly zero energy building*). Cela n'est évidemment pas seulement dû à la façade cinétique, mais la réduction de l'énergie pour le refroidissement joue un rôle majeur.



Position fermée



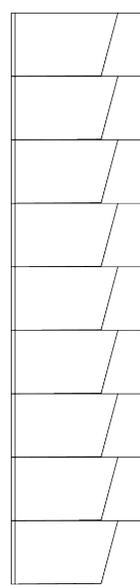
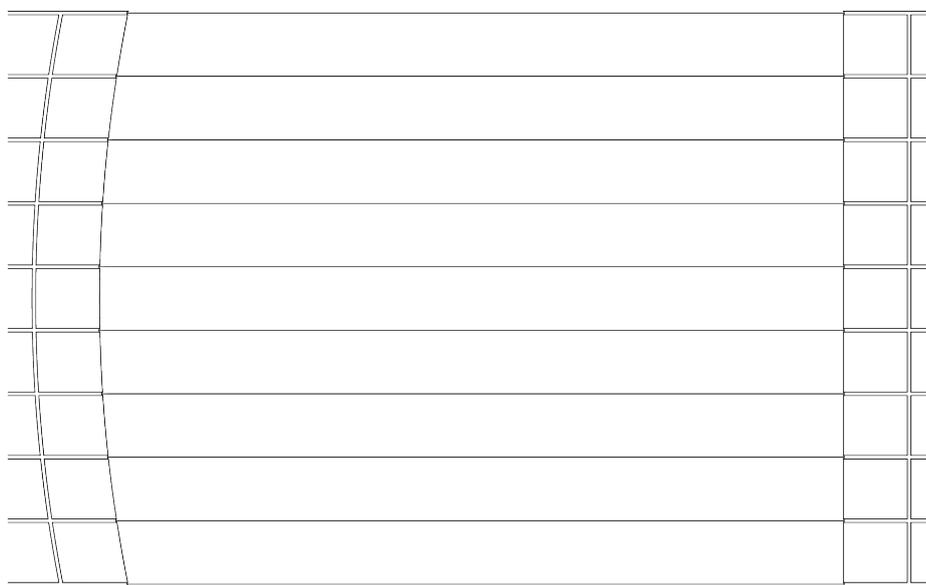
Position ouverte

MODULES EN LAMELLES  
FLÉCHIS INDUIT PAR UNE  
FORCE MÉCANIQUE  
[RÉALISATION]

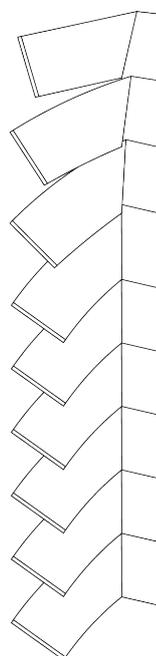
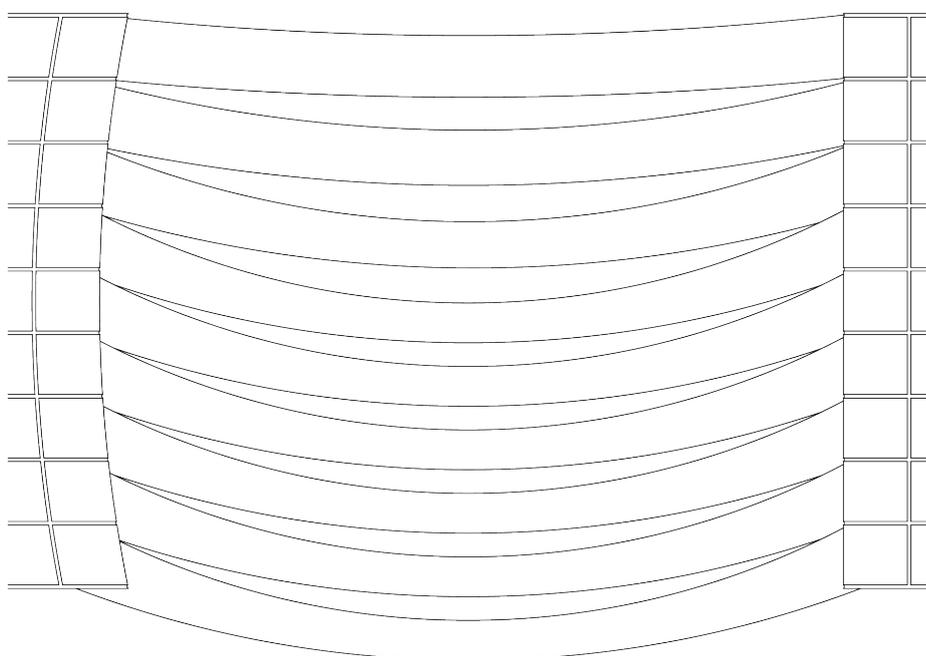


## ONE OCEAN YEOSU

Dans cet exemple, l'ouverture est générée en appliquant deux forces verticales aux extrémités de chaque lamelle. Les pièces subissent donc une flexion qui se manifeste par une légère rotation au centre de chaque module. Cette rotation augmente le degré de transparence de la façade en élévation. Ce mécanisme diffère de ceux montrés précédemment par les éléments actionnés. Habituellement, les façades cinétiques sont constituées de matériaux rigides, reliés entre eux par une structure secondaire et articulés par des liaisons structurelles à ossature. Le projet de *SOMA Architecture* fonctionne grâce à la flexibilité des lamelles en plastique à renfort de verre. Chaque élément peut être commandé individuellement par deux servomoteurs situés aux extrémités. Le pavillon d'exposition est situé sur le front de mer en Corée du Sud. La chorégraphie en forme de vague générée par l'ouverture et la fermeture de la façade est donc incontestablement une volonté esthétique. Outre l'aspect artistique du mouvement des vagues, la façade est capable d'utiliser le vent venant de la mer de manière optimisée pour rafraîchir l'atmosphère intérieure et ainsi créer un microclimat protégé des étés coréens relativement chauds. En ce qui concerne la régulation du rayonnement solaire incident, la façade est moins optimisée ne serait-ce que la lumière visible qui devient lumière diffuse par la réflexion entre les lames ouvertes et donc une réduction du risque d'éblouissement des visiteurs. Néanmoins, une énergie supplémentaire pour l'éclairage artificiel reste toujours nécessaire dans ce pavillon.



Position fermée



Position ouverte



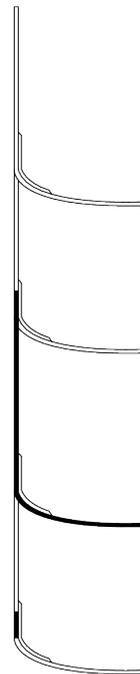
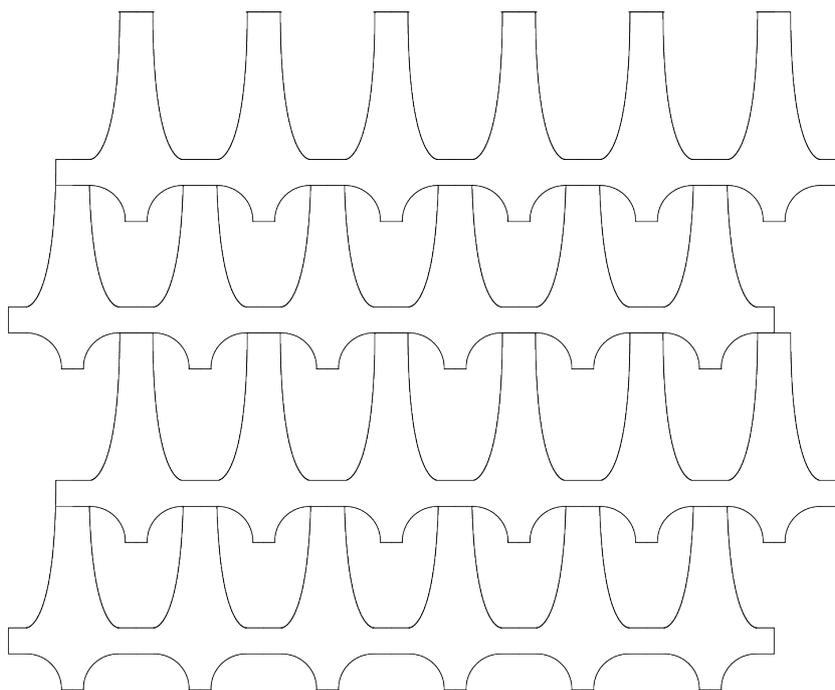
MODULES  
DEFORMABLES INDUIT  
PAR UNE FORCE  
THERMIQUE  
[PAVILLION]



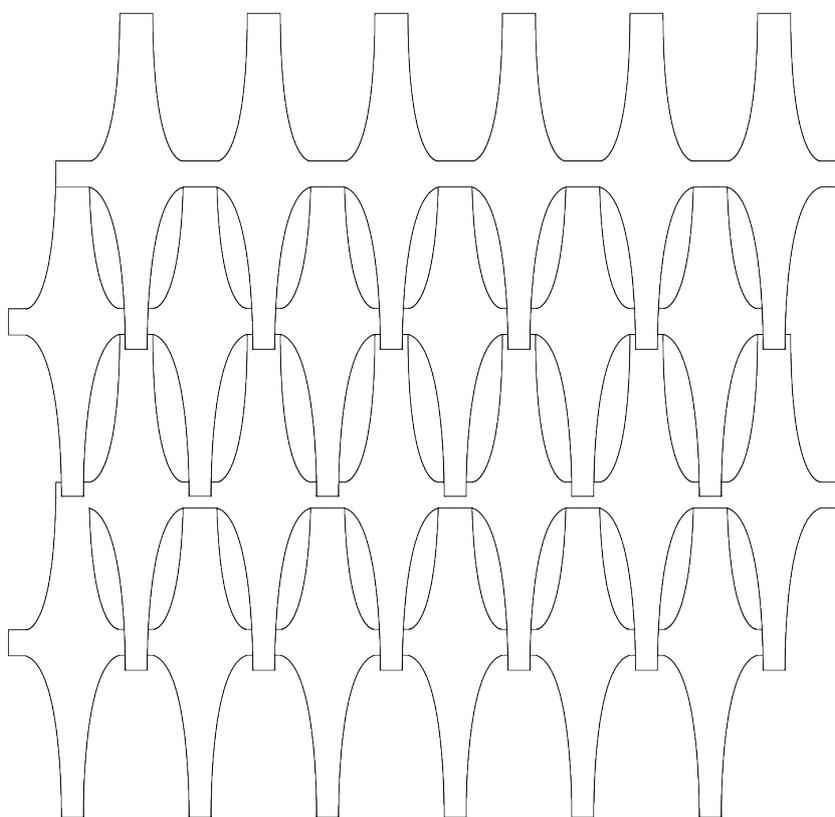
## BLOOM LOS ANGELES

Jusqu'à présent, les exemples étudiés ont été exclusivement actionnés de manière cybernétique, à l'aide de capteurs et de moteurs, pour s'adapter aux changements environnementaux. Il devient d'intérêt de montrer d'autres exemples avec un fonctionnement indépendant d'une énergie auxiliaire. Le pavillon "Bloom" de *Doris Kim Sung* est habillé de simples fragments bimétalliques. L'ouverture des panneaux est régulée par la différence de dilatation des deux couches métalliques des fragments. La force et le déclenchement dans ce modèle de façade cinétique proviennent de l'énergie thermique du soleil. Ce n'est pas une invention nouvelle, les bimétaux sont en effet généralement utilisés dans les vannes thermostatiques pour les corps chauffants de nos systèmes de chauffage. L'utilisation en architecture responsive est néanmoins intéressante car le principe est basé uniquement sur les propriétés physiques des matériaux. Les parois extérieures du pavillon sont constituées de plusieurs couches se chevauchant partiellement et créant des ouvertures dans l'enveloppe. Si l'énergie du rayonnement solaire chauffe les lamelles, une dilatation de la couche exposée à l'extérieur est créée.

En général, tous les métaux se dilatent avec une augmentation de leur température, mais les amplitudes de ces déformations diffèrent d'un matériau à l'autre. C'est ce principe qui trouve son application dans ce projet. Avec une inspiration provenant de la flore, il s'agit donc bien d'un mécanisme bionique autonome. Un emploi dans l'architecture concrète poserait néanmoins des questions sur la possibilité pour l'habitant d'influencer le degré d'ouverture de la façade. Une régulation en fonction des souhaits de l'utilisateur n'est pas donnée et en hiver un intérieur chauffé risquerait de bloquer la façade en position fermée et donc d'empêcher l'éclairage naturel.



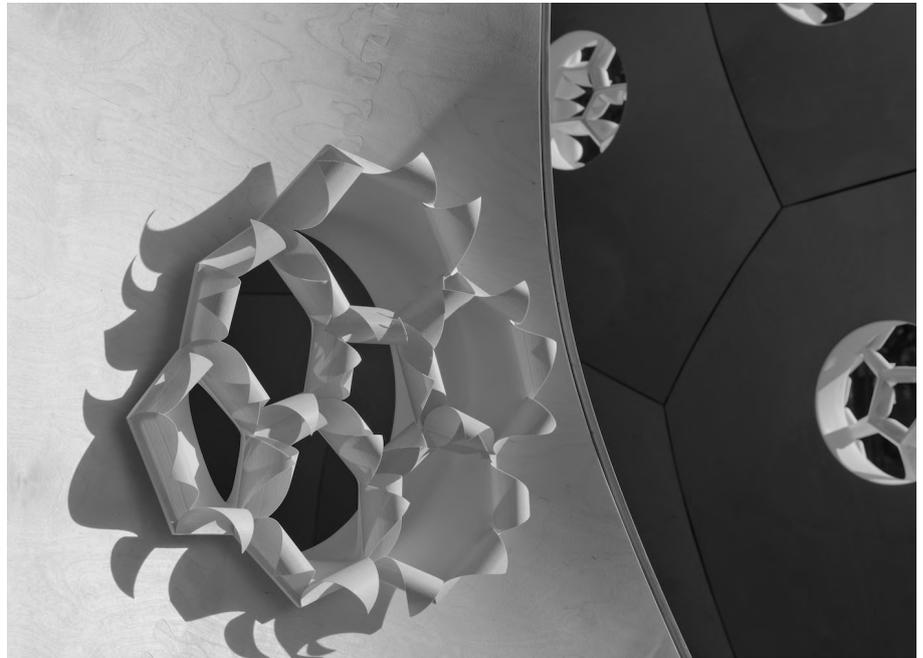
Position ouverte



Position fermée

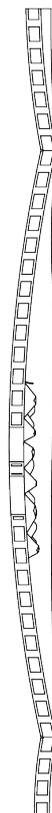
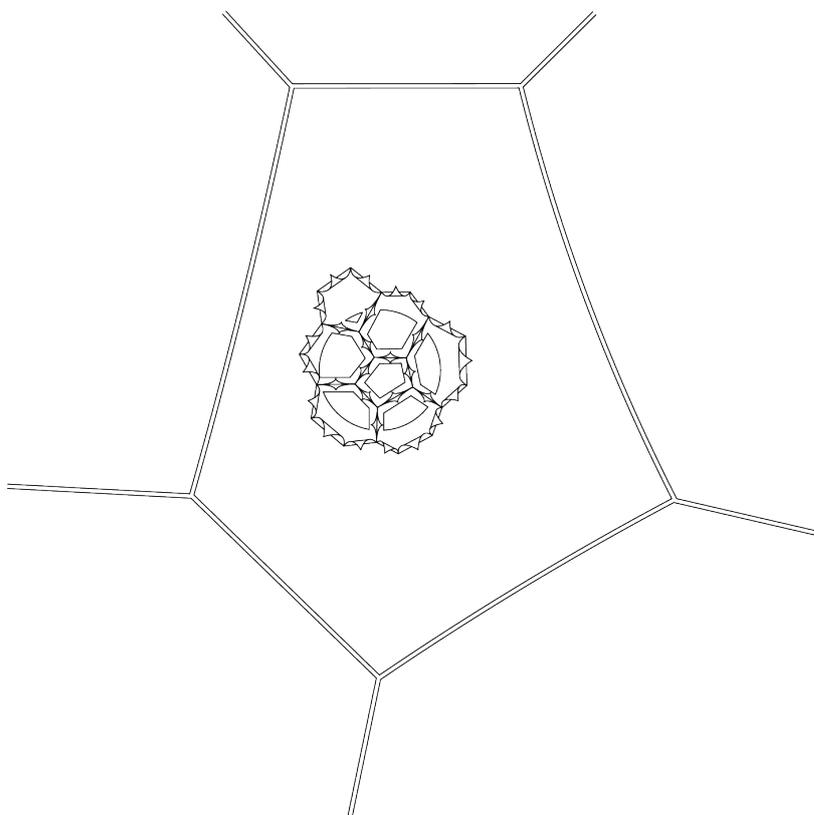


MODULES EN LAMELLES  
COURBÉS INDUIT PAR  
UNE FORCE  
ANISOTROPIQUE  
[PAVILLION]

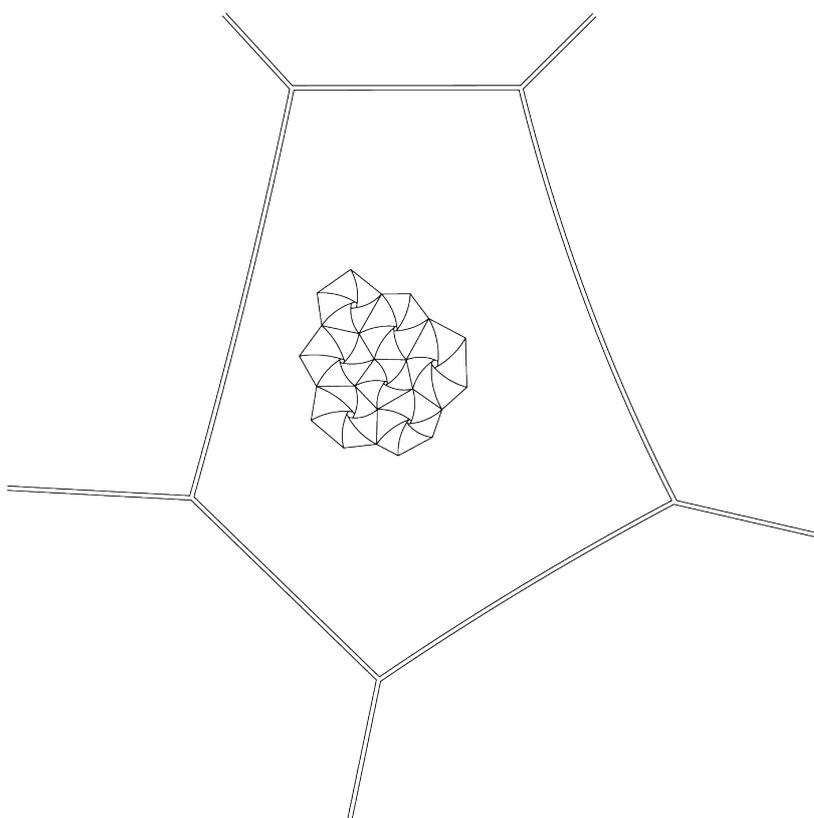


## HYGROSKIN ORLEANS

Le principe utilisé pour la façade *Hygroskin* est similaire à celui présenté juste avant. L'ouverture dans cet exemple est faite par de fines lamelles de bois à deux couches qui se recourbent avec l'augmentation du niveau d'humidité ambiante due aux caractéristiques hygroscopiques du bois. La différence d'expansion des couches génère la courbure. L'énergie utilisée pour le mouvement est donc de l'ordre de l'hygroscopie. Cela signifie que l'énergie calorifique transmise par le rayonnement infrarouge n'est pas utilisée directement. Cette méthode purement *low-tech* s'actionne en fonction du taux d'humidité de l'air ambiant. La saturation de l'air en vapeur d'eau est néanmoins conditionnée par la température de celle-ci. En hiver, l'air extérieur transporte peu de vapeur d'eau et le mécanisme reste donc en position fermée. Lorsque la température extérieure augmente en mi-saison ou en été, le potentiel de transport de l'humidité dans l'air augmente, tout comme le taux d'humidité. Les lamelles sont donc actionnées et se recourbent en dégageant l'ouverture. Cette opération se distingue des autres exemples par son facteur de déclenchement. Son utilisation est moins intéressante dans la recherche d'un filtre solaire qui sera en fonction du taux de luminosité. Il s'agit en effet plutôt d'une application intéressante en termes d'étanchéité à la vapeur pour l'enveloppe.



Position ouverte



Position fermée



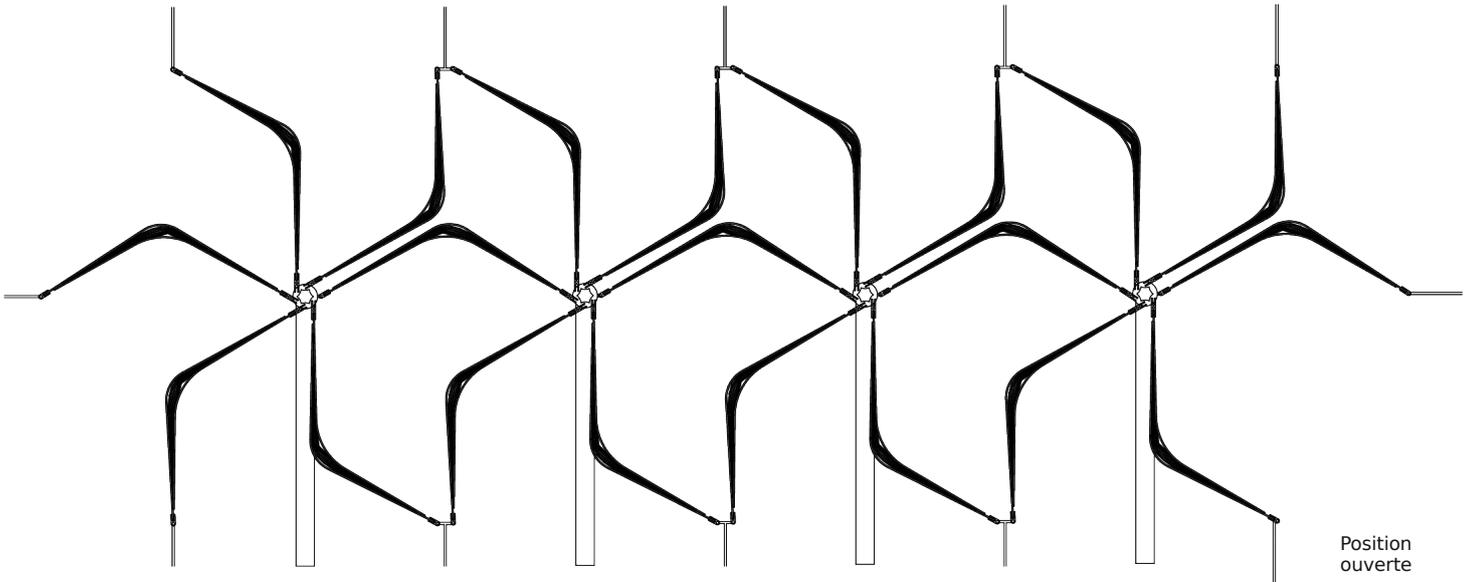
MODULES DEPLOYABLES  
INDUIT PAR UNE  
INSTABILITÉ ELASTIQUE  
[CONCEPT]



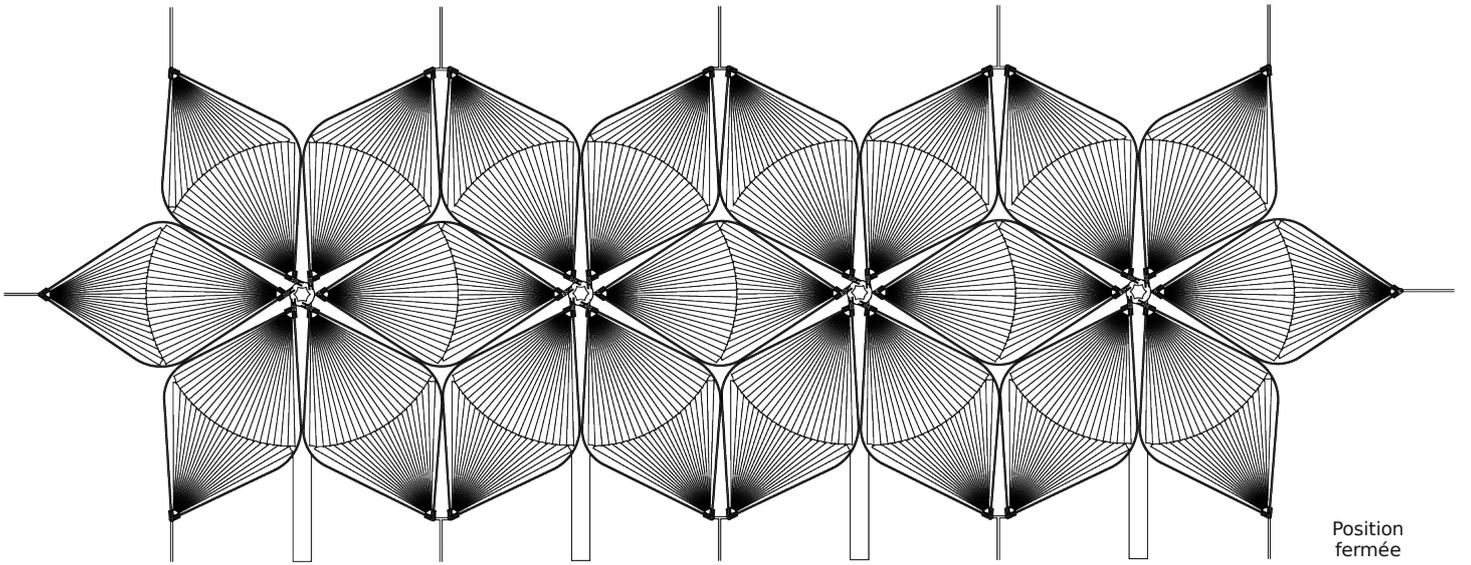
## SNAPPING FACADE BUFFALO

Le système *Snapping Facade* est basé sur l'énergie mécanique due à l'élasticité dans l'état instable d'un élément plié. Avec une force de rotation, l'élément est poussé sur le point de sa courbure initiale et passe ainsi de l'état concave à l'état convexe. Par le déploiement de la métrastucture, un éventail est tendu entre les éléments d'extrémité. Celui-ci forme ainsi le filtre de lumière. Le mécanisme cybernétique est actiné par des senseurs reliés à des moteurs et repose donc sur une source d'énergie auxiliaire. L'esthétique de ce brise-soleil s'inspire des éventails traditionnels chinois et témoigne sensiblement d'une recherche artistique. Le positionnement à l'intérieur du volume protégé empêche la filtration du rayonnement infrarouge, ce qui signifie que sa fonction est uniquement de contrôler l'éclairage naturel et de protéger contre l'éblouissement.

L'avantage des mécanismes basés sur des éléments flexibles est le retardissement de la fin de vie de ces systèmes, causé par une usure intensive. Cependant, la fragilité de la structure secondaire et l'utilisation de joints invalident ces caractéristiques qui auraient pu apporter un avantage à la structure et par cela une réduction des coûts de maintenance. Il s'agit néanmoins d'une expérience intéressante principalement en raison de son esthétique plaisant.



Position ouverte



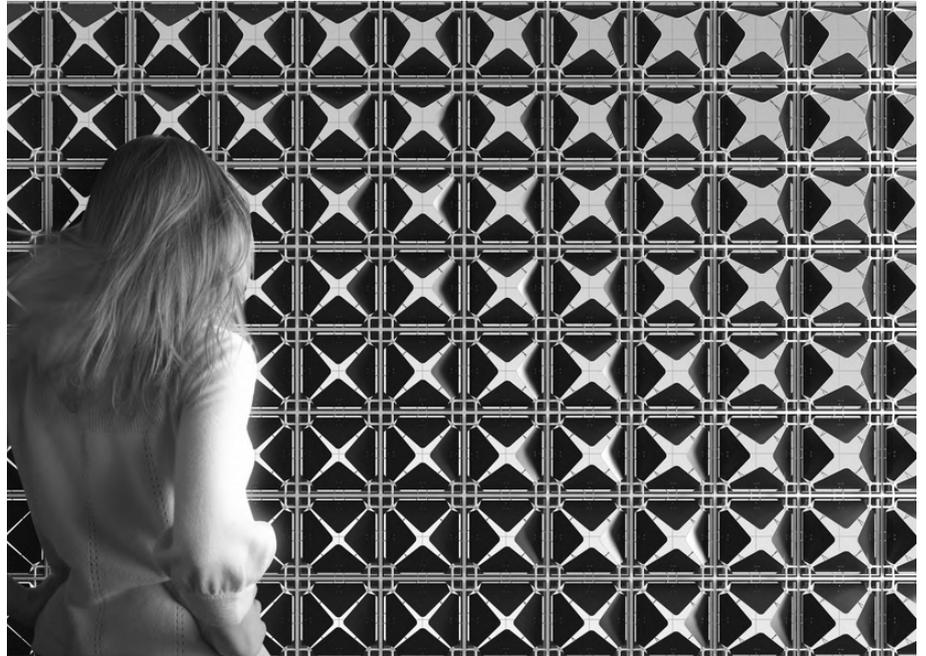
Position fermée



Coupe transversale



MODULES EN PANS  
TOURNÉS INDUIT PAR  
UNE FORCE THÉRMIQUE  
[CONCEPT]

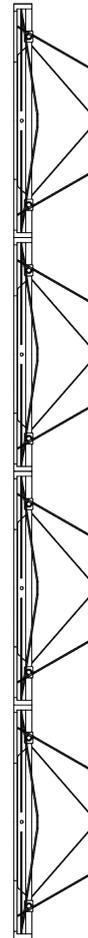
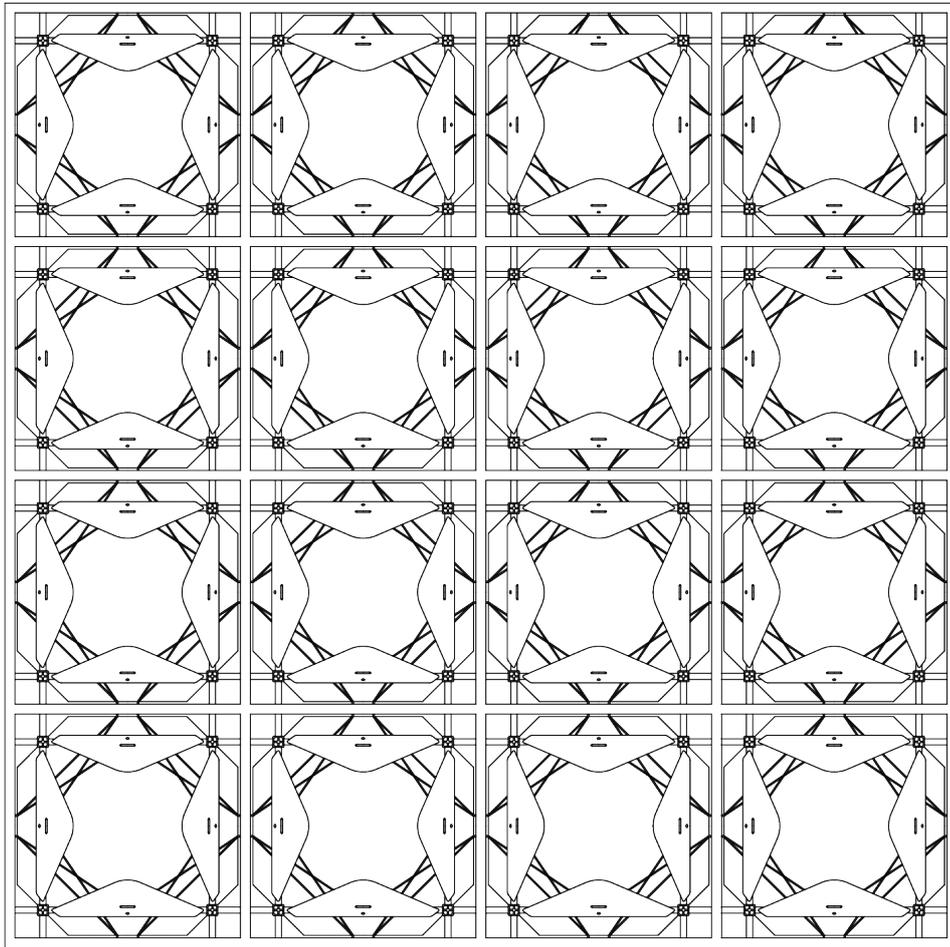


## AIR FLOW(ER) CAMBRIDGE

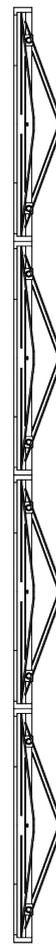
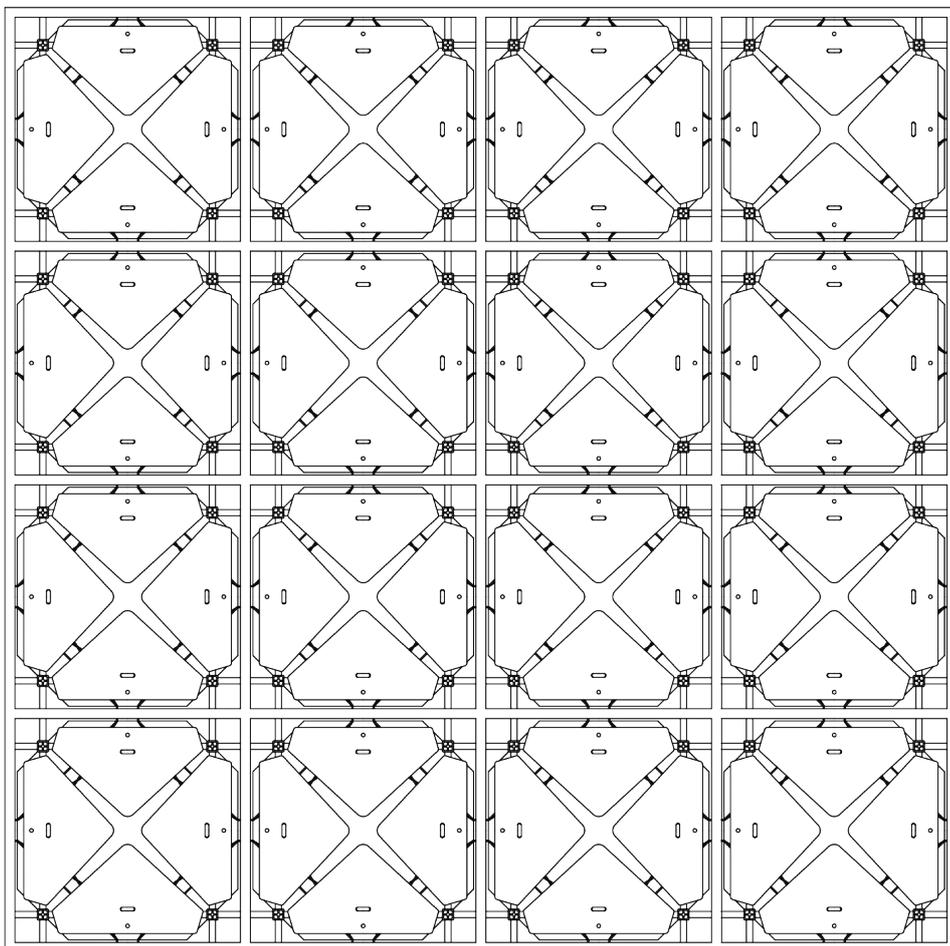
Avec le prototype de *LIFT Architects*, il s'agit d'une expérimentation autour d'une façade autonome conditionnée par la température extérieure. Des fils métalliques tendus sont fixés sur quatre pans. Lorsque la température du fil augmente, une tension est créée en rétractant le câble. Avec une translation de la force au moyen de leviers, les panneaux seront mis en rotation autour de leurs axes d'ancrage. Cela se traduit par une augmentation de la transparence du module.

La fonction principale imaginée par le concepteur est la favorisation d'une ventilation naturelle en double façade. En été, le risque de surchauffe nécessite généralement une ventilation et une climatisation intensive pour permettre le confort, notamment dans les tours de bureaux. L'ouverture des modules situés à l'extérieur de la façade pourrait permettre au vent de refroidir le vitrage et ainsi générer un refroidissement naturel.

En outre, le filtre remplit une double fonction de protection contre les radiations infrarouges en été. L'utilisateur ne peut cependant pas contrôler individuellement le degré d'ouverture, ce qui risque de nécessiter une consommation en énergie primaire supplémentaire pour l'éclairage artificiel en hiver.

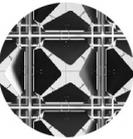


Position ouverte



Position fermée



								
<b>FORCE</b>	TRANSLATION DU CENTRE	ROTATION DE L'ANNEAU EXTERIEUR	GENFLEMENT DU COUSSIN	FLEXION DES LAMELLES	COURBURE DES LAMELLES	COURBURE DES LAMELLES	CONTRACTION DES CABLES	ROTATION DU CENTRE
<b>MÉCANISME</b>	ACTIONNEUR HYDRAULIQUE	ACTIONNEUR HYDRAULIQUE	ACTIONNEUR PNEUMATIQUE	ACTIONNEUR HYDRAULIQUE	DILATATION THERMIQUE	DILATATION HYGROSCOPIQUE	CONTRACTION THERMIQUE	INSTABILITÉ ÉLASTIQUE
<b>DECLENCHEUR</b>	SENSORS: LUMIÈRE VENT PLUIE	SENSORS: LUMIÈRE HEURE	SENSORS: LUMIÈRE TEMPERATURE	SENSOR: HEURE	ENERGIE THERMIQUE SOLAIRE	ENERGIE HYDRAULIQUE TENSION INTERCELLULAIRE	ENERGIE THERMIQUE SOLAIRE	SENSORS: LUMIÈRE
<b>AUTONOMIE</b>	DEPEND D'ENERGIE AUXILIAIRE	DEPEND D'ENERGIE AUXILIAIRE	DEPEND D'ENERGIE AUXILIAIRE	DEPEND D'ENERGIE AUXILIAIRE ET SIGNALE	INDEPENDANT	INDEPENDANT	INDEPENDANT	DEPEND D'ENERGIE AUXILIAIRE
<b>OUVERT</b>	85% VIDE 15% PLEIN	25.8% VIDE 74.2% PLEIN	0.45 FACTEUR SOLAIRE	29% VIDE 71% PLEIN	46.5% VIDE 53.5% PLEIN	3.7% VIDE 96.3% PLEIN	51.8% VIDE 48.2% PLEIN	82.5% VIDE 17.5% PLEIN
<b>FERMÉ</b>	4% VIDE 96% PLEIN	17.4% VIDE 82.6% PLEIN	0.1 FACTEUR SOLAIRE	7% VIDE 93% PLEIN	27.2% VIDE 72.8% PLEIN	0.2% VIDE 99.8% PLEIN	17.7% VIDE 82.3% PLEIN	9% VIDE 91% PLEIN
<b>POSITION</b>	EXTERIEUR	INTERIEUR	EXTERIEUR	EXTERIEUR	EXTERIEUR	EXTERIEUR	INTERIEUR	INTERIEUR
<b>DIMENSIONS</b>	4.2 m x 1.2 m	2.1 m x 2.1 m	4.5 m x 3.1 m	13 m x 1.2 m	0.2 m x 0.3 m	0.4 m x 0.4 m	0.1m x 0.1m	2.2 m x 2.2 m
<b>MATERIAU</b>	ACIER INOXYDABLE ALUMINIUM FIBRE DE VERRE	ALLIAGE D'ALUMINIUM ACIER BRONZE	ACIER ETHYLEN-TETRAFLUOR-RETHYLEN	PLASTIQUE À RENFORT DE FIBRE DE VERRE	ALLIAGE ACIER CUIVRE	CONTREPLAQUÉ D'ÉRABLE	CABLES À MÉMOIRE DE FORME	PLASTIQUE PAPIER
<b>FRAGMENTS</b>	6 PANS + STRUCTURE	56 DIAPHRAGMES À ~6 LAMELLES + STRUCTURE	4 COUCHES + STRUCTURE	1 LAMELLE	1 BANDE	6 LAMELLES	4 PANS + STRUCTURE	12 ÉVENTAIL + STRUCTURE
<b>CLIMAT</b>	ARIDE SUBTROPICAL 22.7° - 34°	OCÉANIQUE DÉGRADÉ 8.9° - 16°	MÉDITERRANÉEN 11° - 19°	OCÉANIQUE 10.8° - 17.6°	MÉDITERRANÉEN 14.1° - 24.2°	TEMPÉRÉ 15.7° - 25.6°	OCÉANIQUE 6.2° - 14.8°	CONTINENTAL 4.2° - 13.3°
<b>GAINS</b>	-20% CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET ÉMISSION DE CARBONE	-95% CONSOMMATION D'ÉNERGIE	-95% ÉMISSION DE CARBONE + ISOLATION THERMIQUE	-ÉNERGIE POUR VENTILATION ARTIFICIELLE	+ GAIN SOLAIRE - VENTILATION ARTIFICIELLE	ESTHETIQUE	+ VENTILATION NATURELLE	-RISQUE DE SURCHAUFFE
<b>APPLICATION</b>	BUREAUX	PUBLIQUE	RECHERCHE ET BUREAUX	PAVILION D'EXPOSITION	PAVILION	PAVILION	PAVILION	BUREAUX

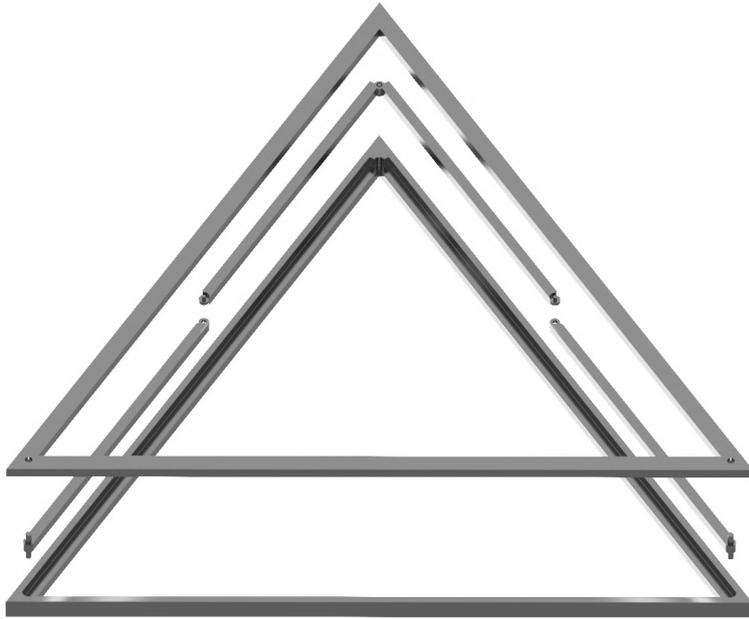




## ÉTAPE 3 : CONCEPTION DES MODULES CINÉTIQUES

L'étape suivante consiste en l'élaboration du mécanisme au niveau de son fonctionnement cinétique. Pour ce faire, les résultats de la première étape servent de base pour l'optimisation de la fonctionnalité. Il est d'importance d'examiner de multiples morphologies afin d'aboutir à une série de concepts variés.

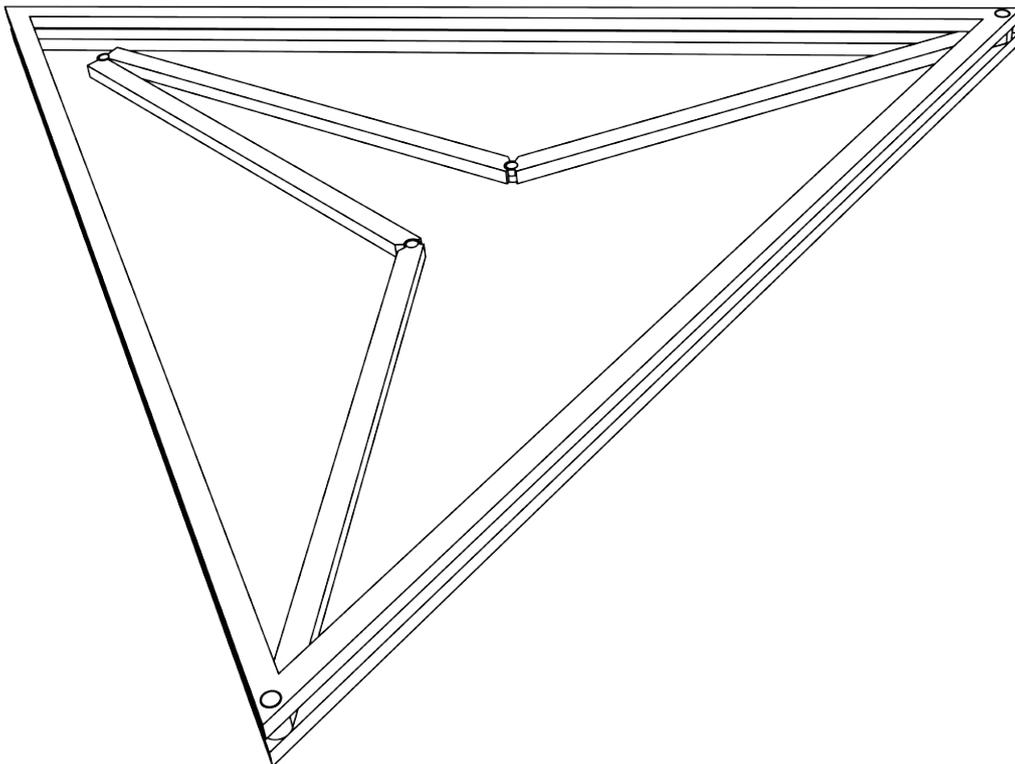
L'expérimentation pour cette phase est avant tout une quête géométrique et mécanique. Ainsi, il est possible de faire varier la forme générale des modules autour de logiques géométriques simples, basées sur des formes triangulaires ou carrées. La réflexion sur le mouvement peut se développer en deux dimensions mais aussi en trois dimensions.



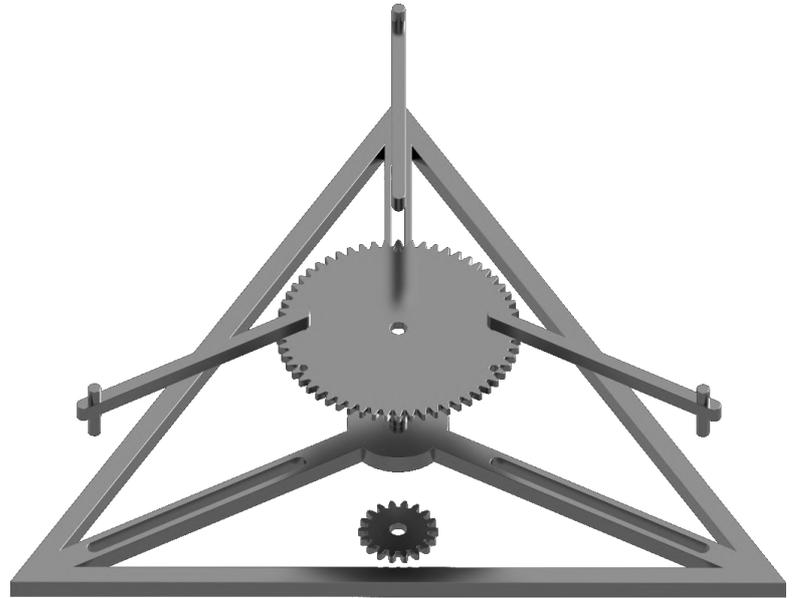
MODULES  
TRIANGULAIRES AVEC  
ROTATION EN DEUX  
POINTS

## MODULE N°1

Le mécanisme est constitué de six sous-éléments reliés entre eux par cinq articulations. La forme triangulaire du module permet une liberté de montage sur la façade et facilite la création de formes ondulantes ou courbes. Les éléments sont néanmoins trop fragiles pour une application réelle et les articulations risquent une forte usure.

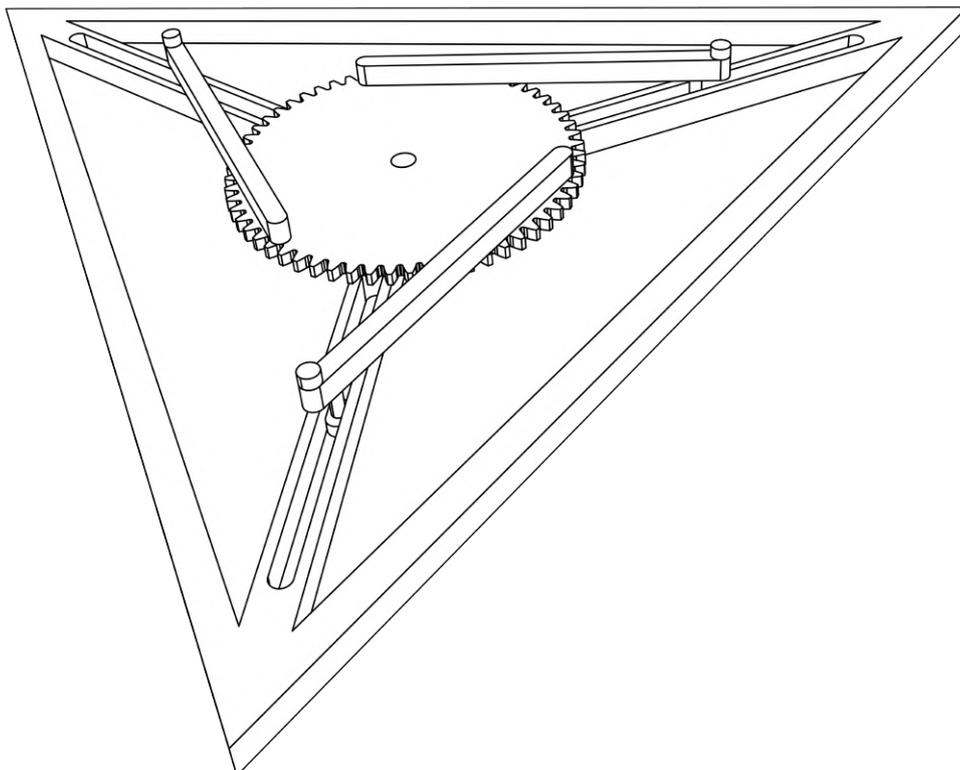


MODULES  
TRIANGULAIRES AVEC  
ROTATION EN UN  
POINT



## MODULE N°2

Composé d'un cadre triangulaire, de trois éléments linéaires et d'une roue dentée, le mécanisme transforme une rotation en une force linéaire guidée par les raies de la base. Les problèmes principaux de ce mécanisme sont l'usure des éléments et le faible rapport entre le plein et le vide en projection verticale, ce qui le disqualifie d'être utilisé comme filtre lumineux.

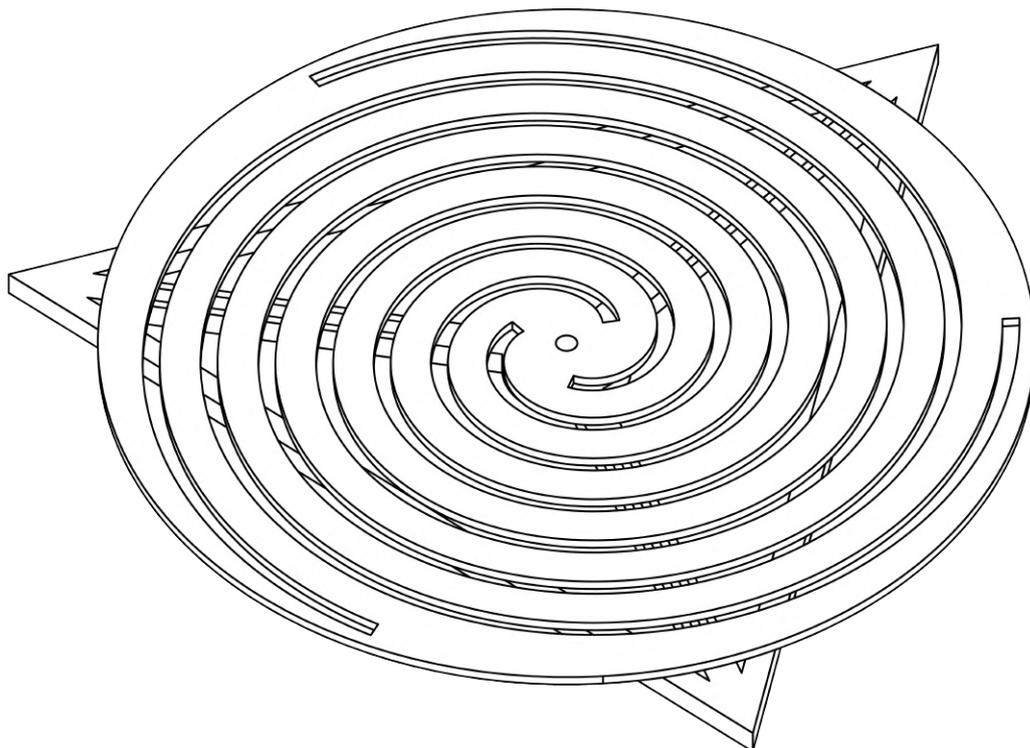




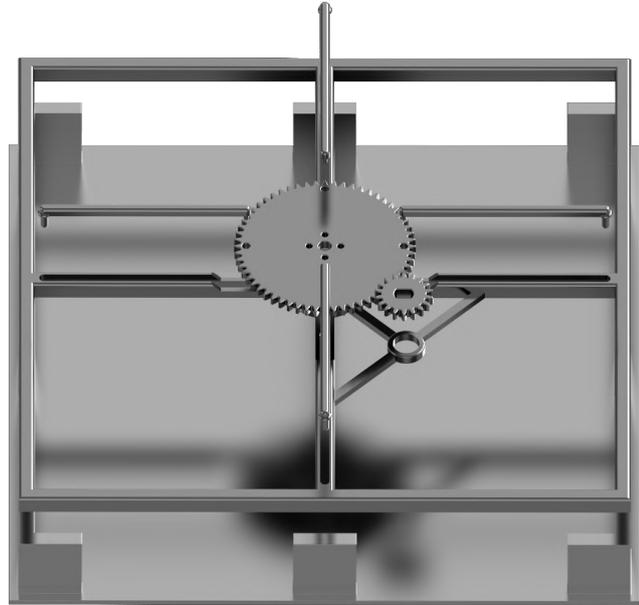
MODULES  
TRIANGULAIRES AVEC  
TABLEAUX CIRCULAIRE  
EN ROTATION

## MODULE N°3

Pour cette expérimentation, le nombre d'éléments requis pour le fonctionnement est réduit à deux. Une table rotative permet d'approcher les fixations des sommets du triangle au centre de celui-ci. Le module est cependant très peu transparent et ne convient donc pas à une application réelle.

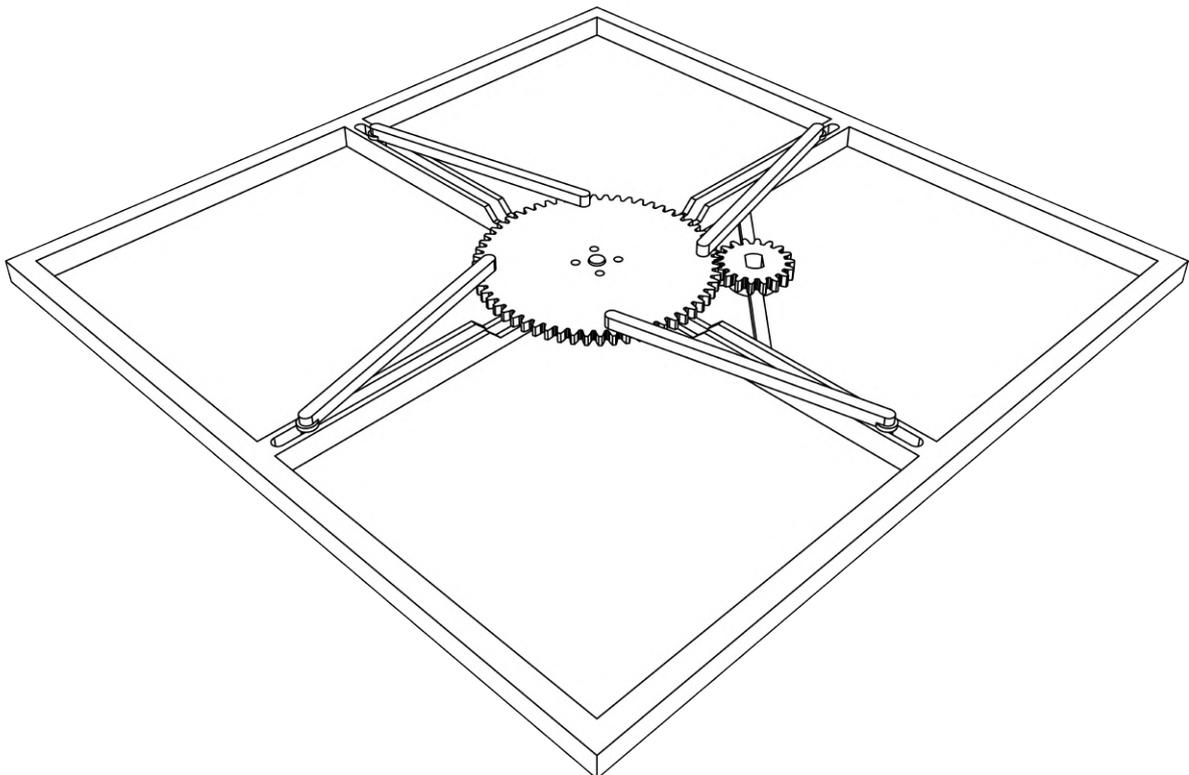


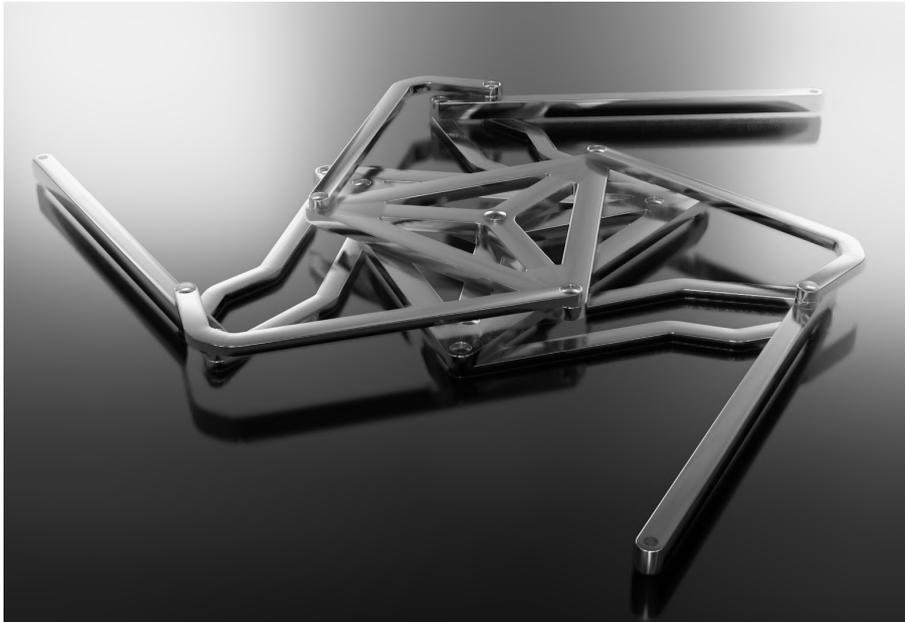
MODULES  
RÉCTANGULAIRES  
AVEC ROTATION EN  
UN POINT



## MODULE N°4

Par rapport au module n° 2, la transparence a été augmentée ici en passant d'une forme triangulaire à une forme rectangulaire. le fonctionnement reste essentiellement le même avec les problèmes d'usure. Le mouvement des fixations est néanmoins réduit à cause de l'augmentation des éléments linéaires.

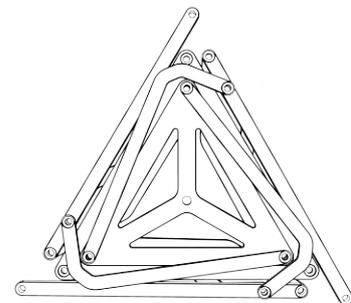
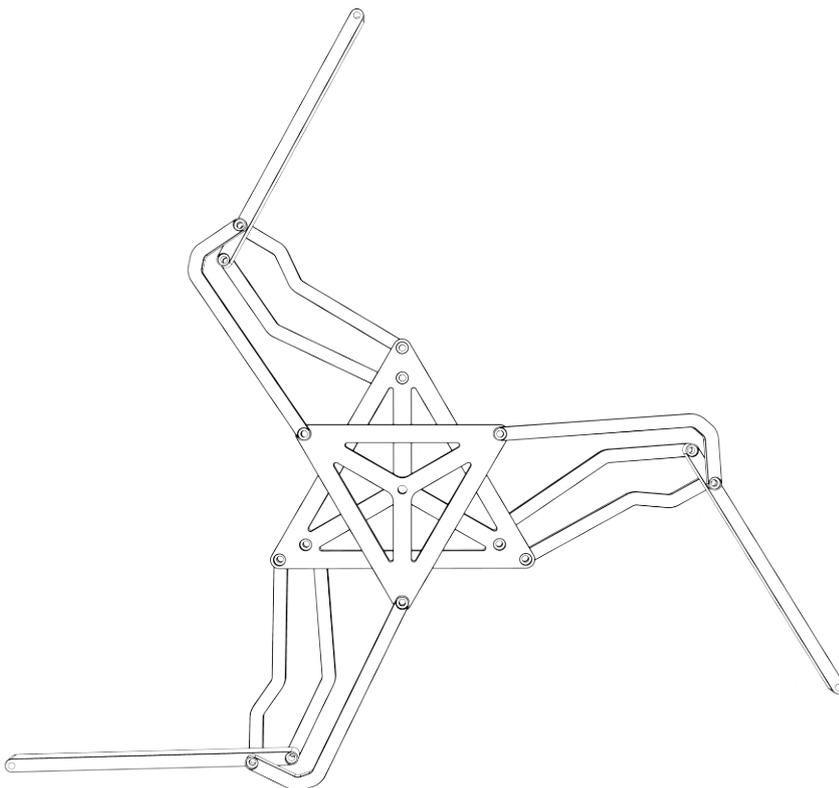




MODULES  
TRIANGULAIRES AVEC  
OUVERTURE PAR  
ROTATION

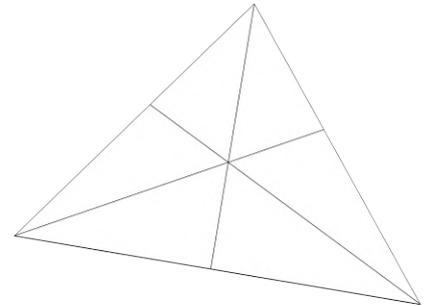
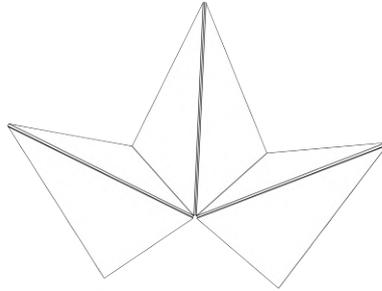
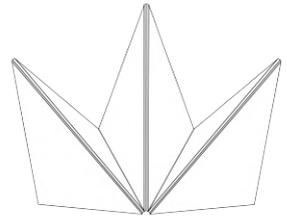
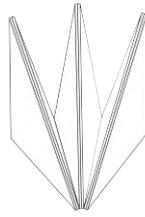
## MODULE N°5

Ce mécanisme se déploie avec une force de rotation appliquée au centre. Grâce aux articulations, le triangle augmente la surface initialement couverte d'un facteur 20. L'opération est néanmoins très complexe et nécessite l'action de 16 articulations en parallèle.



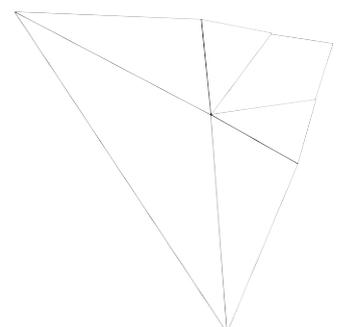
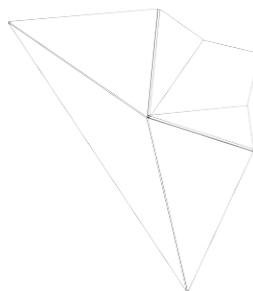
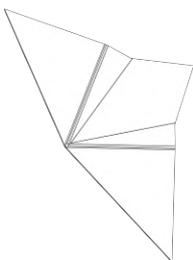
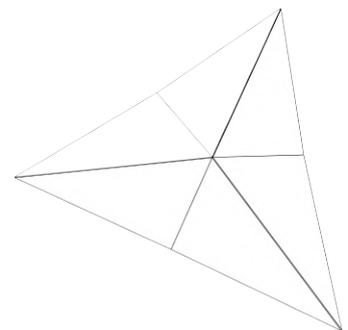
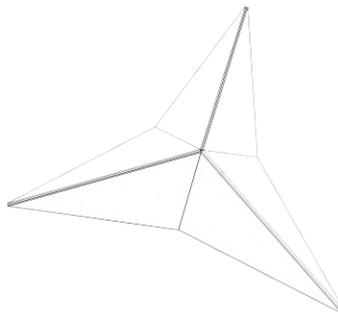
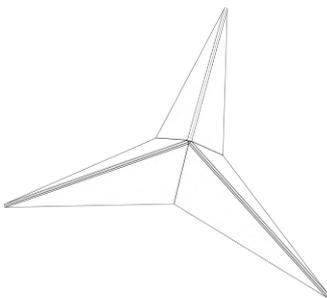


## ÉCHANTILLONS DE LA STRUCTURE SÉCONDAIRE



## SURFACES DÉPLOYABLES

Une expérimentation sur les structures secondaires montre qu'il est préférable de réduire le nombre de plis pour diminuer le nombre de joints nécessaires et donc une réduction de la complexité. En outre, il est important de lier les pans entre eux pour limiter le nombre de fixations nécessaires et le degré de liberté de la structure déployable.

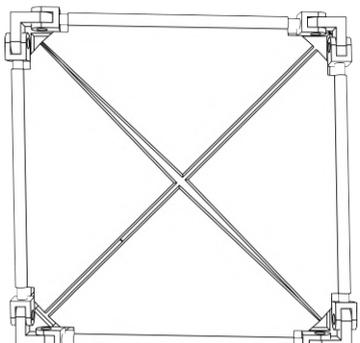
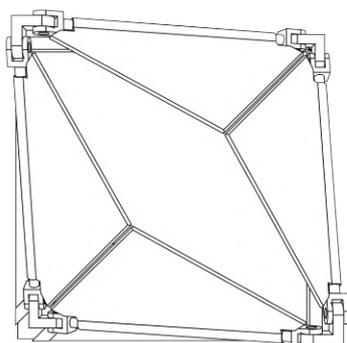
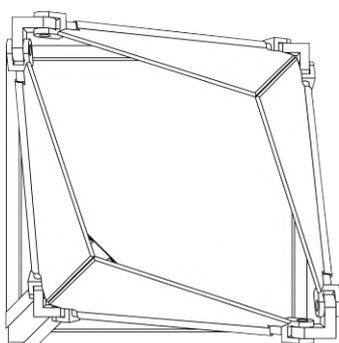
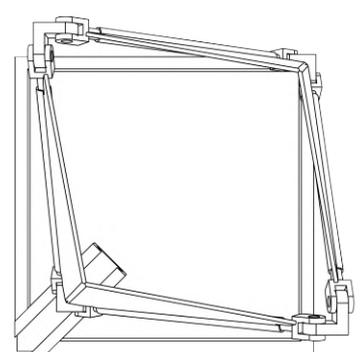
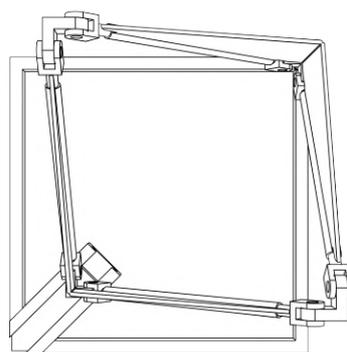
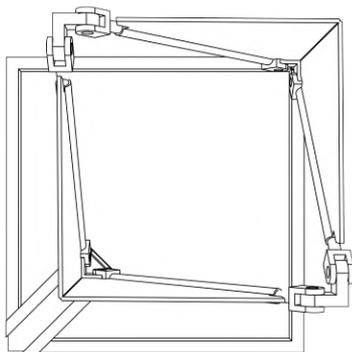


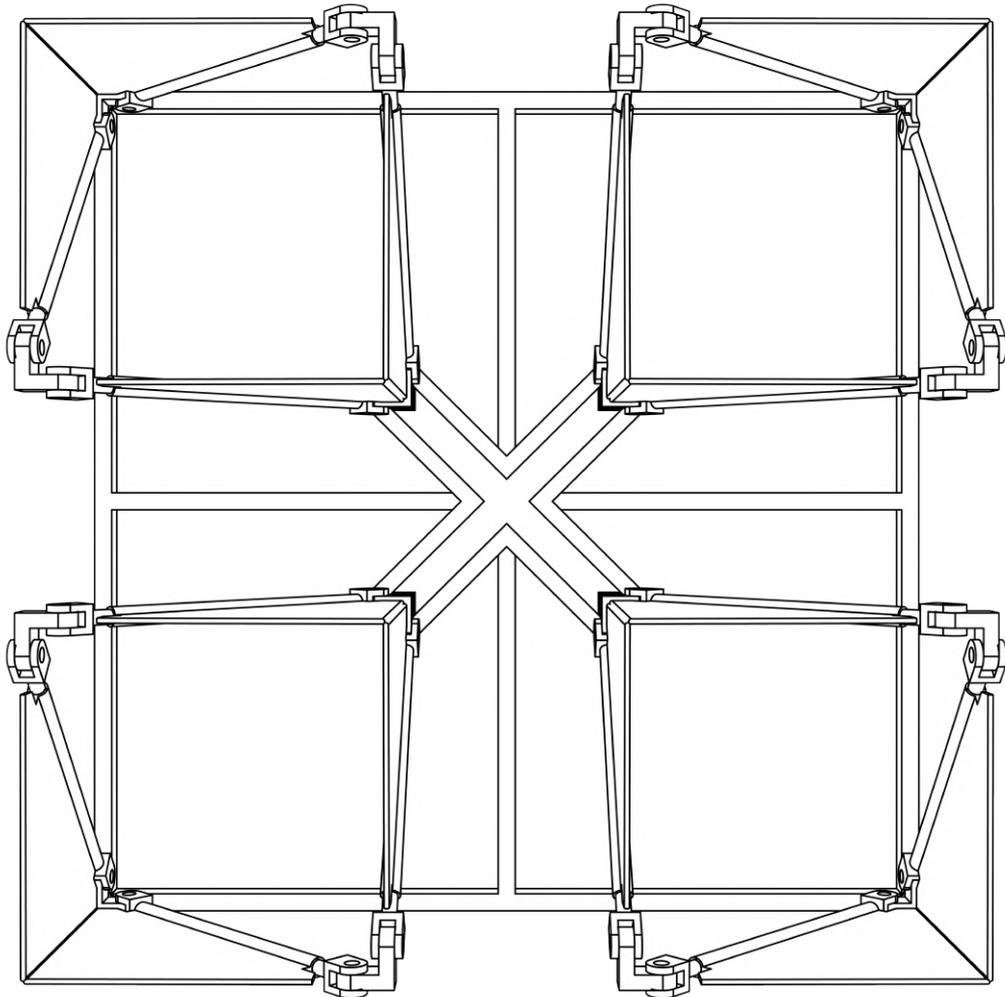
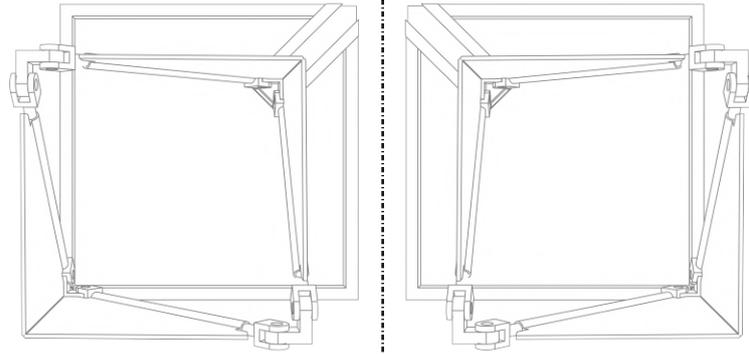
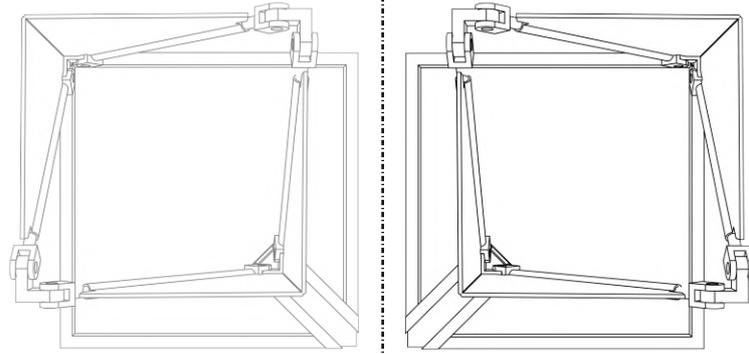


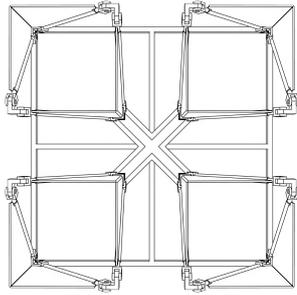
MODULES  
RECTANGULAIRES AVEC  
TRANSLATION  
MECANIQUE D'UN  
SOMMET

## MODULE N°6

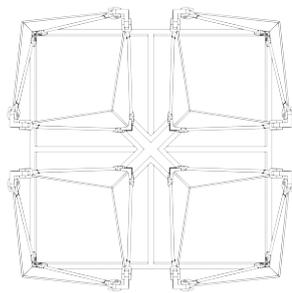
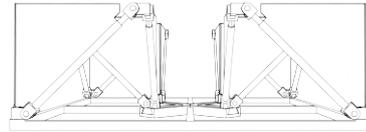
L'assemblage est constitué d'une base rectangulaire avec une raie diagonale intégrée dans l'angle. La translation de la glissière contrôle le degré d'ouverture du module. Deux pans articulés sur leurs côtés sont disposés symétriquement sur la diagonale et sont reliés en deux points. À l'état ouvert, le rapport entre le plein et le vide est suffisant pour permettre une bonne transparence de la façade.



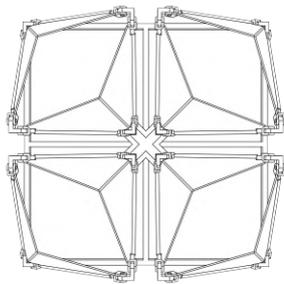
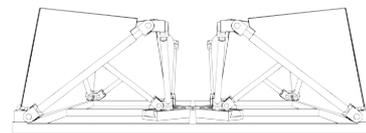




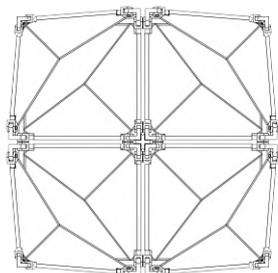
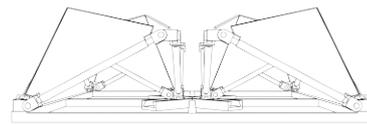
Ouvert



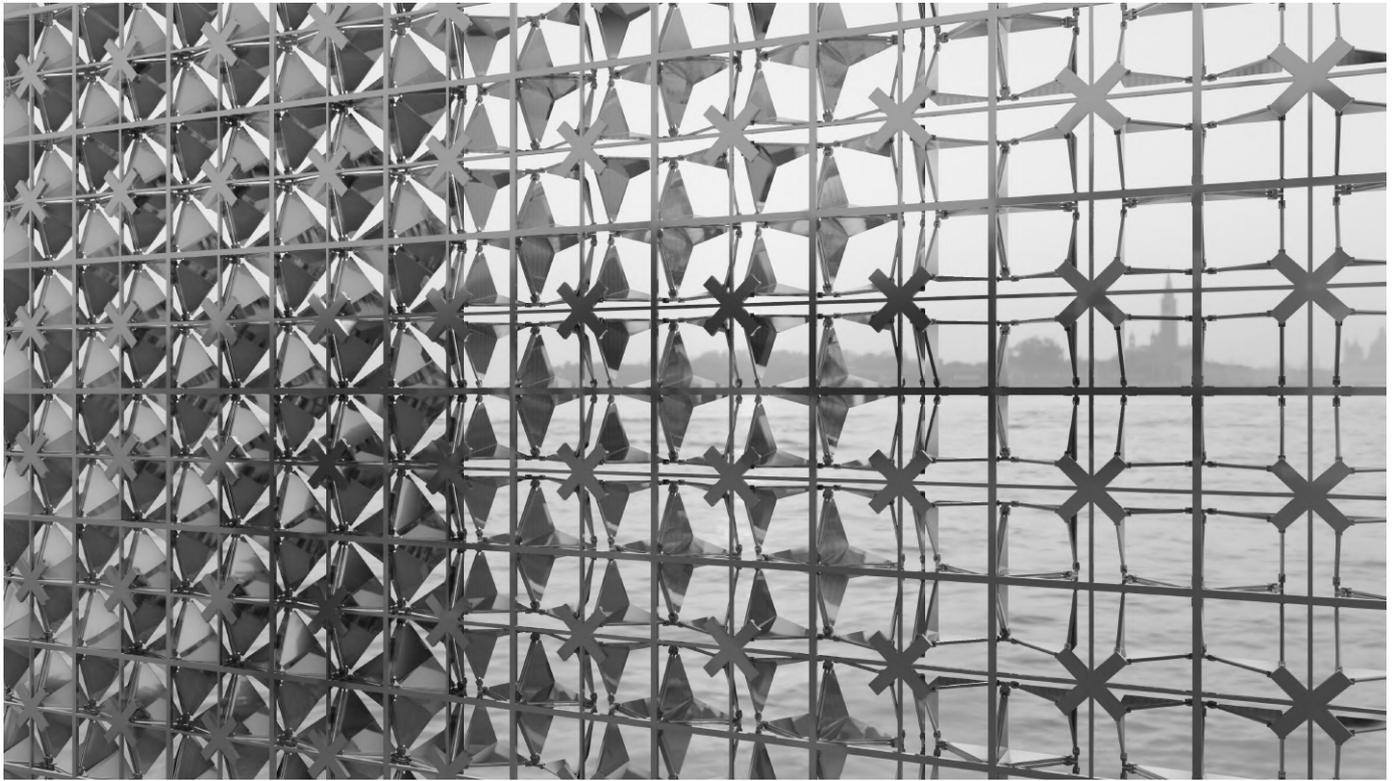
Mi-ouvert



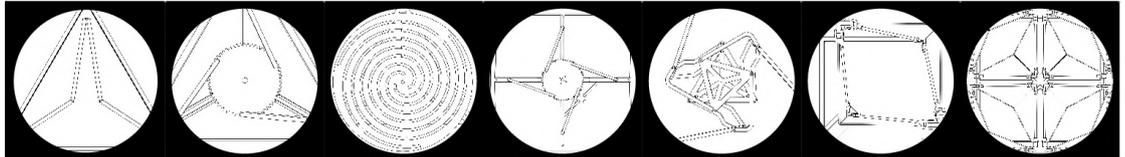
Mi-fermé



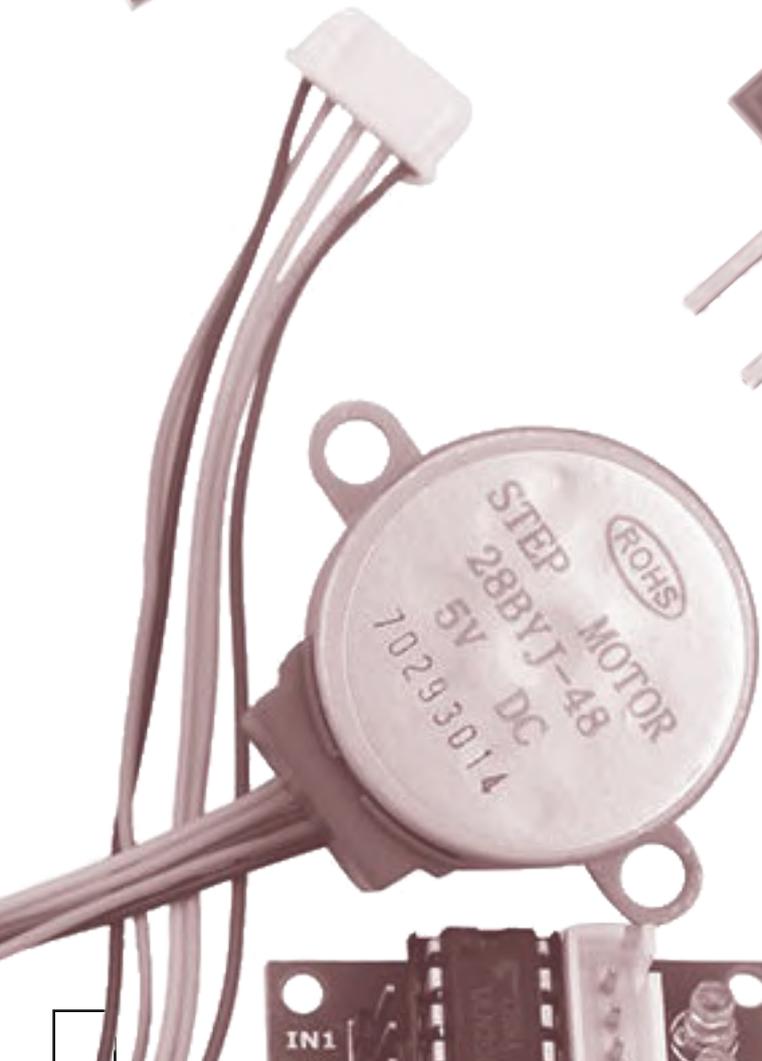
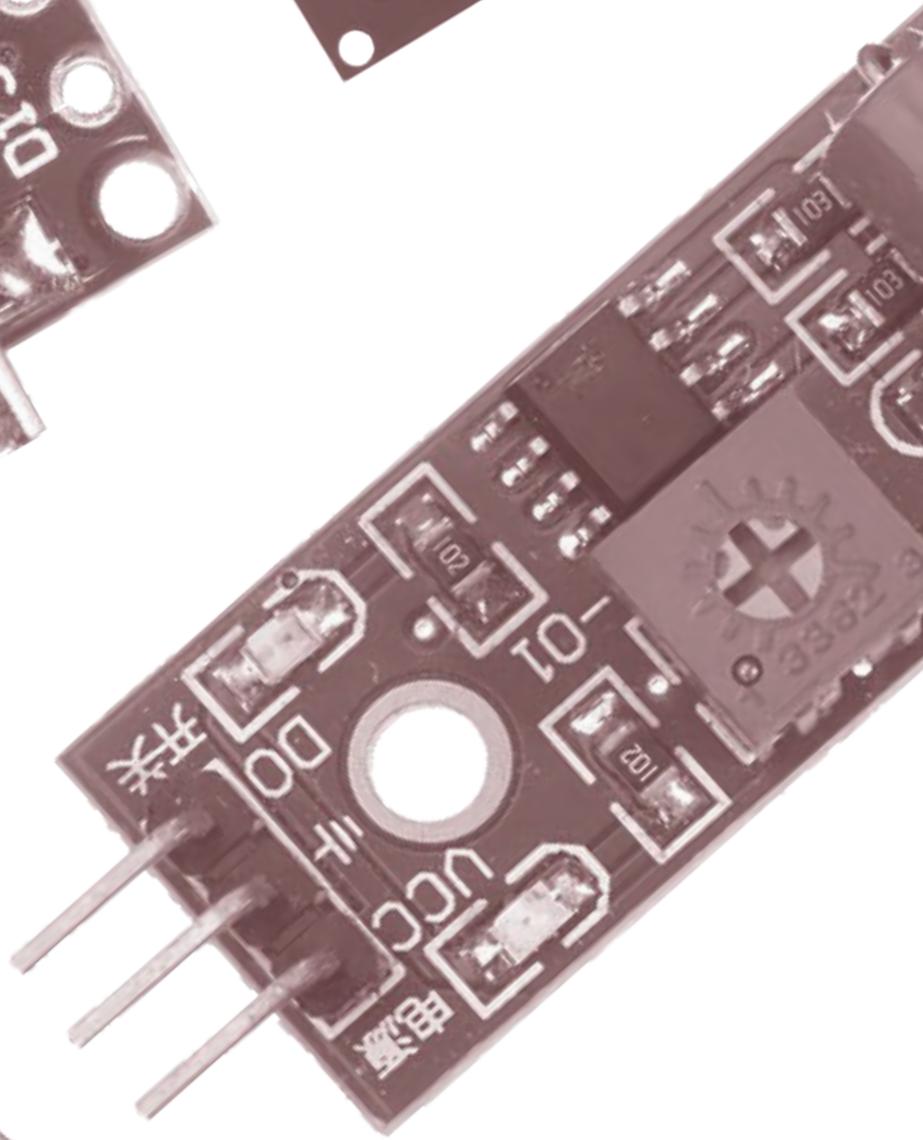
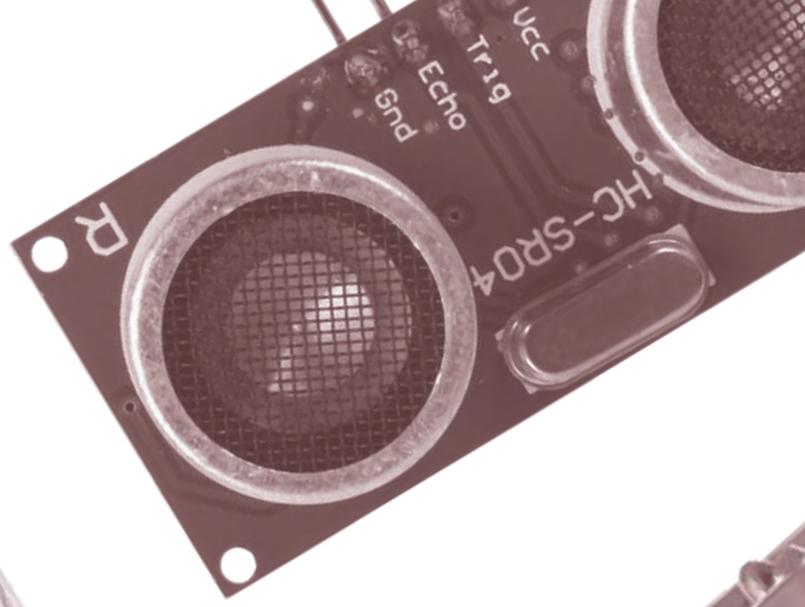
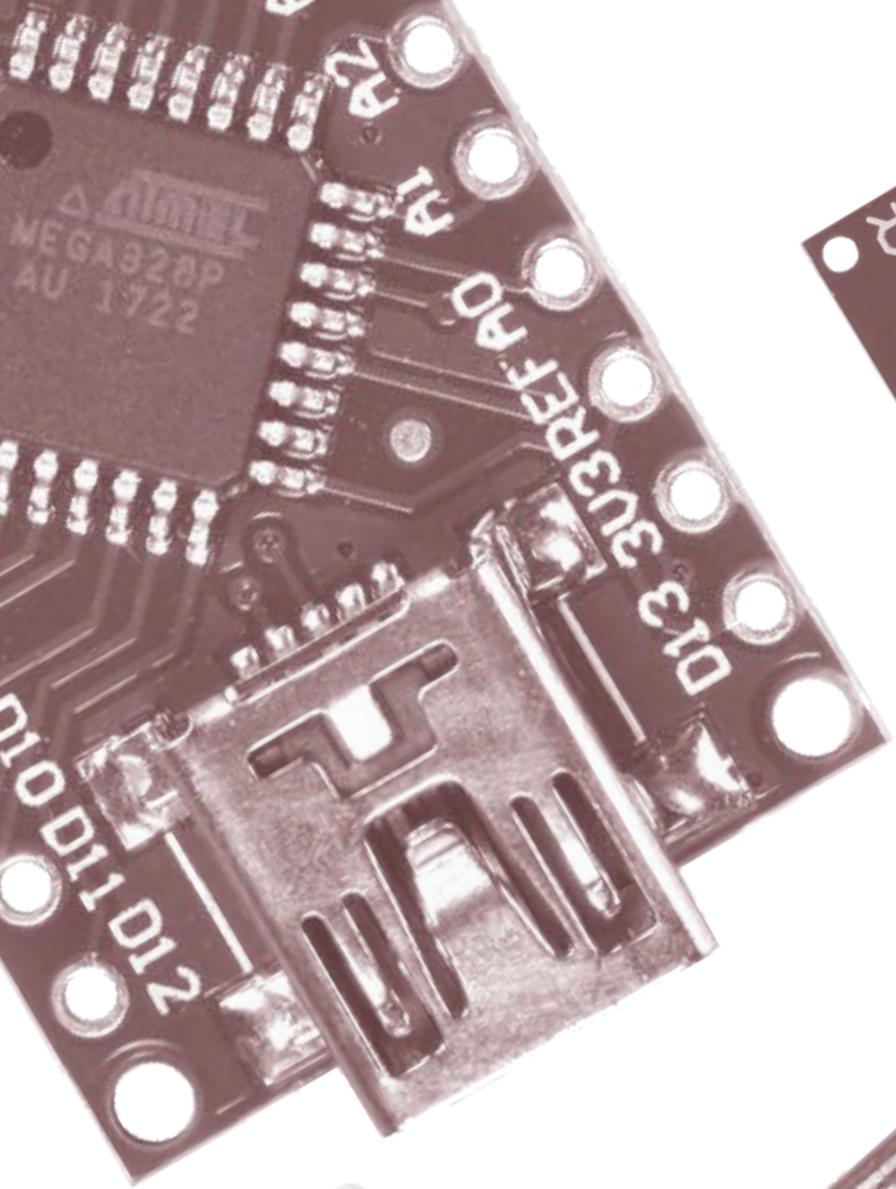
fermé

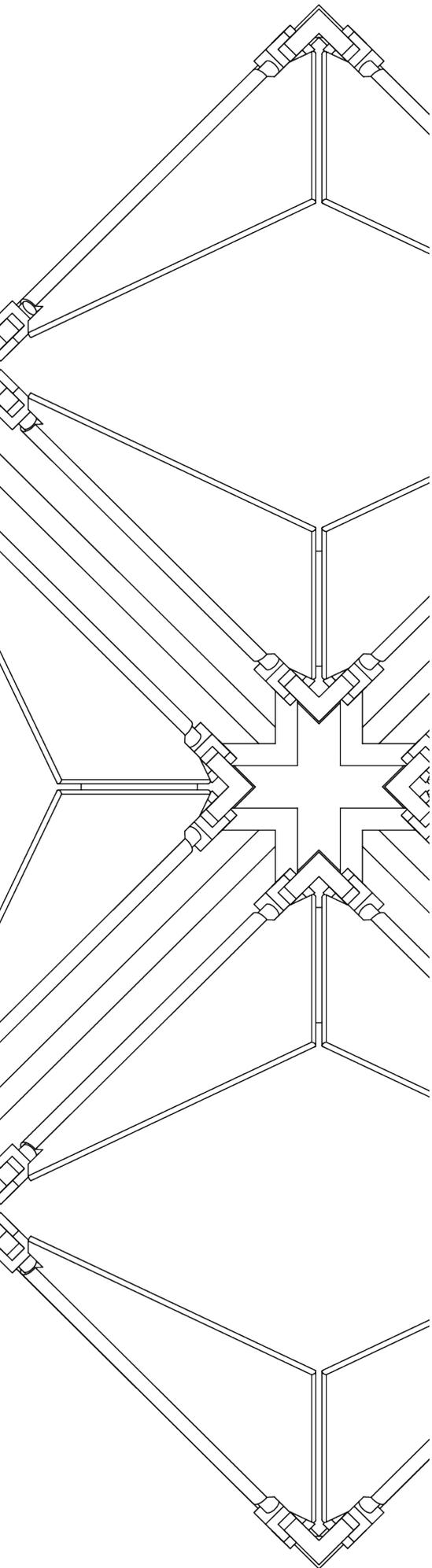


Un assemblage de quatre modules N°6 pivotés de 90 degrés autour de leurs lignes de glissement constitue l'élément cinétique choisi pour poursuivre la recherche. À l'état ouvert, les obstacles empêchant la vue de l'intérieur vers l'extérieur sont réduits à une fine structure autoportante. En même temps, elle protège l'intérieur de la vue des passants. En effet, la disposition des panneaux perpendiculairement à la façade empêche toute exposition visuelle non souhaitée. La disposition à l'extérieur de l'enveloppe protégée permet également une protection thermique à l'état fermé. Avec leur faible coefficient d'émissivité (0,1 pour l'aluminium), les panneaux servent d'isolation thermique contre le rayonnement infrarouge incident en réfléchissant 90 % de l'énergie thermique vers l'extérieur. En hiver, la situation peut être inversée en ouvrant les modules. Les pans sont donc en mesure de réfléchir l'énergie thermique vers l'intérieur et d'augmenter ainsi l'apport solaire du bâtiment. Ces effets seront étudiés plus en détail à l'étape 5. Un autre critère décisif pour le choix du mécanisme a été la facilité de relier les modules avec un mécanisme d'actionnement. Ce point est développé dans l'étape suivante. La façade peut être intégrée dans la logique structurelle du projet en fonction de l'utilité souhaitée pour le projet. En tournant les modules de 45 degrés, la structure peut être utilisée comme contreventement et renforcer le bâtiment. La grille orthogonale peut également aider à soutenir ou à suspendre les châssis des vitrages. Un inconvénient de cette mécanique est cependant la complexité de ces modules qui induit entre autres une sollicitation au niveau des articulations, ce qui risque une usure de ces dernières. Un entretien régulier est donc nécessaire pour assurer un bon fonctionnement.



<b>FORCE</b>	ROTATION 60° AUX DEUX SOMMETS	ROTATION 120° AU CENTRE	ROTATION 810° AU CENTRE	ROTATION 95° AU CENTRE	ROTATION 120° AU CENTRE	TRANSLATION DE GLISSIÈRE 55 MM	TRANSLATION DES GLISSIÈRES 55 MM RAYON
<b>DIMENSIONS</b>	0.2 m	0.2 m	0.2 m	0.25 m	0.2 m	0.4 m x 0.4 m	0.1 m x 0.1 m
<b>OUVERT</b>	97% VIDE 3% PLEIN	72% VIDE 28% PLEIN	13% VIDE 87% PLEIN	81% VIDE 19% PLEIN	84% VIDE 16% PLEIN	87% VIDE 13% PLEIN	87% VIDE 13% PLEIN
<b>FERMÉ</b>	1% VIDE 99% PLEIN	2% VIDE 98% PLEIN	2% VIDE 98% PLEIN	2% VIDE 98% PLEIN	11% VIDE 89% PLEIN	4% VIDE 96% PLEIN	4% VIDE 96% PLEIN
<b>FRAGMENTS</b>	4 BRAS + BASE	3 BRAS 1 ROUE DENTÉE + BASE	1 PLATEAU + BASE	4 BRAS 1 ROUE DENTÉE + BASE	1 PLATEAU 12 BRAS + BASE	4 BRAS 4 PANS + BASE	16 BRAS 16 PANS + BASE
<b>AVANTAGE</b>	RAPPORT PLEIN/VIDE	FORME TRIANGULAIRE	LIBERTÉ DE MOUVEMENT	RAPPORT PLEIN/VIDE	RAPPORT OUVERT/ FERMÉ	RAPPORT FORCE/ ACTION	SIMPLICITÉ ACTIONNE- MENT
<b>INCONVENIENT</b>	FRAGILITÉ	USURE	RAPPORT PLEIN/VIDE	USURE	COMPLEXITÉ	USURE	USURE

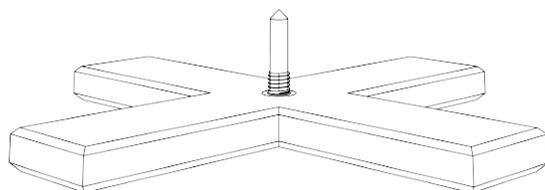
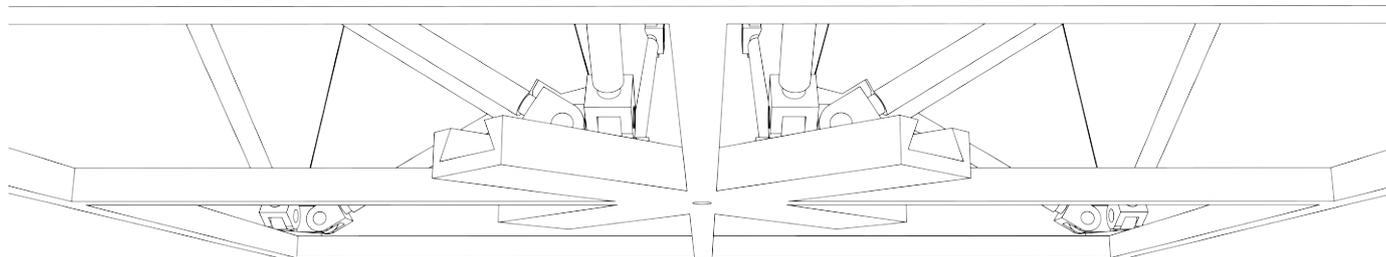
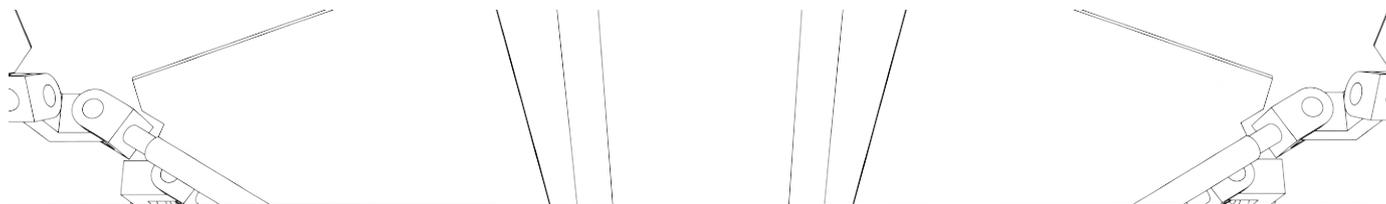




## ÉTAPE 4 : MÉCANISMES DE RÉGULATION

L'étude formelle des modules doit être suivie de recherches au niveau du mécanisme de régulation. C'est le mécanisme fondamental pour permettre la fonctionnalité des façades réponsives. Le mode d'actionnement conditionne de manière significative la performance de l'ensemble.

La question du système de régulation implique l'étude de plusieurs autres facteurs : les différents stimuli de déclenchement, la force vectorielle et le mode de fonctionnement du mécanisme lui-même.



L'une des principales critiques des façades cinétiques concernant le confort intérieur est l'impossibilité pour l'utilisateur de contrôler l'ensoleillement naturel du soleil. En fait, les exemples étudiés dans la première phase agissent selon des mécanismes différents mais sont tous contraints au fonctionnement imaginé par l'architecte. Cela signifie qu'une façade bimétallique, par exemple, protège l'intérieur de la surchauffe, mais en hiver, nous rencontrerons des situations dans lesquelles la lumière naturelle du soleil sera tamisée. Dans ces cas, la façade utilisée n'est plus en mesure de répondre aux besoins de l'habitant. Pour contrer ces problèmes et offrir un concept d'adaptabilité plus fluide, l'approche suivie dans ce travail est basée sur l'interchangeabilité des mécanismes de déclenchement. Dans cette étape, il sera montré qu'il est possible de développer différentes pièces régulatrices qui fonctionneront de différentes manières. En développant cinq pièces différentes en termes d'autonomie, de liberté de contrôle et de stimuli de déclenchement, le champ d'application des façades réactives s'élargit. La simplicité de l'application et de l'échange des pièces de déclenchement a également été importante.

```

1 // Include Libraries
2 #include "Arduino.h"
3 #include "DS18B20.h"
4 #include "NewPing.h"
5 #include "LDR.h"
6 #include "StepperMotor.h"
7
8
9 // Pin Definitions
10 #define DS18B20_PIN_DQ 2
11 #define HCSR04_PIN_TRIG 4
12 #define HCSR04_PIN_ECHO 3
13 #define LDR_PIN_SIG_A0
14 #define MQ2_SW_PIN_A01 A1
15 #define STEPPERGEARED_PIN_STEP 6
16 #define STEPPERGEARED_PIN_DIR 5
17 #define VIBRATIONSENSOR_SW_PIN_2 7
18
19
20
21 // Global variables and defines
22 #define THRESHOLD_ldr 100
23 int ldrAverageLight;
24 #define stepperGearedDelayTime 1000
25 // object initialization
26 DS18B20 ds18b20(DS18B20_PIN_DQ);
27 NewPing hcsr04(HCSR04_PIN_TRIG,HCSR04_PIN_ECHO);
28 LDR ldr(LDR_PIN_SIG);
29 StepperMotor stepperGeared(STEPPERGEARED_PIN_STEP,STEPPERGEARED_PIN_DIR);
30
31
32 // define vars for testing menu
33 const int timeout = 10000; //define timeout of 10 sec
34 char menuOption = 0;
35 long time0;
36
37 // Setup the essentials for your circuit to work. It runs first every time your
38 // circuit is powered with electricity.
39 void setup()
40 {
41 // Setup Serial which is useful for debugging
42 // Use the Serial Monitor to view printed messages
43 Serial.begin(9600);
44 while (!Serial); // wait for serial port to connect. Needed for native USB
45 Serial.println("start");
46
47 ldrAverageLight = ldr.readAverage();
48 // enable the stepper motor, use .disable() to disable the motor
49 stepperGeared.enable();
50 // set stepper motor speed by changing the delay value, the higher the delay
51 // the slower the motor will turn stepperGeared.setStepDelay(stepperGearedDelayTime);
52 menuOption = menu();
53 }
54
55 // Main logic of your circuit. It defines the interaction between the components
56 // selected. After setup, it runs over and over again, in an eternal loop.
57 void loop()
58 {
59
60 if(menuOption == 1) {
61 // DS18B20 1-Wire Temperature Sensor - Test Code
62 // Read DS18B20 temp sensor value in degrees celsius. for degrees Fahrenheit
63 // use ds18b20.readTemp()
64 float ds18b20TempC = ds18b20.readTempC();
65 Serial.print(F("temp: ")); Serial.print(ds18b20TempC);
66 Serial.println(F(" [C]"));
67 }
68 else if(menuOption == 2) {
69 // Ultrasonic Sensor - HC-SR04 - Test Code
70 // Read distance measurement from Ultrasonic sensor
71 int hcsr04Dist = hcsr04.ping_cm();
72 delay(10);
73 Serial.print(F("Distance: ")); Serial.print(hcsr04Dist);
74 Serial.println(F(" cm"));
75 }
76 else if(menuOption == 3) {
77 // LDR (Mini Photocell) - Test Code
78 // Get current light reading, subtract the ambient value to detect light
79 // changes
80 int ldrSample = ldr.read();
81 int ldrDiff = abs(ldrAverageLight - ldrSample);
82 Serial.print(F("Light Diff: ")); Serial.println(ldrDiff);
83 }
84 else if(menuOption == 4) {
85 // Disclaimer: The Methane, Butane, LPG and Smoke Gas Sensor - MQ-2 is in
86 // testing and/or doesn't have code, therefore it may be buggy. Please be kind and
87 // report any bugs you may find.
88 }
89 else if(menuOption == 5) {
90 // Small Reduction Stepper Motor with EasyDriver - 5VDC 32-Step 1/16 Gearing
91 // Test code
92 // the higher the time value the slower the motor will run
93 stepperGeared.step(1, 1000); // move motor 1000 steps in one direction
94 delay(1000); // short stop
95 stepperGeared.step(0, 1000); // move motor 1000 steps in the other direction
96 delay(1000); // short stop
97 }
98 else if(menuOption == 6) {
99 // Disclaimer: The Fast Vibration Sensor Switch (Easy to trigger) is in testing
100 // and/or doesn't have code, therefore it may be buggy. Please be kind and report any
101 // bugs you may find.
102 }
103
104 if (millis() - time0 > timeout)
105 {
106 menuOption = menu();
107 }
108 }
109
110 // Menu function for selecting the components to be tested
111 // Follow serial monitor for instructions
112 char menu()
113 {
114 Serial.println(F("\nWhich component would you like to test?"));
115 Serial.println(F("(1) DS18B20 1-Wire Temperature Sensor"));
116 Serial.println(F("(2) Ultrasonic Sensor - HC-SR04"));
117 Serial.println(F("(3) LDR (Mini Photocell)"));
118 Serial.println(F("(4) Methane, Butane, LPG and Smoke Gas Sensor - MQ-2"));
119 Serial.println(F("(5) Small Reduction Stepper Motor with EasyDriver - 5VDC 32-Step 1/16 Gearing"));
120 Serial.println(F("(6) Fast Vibration Sensor Switch (Easy to trigger)"));
121 Serial.println(F("(menu) send anything else or press on board reset button"));
122 while (!Serial.available());
123
124 // Read data from serial monitor if received
125 while (Serial.available())
126 {
127 char c = Serial.read();
128 if (isAlphanumeric(c))
129 {
130 if(c == 1)
131 Serial.println(F("Now Testing DS18B20 1-Wire Temperature Sensor"));
132 else if(c == 2)
133 Serial.println(F("Now Testing Ultrasonic Sensor - HC-SR04"));
134 else if(c == 3)
135 Serial.println(F("Now Testing LDR (Mini Photocell)"));
136 else if(c == 4)
137 Serial.println(F("Now Testing Methane, Butane, LPG and Smoke Gas Sensor - MQ-2. note that this component doesn't have a test code"));
138 else if(c == 5)
139 Serial.println(F("Now Testing Small Reduction Stepper Motor with EasyDriver - 5VDC 32-Step 1/16 Gearing"));
140 else if(c == 6)
141 Serial.println(F("Now Testing Fast Vibration Sensor Switch (Easy to trigger) note that this component doesn't have a test code"));
142 else
143 {
144 Serial.println(F("illegal input"));
145 return 0;
146 }
147 }
148 time0 = millis();
149 return c;
150 }
151 }
152 }

```

code arduino exemplaire

## ARDUINO



Arduino Nano



Breadboard



Reed Switch



Light Sensor



Gas Sensor



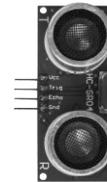
Servo Motor



Stepper Motor



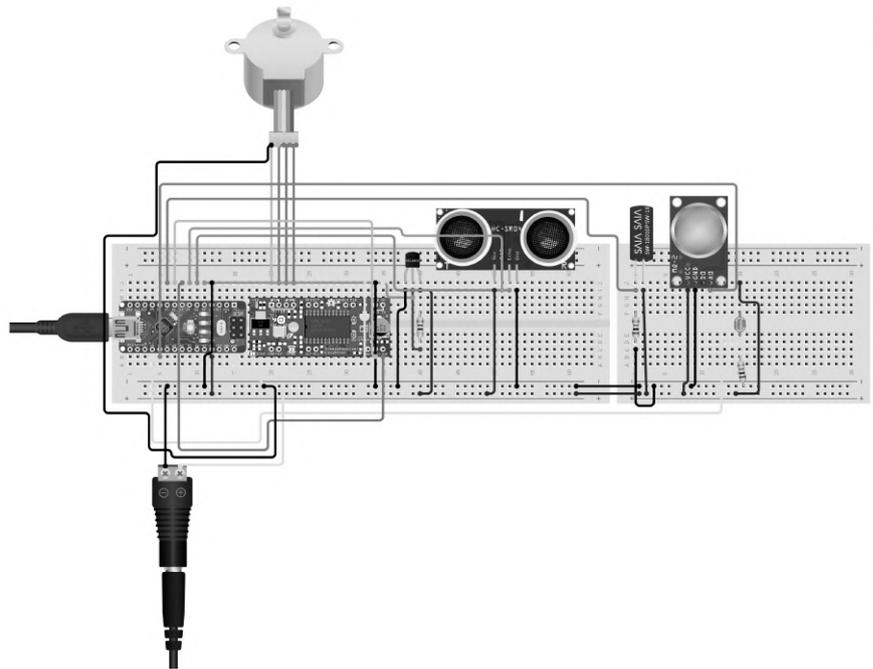
Thermo Sensor



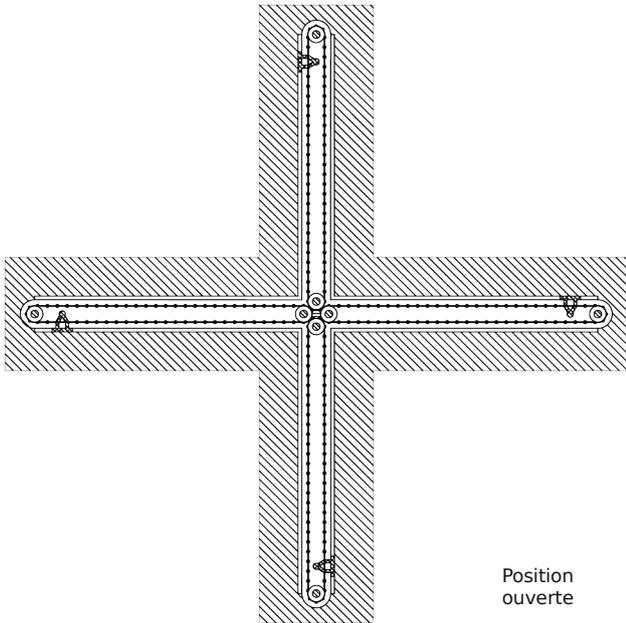
Proximity Sensor



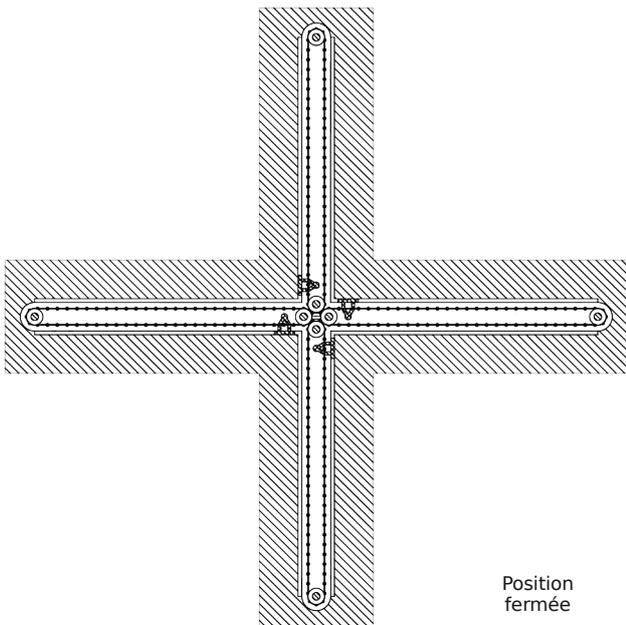
Vibration Sensor



Avant de développer les détails techniques des pièces, il était intéressant de mieux comprendre l'approche cybernétique classique basée sur l'utilisation de senseurs, de moteurs et de sources d'énergie auxiliaires. Pour cela, une configuration intégrant une multitude de capteurs différents a fait l'objet d'une expérimentation. Ainsi, il était relativement simple de détecter des différences de pression, de gaz, de température, de lumière, de vibration et de proximité, pour ensuite faire fonctionner un seul moteur.



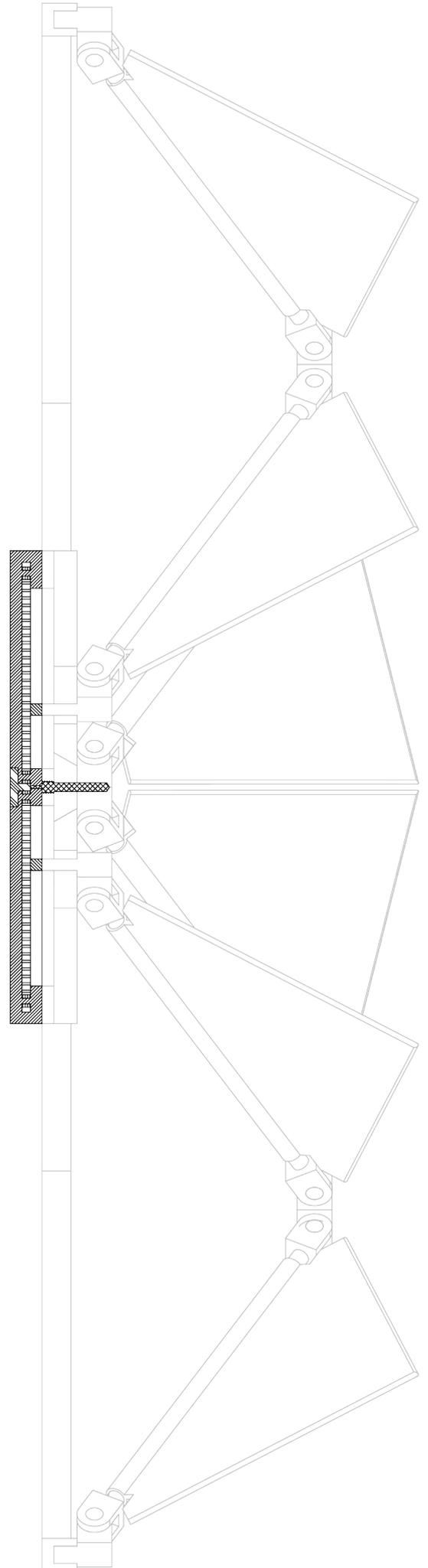
Position ouverte

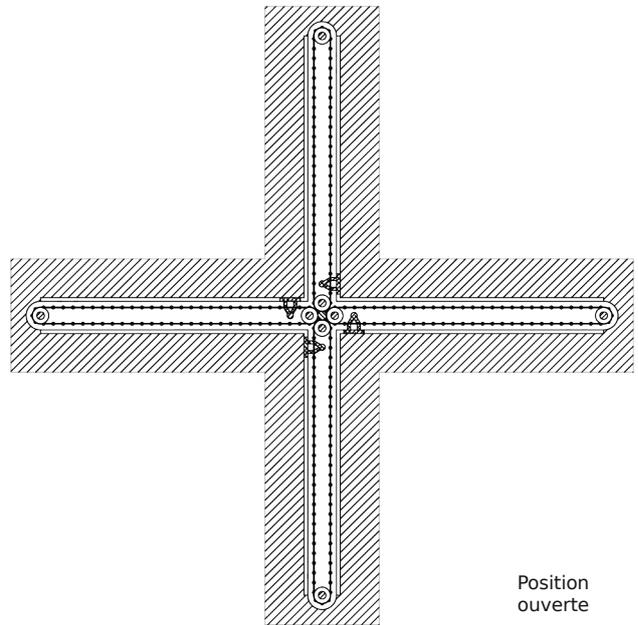
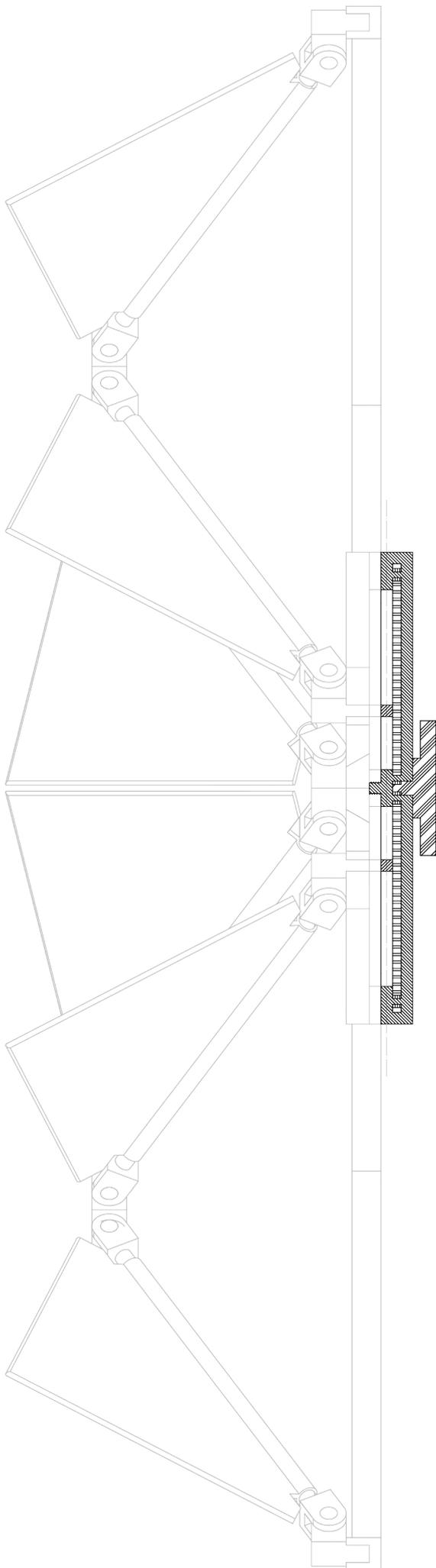


Position fermée

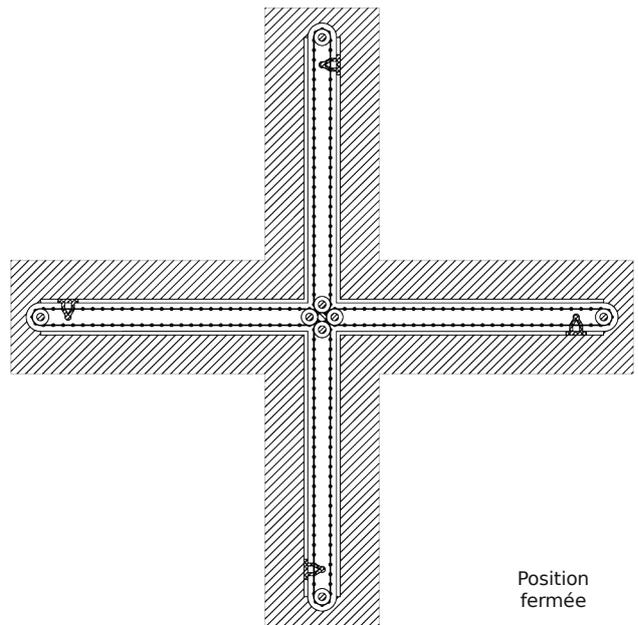
Intégrés dans la tige exposée au contexte extérieur, les capteurs détectent des paramètres environnementaux qui seront transformés en signaux pour activer le servomoteur. En fonction des degrés de rotation de ce dernier, des aimants sont éloignés du centre du module au moyen d'un simple mécanisme à chaîne d'engrenages. Ces aimants constituent la connection entre la partie commandeur et le module de base.

## REGULATION MOTORISÉE





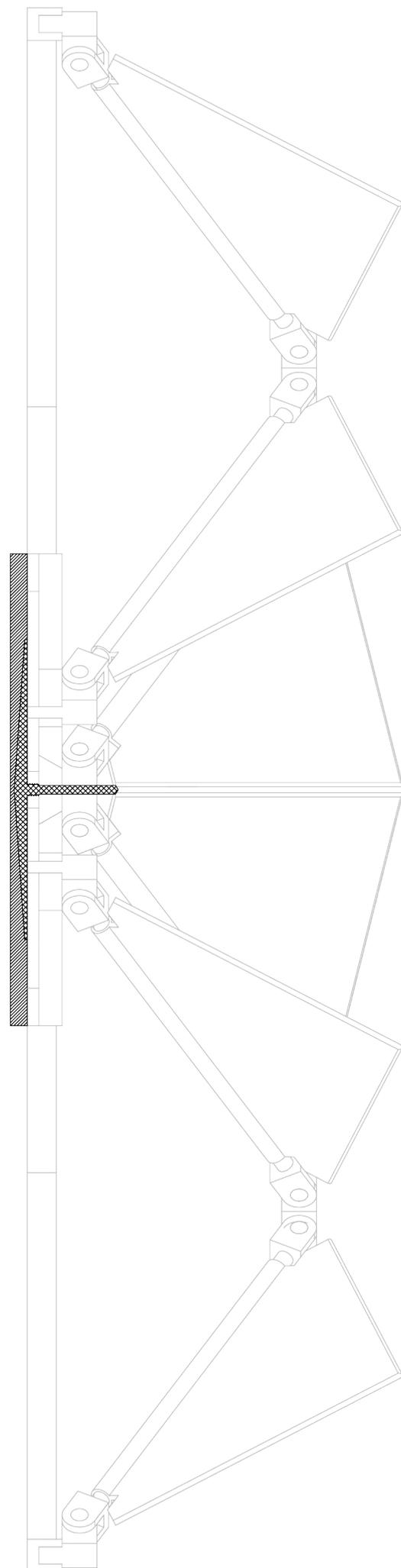
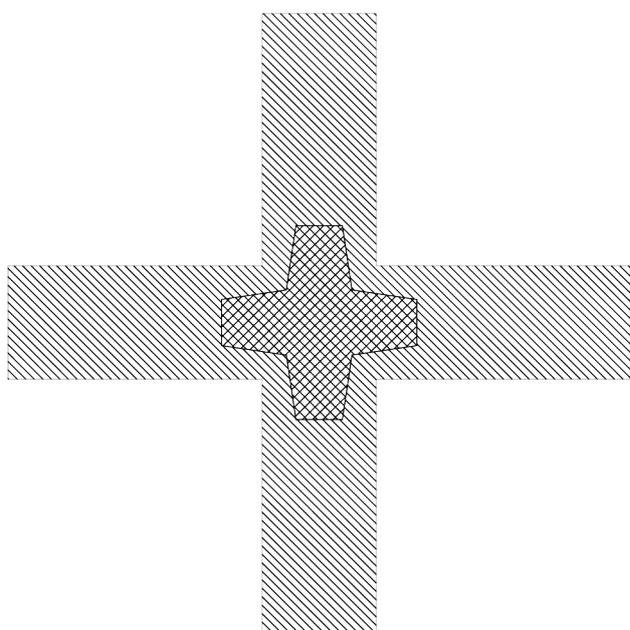
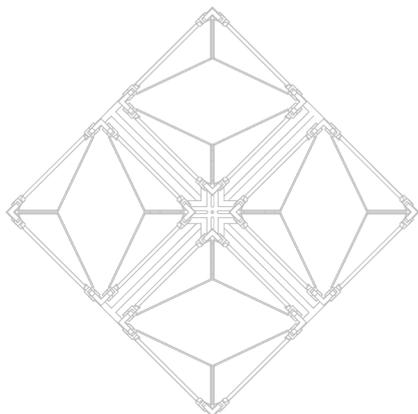
Position ouverte



Position fermée

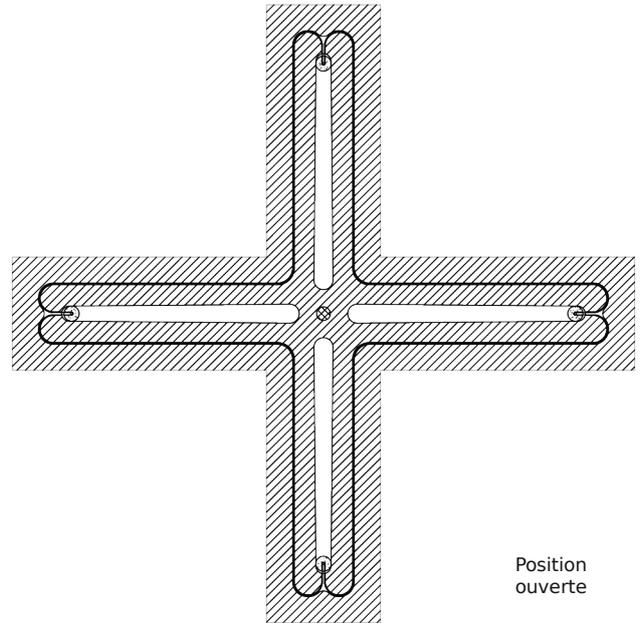
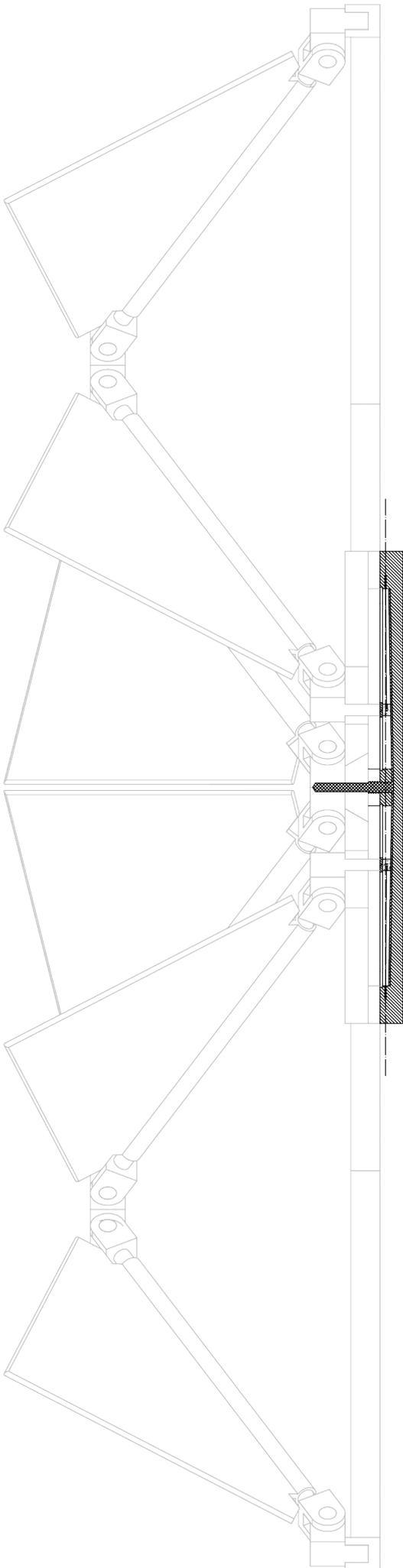
Comme pour la partie illustrée ci-dessus, les aimants suspendus à des chaînes d'engrenages s'éloignent du centre en fonction de la force de rotation appliquée au centre. Dans cet exemple, la roue dentée centrale ne est pas actionné par un moteur électrique mais par une molette de réglage. Cela permet à l'utilisateur de choisir lui même le degré d'ouverture de la façade.

## REGULATION MANUELLE

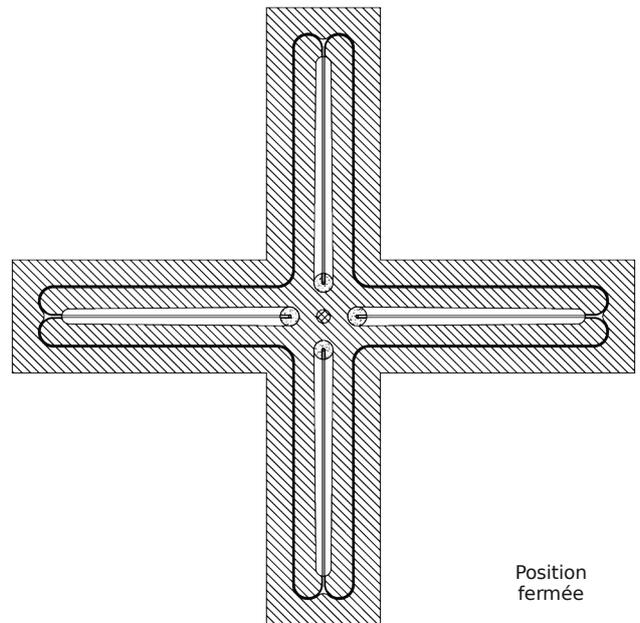


Pour cette pièce-ci, il s'agit d'un alliage de deux métaux qui, en raison de leurs caractéristiques physiques, créent un champ magnétique et régulent ainsi la translation des glissières magnétiques. L'effet de Curie exploité pour ce module consiste en la génération d'un champ magnétique par une différence de température dans un même conducteur.

## REGULATION PAR CHAMP MAGNETIQUE [EFFET CURIE]



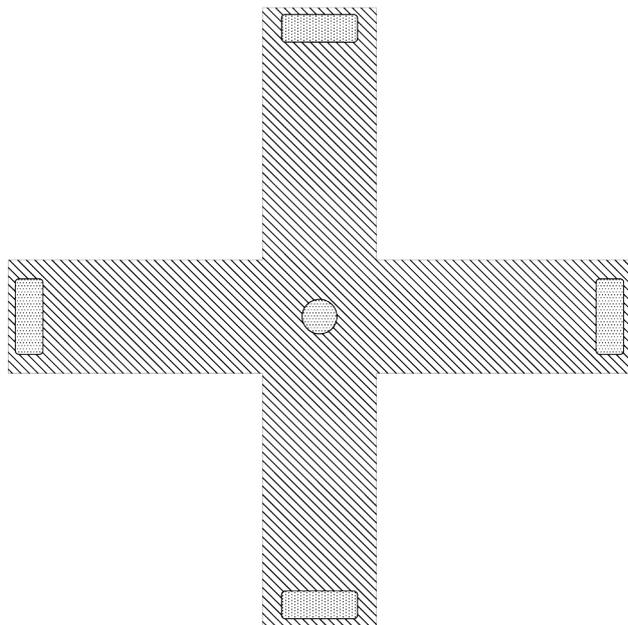
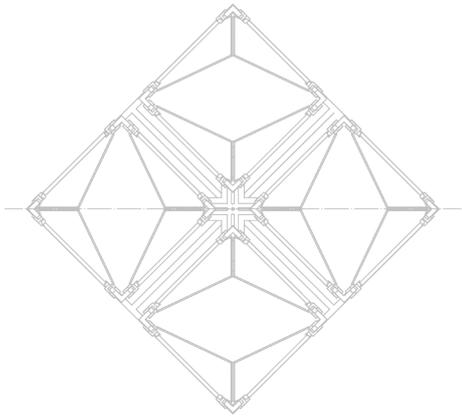
Position ouverte



Position fermée

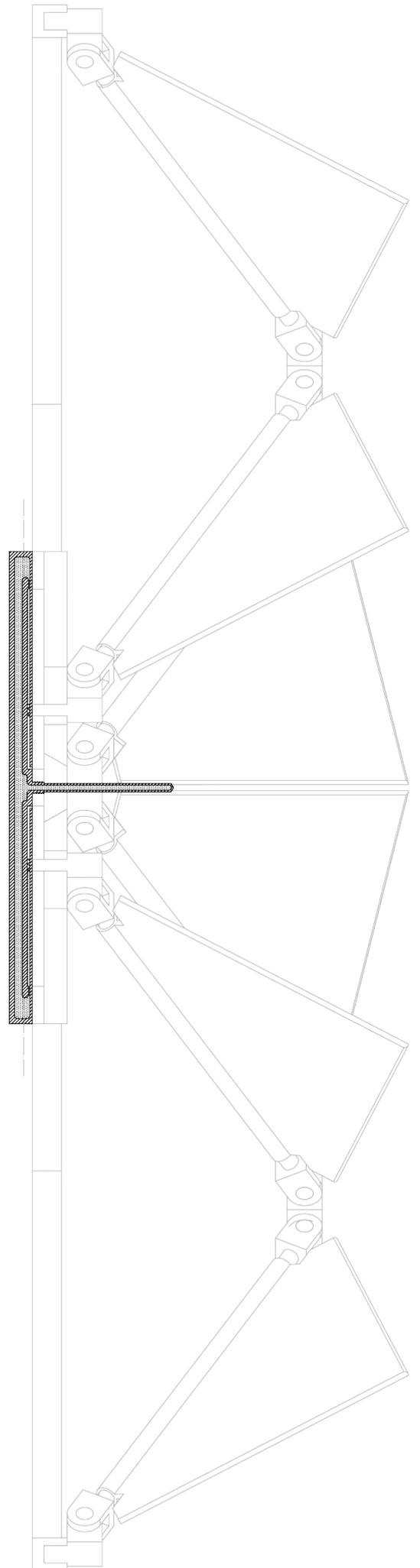
Semblable au fonctionnement des bimétaux, cette opération repose sur la dilatation différentielle des métaux par augmentation de leur température. La tige est utilisée pour transférer l'énergie thermique à quatre cônes métalliques qui se dilatent en augmentant leur température. Favorisée par la forme du cadre de cette pièce, cette dilatation entraîne une translation des cônes sur des axes perpendiculaires au centre.

**REGULATION PAR  
EXPANSION  
DIFFERENTIEL  
DE METAUX**



Ce module creux est rempli d'un gaz ou d'un liquide qui se dilate avec l'augmentation de la température. En raison de la section transversale réduite des conduits vers les pièces aimants, une augmentation de la pression interne entraînera une translation des ces cônes magnétisés. À l'inverse, lorsque le liquide refroidit, une sous-pression se crée, ce qui déplace les aimants vers les extrémités de la pièce.

## REGULATION PAR DILATATION DE GAZ/LIQUIDE



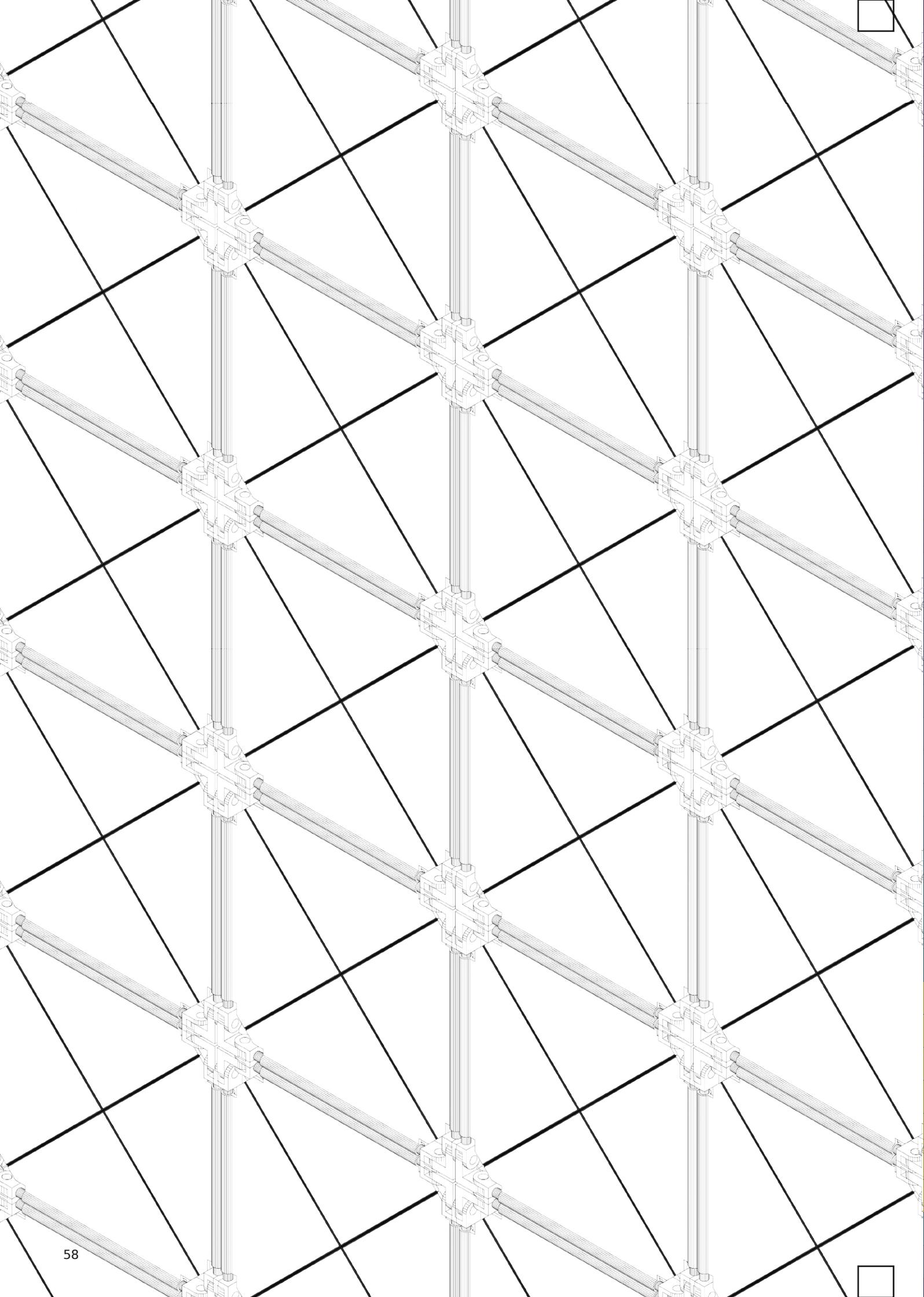
## CONCLUSION SUR LES MÉCANISMES RÉGULATOIRES

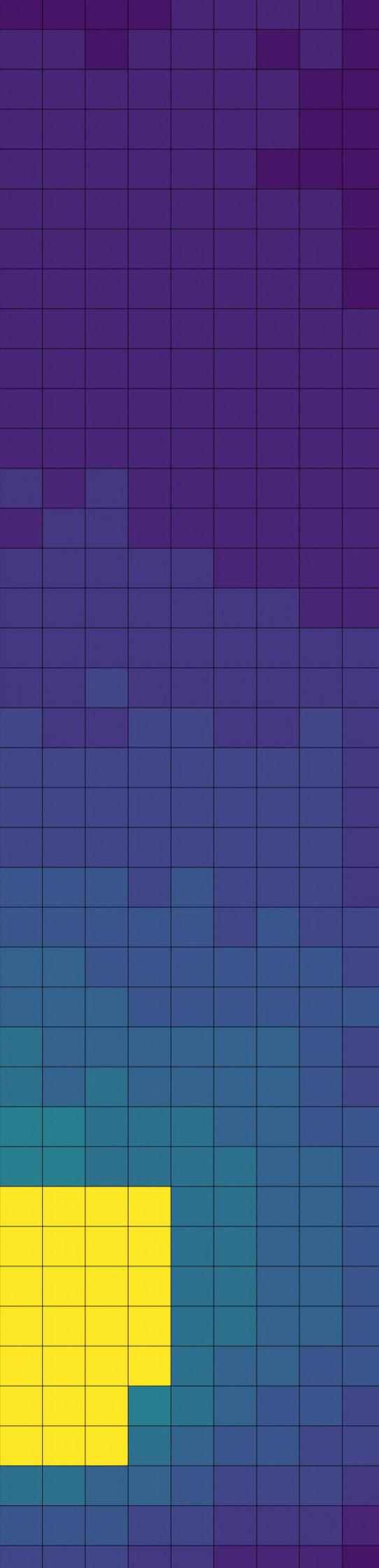
Il est important de préciser qu'il ne s'agit pas d'une recherche approfondie sur les différentes possibilités de réactions chimiques ou physiques. Une vérification des effets décrits dans les exemples précédents n'était possible que de manière théorique et abstraite. Il s'agit plutôt d'une réflexion sur les possibilités que différentes fonctions pouvant être appliquées aux mêmes modules pourraient offrir comme avantages. Cela signifie que les forces nécessaires pour faire fonctionner des mécanismes comme l'effet Curie n'ont pas été vérifiées dans un exemple réel.

L'un des avantages de la séparation de la façade cinétique en une partie mécanique et une partie régulatoire est l'augmentation de la durée de vie de l'ensemble. Si l'une des pièces est défectueuse après un certain temps, il est possible de ne remplacer que la pièce à défaut, ce qui évite des coûts supplémentaires pour la maintenance.

De plus, comme mentionné au début de cette étape, la multitude de contrôleurs différents offre une flexibilité en termes de niveau de confort souhaité par l'emploi de cette façade. Cette approche permet d'intégrer plusieurs modules de sensibilités différentes dans une seule façade. On pourrait donc imaginer d'intégrer entre les modules autonomes des éléments réglables au moyen de boutons moletés.

Les réflexions menées ici restent évidemment théoriques en l'état actuel car la nécessité d'une pièce de réglage pour chaque module cinétique n'est pas optimale d'un point de vue économique.





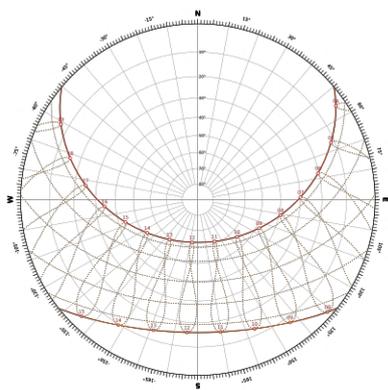
## ÉTAPE 5 : SIMULATION

La simulation est la première étape avec une approche pratique plutôt que théorique. Elle consiste à imaginer un contexte représentatif afin de tester les performances du système développé. Grâce à l'environnement modélisé, une simulation des différentes situations est possible. Il est ainsi possible de faire varier la course du soleil, de changer l'orientation, les dimensions des modules ou l'inclinaison du plan de filtrage.

L'utilité de ces simulations est de vérifier les impacts bénéfiques ou non d'une application dans un contexte réaliste.

## SITUATION CLIMATIQUE

Le climat océanique tempéré de Bruxelles est conditionné par la proximité de la mer. Il s'agit d'un climat relativement peu ensoleillé, avec des températures moyennes autour de dix degrés Celsius. En général, les fluctuations temporelles au fil des saisons sont modérées et les heures annuelles d'ensoleillement sont très faibles par rapport au reste de l'Europe avec 1500 heures. Le soleil se lève à 62 degrés au solstice d'été et descend à un angle de 16 degrés en décembre. Sur le diagramme psychrométrique, nous pouvons voir que la plupart des jours se situent en dehors de la zone de confort, ce qui signifie qu'à ces moments-là, un apport en chauffage est nécessaire pour permettre une atmosphère confortable à l'intérieur de nos bâtiments. En outre, nous remarquons que la répartition des heures de l'année se situe rarement en dehors de la zone de refroidissement naturel en été. En hiver et en mi-saison, le diagramme montre une répartition relativement homogène dans les quatre secteurs de chauffage : Les gains internes, les gains solaires passifs, le solaire actif et le chauffage conventionnel. L'avantage d'utiliser une façade qui protège contre la surchauffe est donc moins pertinent pour une application à Bruxelles. D'autre part, l'optimisation de l'utilisation de l'énergie solaire en hiver pour augmenter de manière passive les gains solaires pourrait privilégier une réduction de la consommation d'énergie primaire pour le chauffage. L'ensoleillement naturel et le bilan énergétique ont été évalués à l'aide d'une simulation d'une pièce représentative de Bruxelles dans les pages suivantes.



Course solaire

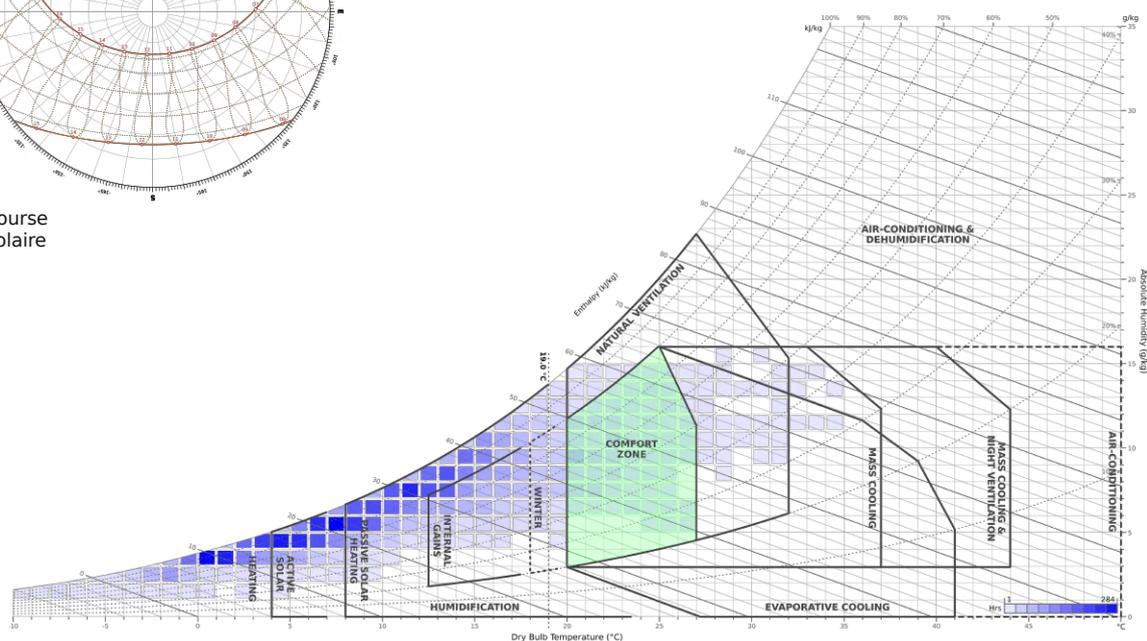
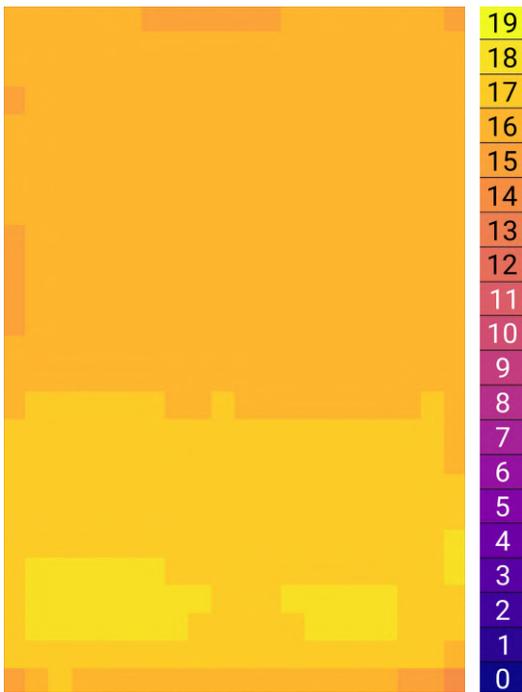


Diagramme psychrométrique (Bruxelles)



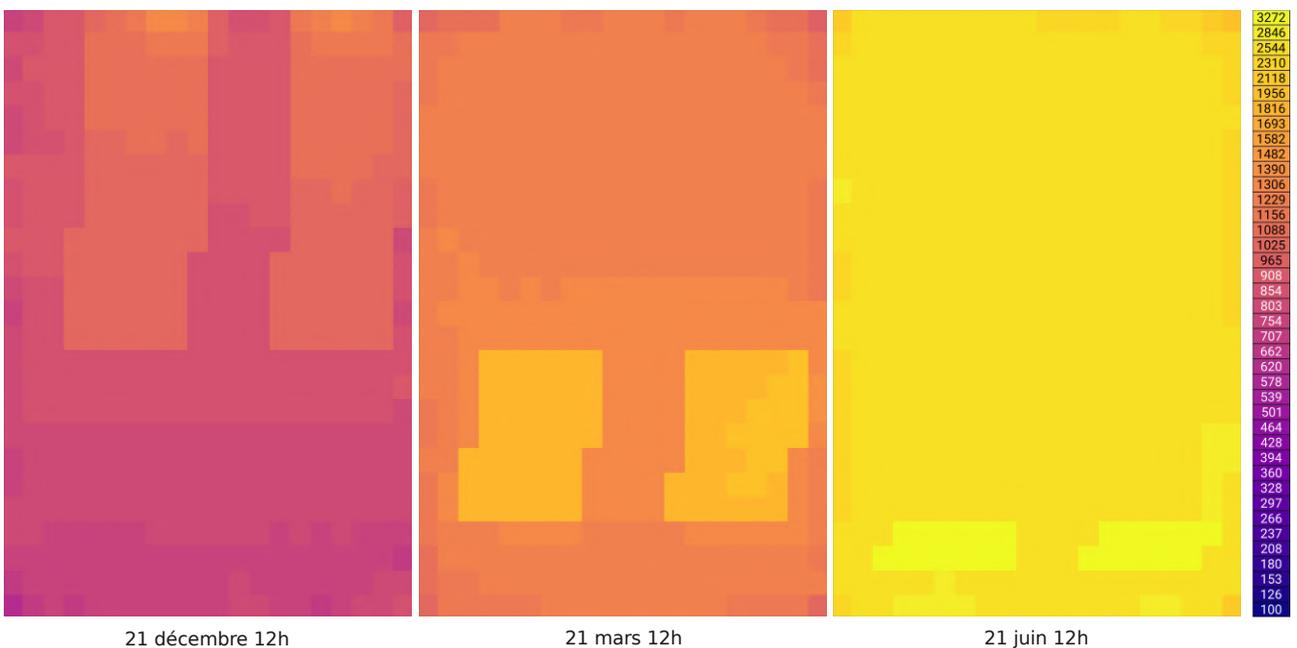
Daylight factor [%]



Cas de base

Pour cette simulation, est utilisé la même pièce et les mêmes dimensions que pour l'estimation du bilan énergétique de la première étape. Deux fenêtres de 1,7 m<sup>2</sup> orientées vers le sud s'ouvrent sur le salon de 24 m<sup>2</sup>. Il s'agit d'abord d'analyser l'influence sur l'ensoleillement naturel dans des conditions conventionnelles avec un double vitrage et un facteur de transmission thermique de 0,72. En analysant le facteur de lumière de jour sans protection solaire, on peut constater que les valeurs sont élevées avec un risque d'éblouissement à proximité des ouvertures. La répartition de la lumière naturelle dans la pièce n'est pas homogène et un confort lumineux n'est donc pas assuré. En été, des rideaux sont traditionnellement utilisés pour protéger de l'éblouissement des reflets trop intenses. Ils sont souvent accompagnés d'un éclairage artificiel pour compenser la perte de lumière dans les zones moins exposées. Les résultats en bas de page montrent l'illuminance en lux pour des jours représentatifs d'hiver, de mi-saison et d'été. En hiver, la lumière est relativement homogène et fournit un éclairage suffisant pour qu'aucune lumière artificielle supplémentaire ne soit nécessaire. Les fenêtres sont relativement grandes par rapport à la surface de la pièce et l'exposition au sud permet une bonne utilisation de la lumière naturelle. En mi-saison et surtout en été, il y a cependant une surexposition considérable.

Illuminance [Lux]  
(Cas de base)



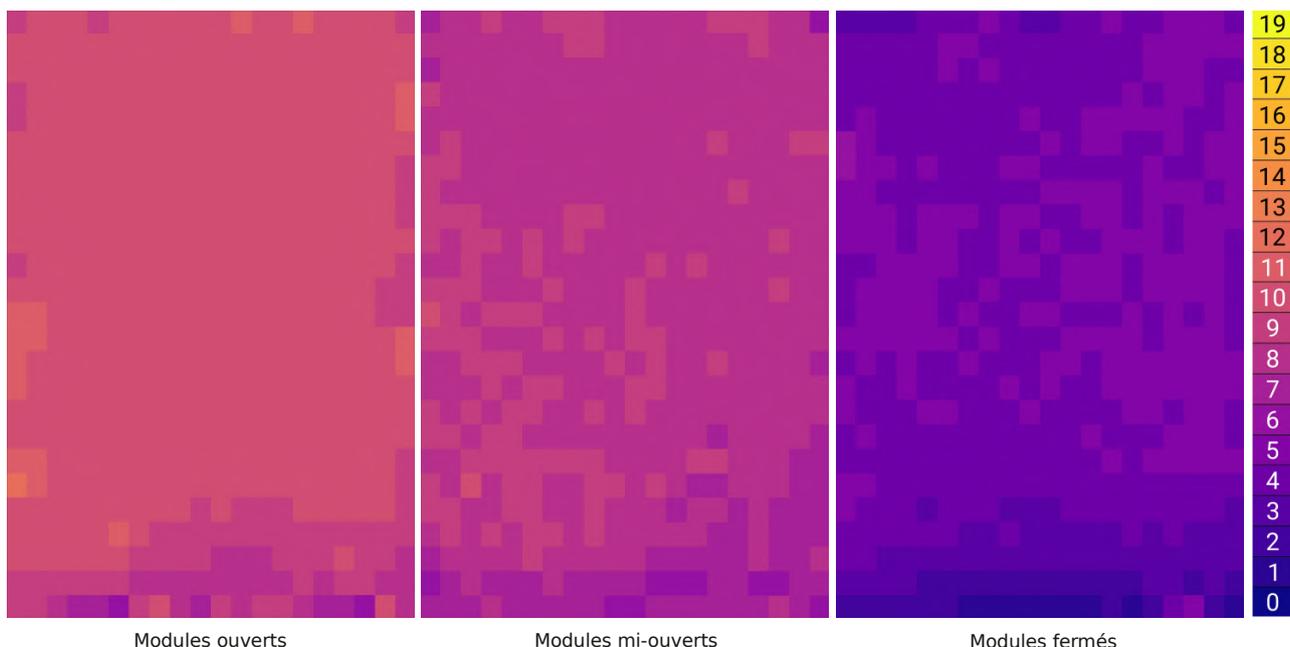
21 décembre 12h

21 mars 12h

21 juin 12h



Daylight factor [%]

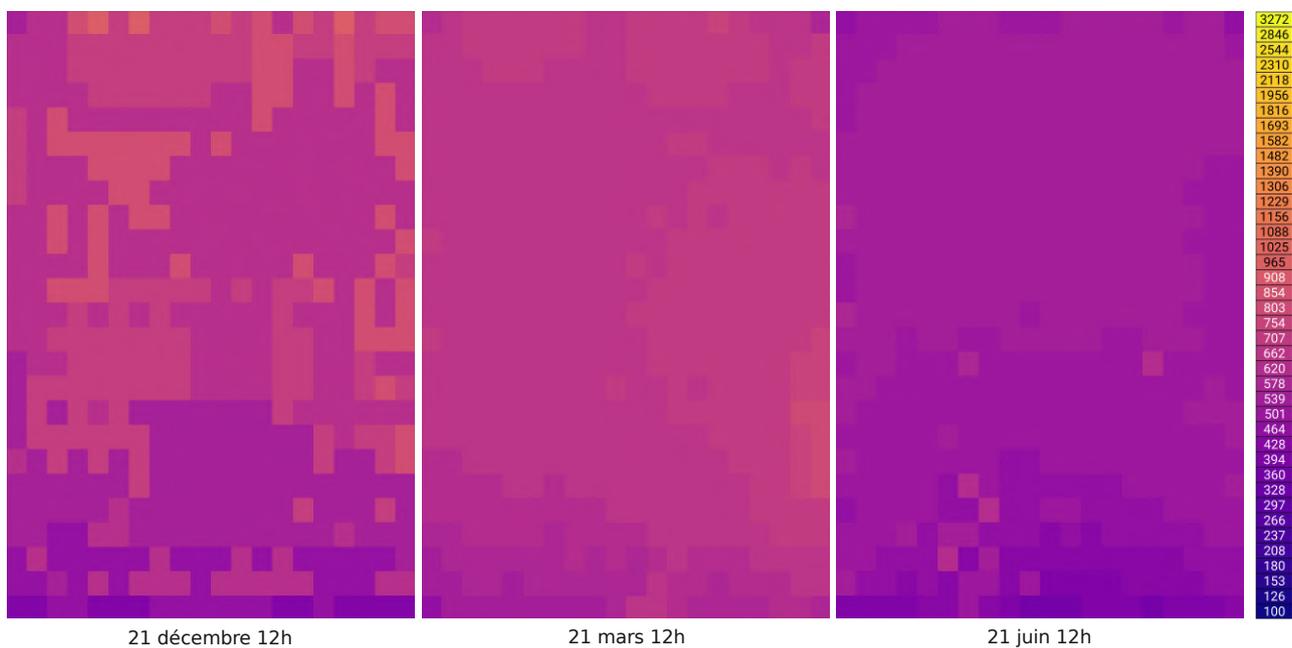


Modules ouverts

Modules mi-ouverts

Modules fermés

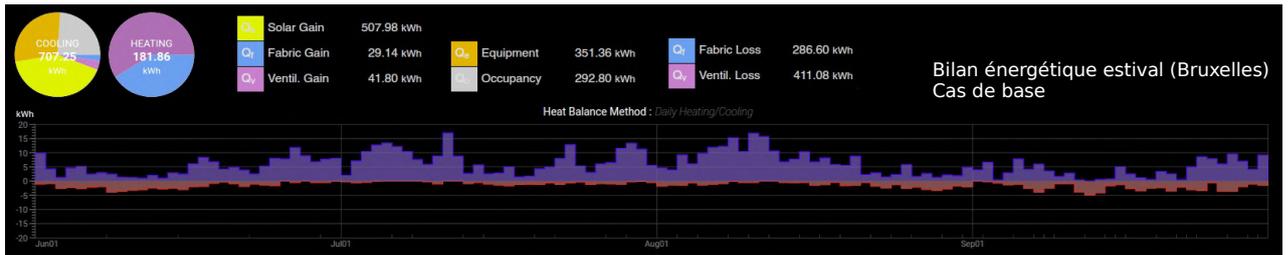
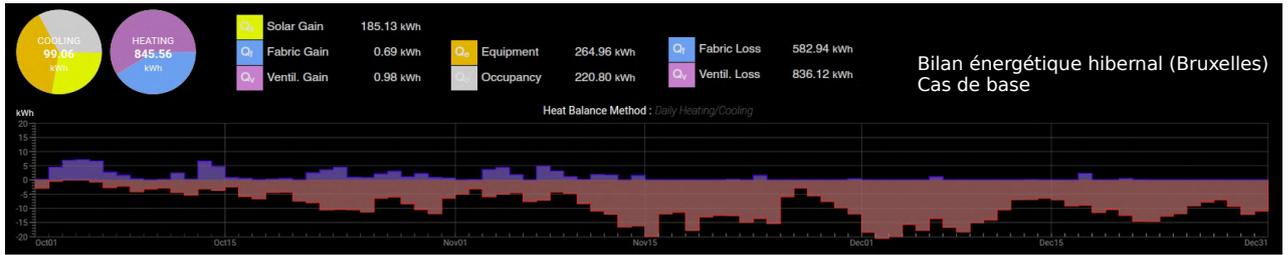
En simulant la même pièce avec une seule baie de 4,1 m<sup>2</sup> protégée par la façade cinétique développée dans les étapes précédentes, nous constatons tout d'abord que les situations d'ensoleillement sont sensiblement différentes selon le degré d'ouverture des modules. Les diagrammes du facteur de lumière de jour montrent une répartition plus homogène par rapport au cas de base. En hiver, la pièce présente un ensoleillement diffus qui éclaire la pièce équitablement et rend ainsi inutile tout recours à l'éclairage artificiel pendant la journée. La principale différence par rapport au cas de base est visible dans les résultats pour l'été et la mi-saison: Avec une fermeture partielle des modules de filtres cinétiques, les situations d'ensoleillement dans cette pièce deviennent plus confortables. Le niveau général de lumière est abaissé, mais aussi le risque d'éblouissement. Une réflexion de la lumière visible sur les pans métalliques rend la lumière entrante plus diffuse et plus homogène.

Illuminance [Lux]  
(Avec facade cinétique)

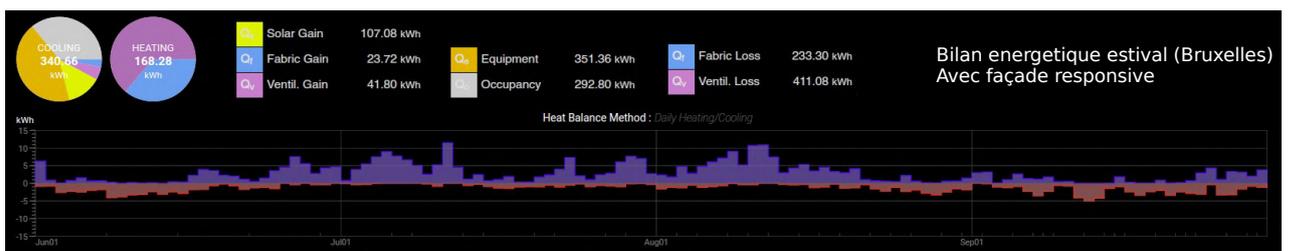
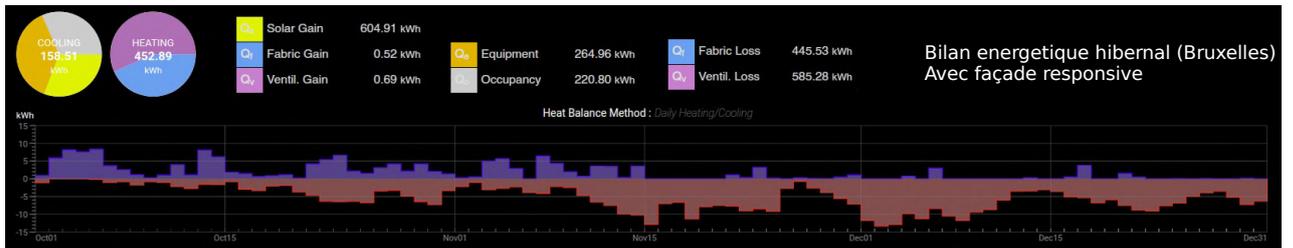
21 décembre 12h

21 mars 12h

21 juin 12h



Si l'on compare les bilans énergétiques de la pièce sans protection solaire avec ceux de la façade cinétique, on constate des avantages significatifs en termes de besoins de chauffage et de consommation d'énergie pour le refroidissement. La consommation d'énergie hivernale est principalement due au besoin de chauffage élevé en novembre et décembre. L'utilisation de la façade cinétique, qui permet une augmentation des rayons infrarouges vers l'intérieur par réflexion, réduit les besoins de chauffage de près de 50 %. Ceci est principalement dû à l'augmentation des gains solaires, qui sont multipliés par trois. De plus, grâce à l'application de ce filtre responsive, le facteur de transmission solaire du vitrage peut être réduit pour permettre le passage d'un pourcentage plus élevé de rayons.

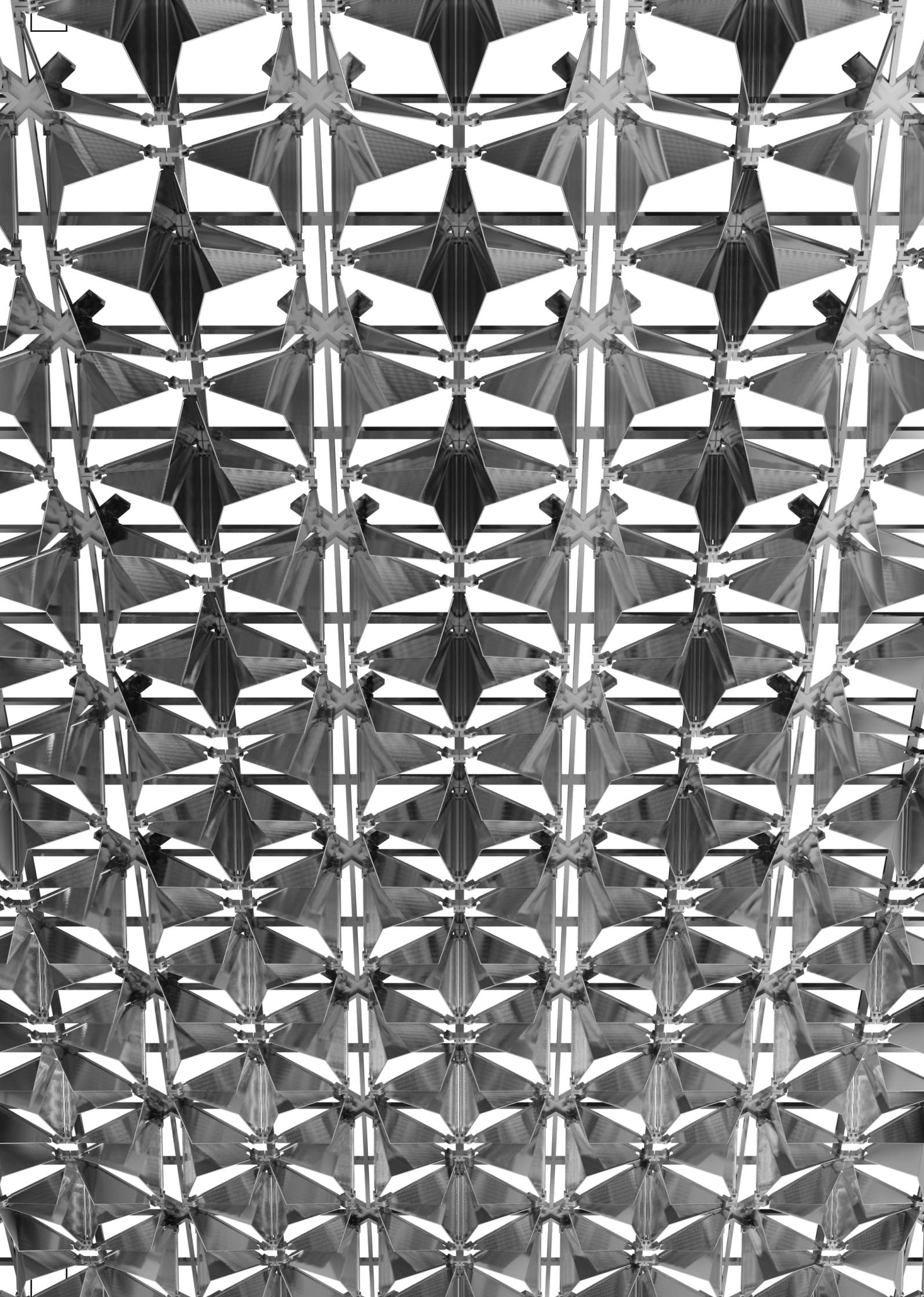


énergétiques du soleil. Un facteur g inférieur à 0,5 du vitrage provoque dans le cas classique, des problèmes de surchauffe en été mais comme il s'agit d'une combinaison de vitrage et de protection solaire, ce risque est réduit.

En été, le cas de base analysé montre une consommation élevée pour le refroidissement de la pièce. Normalement, ce risque est naturellement réduit par l'utilisation d'un rapport plus faible entre la baie et le volume protégé, mais dans la simulation, il était intéressant de conserver des proportions comparables pour les deux cas. L'avantage énergétique du filtre responsif se montre dans des conditions estivales. Grâce à la fermeture et ainsi à la protection contre le rayonnement infrarouge, le facteur g du mur augmente considérablement. En effet, la faible émissivité des panneaux permet de réfléchir une grande partie de cette énergie à tendance à surchauffer l'air intérieur. Cette protection est beaucoup plus efficace que le double ou triple vitrage standard et réduit la consommation d'énergie de refroidissement de 50 %.

## CONCLUSION SUR LA PERFORMANCE

Les analyses effectuées sur l'exemple de Bruxelles montrent des améliorations significatives concernant l'éclairage naturel et le bilan énergétique. Il faut noter que l'application de ces façades est moins intéressante dans les climats tempérés car il existe des moyens passifs *low-tech* tout aussi efficaces pour réduire le risque de surchauffe et la consommation d'énergie de chauffage. Dans les climats plus chauds, avec de plus grandes fluctuations de température et plus d'heures d'ensoleillement, l'application de la façade sera proportionnellement plus efficace. En effet il reste à douter que l'effort économique impliqué dans la production, l'installation et la maintenance de ce type de structure soit rentable. De plus, les bilans énergétiques ne tiennent pas compte de l'énergie grise nécessaire à la production et au transport.



# CONCLUSION

Au cours des quatre dernières décennies, le domaine de l'architecture et d'ingénierie a connu une vaste expérimentation sur le sujet des structures non statiques s'adaptant aux paramètres contextuels, attirant l'attention principalement pour leur caractère artistique et esthétique, la fonctionnalité de ces structures tombant souvent dans l'oubli. Il est clair que l'architecture est en partie un art à apprécier d'un point de vue artistique, mais c'est aussi une science concrète. Les façades cinétiques sont un bon exemple pour symboliser cette ambiguïté.

Les résultats de la simulation montrent qu'une application possible de ce travail théorique pourrait apporter des avantages en matière de confort des habitants et de consommation d'énergie. Comme mentionné dans la première partie, nous vivons un tournant décisif qui va déterminer la responsabilité que nous prenons envers notre planète. Le changement climatique nous oblige à repenser nos habitudes que nous avons adaptées depuis des générations. Le secteur de la construction est l'un des plus grands consommateurs d'énergie primaire et, contrairement à d'autres domaines, il n'est pas très compliqué d'adapter de nouvelles stratégies éco-responsables (passives). Il est donc important pour les architectes et les ingénieurs de s'assurer que leurs projets répondent aux exigences esthétiques et écologiques des années à venir.

Avec un climat à tendance à se réchauffer de plus en plus rapidement et avec des heures d'ensoleillement qui augmentent d'année en année, l'architecte est obligé d'adapter ses projets en considérant ces évolutions. Les façades cinétiques sont un moyen intéressant de profiter des avantages énergétiques de ce développement. En optimisant l'utilisation de l'énergie solaire gratuite, nos maisons peuvent atteindre un statut d'autonomie (*nZEB*) qui pourrait avoir des effets de ralentissement concernant la crise écologique.

Il est évident que le mécanisme tel que décrit dans ce travail n'apportera certainement pas les bénéfices démontrés dans la dernière étape. Dans ce travail, des facteurs importants tels que l'énergie grise investie au moment de la production et de la mise en œuvre ne sont pas pris en compte. De même, les coûts d'entretien régulier ne seront certainement pas économiques. Cependant, l'utilisation d'un filtre adaptatif peut apporter des avantages importants dans la construction et des façades cinétiques bien conçues sont bien plus que de simples éléments artistiques.

## SUITE

L'étude sur les façades responsives traitée dans cet ouvrage est présente sous une forme multidisciplinaire. Chaque étape implique un investissement dans des domaines variés tels que l'ingénierie, la biologie, la chimie, la physique ou les sciences de l'environnement. Ce sont des sciences qui me sont relativement éloignées et il a fallu un effort important pour pouvoir s'approprier les règles de base de ces disciplines. Pour la suite du travail, il est d'intérêt de continuer à travailler dans les domaines proches de l'architecture pour pouvoir améliorer les résultats. Ainsi les recherches sur les mécanismes des modules pourraient être faites en tenant compte des propriétés physico-chimiques des matériaux ainsi que de leur résistance qui peuvent être simulées dans des logiciels dédiés à ces fins. En ce qui concerne les pièces de déclenchement, une simulation des champs électro-magnétiques ou des simulateurs de comportement des liquides pourrait aider à concrétiser les concepts. De plus, l'expérimentation cybernétique autour des circuits Arduino peut être poussée plus loin pour mieux comprendre l'intégration et l'interaction de plusieurs capteurs dans un système motorisé. Enfin, la simulation de l'environnement dans la dernière étape est très abstraite et laisse de côté de nombreux paramètres. Ici, il peut être intéressant d'analyser les effets du vent sur la façade ainsi que les propriétés stabilisatrices de la structure. Les analyses de l'énergie et de la lumière du soleil peuvent être menées plus loin pour donner des résultats plus concrets à appliquer à des projets réels. En effet, une meilleure compréhension des logiciels énergétiques tels que *EnergyPlus* aurait permis d'analyser les effets plus en détail.

# LOGICIELS UTILISÉS (open-source)

## MODELISATION 3D

FreeCAD [modélisation paramétrique] <https://github.com/FreeCAD>  
Blender [3D creation suite] <https://github.com/blender>  
Openscad [solid 3D cad modeller] <https://github.com/openscad>  
Meshgen [mesh generation tool] <https://github.com/jtsiomb/meshgen>  
Meshlab [mesh processing system] <https://github.com/cnr-istivclab/meshlab>  
BRL-CAD [Solid Modeller] <https://github.com/BRL-CAD>  
OpenCascade [3D modeling library] <https://github.com/tpaviot/occe>  
Antimony [modélisateur paramétrique] <https://github.com/mkeeter/antimony>  
Slic3r [toolpath generator] <https://github.com/slic3r/Slic3r>

## ADDONS

Archipak [modélisation architecturale] <https://github.com/s-leger/archipack>  
BenderBim [architecture ifc library] <https://github.com/lfcOpenShell/lfcOpenShell>  
Sorcar [procedural modeling] <https://github.com/aachman98/Sorcar>  
Sverchok [parametric tool] <https://github.com/nortikin/sverchok>  
Vi-Suite [environnement analysis] <https://github.com/rgsouthall/vi-suite06>  
A2plus [assembly workbench] <https://github.com/kbwbe/A2plus>  
Assembly4 [Assembly workbench] [https://github.com/Zolko-123/FreeCAD\\_Assembly4](https://github.com/Zolko-123/FreeCAD_Assembly4)  
BIM [BIM Workbench] [https://github.com/yorikvanhavre/BIM\\_Workbench](https://github.com/yorikvanhavre/BIM_Workbench)  
CfdOF [Computational Fluid Dynamics] <https://github.com/jaheyns/CfdOF>  
DesignSPHysics [DualSPHysics fluid simulator] <https://github.com/DualSPHysics/DesignSPHysics>  
Fasteners [Fasteners workbench] [https://github.com/shaise/FreeCAD\\_FastenersWB](https://github.com/shaise/FreeCAD_FastenersWB)  
FcGear [Gear workbench] <https://github.com/loooooo/freecad.gears>  
Slic3r-tools [slic3r workbench] <https://github.com/limikael/freecad-slic3r-tools>  
TechDraw [2D CAD workbench] <https://github.com/WandererFan/FreeCAD-TechDraw>

FEM [Finite element analyse workbench] <https://github.com/FreeCAD/FreeCAD/tree/master/src/Mod/Fem>

## VISUALISATION

LuxRender [Render engine] <https://github.com/LuxCoreRender>

Cycles [Render engine] <https://github.com/boberfly/cycles>

EEVEE [Render engine] <https://github.com/sobotka/blender>

Appleseed [Render engine] <https://github.com/appleseedhq/appleseed>

ParaView [Data Analysis and Visualization Application] <https://github.com/Kitware/ParaView>

## SIMULATION

Radiance [Lighting simulation tool] <https://github.com/NREL/Radiance>

OpenStreetMap [Map library] <https://github.com/openstreetmap>

CodeAster [Structure and Thermomechanics analysis] [https://github.com/ralic/Code\\_Aster](https://github.com/ralic/Code_Aster)

CodeSaturne [turbulence analysis] [https://github.com/code-saturne/code\\_saturne](https://github.com/code-saturne/code_saturne)

EnergyPlus [building energy simulation program] <https://github.com/NREL/EnergyPlus>

GMSH [finite element mesh generator] <https://gitlab.onelab.info/gmsh/gmsh>

OpenFOAM [computational fluid dynamics software] <https://github.com/OpenFOAM>

Ladybug-Tools [environmental simulation] <https://github.com/ladybug-tools>

## MANIPULATION 2D

Qcad [2D CAD] <https://github.com/qcad/qcad>

LibreCAD [2D CAD] <https://github.com/LibreCAD/LibreCAD>

Inkscape [vector graphics software] <https://github.com/inkscape/inkscape>

GIMP [Image Manipulation Program] <https://github.com/GNOME/gimp>

Scribus [Desktop publishing software] <https://github.com/scribusproject/scribus>

GeoGebra [Math visualizer] <https://github.com/geogebra/geogebra>  
Gthumb [Image viewer and editor] <https://github.com/GNOME/gthumb>  
Solvespace [Parametric 2D/3D modeler] <https://github.com/solvespace/solvespace>  
LibreOffice [office Suite] <https://github.com/LibreOffice/core>  
PDF Tricks [PDF Manipulator] <https://github.com/muriloventuroso/pdftricks>  
Evince [PDF Viewer] <https://github.com/GNOME/evince>  
Gnome-LaTeX [LaTeX editor] <https://github.com/GNOME/gnome-latex>

## AUTRES

FFmpeg [Audio and video manipulator] <https://github.com/ffmpeg/ffmpeg>  
Arduino IDE [Developement environnement] <https://github.com/arduino/arduino-pro-ide>  
Zotero [research organizer] <https://github.com/zotero/zotero>  
Ghostscript [postscript language interpretor] <http://git.ghostscript.com/>  
DeepL [Translator] <https://github.com/vsetka/deepl-translator>  
Impress [Presentation framework] <https://github.com/impress/impress.js/>

# BIBLIO- GRAPHIE

## MONOGRAPHS

HEYLIGHEN, A. 2000. Design(ing) knowledge in architecture, Leuven, KU Leuven

JUARISTI, M. MONGE-BARRIO, A. 2016. Adaptive façades in temperate climates. An in-use assessment of an office building, Navarra, Universidad de Navarra

NASHAAT, B. WASEEF, A. 2018. Kinetic Architecture: Concepts, History and Applications, Port Said, Port Said University

SHARAIDIN, K. 2018. Kinetic Facades: Towards design for Environmental Performance, Melbourne, RMIT University

SUGAR, V. et al. 2017. Bionics in architecture, Budapest, University Budapest

BHARATI, P. 2017 « Kinetic architecture », SUSTAINABLE MEANS, [https://issuu.com/pragyabharati/docs/ilovepdf\\_merged](https://issuu.com/pragyabharati/docs/ilovepdf_merged)

## EXEMPLES

KNIPPERS, J. et al. 2012. Bio-inspired Kinetic GFRP-façade for the Thematic Pavilion of the EXPO 2012 in Yeosu, Stuttgart, ITKE

BABILIO, E. FRATERNALI, F. 2019. On the Kinematics and Actuation of Dynamic Sunscreens With Tensegrity Architecture, Naples, University of Naples

SHADY, A. 2017. Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE, Liège, University of Liège

Snapping facade

Consultable: <https://dionno.com/Snapping-Facade> [disponible le 13 juin 2020].

Air Flower

Consultable: <http://www.liftarchitects.com/air-flower> [disponible le 13 juin 2020].

Light Responsive Facade

Consultable: <http://fabacademy.org/archives/2015/sa/students/gutierrez.juan/w16.html> [disponible le 13 juin 2020].

## DOCUMENTATIONS

PARAMETRICSHOUSE

Consultable: <https://parametrichouse.com/subjects/> [disponible le 13 juin 2020].

Instructables

Consultable: <https://www.instructables.com/> [disponible le 13 juin 2020].

Hackaday

Consultable: <https://hackaday.com/> [disponible le 13 juin 2020].

Thingiverse

Consultable: <https://www.thingiverse.com/> [disponible le 13 juin 2020].

Fablabs

Consultable: <https://projects.fablabs.io/> [disponible le 13 juin 2020].

Arduino

Consultable: <https://create.arduino.cc/projecthub> [disponible le 13 juin 2020].

## MATERIAUX

HADBAOUI, H. BOURBIA, F. 2018. Pratique du biomimétisme dans l'architecture bioclimatique : Essai sur la performance énergétique des enveloppes architecturales autonomes responsives dans un climat aride, Constantine, University of Constantine

BASETA, E. 2019. BEND & BLOCK a shape-adaptable system for the rapid stiffening of active-bending structures, Berlin, Academy of Arts Berlin

NABONI, R. MIRANTE, L. 2016. Computational Design and simulation of Bending-active auxetic structures, Milano, Politecnico di Milano

Deployable Soft Composite Structures

Consultable: <https://www.nature.com/articles/srep20869> [disponible le 13 juin 2020].

Materiability

Consultable: <http://materiability.com/> [disponible le 13 juin 2020].

## MÉCANISMES

STAVRIC, M. et al. 2016. Parametrics of Movable Polyhedral Models in Performative Architecture, Graz, Graz University of Technology

AL-KHALFA, D. et al. 2016. Prototyping for kinetic architecture, Damascus, Damascus University

ABDULMAJID, K. et al. 2015 « Innovations in dynamic architecture », Journal of Facade Design and Engineering, <https://content.iospress.com/articles/journal-of-facade-design-and-engineering/fde0040>

The Spaces

Consultable: <https://thespaces.com/kinetic-architecture-hong-kong/> [disponible le 13 juin 2020].

Strandbeest

Consultable: <https://www.strandbeest.com/> [disponible le 13 juin 2020].

Bimetals

Consultable: [http://www.iaacblog.com/programs/thermatrix\\_bimetals-phase-2/](http://www.iaacblog.com/programs/thermatrix_bimetals-phase-2/) [disponible le 13 juin 2020].

Islamic Patterns

Consultable: <https://www.geno-morph.com/igp> [disponible le 13 juin 2020].

## FONCTIONNEMENT

KARANOUH, A. et al. 2017. Innovations in dynamic architecture, Bath, Journal of Facade Design and Engineering

SHAWUL, H. et al. 2018. Building Envelop Design Lab, Milano, Politecnico Milano

ZARZYCKI, A. 2014. Reflections on Computational Design Through Interactions With Materiality and Physical Mock-Ups, New Jersey, New Jersey Institute of Technology

LAAB

Consultable: [https://www.laab.pro/?portfolio\\_page=harbour-kiosk](https://www.laab.pro/?portfolio_page=harbour-kiosk) [disponible le 13 juin 2020].

Responsive Structures

Consultable: <https://www.geno-morph.com/rg> [disponible le 13 juin 2020].

## ENVIRONNEMENT

GREIVING, S. et al. 2013. Climate Change and Territorial Effects on Regions and Local Economies, Dortmund, TU Dortmund

POTIENKO, N. et al. 2018. The Global Experience of Deployment of Energy-Efficient Technologies in High-Rise Construction, Samara, Samara State Technical University

GIEDROWICZ, M. 2015. Parametric Design for Ecological Purposes – Case Studies and Algorithm Examples, Poznan, Poznan University of Technology

ELGHAZI, Y. et al. 2014. Daylighting Driven Design: Optimizing Kaleidocycle façade for hot arid climate, Cairo, AASTMT

## SIMULATION

PANYA, D. et al. 2019. PA Methodology of Interactive Motion Facades Design through Parametric Strategies, Kyungpook, Kyungpook National University

SUJI, C. et al. 2015. Calculation Method of Shaded Fraction According to the Movements Type for Kinetic Facade, Inha, Inha University  
Dynamic Daylight  
Consultable: <https://drajmarsh.bitbucket.io/daylight-box.html> [disponible le 13 juin 2020].

Shading Box  
Consultable: <http://andrewmarsh.com/apps/staging/shading-box.html> [disponible le 13 juin 2020].

Heat Balance  
Consultable: <https://drajmarsh.bitbucket.io/heat-balance.html> [disponible le 13 juin 2020].

Psychrometric Chart  
Consultable: <https://drajmarsh.bitbucket.io/psychro-chart2d.html> [disponible le 13 juin 2020].

2D Sun-Path  
Consultable: <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath2d.html> [disponible le 13 juin 2020].

Weather Data  
Consultable: <https://drajmarsh.bitbucket.io/weather-data.html> [disponible le 13 juin 2020].

Arduino Circuit  
Consultable: <https://www.circuito.io/> [disponible le 13 juin 2020].