



**Faculté
d'Architecture
La Cambre Horta**

Structures déployables :

**Optimisation des systèmes solaires face aux enjeux
humanitaires**

Mémoire de fin d'étude sous la direction de Thomas VILQUIN

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au soutien, aux conseils et à la disponibilité de nombreuses personnes que je tiens à remercier sincèrement.

Je souhaite tout d'abord exprimer ma reconnaissance à Monsieur Thomas Vilquin, professeur à l'ULB et promoteur de ce mémoire, pour son accompagnement régulier, ses suggestions enrichissantes et l'aide précieuse qu'il m'a apportée afin de progresser tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également aux acteurs de terrain qui ont contribué par leurs témoignages et leur expertise à enrichir cette recherche : Monsieur Uriel Aboim et Madame Monia Belkhir de Médecins Sans Frontières, Madame Magali Clerboux de la Croix-Rouge, ainsi que Monsieur Thibaut Colette, Major à la Défense. Leurs apports ont été essentiels pour nourrir ma réflexion et donner une dimension concrète à ce mémoire.

Je remercie aussi les étudiants également encadrés par Monsieur Vilquin, pour la richesse de leurs retours lors de nos rencontres collectives, qui ont contribué à affiner et améliorer ce travail.

Enfin, j'adresse toute ma reconnaissance à ma famille et à mes amis, pour leur soutien, leurs encouragements et leur patience, qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours et ont rendu possible l'élaboration de ce mémoire.

RÉSUMÉ

C'est dans un contexte de croissance des besoins humanitaires liés au dérèglement climatique et à l'intensification des conflits à l'échelle mondiale que les interventions d'urgence se heurtent à des difficultés d'approvisionnement énergétique freinant leur capacité d'action. Dans ces situations instables, l'accès à une source d'énergie renouvelable reste trop peu présent ou inadapté aux contraintes spécifiques des opérations. Cette réalité soulève la nécessité de repenser les stratégies énergétiques déployées sur le terrain afin de mieux répondre aux exigences des missions humanitaires contemporaines.

Pour ce faire, ce mémoire explore le potentiel de l'énergie solaire comme réponse à ce manque. L'objectif est de formuler des pistes de conception pour des infrastructures renouvelables déployables sur site, adaptées aux contraintes spécifiques des premières phases d'intervention d'urgence.

L'étude vise à établir les modalités d'intégration du photovoltaïque aux structures humanitaires. Elle vise à relever les failles des dispositifs actuels afin d'identifier les modèles les plus adaptés aux contraintes logistiques et opérationnelles. Un lien est établi entre ces technologies et les typologies de structures déployables dans le but d'élaborer une proposition cohérente en réponse à la problématique énergétique soulevée par les acteurs du secteur.

Cette réflexion s'appuie sur des retours recueillis auprès d'acteurs actifs tels que Médecins Sans Frontières, la Croix-Rouge et les forces de défense belges, mettant en évidence les besoins concrets des opérations actuelles. L'approche adoptée est pluridisciplinaire, combinant l'analyse des technologies solaires existantes, leur intégration à l'architecture et aux structures d'urgence, ainsi qu'une classification des structures déployables.

Le mémoire propose alors une réflexion sur la pertinence des différentes typologies structurelles, afin d'identifier les modules capables de renforcer l'accès à l'énergie et d'améliorer la capacité des interventions en faveur des populations touchées.

L'articulation de ces enjeux s'inscrit dans une démarche plus large de transition vers des modèles d'intervention humanitaire autonomes, durables et respectueux des contextes dans lesquels ils s'insèrent.

AVANT PROPOS

« Inondations : 15 millions de sinistrés au Pakistan, 132 morts en Inde ¹ », « Cyclone Chido : Mayotte dévastée par des vents de 220km/h ² », « Six mois de guerre Israël-Gaza : les chiffres dramatiques... ³ », « Un million de victimes au total dans la guerre en Ukraine... ⁴ », etc.

Les gros titres ne cessent de croître dans des contextes de crises humanitaires marquant tristement notre époque par de nombreux défis liés à l'état d'urgence. Catastrophes climatiques de plus en plus fréquentes, conflits prolongés et déplacements réguliers de populations, c'est face à ces constats que j'ai souhaité orienter ce mémoire vers l'architecture d'urgence en espérant pouvoir contribuer, à mon échelle, à combler certains manques dans le secteur et apporter une contribution en soutien aux pratiques actuelles des acteurs de terrain.

A ce stade, concevoir des solutions architecturales capables de répondre aux besoins dans l'urgence, tout en intégrant des principes d'autonomie énergétique et de résilience, représente un défi captivant et porteur de sens. Cette réflexion s'inscrit dans une approche plus large, alliant progrès techniques et architecture durable, un champ que je souhaite développer en tant qu'architecte. L'opportunité d'explorer une problématique située au croisement des dimensions environnementales, sociales et technologiques a ainsi naturellement guidé mon intérêt.

Ma volonté d'explorer les liens entre technologie et architecture au-delà des applications courantes a émergé lors de ma participation à l'atelier *Digital Fabrication Studio* en 2022, dirigé par David Erkan, au sein de la Faculté d'Architecture de l'ULB. Ce laboratoire, qui continue aujourd'hui à explorer le rôle des technologies émergentes, interroge les liens entre architecture et ingénierie à travers divers outils de conception numérique. Cet atelier m'a permis d'approfondir des recherches pluridisciplinaires ouvrant la voie à l'intégration d'approches novatrices dans la conception architecturale.

Cela met en lumière non seulement la réflexion, mais aussi le parcours qui a mené à l'initiative de cette recherche, tout en soulignant l'importance des expériences acquises lors de rencontres et d'ateliers ayant nourri mon parcours universitaire et enrichi le développement de ce mémoire.

¹ RTBF Info, « Inondations : 15 millions de sinistrés au Pakistan, 132 morts en Inde », *RTBF.be*, 6 août 2010, consulté le 10 décembre 2024 sur : www.rtb.be/article/inondations-15-millions-de-sinistres-au-pakistan-132-morts-en-inde-4987703.

² RTBF Info, « Cyclone Chido : Mayotte dévastée par des vents de 220 km/h, au moins deux morts », *RTBF.be*, 9 mai 2024, consulté le 10 décembre 2024 sur : www.rtb.be/article/cyclone-chido-mayotte-devaste-par-des-vents-de-220km-h-au-moins-deux-morts-11477849.

³ RTBF Info, « Six mois de guerre Israël-Gaza : les chiffres dramatiques d'une guerre aux multiples visages », *RTBF.be*, 7 avril 2024, consulté le 10 décembre 2024 sur : www.rtb.be/article/six-mois-de-guerre-israel-gaza-les-chiffres-dramatiques-d-une-guerre-aux-multiples-visages-11355120.

⁴ France Inter, « Géopolitique du jeudi 19 septembre 2024 », *France Inter*, podcast audio, 19 septembre 2024, consulté le 10 décembre 2024 sur : www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/geopolitique/geopolitique-du-jeudi-19-septembre-2024-6206280.

Cette approche est traduite dans ce travail à travers l'exploration des difficultés liées au déploiement des moyens solaires en situation de crise, en combinant explorations théoriques, observations de terrain et appropriation personnelle. J'espère ainsi que ces recherches pourront participer aux débats en cours et ouvrir des perspectives sur la manière dont l'architecture peut accompagner la transition vers des interventions plus durables et efficaces.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	10
1.1. Contexte.....	10
1.1.1. Historique.....	10
1.1.2. Crises climatiques.....	11
1.1.3. Crises politiques.....	11
1.1.4. Les secteurs de l'urgence.....	11
1.2. Problématique.....	12
1.3. Objectifs.....	13
1.4. Question d'étude.....	14
1.5. Méthodologie.....	15
1.5.1. Entretiens semi-directifs.....	15
1.5.2. Analyse typologique.....	15
1.5.3. Portée et limites de la méthode.....	15
2. Préliminaires.....	17
2.1. Energies solaires.....	17
2.1.1. Pourquoi le solaire ?.....	18
2.1.2. Différents systèmes d'exploitation.....	22
2.1.2.1. Systèmes thermiques.....	22
2.1.2.2. Systèmes thermodynamiques.....	23
2.1.2.3. Systèmes photovoltaïques.....	24
2.1.3. Intégrations architecturales.....	32
2.1.3.1. Photovoltaïques en surimposition.....	32
2.1.3.2. Photovoltaïque comme élément constructif.....	34
2.1.4. Architecture d'urgence.....	36
2.1.4.1. Temporalité des interventions.....	36
2.1.4.2. Besoins sur site.....	37
2.1.4.3. Priorité.....	39
2.1.4.4. Centres de santé temporaires.....	40
2.1.4.5. Solutions actuelles.....	42
2.2. Structures déployables.....	45
2.2.1. Définition.....	45
2.2.2. Historique.....	45
2.2.3. Classification.....	46
2.2.4. Sélection du corpus.....	51

3. Analyse systémique.....	54
3.1. Méthode de sélection multicritère.....	54
3.1.1. Contextualisation.....	54
3.1.2. Pondération des critères.....	55
3.1.3. Détermination des paramètres.....	56
3.1.4. Evaluation des différentes typologies.....	57
3.1.5. Tableau synthétique.....	93
3.2. Discussion des résultats.....	95
3.2.1. Ecart pratiques.....	96
3.2.2. Pertinence contextuelle.....	97
3.2.3. Sélection finale.....	98
3.3. Membranes tendues.....	99
3.3.1. Etude de cas.....	100
3.3.1.1. PowerMod.....	101
3.3.1.2. Pure Tension.....	102
3.3.2. Identification des limites.....	107
3.3.3. Evolutions récentes comme levier d'amélioration.....	107
3.3.4. Esquisse conceptuelle.....	111
3.3.4.1. Formulation des enjeux.....	111
3.3.4.2. Exploration intuitive.....	112
3.3.4.3. Exploration référencée.....	113
3.3.4.4. Aspect énergétique.....	114
3.3.4.5. Système de déploiement.....	116
3.3.4.6. Sélection des matériaux.....	118
3.3.4.7. Dimensionnement.....	121
4. Conclusion.....	125
4.1. Identification du système énergétique.....	125
4.2. Identification d'une typologie.....	125
4.3. Identification des limites.....	126
4.4. Réserves et conditions.....	126
4.5. Perspectives.....	126
Bibliographie.....	129
Table des figures.....	134
Annexes.....	141

1. INTRODUCTION

Les crises humanitaires et environnementales se multiplient à travers le monde, provoquées par des catastrophes naturelles, des conflits armés et des déplacements importants de populations. Ces événements soulèvent des enjeux concernant la capacité des acteurs humanitaires à intervenir efficacement sur le terrain. Parmi ces enjeux, l'accès à l'énergie constitue un facteur déterminant pour la mise en place et le maintien des infrastructures essentielles telles que les centres médicaux, les systèmes de communication, l'éclairage, la conservation alimentaire ou encore la purification de l'eau.

Aujourd'hui, les solutions énergétiques les plus répandues en contexte d'urgence reposent principalement sur l'utilisation de générateurs diesel. Toutefois, ces solutions présentent plusieurs contraintes, notamment liées à la logistique d'approvisionnement en carburant dans les régions isolées ou instables, ainsi qu'à leurs impacts environnementaux néfastes.

Dès lors, l'exploration d'alternatives énergétiques renouvelables apparaît pertinente et particulièrement à travers les systèmes solaires pour les divers avantages qu'ils présentent. Leur déploiement dans les infrastructures temporaires ou semi-permanentes offre une réponse technique adaptée aux défis spécifiques rencontrés lors des interventions humanitaires, tout en tenant compte des contraintes logistiques et environnementales propres à chaque contexte local. Dès lors, il est intéressant de se demander si ces systèmes peuvent réellement être utilisés comme un véritable outil dans l'adaptation face à la vulnérabilité.

1.1. Contexte

1.1.1. Historique

Le contexte ayant mené à cette réflexion s'ancre dans les conséquences de l'ère des révolutions industrielles qui a marqué, et marque encore aujourd'hui, des transformations majeures sur nos sociétés.

Le début de l'industrialisation a mis en évidence une accélération des capacités de production, favorisant une croissance démographique rapide et une urbanisation massive.⁵ Malheureusement, ces changements se sont appuyés principalement sur une exploitation intensive des ressources énergétiques fossiles, telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ouvrant une nouvelle ère de prospérité matérielle mais également de dépendance énergétique. Durant cette période, les impératifs économiques et la quête d'efficacité ont souvent pris le pas sur les spécificités locales et environnementales, conduisant à des choix mal adaptés à une vision durable.

⁵ GEORGE, A. Shaji, « Industrial Revolution 5.0 : The Transformation of the Modern Manufacturing Process to Enable Man and Machine to Work Hand in Hand », *Seybold Report*, vol. 15, 2020, p. 219.

1.1.2. Crises climatiques

Cette dynamique a progressivement mis en évidence certaines limites, mettant en évidence les causes des bouleversements actuels. L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre qui en résulte a profondément déséquilibré notre système climatique, provoquant une hausse généralisée des températures. Nos sociétés se retrouvent ainsi confrontées à des phénomènes de catastrophes naturelles autrefois moins intenses et évoluant sur des échelles de temps bien plus longues. Cette évolution d'événements est aujourd'hui une source majeure de l'amplification des crises humanitaires.⁶

Cette prise de conscience a conduit à l'émergence d'accords internationaux visant à limiter l'empreinte humaine sur le climat. Depuis la fin du XXe siècle, au fur et à mesure que les observations scientifiques confirment l'ampleur du phénomène, nos sociétés tentent de trouver des solutions en accord avec les nouveaux enjeux climatiques. Pourtant, les efforts actuels restent insuffisants face à l'ampleur des prévisions.⁷

L'urgence ne se limite plus à un débat scientifique ou politique, elle est devenue une réalité qui redéfinit les approches de l'ensemble des secteurs qui façonnent nos vies. De l'architecture à l'ingénierie, en passant par l'agriculture et la mobilité, les stratégies d'adaptation et d'atténuation occupent aujourd'hui une place centrale dans nos choix et nos pratiques.

1.1.3. Crises politiques

Au-delà des bouleversements climatiques, nos sociétés doivent également composer avec une instabilité politique croissante. Dans de nombreuses régions du monde, les tensions géopolitiques, les guerres ou encore les crises sociales viennent se superposer aux fragilités environnementales, aggravant l'exposition des populations à une insécurité généralisée.

Ces conflits, souvent marqués par des inégalités profondes et un accès limité aux ressources, laissent des communautés entières sans moyens d'action face à des catastrophes qu'elles subissent de plein fouet. Dans ce contexte, la gestion de l'urgence ne peut se limiter à une réponse technique ou environnementale : elle doit aussi intégrer une solidarité internationale capable de protéger et de soutenir les plus vulnérables.

1.1.4. Les secteurs de l'urgence

Nous avons aujourd'hui pris conscience de l'importance de développer des infrastructures capables d'intégrer les risques liés à notre époque et à ses évolutions. Toutefois, certaines régions restent extrêmement exposées et nécessitent une attention particulière. Leur

⁶ ZERO CARBON ANALYTICS, *Unnatural disasters: The connection between extreme weather and fossil fuels*, Briefing, juillet 2024.

⁷ OECD, *The Climate Action Monitor 2024*, OECD Publishing, Paris, 2024.

vulnérabilité ne tient pas seulement à leur exposition, mais aussi à leur difficulté à réagir et à retrouver un équilibre après une crise.⁸

Ces aléas de nature multiple provoquent des déplacements massifs de population, détruisent les habitats et compromettent l'accès aux ressources essentielles telles que l'eau potable, la nourriture et les soins médicaux.

C'est alors que les secteurs d'urgence, qu'ils soient gouvernementaux, militaires ou humanitaires, constituent un dernier rempart de résilience face à ces situations de détresse. À l'échelle internationale, des agences comme la Croix-Rouge, Médecins sans frontières ou encore l'Office des nations unies pour la coordination des affaires humanitaires (OCHA), déploient des équipes spécialisées pour organiser les secours dans les régions touchées. Elles permettent de répondre aux besoins vitaux des populations tels que les soins médicaux, la distribution de nourriture, l'accès à l'eau potable ou encore la mise à disposition d'abris. Au-delà de l'urgence immédiate, elles travaillent également à la mise en place de solutions durables, en soutenant la reconstruction et en renforçant la résilience et l'autonomie des communautés.

1.2. Problématique

Afin de mieux comprendre les enjeux concrets auxquels sont confrontés les acteurs de l'urgence, une série d'entretiens a été menée avec des organisations humanitaires et institutionnelles telles que la Croix-Rouge, Médecins sans frontières et les forces de défense belges impliquées dans des missions de secours. Ces échanges ont permis d'identifier plusieurs problématiques récurrentes documentées en annexes.

Parmi ces défis, la question de l'énergie s'est présentée comme un frein omniprésent dans la gestion des crises et influence directement l'efficacité des opérations de secours. Qu'il s'agisse de centres de soins temporaires, des camps d'hébergement ou de bases logistiques, la mise en place rapide d'un approvisionnement énergétique est essentielle pour organiser les secours et stabiliser une situation de crise.

Effectivement, la majorité des populations en zone sinistrée ne sont pas en mesure d'accéder à l'électricité pour répondre à des besoins essentiels.⁹ L'énergie est pourtant indispensable au fonctionnement des équipements médicaux, des systèmes de communication, de l'éclairage, de la conservation des denrées alimentaires, des solutions de cuisson propre et des dispositifs de purification de l'eau. De nombreuses situations d'urgence et de conflits prolongés actuels que

⁸ THOURET, Jean-Claude et D'ERCOLE, Robert, « Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales », *Cahiers des Sciences Humaines*, vol. 32, n° 2, 1996, p. 407-422.

⁹ GPA, « The State of the Humanitarian Energy Sector : Challenges, Progress and Issues in 2022 », *UNITAR Publishing*, Genève, 2022, p. 8.

nous pouvons illustrer avec la situation à Gaza¹⁰, montrent qu'assurer un accès fiable à l'énergie demeure encore aujourd'hui un défi majeur.

Les témoignages recueillis mettent en lumière l'absence de solutions énergétiques durables accessibles et faciles à déployer dans des contextes difficiles d'accès. Malgré les contraintes logistiques et les impacts environnementaux qu'ils engendrent, le recours aux générateurs diesel demeure trop souvent la seule option à court terme pour répondre aux besoins vitaux d'un groupe conséquent. De plus, dans les zones isolées ou en conflit, l'acheminement du carburant se révèle incertain, accentuant la dépendance des interventions aux ressources locales et compromettant ainsi leur pérennité.

Cette problématique s'inscrit également dans une réflexion plus large sur l'intégration des énergies renouvelables dans les infrastructures de secours et dans l'architecture de relocalisation post-sinistre. Si des initiatives émergent à travers certaines politiques d'organisations du secteur visant à développer des solutions énergétiques alternatives adaptées aux contextes humanitaires, leur déploiement reste encore limité et souvent sous-exploité.¹¹ Encore aujourd'hui, 675 millions de personnes vivent sans accès à l'électricité.¹² Pourtant, une transition vers des sources d'énergie plus autonomes et durables représente un enjeu majeur à travers le contexte climatique énoncé plus tôt.

1.3. Objectifs

L'architecture d'urgence ne se limite pas à la conception spatiale, elle implique d'apporter des réponses adaptées aux contraintes logistiques, climatiques, énergétiques et sociales propres à chaque contexte. En tant qu'architecte je dois être capable de mobiliser une approche pluridisciplinaire intégrant l'ingénierie, l'urbanisme, les sciences sociales et la gestion des ressources afin de pouvoir répondre à la problématique posée.

L'enjeu de ce travail est de renforcer l'efficacité des interventions tout en favorisant une transition vers des pratiques plus durables, autonomes et déployables dans des zones isolées. Les principaux objectifs visent alors à interroger dans un premier temps la question énergétique, en interrogeant la pertinence du solaire dans les contextes d'urgence humanitaire. Cette réflexion

¹⁰ RTBF, « Guerre Israël-Gaza : “Pas d'eau, de gaz et d'électricité”, la bande de Gaza à quelques jours de vivre une catastrophe humanitaire », *RTBF.be*, 9 octobre 2023, consulté le 20 janvier 2025 sur : <https://www.rtbf.be/article/guerre-israel-gaza-pas-d-eau-de-gaz-et-d-electricite-la-bande-de-gaza-a-quelques-jours-de-vivre-une-catastrophe-humanitaire-11270419>.

¹¹ VAN DORP, Mark, avec la contribution de VAN DER WAL, M. et VAN DE GIESSEN, E., « Dealing with energy needs in humanitarian crisis response operations: A Quick Scan of policies and best practices of humanitarian aid organizations and potential alternative energy sources and technologies », *Institute for Environmental Security (IES) & IUCN-Netherlands Committee (IUCN NL)*, 2009, p.5

¹² Banque mondiale, « Selon un nouveau rapport, l'accès de base à l'énergie est à la traîne malgré des opportunités en matière d'énergie renouvelable », *Banquemondiale.org*, 6 juin 2023, consulté le 20 janvier 2025 sur : <https://www.banquemondiale.org/fr/news/press-release/2023/06/06/basic-energy-access-lags-amid-renewable-opportunities-new-report-shows>.

suppose ensuite d'analyser les rendements et les contraintes d'exploitation, mais également de considérer les systèmes qui leur sont associés afin de comprendre comment ils s'intègrent à l'architecture d'urgence et pourquoi ils peinent encore à répondre pleinement aux impératifs énergétiques des opérations sur le terrain.

Dans un second temps, il s'agira de questionner la dimension structurelle, en cherchant à déterminer quel type de construction pourrait constituer le support le plus adapté à l'intégration de systèmes énergétiques. Le choix d'une typologie devra se faire à travers l'évaluation de critères directement liés aux conditions d'intervention, l'objectif étant d'identifier la meilleure solution qui puisse accompagner efficacement les premières phases d'une opération humanitaire.

La réponse à ces objectifs devrait ouvrir la voie à une réflexion plus large sur la possibilité de formuler une conclusion sous la forme d'une proposition conceptuelle. Une telle perspective implique d'ancrer l'analyse dans les réalités concrètes des missions humanitaires, menant à l'élaboration d'un scénario de mise en situation.

L'objectif serait alors de tester la pertinence de la démarche à travers une simulation de déploiement dans un contexte géographique spécifique, en réponse à un besoin humanitaire clairement identifié. Dans le cadre de ce travail, il s'agirait d'envisager la conception d'un centre de santé d'urgence capable de répondre aux besoins immédiats d'une population d'environ cent personnes lors des premières phases d'intervention. Cette mise en application permettrait de confronter les choix énergétiques et structurels à la réalité opérationnelle, tout en mesurant leur faisabilité, leurs limites et leur potentiel en termes d'impact.

1.4. Question d'étude

En lien avec les objectifs exposés, cette recherche s'articule autour d'une interrogation centrale :

« Comment l'intégration de l'énergie solaire aux structures déployables peut-elle contribuer à répondre aux besoins énergétiques des premières phases d'interventions humanitaires ? »

Pour approfondir cette réflexion, trois sous-questions structurent la démarche :

- « Quel système lié à l'énergie solaire est le plus adapté aux enjeux énergétiques spécifiques aux interventions humanitaires ? »
- « Quelle typologie de structures déployables présente les meilleures capacités de déployabilité dans les premières phases d'intervention ? »
- « L'association d'un modèle énergétique et structurel qualifié comme optimal suffit-elle à répondre aux besoins vitaux d'un centre de santé pour cent personnes dans les premières phases d'intervention ? »

1.5. Méthodologie

En accord avec les objectifs de ce travail, la méthodologie adopte un aspect pluridisciplinaire, articulée autour de deux axes complémentaires : une première phase de recherches théoriques permettant de cadrer les enjeux techniques et contextuels liés aux énergies solaires et aux structures déployables. Une seconde phase de recherches empiriques, fondée sur une analyse comparative des structures déployables et une esquisse conceptuelle. Cette démarche vise à croiser les connaissances scientifiques, les retours d'expérience opérationnels et les concepts architecturaux pour répondre aux objectifs formulés précédemment.

1.5.1. Entretiens semi-directifs

Afin d'ancrer la réflexion dans des réalités opérationnelles, une série d'entretiens semi-directifs a été menée auprès d'acteurs humanitaires, militaires et institutionnels impliqués dans la conception ou la gestion d'infrastructures temporaires :

- La Croix-Rouge (Be)
- Médecins Sans Frontières (Be)
- La défense (Be)

Ces entretiens, rendus possibles grâce à un travail préalable d'identification des acteurs clés du secteur humanitaire ayant conduit à l'élaboration d'un annuaire des acteurs disponible.

1.5.2. Analyse typologique

L'analyse comparative des structures déployables a été réalisée à partir de fiches techniques, catalogues industriels, publications de prototypes, et études de projets réels. Chaque structure recensée a été évaluée à l'aide d'une grille de critères reposant sur la méthodologie multicritère d'aide à la décision (MMCAD).¹³

1.5.3. Portée et limites de la méthode

Ce travail ne prétend pas apporter une solution universelle ou totalement opérationnelle, mais s'inscrit dans une démarche exploratoire visant à croiser architecture, énergie et action humanitaire. Il s'agit ici d'élaborer une réflexion critique, fondée sur une compréhension des différents domaines utiles à la formulation d'une réponse à la problématique posée et d'exposer la cohérence d'un ensemble de paramètres en amont de toute mise en œuvre opérationnelle.

¹³ ROY, Bernard, *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*, Paris, Economica, 1993.

2. PRELIMINAIRES

2.1. Énergie solaire

L'énergie solaire a depuis toujours permis des conditions favorables à la vie sur Terre et se présente comme l'une des principales sources d'énergie renouvelable. On entend par « énergie renouvelable » une production d'énergie de source non fossile, se renouvelant naturellement et assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle d'une vie humaine.¹⁴ Elles englobent une série de sources, associées à des technologies et applications différentes illustrées en [figure 1](#).

Énergie solaire	Énergie éolienne	Énergies marines	Énergie hydraulique	Énergie géothermique	Bioénergie
					
Source: soleil	Source: vent	Source: vagues, marées	Source: eau	Source: terre	Source: biomasse, déchets
Technologies: systèmes photovoltaïques, systèmes solaires thermiques	Technologies: éoliennes	Technologies: barrages marémoteurs	Technologies: centrales hydroélectriques	Technologies: géothermique et pompes à chaleur	Technologies: combustion de biomasse, usines de production de biogaz, biocarburants
Applications: électricité, chauffage et refroidissement	Applications: électricité	Applications: électricité	Applications: électricité	Applications: électricité, chauffage et refroidissement	Applications: électricité, chauffage et refroidissement, transports

Figure 1 : Les principales sources d'énergies renouvelables et leurs applications

La question ne se limite pas à se demander quelle source d'énergie dominera le monde de demain, mais quelle source d'énergie est utile dans un contexte donné, à un moment donné. Toute source d'énergie naturelle doit être considérée comme une opportunité à combler des manques de manière saine et durable.¹⁵

L'énergie solaire participe ainsi à une production énergétique équilibrée et résiliente, utile à une série de secteurs différents, et particulièrement pertinente dans des contextes liés aux secteurs d'urgence pour des raisons que nous allons développer dans cette partie.

¹⁴ Cour des comptes européenne, *Énergies renouvelables et développement rural durable : d'importantes synergies sont possibles, mais rarement exploitées*, Rapport spécial n° 05/2018, Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2018, consulté le 15 février 2025 sur : www.op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/renewable-energy-5-2018/fr/

¹⁵ European Renewable Energy Council (EREC), *RE-thinking 2050: A 100% Renewable Energy Vision for the European Union*, Bruxelles, EREC, 2010, p. 10.

2.1.1. Pourquoi le solaire ?

Parmi l'ensemble des sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire se situe comme l'une des plus abondantes dont nous pouvons disposer. Selon le Conseil européen des énergies renouvelables, *European Renewable Energy Council* (EREC), le flux constant d'énergie en provenance du soleil au cours d'une seule année correspond à 2850 fois l'énergie totale consommée par les humains¹⁶. La [figure 2](#) ci-dessous illustre cette disponibilité énergétique inépuisable à échelle humaine, en comparaison à d'autres sources d'énergie capables de subvenir aux besoins énergétiques mondiaux.

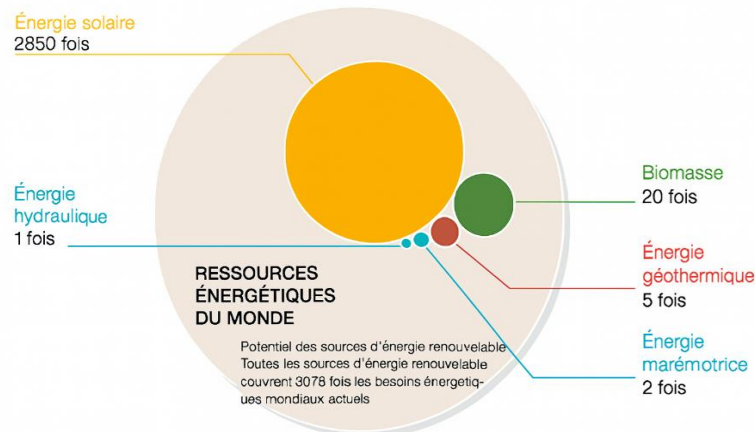


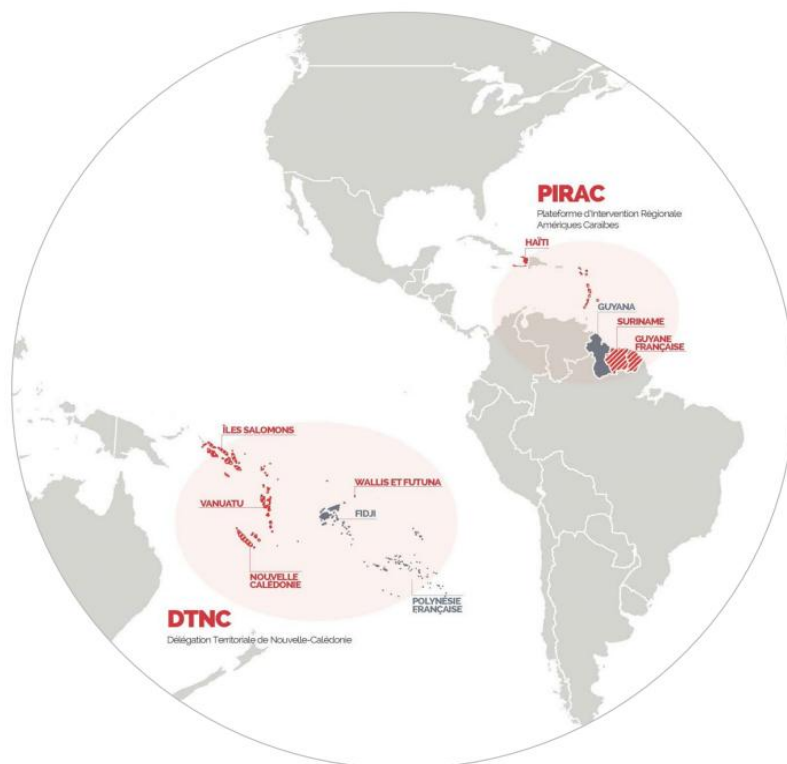
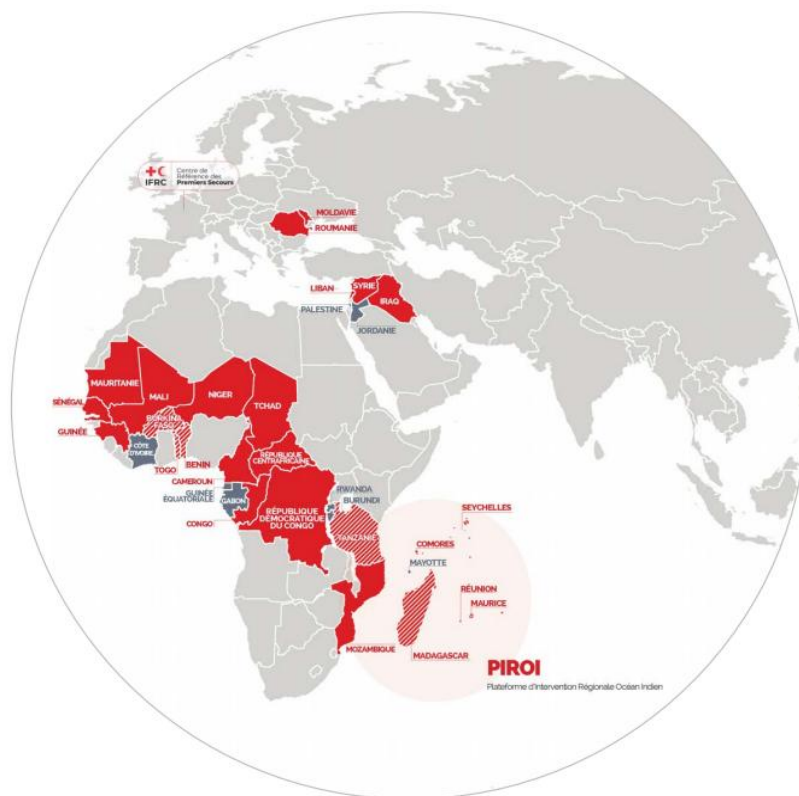
Figure 2 : Potentiel des différentes sources d'énergies renouvelables à combler les besoins énergétiques annuels humains. Schéma inspiré de EREC ; "RE-thinking 2050", 2010, p. 16.

Cette quantité d'énergie solaire permet de répondre à des besoins variés (électricité, chauffage, refroidissement) et apparaît comme une solution particulièrement adaptée à la majorité des situations géographiques d'actions humanitaires. En 2024, les besoins des acteurs humanitaires ont considérablement augmenté principalement dus à l'intensification de la guerre dans les territoires palestiniens et libanais, à la sécheresse en Afrique australe, à l'ouragan Beryl dans les Caraïbes et aux inondations au Bangladesh, au Népal et au Viet Nam. Au cours de l'année, les besoins humanitaires ont également augmenté dans plusieurs pays tels que le Tchad, l'Éthiopie, la Somalie, la Syrie, le Venezuela et le Yémen.¹⁷

Comme nous pouvons le constater, les zones d'intervention internationales se situent majoritairement en Afrique subsaharienne, au Moyen-Orient, en Asie du Sud et en Amérique latine. La [figure 3](#) illustre également les prévisions d'intervention de la Croix-Rouge à horizon de 2030, définissant les régions en situation d'urgence prolongée, tant en termes de conflits armés que de catastrophes climatiques.

¹⁶ European Renewable Energy Council. (2010). RE-thinking 2050: A 100 % Renewable Energy Vision for the European Union. Bruxelles : EREC, p.16

¹⁷ Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), *Aperçu humanitaire mondial 2025 – Rapport abrégé*, Genève, Nations Unies, 2025.



- Pays avec des activités CRF et une délégation
- Pays avec des activités CRF et pas de délégation
- Pays sans activités CRF en zone prioritaire

Figure 3 : Zones d'intervention internationales. STRATÉGIE INTERNATIONALE horizon 2030, La croix rouge.

La majorité de ces zones d'intervention FCV¹⁸ correspondent à des régions bénéficiant d'un haut niveau d'ensoleillement annuel. Ce constat, illustré en [figure 4](#) avec les différents niveaux d'irradiance globale horizontale (GHI)¹⁹, constitue un atout majeur pour la production d'énergie solaire hors réseau, que ce soit à travers des systèmes photovoltaïques classiques, des mini-réseaux solaires pour les structures communautaires (centres de santé, points d'eau, écoles) ou encore pour des solutions mobiles destinées aux camps de déplacés.

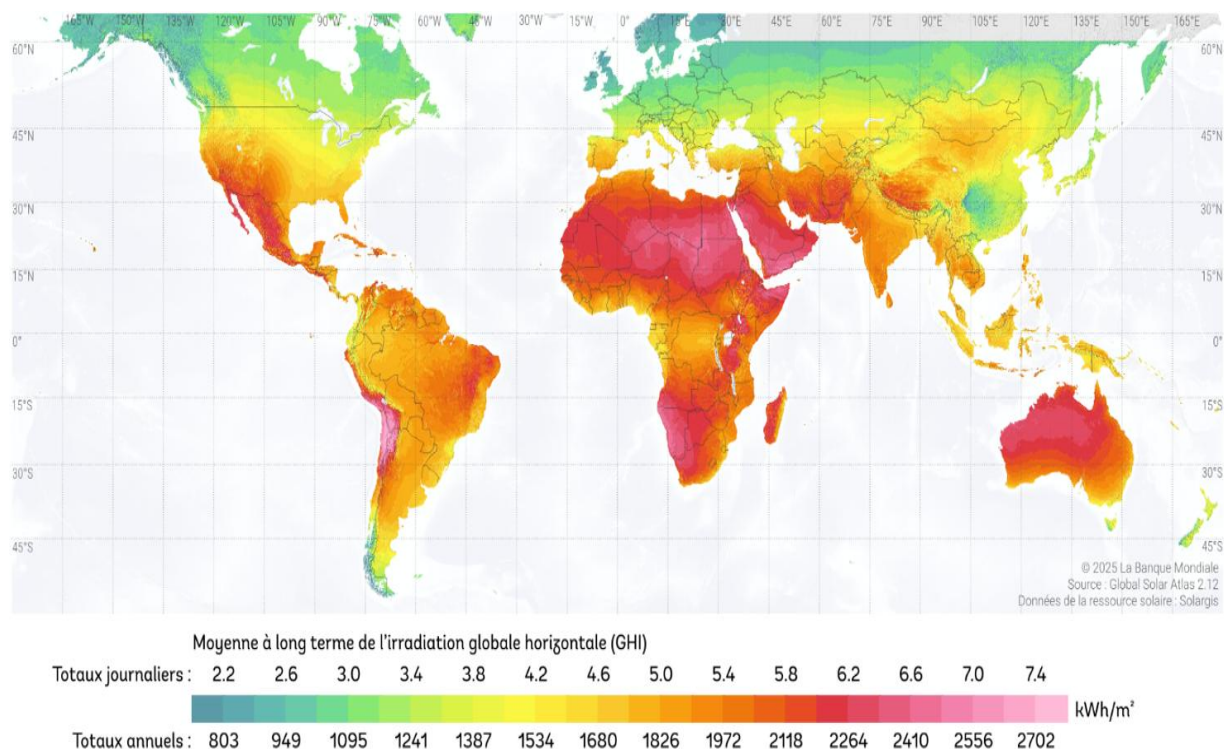


Figure 4 : Répartition de l'irradiation globale horizontale (GHI) dans le monde, carte de la ressource solaire internationale publiée par World bank group, financé par Esmap et préparé par Solargis. Consulté sur <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?>

De plus, recourir à l'énergie solaire dans l'humanitaire s'aligne avec les objectifs globaux de durabilité et de réduction des émissions. De plus en plus d'organisations internationales intègrent la dimension environnementale dans l'aide d'urgence. Par exemple, l'agence des Nations Unies pour les réfugiés (UNHCR), recommande systématiquement de privilégier les sources renouvelables plutôt que les combustibles fossiles ou le bois, afin de limiter les dégâts environnementaux et les émissions de CO₂ même en contexte de crise²⁰.

¹⁸ Fragile, touché par les conflits et vulnérable (FCV) ; Contextes qui englobent diverses situations, notamment les crises humanitaires, les situations d'urgence prolongées et les conflits armés. Source : GOGLA and Lighting Global. 2024 Off-Grid Solar Market Trends Report. Utrecht, Netherlands: GOGLA and World Bank Group, 2024.

¹⁹ L'irradiance horizontale globale est le rayonnement solaire total par unité de surface mesuré sur une surface horizontale de la terre. Il est généralement présenté en W/m². Source : <https://www.solaranywhere.com/fr/support/data-fields/definitions/#ghi>

²⁰ UNHCR, *Energy Needs, Emergency Handbook*, mise à jour le 24 janvier 2025, consulté le 15 février 2025 sur : www.emergency.unhcr.org/emergency-assistance/shelter-camp-and-settlement/settlements/energy-needs

De grandes initiatives telles que la « *Global Platform for Action on Sustainable Energy in Displacement* » coordonnée par l'UNHCR, soulignent qu'accélérer la transition du secteur humanitaire vers le solaire et les énergies renouvelables en général réduira les dommages environnementaux, les risques liés aux carburants fossiles, mais aussi les coûts opérationnels ²¹. Bien que les systèmes à énergie renouvelable nécessitent un investissement initial significatif, il est rapidement amorti sur une période allant de 2 à 5 ans ²². Plus précisément, en ce qui concerne les systèmes solaires, les progrès technologiques et l'évolution de la dynamique du marché ont récemment induit une baisse significative des coûts de presque 50% se traduisant par une adoption massive illustrée en [figure 5](#) ²³.

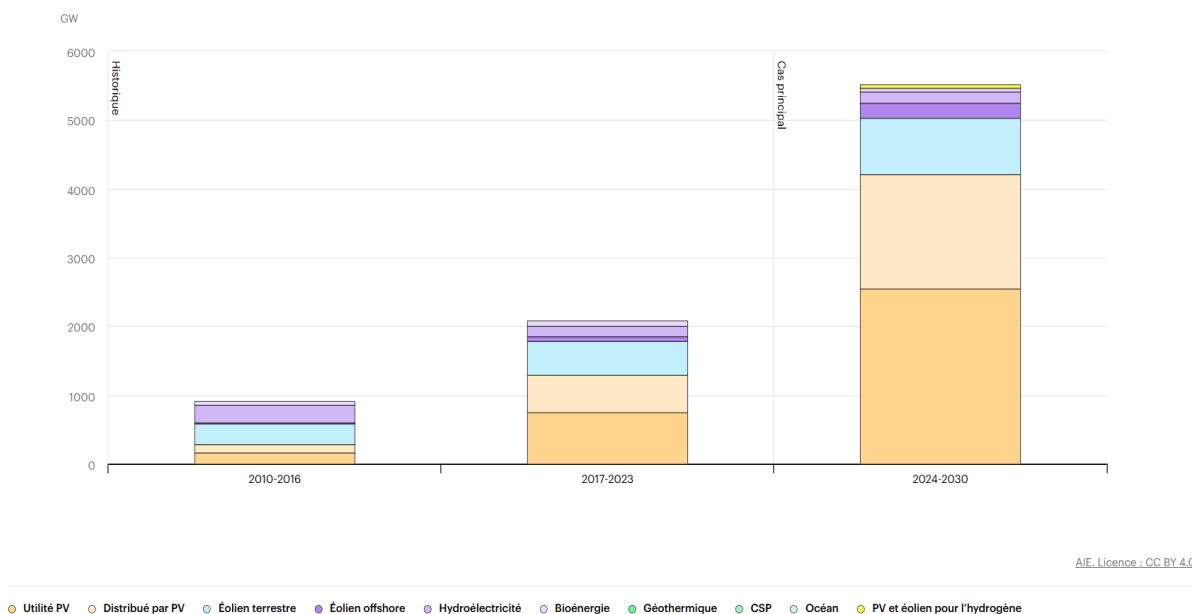


Figure 5 : Évolution mondiale de la capacité installée en énergies renouvelables

Enfin, en termes d'efficacité dans le déploiement in-situ, les progrès technologiques apportent des gains notables en termes de rendement énergétique, mais offrent également des avantages logistiques importants, notamment en matière de portabilité et de modularité. Contrairement à l'hydroélectricité par exemple, qui nécessite une infrastructure lourde dépendante d'un accès à des cours d'eau, ou encore d'autres sources d'énergies renouvelables nécessitant des conditions plus strictes dont l'installation est souvent plus complexe, le solaire peut être déployé rapidement et de manière flexible sur des sites variés. Le développement de nombreux systèmes de déploiement, qui seront présentés dans le chapitre des structures déployables, permettent aux systèmes solaires d'être installés dans des délais courts, même dans des zones isolées ou en mouvement offrant une autonomie énergétique immédiate aux populations déplacées.

²¹ Global Platform for Action (GPA), *Humanitarian Energy Outlook 2023*, Berlin, GPA Coordination Unit, UNITAR, 2023.

²² IRENA. IOREC: Outcomes Report 2022 – Fourth International Off-grid Renewable Energy Conference. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022, p.21

²³ International Energy Agency (IEA), *Electricity*, dans *Renewables 2024*, Paris, IEA, 2024, consulté le 15 février 2025 sur : www.iea.org/reports/renewables-2024/electricity

2.1.2. Différents systèmes d'exploitation

L'énergie solaire peut être valorisée à travers des systèmes technologiques très différents, selon ce que l'on cherche à produire et dans quel objectif. Ces systèmes, brièvement présentés en [figure 1](#), se répartissent en trois modèles distincts :

- les systèmes thermiques
- les systèmes thermodynamiques
- les systèmes photovoltaïques

Chacun repose sur un principe physique distinct et s'adapte à des contextes d'usage spécifiques, qu'il s'agisse de chauffer un bâtiment (thermique), d'alimenter une industrie (thermodynamique) ou de fournir de l'électricité à une école isolée (photovoltaïque).

Comprendre ces différentes technologies est essentiel pour saisir le champ des possibles qu'offre l'énergie solaire. Cette section propose donc une vue d'ensemble de ces trois grandes approches. Cependant, compte tenu du sujet traité par ce travail, l'accent sera mis plus spécifiquement sur les systèmes photovoltaïques.

2.1.2.1. Systèmes thermiques

Les systèmes solaires thermiques ([figure 6](#)) exploitent les rayonnements solaires pour les transformer en énergie calorifique (chaleur). Contrairement aux technologies photovoltaïques ou thermodynamiques, leur objectif n'est pas de produire de l'électricité mais de répondre à des besoins thermiques, principalement pour des applications domestiques ou industrielles tel que le chauffage de l'eau sanitaire, le chauffage de locaux ou encore certaines applications industrielles à basse température.²⁴

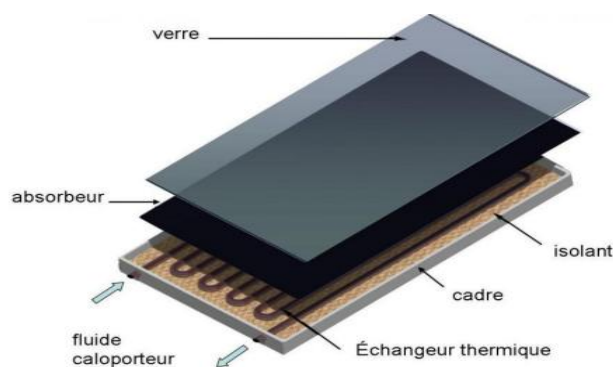


Figure 6 : Capteurs thermiques plans vitrés.

On distingue deux catégories :

- Les systèmes actifs, spécifiquement utiles dans la conversion de chaleur grâce à des capteurs solaires, en plans ou à tubes sous vide, qui absorbent l'énergie pour chauffer un

²⁴ BOULANGER, Pascal, et DESMETTRE, Daniel, « Les trois voies de l'énergie solaire », Clefs CEA, n° 44, hiver 2000–2001.

fluide caloporteur ²⁵, souvent de l'eau ou un mélange avec de l'antigel. Ce fluide, en circulant dans un circuit fermé, transmet sa chaleur à un ballon de stockage ou à un système de chauffage dans le but de remplir l'objectif pour lequel il a été installé.²⁶

- Les systèmes passifs, qui s'intègrent directement dans nos conceptions architecturales pour optimiser les apports solaires sans composants mécaniques ou électriques.

Les performances de ces systèmes dépendent des conditions d'ensoleillement et du dimensionnement de l'installation notamment en ce qui concerne les installations actives. Les performances de ces systèmes dépendent des conditions d'ensoleillement et du dimensionnement de l'installation. Les rendements thermiques varient généralement entre 30 % et 40 %, pour une productivité annuelle allant de 300 à 600 kWh/m² de capteurs.²⁷ À titre indicatif, une surface de 4 m² de capteurs suffit pour couvrir les besoins en eau chaude d'un foyer de quatre personnes.²⁸

2.1.2.2. Systèmes thermodynamiques

Les systèmes solaires thermodynamiques, également appelés centrales solaires à concentration, exploitent le principe de concentration du rayonnement solaire pour atteindre des températures très élevées. Contrairement aux systèmes thermiques, ces installations permettent de chauffer des fluides caloporteurs à des températures comprises entre 250 et 1 000 °C selon la technologie utilisée. Cette chaleur est ensuite utilisée pour générer de la vapeur, laquelle actionne une turbine couplée à un alternateur afin de produire de l'électricité.²⁹

Bien que ces installations requièrent des investissements initiaux importants et une infrastructure plus complexe (figure 7) que les autres systèmes solaires présentés dans ce chapitre, elles se prêtent particulièrement bien à la production d'électricité à grande échelle. Certaines centrales construites dans les années 1980, comme celles en Californie, sont encore

²⁵ Fluide en mouvement qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et en cède en un autre point. Source : Ministère de la Culture (France), *Fluide caloporteur*, FranceTerme, Journal officiel du 22 septembre 2000, consulté le 15 février 2025 sur : www.culture.gouv.fr/franceterme/terme/EQUI84

²⁶ France Renouvelables, *Énergie solaire : comment fonctionne la technologie thermique ?*, mis à jour en 2024, consulté le 15 février 2025 sur : <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energie-solaire/energie-solaire-differences-similitudes-thermique-vs-photovoltaique>

²⁷ Connaissance des Énergies, *Solaire thermique*, dernière mise à jour le 11 juillet 2019, consulté le 25 juillet 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique

²⁸ BOULANGER, Pascal, et DESMETTRE, Daniel, « Les trois voies de l'énergie solaire », Clefs CEA, n° 44, hiver 2000–2001.

²⁹ Connaissance des Énergies, *Solaire thermodynamique à concentration*, dernière mise à jour le 6 juillet 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration

en activité aujourd'hui et ont vu leur productivité s'améliorer avec le temps, atteignant des coûts de production compétitifs d'environ 0,1 €/kWh.³⁰



Figure 7 : Andasol, une des plus puissantes centrales thermodynamiques d'Europe située en Espagne

Par ailleurs, ces systèmes permettent un stockage de chaleur offrant une production électrique plus stable que les systèmes photovoltaïques, même quelques heures après le coucher du soleil. Seulement, ils présentent des contraintes d'implantation, car ils nécessitent une infrastructure lourde, un ensoleillement direct élevé (supérieur à 2 000 kWh/m²/an), de vastes surfaces, et d'importantes ressources en eau pour le nettoyage des miroirs.³¹

2.1.2.3. Systèmes photovoltaïques

Contrairement aux systèmes thermodynamiques, les systèmes photovoltaïques convertissent directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ce phénomène physique, mis en évidence pour la première fois en 1839 dans un compte rendu de l'académie des sciences rédigé par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel, permet de transformer l'énergie lumineuse en courant électrique via des cellules semi-conductrices³².

Ces cellules sont principalement composées de silicium dont les propriétés permettent aux électrons de circuler lorsqu'ils sont exposés aux rayons solaires comme l'illustre la [figure 8](#). Elles

³⁰ BOULANGER, Pascal, et DESMETTRE, Daniel, « Les trois voies de l'énergie solaire », Clefs CEA, n° 44, hiver 2000–2001.

³¹ Connaissance des Énergies, *Solaire thermodynamique à concentration*, dernière mise à jour le 6 juillet 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration.

³² Connaissance des Énergies, *Solaire photovoltaïque – Fiche pédagogique*, dernière mise à jour le 26 avril 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque.

sont constituées de deux couches. L'une dopée³³ de type n (excès d'électrons) et l'autre dopée de type p (déficit d'électrons), générant un champ électrique interne permettant le mouvement des charges et donc la production de courant électrique.

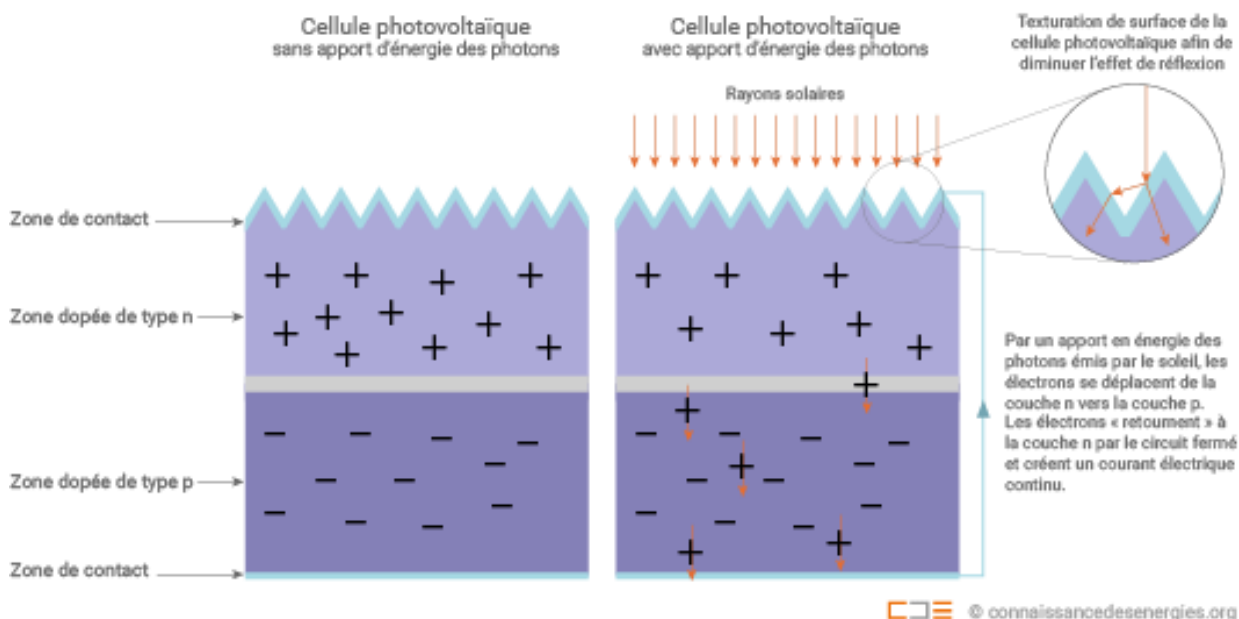


Figure 8 : Schéma du fonctionnement de production énergétique d'une cellule photovoltaïque.

Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques³⁴ :

- Les modules en silicium monocristallin, réalisés à partir d'un seul cristal de silicium. Ils offrent un excellent rendement, supérieur à 20 %, ainsi qu'une grande durabilité. Ils sont notamment reconnaissables dans les petits objets électroniques solaires comme les calculatrices ou les montres.
- Les modules polycristallins, conçus à partir de cristaux multiples, moins performants (généralement compris entre 14 % et 18 %) mais plus économiques à produire. Leur fabrication est plus simple et ils sont largement répandus pour des usages standards tels que l'équipement de toitures résidentielles, de bâtiments publics, de petites installations agricoles ou encore de systèmes d'électrification rurale dans les pays en développement.
- Les cellules à couches minces, issues des avancées technologiques, permettent d'économiser le silicium et sont constituées de films très fins de matériaux semi-conducteurs. Elles présentent l'avantage d'être plus légères et flexibles, mais leurs performances restent inférieures (10 à 13 % selon les configurations) à celles des cellules cristallines classiques.

³³ Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

³⁴ Connaissance des Énergies, *Solaire photovoltaïque – Fiche pédagogique*, dernière mise à jour le 26 avril 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque.

- Le photovoltaïque à concentration, également issue de nouvelles technologies prometteuses, repose sur des systèmes optiques (miroirs, lentilles) qui concentrent la lumière sur des cellules de petite taille mais à haut rendement. Cette technologie permet une réduction importante des matériaux pv utilisés avec un rendement allant jusqu'à 46 % en laboratoire, mais reste complexe à mettre en œuvre et coûteuse.
- Les cellules photovoltaïques organiques, faites de polymères, constituent également une voie prometteuse en raison de leur coût très faible et de leur souplesse. Leurs rendements atteignent les 19% en laboratoire, mais leur durabilité reste encore limitée.

Au-delà du rendement spécifique à chacune de ces technologies, plusieurs paramètres influencent la performance réelle des installations sur le terrain. La notion de puissance crête permet d'indiquer la capacité maximale d'un panneau à produire de l'électricité dans des conditions standards : ensoleillement de 1 000 W/m² ou plus, température de 25°C et rayonnement direct optimal³⁵. Or, dans des conditions réelles, ces critères sont difficiles à réunir simultanément, si bien qu'un panneau fonctionne rarement à son plein potentiel.

Comme nous avons pu le voir précédemment, la majorité des régions occupées par les secteurs humanitaires bénéficient d'expositions solaires particulièrement favorables à l'exploitation de cette source d'énergie. La forte irradiation annuelle de ces zones dépasse globalement le GHI moyen à long terme (LTA)³⁶, avec un seuil minimum avoisinant les 1700 kWh/m² et pouvant dépasser les 2500 kWh/m² pour les zones les plus exposées. À titre de comparaison, certaines régions du sud de la France atteignent entre 1 250 et 1 400 kWh/m².

Cependant, cette forte exposition s'accompagne souvent de températures ambiantes élevées, voire extrêmes. Or, le rendement des panneaux PV atteint son plein potentiel à 25°C mais décroît avec la chaleur à raison d'environ 0,4 % par degré au-dessus de ce seuil³⁷, ce qui peut affecter la performance réelle malgré un ensoleillement optimal.

De plus, la couverture nuageuse modifie la nature du rayonnement. Pour atteindre leur puissance crête, les cellules photovoltaïques, qui captent aussi bien le rayonnement direct que diffus, peuvent encore fonctionner en ciel voilé, mais leur rendement diminue en proportion de la qualité du rayonnement.³⁸

³⁵ Connaissance des Énergies, *Solaire photovoltaïque : que signifie la puissance « crête » ?*, dernière modification le 20 mars 2025, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/solaire-photovoltaïque-que-signifie-la-puissance-crete.

³⁶ Solargis, *Solar irradiance difference map of 2024*, publié en 2024, consulté le 16 juillet 2025 sur : www.solargis.com/resources/blog/solargis-news/solar-irradiance-difference-map-of-2024

³⁷ EDF Solutions Solaires, *Watt crête : définition*, dernière mise à jour 2024, consulté le 16 juillet 2025 sur : www.edf-solutions-solaires.com/lexique/watt-crete/

³⁸ Connaissance des Énergies, *Les installations solaires peuvent-elles fonctionner quand le ciel est nuageux ?*, dernière mise à jour le 17 octobre 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/les-installations-solaires-peuvent-elles-fonctionner-quand-le-ciel-est-nuageux

Comme le souligne l'étude « *Global Photovoltaic Power Potential by Country* » menée par la Banque mondiale, le niveau d'irradiation solaire ne suffit pas à lui seul pour caractériser le rendement effectif d'une installation photovoltaïque. Comme nous venons de le voir avec la notion de puissance crête, plusieurs facteurs géographiques et techniques viennent influencer significativement la production réelle d'énergie. Le GHI, bien qu'utilisé pour introduire le potentiel théorique d'un site, ne permet pas de prédire avec précision la performance d'un système, car il ne prend pas en compte les effets locaux tels que la température de l'air, le vent, la poussière ou encore l'encrassement des panneaux³⁹.

C'est là qu'intervient la notion de potentiel photovoltaïque pratique, désigné par l'indicateur « PVOUT », qui représente l'énergie réellement produite par kilowatt-crête (kWh/kWc) sur le long terme. Cette donnée intègre les contraintes environnementales (ombrage, température), topographiques, mais aussi d'usage des sols et de configuration technique des systèmes. Elle fournit donc une vision bien plus réaliste des performances attendues.

Dans le cadre de cette nouvelle notion de PVOUT, il est important d'aborder la typologie des niveaux d'évaluation définis par l'étude de la Banque mondiale, afin de mieux comprendre comment les contraintes géographiques, techniques et réglementaires influencent la viabilité réelle d'une installation solaire à grande échelle.

Ainsi, trois niveaux de PVOUT sont distingués. Le niveau 0 représente une estimation théorique : il suppose que chaque pays ou région pourrait exploiter l'intégralité de son potentiel solaire sans aucune contrainte technique ou environnementale.

En revanche, le niveau 1 introduit des restrictions physiques et techniques, excluant les zones identifiées comme inadaptees au déploiement de modules photovoltaïques selon 5 critères :

- les terrains trop accidentés (variation altimétrique > 300 m ou écart-type > 60 m sur une cellule de 1 km²)
- les plans d'eau permanents (hors zones flottantes côtières)
- les forêts denses (densité de couverture arborée ≥ 50 %)
- les zones inhabitables (situées à plus de 25 km d'un centre peuplé à > 50 habitants/km²)
- les zones urbaines denses (densité de construction > 50 %)

Enfin, le niveau 2 ajoute une couche de contraintes dites « douces », d'ordre réglementaire. Il exclut les zones protégées selon les catégories de l'UICN, ainsi que les terres agricoles.⁴⁰

Dans le cadre de cette étude traitant du déploiement de modules à usage humanitaire, le niveau 1 illustré en [figure 9](#) est sélectionné comme référence. Même si ce niveau est pensé pour les principales contraintes physiques et techniques empêchant le développement de projets solaires à plus grande échelle, il fournit tout de même une vision plus pragmatique, en phase avec les réalités d'un déploiement sur le terrain, contrairement au niveau 0 qui repose uniquement sur

³⁹ Banque mondiale et Solargis, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, Washington, D.C., World Bank, 2020, consulté le 15 février 2025 sur : www.globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study?c=11.523088,8.261719,3.

⁴⁰ ESMAP, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, Washington, D.C., World Bank, juin 2020, p. 12-13.

le potentiel théorique sans tenir compte des conditions locales. Il semble également plus adapté que le niveau 2, qui exclut certaines zones sur la base de restrictions réglementaires comme les terres agricoles protégées, des zones qui peuvent néanmoins être mobilisées temporairement en contexte d'urgence, notamment pour des installations solaires modulaires ou démontables.

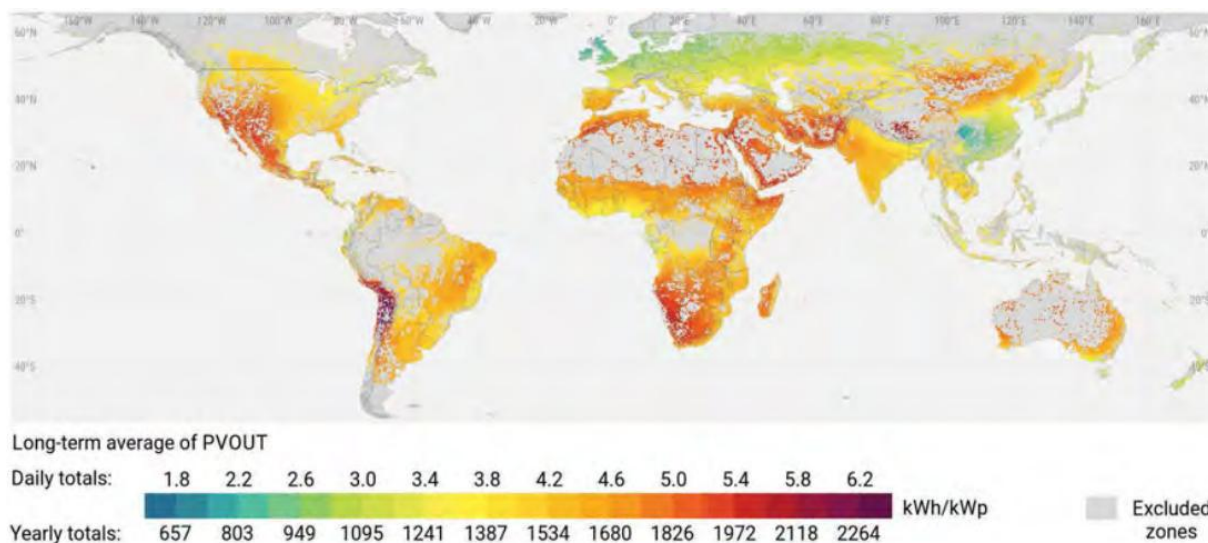


Figure 9 : Potentiel pratique de puissance photovoltaïque (PVOUT) au niveau 1 : moyenne annuelle à long terme des totaux quotidiens et annuels exprimé en kWh/kWp.⁴¹

Toutefois, une telle moyenne annuelle ne permet pas à elle seule de caractériser pleinement la performance d'un système PV dans ces régions.

« Une seule moyenne annuelle à long terme de PVOUT ne dit pas tout, car elle masque divers profils de variabilité saisonnière »⁴²

C'est pourquoi l'ESMAP, programme d'aide à la gestion du secteur énergétique dirigé par la banque mondiale, affirme que l'intérêt du PVOUT réside aussi dans sa capacité à illustrer les variations saisonnières, grâce à l'indice de saisonnalité⁴³ :

$$\text{PVOUT SAISON} = \text{MAX} [m01, m02 \dots, m12] / \text{MIN} [m01, m02 \dots, m12]$$

Celui-ci compare le mois le plus productif au moins productif, et révèle que les pays au fort potentiel disposent souvent d'une faible saisonnalité (indice < 2), ce qui renforce leur pertinence pour des projets pv performants tout au long de l'année.⁴⁴

⁴¹ kWh/kWp signifie "kilowatt-heure" par "kilowatt-peak", noté kWh/kWc en français pour "kilowatt-heure" par "kilowatt-crête".

⁴² ESMAP, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, Washington, D.C., World Bank, juin 2020, p. 10.

⁴³ PVOUT SAISON = Indice de saisonnalité, MAX [m01, m02 ... , m12] = Rendement moyen mensuel le plus élevé de PVOUT pour le pays/la région, MIN [m01, m02 ... , m12] = Rendement moyen mensuel le plus bas de PVOUT pour le pays/la région.

⁴⁴ Banque mondiale et Solargis, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, Washington, D.C., World Bank, 2020, consulté le 15 février 2025 sur : www.globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study?c=11.523088,8.261719,3.

L'analyse du potentiel pratique de puissance photovoltaïque, tenant compte des variations saisonnières de la [figure 10](#), montre que certains territoires comme l'Afrique australe, le Moyen-Orient, ou encore l'Australie, peuvent atteindre des niveaux stables supérieurs à 4,5 kWh/kWc.

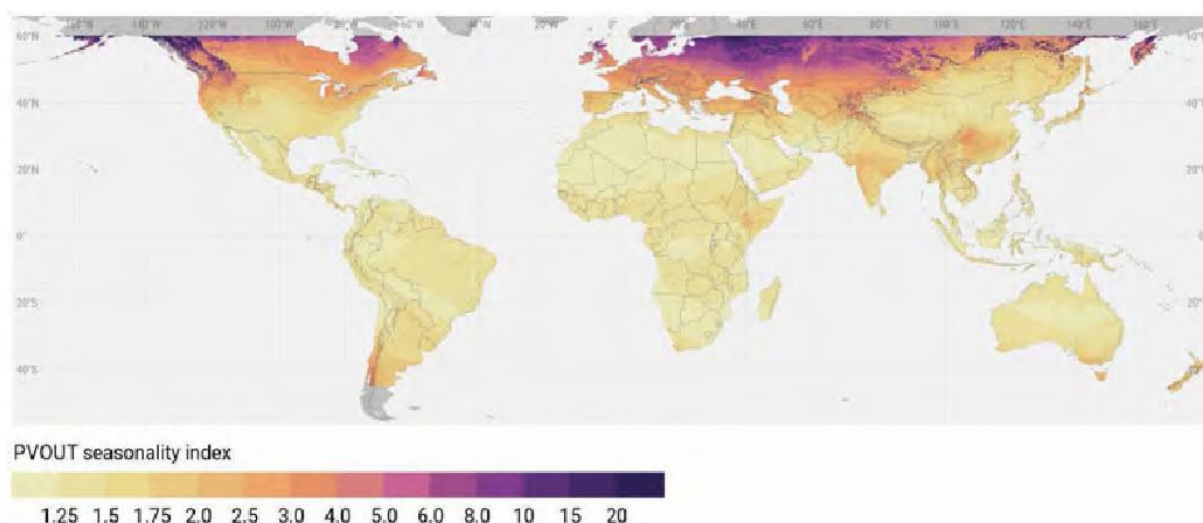


Figure 10 : Potentiel photovoltaïque pratique mondial (PVOUT) et variabilité saisonnière.

Ce constat représente une importance particulière dans le cadre des actions humanitaires dans la mesure où la majorité des zones d'intervention, telles que nous les avons présentées précédemment, se situent dans la tranche supérieure du potentiel photovoltaïque pratique. Ces territoires affichent des valeurs de PVOUT souvent supérieures à 4,5 kWh/kWc et se situent dans des zones d'index de saisonnalité faible traduisant une capacité de production énergétique particulièrement favorable peu importe le moment et la durée des interventions.

Toutefois, il faut nuancer cette corrélation car certaines zones d'intervention majeures ne bénéficient pas d'un ensoleillement constant ni d'une saisonnalité stable. L'Ukraine par exemple affiche un PVOUT moyen de 3,28 kWh/kWc ⁴⁵ et un indice de saisonnalité supérieur à 2, la production photovoltaïque reste exploitable mais ne se présente pas comme étant optimale. Cette variabilité peut compromettre l'autonomie énergétique si le système n'est pas dimensionné pour compenser les baisses de production durant les périodes les moins ensoleillées.

Cela ne signifie pas pour autant qu'il n'est pas pertinent d'avoir recours à l'énergie solaire dans ces contextes. Au contraire, le photovoltaïque reste souvent la solution la plus viable et durable, notamment en situation de crise prolongée. Cependant, son intégration nécessite quelques ajustements notamment par un dimensionnement étendu du champ photovoltaïque permettant d'assurer l'approvisionnement énergétique. Cette approche consiste à installer une surface de panneaux supérieure à la stricte estimation des besoins, afin de maximiser la captation d'énergie pendant les périodes favorables et de compenser les creux de production liés périodes nocturnes ou nuageuses. Toutefois, cet excédent de production ne garantit pas, à lui seul, une autonomie énergétique constante.

⁴⁵ World Bank & Solargis, *Solar resource map (interactive)*, consulté le 15 février 2025 sur : www.globalsolaratlas.info/detail?c=46.316584,63.105469,3

Pour anticiper les variations de production et adapter le dimensionnement du système aux besoins du terrain, il est d'abord important de comprendre comment l'électricité est initialement générée au niveau du panneau pv lui-même.

Un panneau photovoltaïque est constitué de cellules solaires connectées en série, conçues pour fournir une tension (U) électrique fixe, généralement de 12 volts (V). Cette tension reste globalement constante, quelles que soient les conditions d'ensoleillement, tant que le panneau est en bon état de fonctionnement.

En revanche, l'intensité (I) du courant, exprimée en ampères (A), dépend directement de la quantité de lumière solaire reçue. Plus l'ensoleillement est important, plus le courant produit est fort. Ainsi, par temps couvert ou en fin de journée, le panneau peut toujours délivrer ses 12 V, mais avec un courant plus faible, ce qui signifie que la quantité d'énergie réellement disponible est réduite⁴⁶.

Cela a un impact direct sur la capacité à alimenter les appareils électriques, la puissance (P), exprimée en watts (W), qui traduit l'énergie réellement utilisable à un instant donné, est obtenue en multipliant la tension par l'intensité⁴⁷ :

$$P = U \times I$$

Même si la tension reste stable, une baisse d'intensité causée par une faible luminosité entraîne une diminution immédiate de la puissance fournie.

Dans un contexte humanitaire, par exemple pour alimenter un hôpital temporaire, cela peut entraîner des conséquences importantes : un réfrigérateur de vaccins ou tout autre équipement vital pourrait ne pas fonctionner correctement si le courant est trop faible, même si la tension est encore présente.

Ceci traduit l'importance du stockage par batterie, et d'un bon dimensionnement du système, pour garantir une alimentation stable et suffisante même lorsqu'il fait nuit ou nuageux pendant une certaine période comme cela peut être le cas pour les zones à forte saisonnalité.

En effet, pour garantir une alimentation électrique continue, notamment en l'absence de soleil, l'énergie produite par les panneaux solaires doit être stockée de manière fiable. Les batteries, qu'elles soient au lithium, au plomb ou au gel, permettent de conserver cet excédent d'électricité pour une utilisation différée.

Ce stockage est indispensable la nuit et particulièrement nécessaire dans des contextes d'indice de saisonnalité élevé (< 2). Toutefois, la performance et la durabilité de ces batteries dépendent

⁴⁶ Ministère de l'Éducation nationale, *L'énergie solaire photovoltaïque*, France, 2013.

⁴⁷ YOWELL, Julie, YOWELL, Janet, ZARSKE, Malinda Schaefer et BROOKS, David R., *Photovoltaic Efficiency*, TeachEngineering, College of Engineering, University of Colorado Boulder, dernière mise à jour le 8 juillet 2022, consulté le 23 juillet 2025 sur : www.teachengineering.org/lessons/view/cub_pveff_lesson03.

fortement du respect de leurs conditions d'utilisation. Il est crucial de contrôler les cycles de charge et de décharge pour éviter une usure prématurée.⁴⁸

Pour ce faire, un régulateur est intercalé entre les différents modules et la batterie. Comme l'illustre le contrôleur de charge et le limiteur de décharge en [figure 11](#), il protège la batterie contre les phénomènes de surcharge et de décharge profonde en surveillant en continu la tension et l'état de charge. Si ces paramètres dépassent les seuils critiques, le régulateur intervient automatiquement pour limiter ou interrompre le flux d'électricité, évitant ainsi une détérioration.

Il existe également des régulateurs les plus performants, équipés de technologies PWM (modulation de largeur d'impulsion) ou MPPT (suivi du point de puissance maximale), permettant d'optimiser le rendement énergétique du système. Ils ajustent en temps réel le transfert d'énergie entre les panneaux et les batteries en fonction des conditions de production, ce qui maximise la récupération d'énergie solaire tout en assurant des cycles de charge stables, efficaces et respectueux de la durée de vie des batteries.⁴⁹

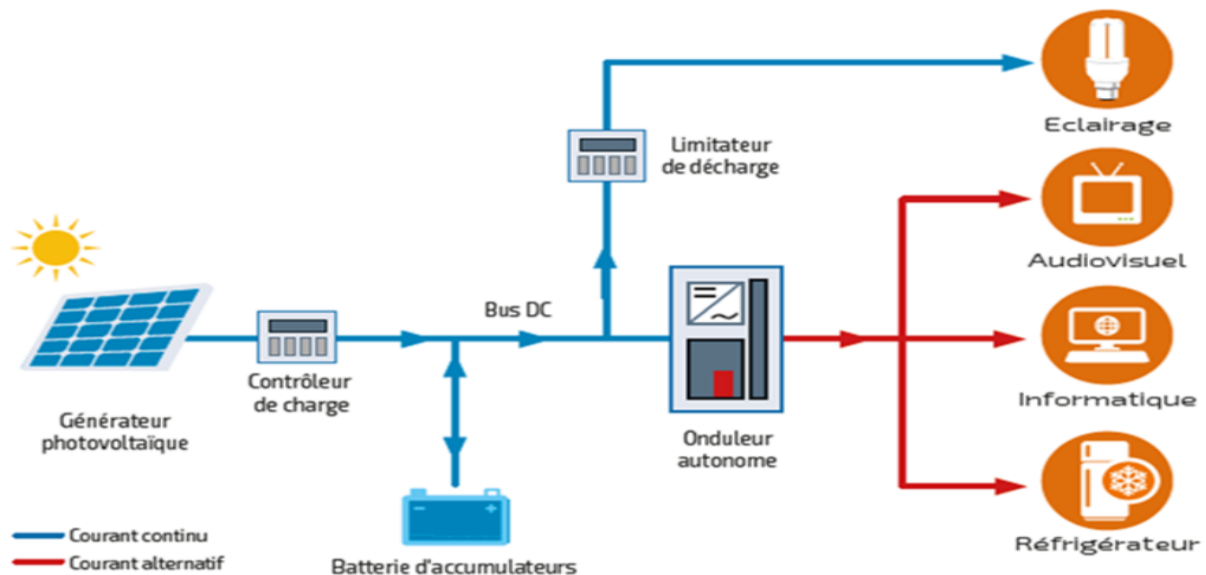


Figure 11 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage.

Cette électricité stockée en courant continu (DC)⁵⁰ doit être convertie pour alimenter la plupart des équipements (appareils médicaux, éclairage, réfrigérateurs, etc.). Cette conversion est

⁴⁸ IDEX, « Batteries pour panneaux solaires : rentabiliser une installation grâce au stockage », mis à jour le 6 octobre 2022, consulté le 23 juillet 2025 sur : www.idex.fr/le-blog/batteries-pour-panneaux-solaires-rentabiliser-une-installation-grace-au-stockage.

⁴⁹ SOLARIS, « Principe de fonctionnement d'un régulateur solaire », Solaris Store, consulté le 23 juillet 2025 sur : www.solaris-store.com/content/44-principe-de-fonctionnement-d-un-regulateur-solaire.

⁵⁰ Courant continu (DC, Direct Current) qui circule dans une seule direction constante ? souvent utilisé dans les dispositifs électroniques et les batteries

assurée par un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif (AC)⁵¹ indispensable pour la plupart des usages.⁵²

En outre, la performance d'un système dépend aussi de la qualité des régulateurs de charge, qui optimisent le transfert d'énergie vers les batteries sans les endommager, et des onduleurs, qui convertissent le courant continu en courant alternatif utilisable par la majorité des équipements. L'ensemble de ces composants doit être sélectionné et calibré en fonction des besoins et des contraintes logistiques du projet. Un système photovoltaïque bien conçu, même dans des régions au potentiel moyen, peut donc offrir une autonomie énergétique durable et fiable, à condition de tenir compte des spécificités locales où il est déployé.

2.1.3. Intégrations architecturales

Le déploiement de ces dispositifs est utile à de nombreux secteurs. Dans le cadre de cette étude ils ne peuvent être pensés indépendamment de leur interaction avec l'enveloppe architecturale. L'intégration du solaire au bâti ne concerne pas uniquement la performance énergétique, mais engage également des enjeux d'esthétique, de structure, de régulation thermique et d'adaptation aux usages.

Deux grandes stratégies d'intégration se dessinent aujourd'hui : d'un côté, la pose en surimposition (BAPV) et de l'autre, l'intégration comme élément constructif (BIPV). À ces deux grandes approches s'ajoute une réflexion plus spécifique, celle de l'architecture d'urgence, où l'intégration photovoltaïque architecturale répond à des impératifs de rapidité de déploiement, de résilience et d'adaptabilité dans des contextes de crise.

Cette section vise à explorer ces différentes manières d'inscrire le photovoltaïque dans la matérialité du bâti. En examinant la logique de surimposition, la stratégie de substitution architecturale et les spécificités de l'urgence humanitaire, nous verrons comment les systèmes solaires ne sont plus de simples ajouts techniques, mais deviennent des éléments porteurs de sens.

2.1.3.1. Photovoltaïques en surimposition

La forme d'intégration de systèmes solaires la plus courante reste aujourd'hui l'installation en surimposition, aussi désignée par l'acronyme BAPV (*Building Applied Photovoltaics*). Cette approche consiste à fixer les modules photovoltaïques sur des éléments déjà construits, généralement en toiture, sans en modifier la fonction ou la composition.⁵³

⁵¹ Courant alternatif (AC, pour Alternating Current) change de direction périodiquement, principalement utilisé pour le transport d'électricité sur de longues distances.

⁵² Socomec, *Définition et usages d'un onduleur*, consulté le 25 juillet 2025 sur : www.socomec.fr/fr/definition-et-usages-dun-onduleur

⁵³ Institut National de l'Énergie Solaire (INES), *Guide d'installation des systèmes photovoltaïques – Édition 2024*, Chambéry, INES, 2024, p. 26-27.

Contrairement à l'approche BIPV, les panneaux ne remplacent pas les matériaux de couverture, mais viennent s'y superposer, formant une couche ajoutée. La pose suit une procédure standardisée : des crochets ou rehausses sont fixés à la charpente, dessus se montent des rails en aluminium, puis les panneaux sont clipsés un à un comme l'illustre la figure 12. Ce système de pose permet une meilleure ventilation des modules, optimisant leur rendement en limitant les hausses de température, ce qui n'est pas toujours le cas pour les installations totalement intégrées.⁵⁴

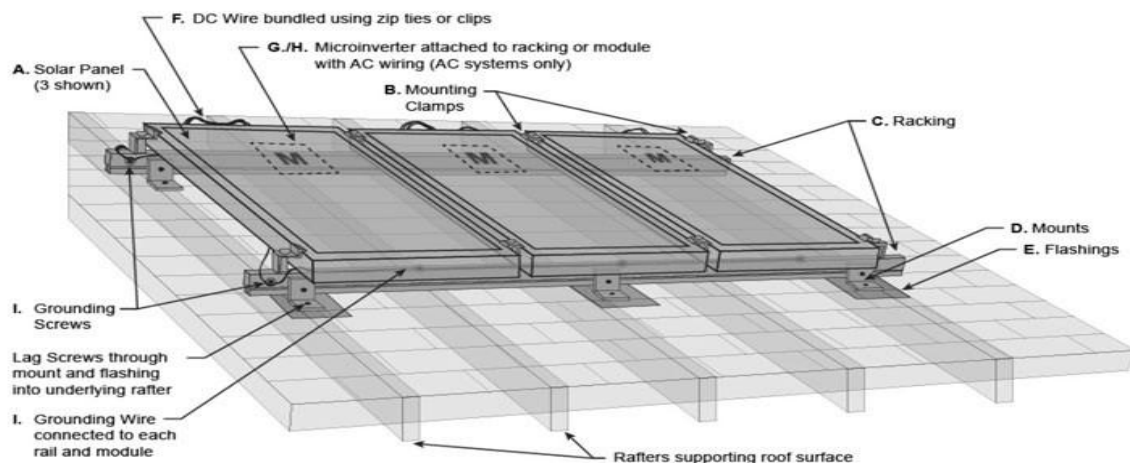


Figure 12 : Schéma d'un système de fixation en surimposition pour modules photovoltaïques.

Cette méthode est la plus simple à mettre en œuvre, moins coûteuse, et généralement plus facile à entretenir. Dans de nombreux cas, les installations BAPV sont réalisées sur des bâtiments existants, lors de rénovations énergétiques ou pour améliorer les performances environnementales d'un patrimoine bâti sans transformation structurelle majeure.

Toutefois, ce type d'installation peut présenter quelques limites. Sur le plan esthétique, les panneaux peuvent apparaître comme des éléments ajoutés, parfois peu harmonieux avec les lignes architecturales du bâtiment. Dans les cas de bâtiments anciens, protégés ou classés, la pose de panneaux en surimposition peut être restreinte, voire interdite, en raison de son impact visuel.

Dans les zones moins contraignantes du point de vue patrimonial ou esthétique, la surimposition reste l'option la plus utilisée. Elle permet de profiter des bénéfices économiques de la production solaire tout en évitant les contraintes de personnalisation associées aux systèmes BIPV. Pour les bâtiments industriels, agricoles ou tertiaires, la pose en BAPV est une solution particulièrement intéressante en raison de sa standardisation, de sa modularité et de son coût réduit par rapport à une intégration plus fine.⁵⁵

⁵⁴ Institut National de l'Énergie Solaire (INES), *Guide d'installation des systèmes photovoltaïques – Édition 2024*, Chambéry, INES, 2024, p. 27.

⁵⁵ Groupe Roy Énergie, *Panneaux photovoltaïques intégrés au bâti ou en surimposition : quelles différences ?*, GRE ENR, 2022, consulté le 25 juillet 2025 sur : www.gre-enr.fr/panneaux-photovoltaïques-integres-au-bati-ou-en-surimposition-quelles-differences/.

En dépit de ses limites, les systèmes BAPV constituent aujourd'hui la technologie dominante dans le secteur photovoltaïque résidentiel et industriel. Leur rapidité de mise en œuvre, leur rentabilité et leur souplesse d'adaptation en font une réponse clé à l'accélération nécessaire de la transition énergétique, notamment dans le cadre des objectifs de neutralité carbone fixés à l'échelle européenne et mondiale (cf. 2.1.1. Pourquoi le solaire ?).

2.1.3.2. Photovoltaïque comme élément constructif

L'intégration du photovoltaïque comme élément constructif au sein de l'enveloppe architecturale d'un bâtiment constitue une approche plus fine de l'installation solaire dans le domaine de la construction. Cette approche, désignée par l'acronyme BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*), consiste à intégrer les modules photovoltaïques directement dans les éléments constitutifs du bâti.⁵⁶

Contrairement à une pose « classique » où les panneaux sont ajoutés sur une toiture existante, le BIPV remplace les matériaux de construction traditionnels tout en conservant les bénéfices des installations solaires. Les modules photovoltaïques prennent la place des composants architecturaux tels que les tuiles, les vitrages ou les bardages (*figure 13*), tout en assurant leurs fonctions structurelles, d'étanchéité, d'isolation, ou de protection.⁵⁷ Il ne s'agit donc pas simplement d'ajouter une source d'énergie solaire à un bâtiment, mais de repenser l'enveloppe comme élément « actif », à la fois esthétique et fonctionnel.⁵⁸

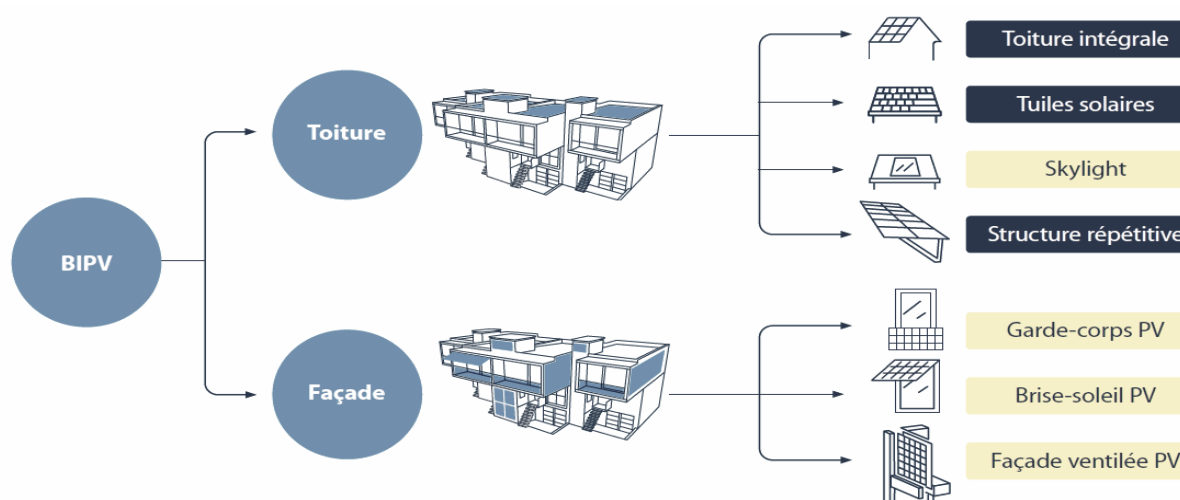


Figure 13 : Différents moyens d'intégration de systèmes BIPV en toiture et en façade.

⁵⁶ GRE-Énergies Renouvelables, *Photovoltaïque intégré au bâti : une solution esthétique et performante*, GRE ENR, s.d., consulté le 25 juillet 2025 sur : www.gre-enr.fr/photovoltaïque-integre-au-bati/.

⁵⁷ SPW Énergie, *Zoom sur le Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*, Portail de l'Énergie en Wallonie, s.d., consulté le 25 juillet 2025 sur : energie.wallonie.be/fr/zoom-sur-le-building-integrated-photovoltaics-bipv.html.

⁵⁸ Espaces contemporains, *L'architecture solaire en révolution grâce au nouveau visage des panneaux photovoltaïques et les innovations*, s.d., consulté le 25 juillet 2025 sur : espacescontemporains.ch/larchitecture-solaire-en-revolution-grace-le-nouveau-visage-des-panneaux-photovoltaïques-et-les-innovations/.

Ce double rôle fait du BIPV un outil puissant pour réduire l’empreinte carbone de la construction. Il optimise l’utilisation de la surface bâtie, sans emprise foncière supplémentaire, tout en participant à une conception plus harmonieuse et intégrée.

Grâce à la diversité des technologies disponibles, l’intégration architecturale devient un levier de création esthétique autant que de performance énergétique. On retrouve des modules colorés, transparents, texturés ou imitant d’autres matériaux comme nous pouvons le voir à la [figure 14](#) avec les tuiles solaires développées par l’entreprise *Dyaqua*, permettant de remplacer les tuiles traditionnelles tout en préservant l’apparence des toitures patrimoniales.⁵⁹



Figure 14 : Exemple de tuiles photovoltaïques intégrées pour toitures patrimoniales.

Dans cette perspective, le photovoltaïque n’est plus pensé comme un ajout fonctionnel mais comme un véritable enjeu de conception architecturale. La [figure 15](#) illustre cette démarche avec le projet *Bota Solar* visant à transformer un immeuble emblématique de la Place Rogier à Bruxelles, en intégrant un auvent solaire directement à son architecture. Deux portiques métalliques supportent 800 m² de verres solaires translucides forment une voile légèrement courbée visible depuis la rue. Cette courbure, orientée vers le sud pour maximiser la captation solaire, devient un véritable couronnement architectural du bâtiment et lui donne une nouvelle identité esthétique, tout en permettant de couvrir environ 30 % de ses besoins en électricité.⁶⁰

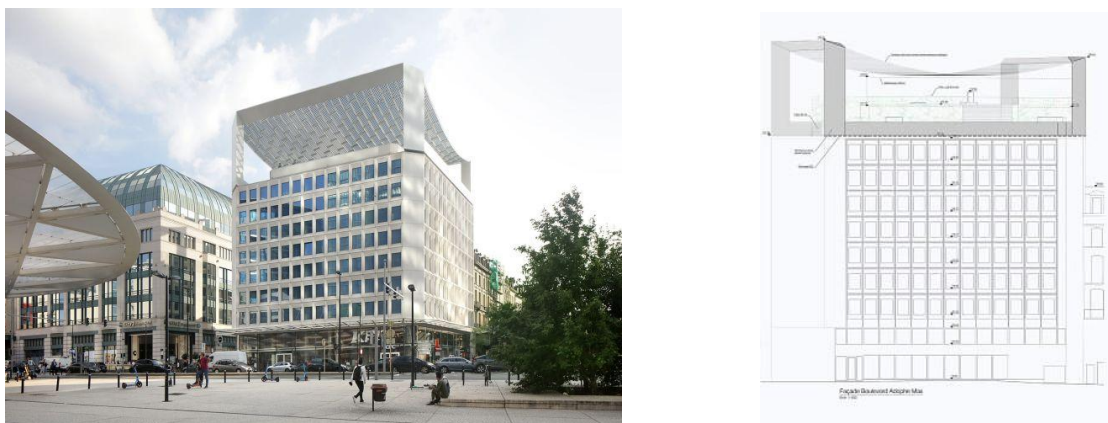


Figure 15 : Projet Bota Solar à Bruxelles intégrant un auvent photovoltaïque à l’architecture.

⁵⁹ Dyaqua, *Invisible Solar Technology*, s.d., consulté le 25 juillet 2025 sur : www.invisiblesolar.it/EN/technology/.

⁶⁰ ecobuild.brussels, *Bota Solar*, 2023, dernière modification le 12 septembre 2023, consulté le 25 juillet 2025 sur : ecobuild.brussels/projets/bota-solar/.

Toutefois, le développement de cette sensibilité à l'intégration du solaire rencontre encore plusieurs freins. Le coût des installations reste supérieur à celui des systèmes photovoltaïques en surimposition notamment dû à la personnalisation des systèmes propres à chaque projet. De plus, la méconnaissance de ces technologies peut provoquer une surévaluation des risques et un accès limité aux financements.⁶¹ Ces approches nécessitent encore des efforts en matière de standardisation, de diffusion d'information et de soutien économique, mais constituent tout de même une réponse pertinente en termes de conception architecturale dans le contexte des défis énergétiques et climatiques actuels.

2.1.4. Architecture d'urgence

Si l'intégration du photovoltaïque dans l'architecture traditionnelle illustre la volonté d'optimiser les ressources énergétiques tout en renforçant la qualité esthétique et environnementale des bâtiments, une approche parallèle peut être observée dans le domaine de l'architecture d'urgence. Dans ce contexte, l'objectif reste similaire, garantir un accès à une énergie propre et décentralisée, mais s'inscrit dans des conditions radicalement différentes, où cet accès devient non plus un choix de conception durable, mais une nécessité vitale.

En situation de catastrophe naturelle, de crise humanitaire ou de déplacement massif de populations, les infrastructures énergétiques locales sont souvent détruites ou inaccessibles. L'intégration de systèmes photovoltaïques dans les structures d'urgence (abris temporaires, centres de soins mobiles, unités logistiques) permet alors de répondre rapidement à des besoins essentiels : éclairage, alimentation des dispositifs médicaux, pompage et purification de l'eau, ou encore maintien des communications.

Ces besoins, toutefois, ne sont pas figés : ils évoluent avec le temps et la nature de l'intervention, ce qui appelle une réflexion spécifique sur l'adaptation des solutions déployées.

2.1.4.1. Temporalité des interventions

L'architecture d'urgence ne se limite pas à une réponse figée, mais s'inscrit dans une réflexion plus large sur l'évolution des besoins dans le temps. Les exigences diffèrent en effet selon qu'il s'agit de couvrir les premiers jours d'une catastrophe, d'assurer des conditions de vie acceptables sur plusieurs mois, ou de préparer une transition vers des solutions plus pérennes ([figure 16](#)). Cette dimension temporelle, déterminante pour la conception et l'efficacité des dispositifs déployés, conditionne directement les choix architecturaux et technologiques à privilégier.

⁶¹ SPW Énergie, *Zoom sur le Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*, Portail de l'énergie en Wallonie, s.d., consulté le 25 juillet 2025 sur : energie.wallonie.be/fr/zoom-sur-le-building-integrated-photovoltaics-bipv.html.

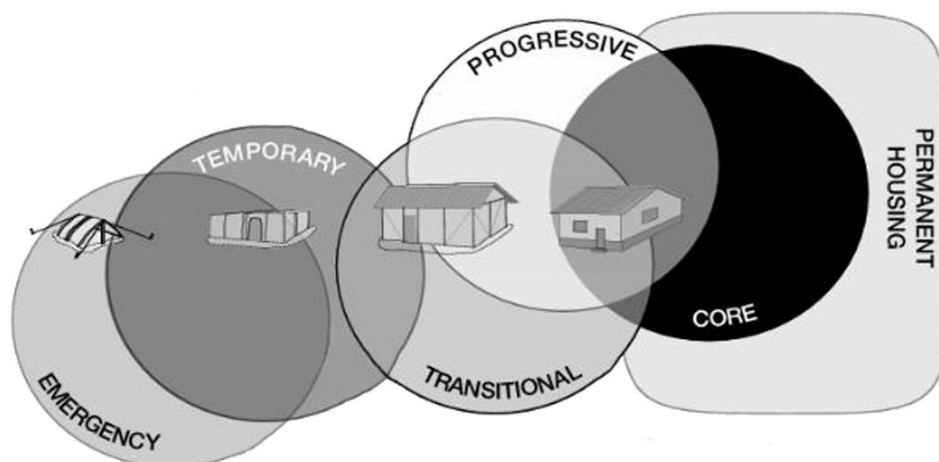


Figure 16 : Typologie des abris d'urgence selon leur temporalité et leur fonction.

Dans ce cadre, plusieurs catégories se distinguent selon leur temporalité et leur fonction. Les abris d'urgence (« *emergency* », figure 16) constituent la réponse la plus immédiate, destinés à sauver des vies dans les premiers instants qui suivent la catastrophe.⁶²

Lorsque la crise se prolonge, les structures évoluent vers une utilisation temporaire (« *temporary* ») et permettent une réponse rapide mais limitée, conçue avec des matériaux simples et une mise en œuvre accélérée.⁶³

Vient ensuite les installations transitionnelles (« *transitional* »), pensées pour évoluer et s'adapter aux contextes changeants, notamment grâce à leur capacité d'être réutilisés ou améliorés.⁶⁴

Enfin, l'enjeu peut se prêter à accompagner les populations touchées vers une architecture progressive (« *progressive* », figure 16) plus durable. Dans certains cas, cette architecture devient une composante permanente de l'occupation du site (« *permanent housing* »).⁶⁵

2.1.4.2. Besoins sur site

Ces structures d'urgence destinées à protéger immédiatement les populations jusqu'aux solutions plus pérennes, ne suffisent pas en elles-mêmes. Leur efficacité dépend directement de l'ensemble des moyens opérationnels qui les accompagnent. Une réponse humanitaire pertinente repose ainsi non seulement sur l'adaptation des formes construites au contexte d'occupation, mais aussi sur la mise à disposition des ressources et des dispositifs techniques qui assurent leur fonctionnement.

⁶² International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, *Post-disaster Shelter: Ten Designs*, Genève, IFRC, 2013, p. 8-9.

⁶³ Ibid.

⁶⁴ Ibid.

⁶⁵ Ibid.

Sur le terrain, l'enjeu dépasse donc la seule installation d'hébergements temporaires. Il s'agit de créer un environnement logistique cohérent et autonome, capable de soutenir durablement les activités déployées. Ces besoins recouvrent plusieurs dimensions essentielles ⁶⁶ :

- Approvisionnement énergétique : il est impératif de disposer d'une source d'énergie fiable et adaptée au contexte pour alimenter l'ensemble des activités, qu'il s'agisse de l'éclairage, des dispositifs médicaux, du maintien de la chaîne du froid ou encore du fonctionnement des systèmes de communication.
- Systèmes de communication : la capacité à transmettre des informations vers les instances locales et nationales est indispensable.
- Transport et mobilité : l'efficacité d'une mission repose aussi sur l'organisation des déplacements. Cela implique à la fois l'acheminement initial du matériel et du personnel vers la zone d'intervention, mais aussi la gestion quotidienne des mouvements à l'intérieur du dispositif.
- Alimentation : les équipes comme les bénéficiaires directs (patients hospitalisés, accompagnants) doivent avoir accès à une alimentation suffisante et adaptée.
- Gestion des stocks et entreposage : la mise en place d'un système de stockage structuré, permettant d'anticiper les besoins et de maintenir un flux constant de matériel et de consommables, conditionne la continuité des opérations.
- Chaîne pharmaceutique et équipements médicaux : l'autonomie des équipes suppose de disposer sur place d'un stock suffisant de médicaments, consommables et matériel médical, garantissant la qualité et la régularité des soins.
- Gestion des contributions externes : les donations de médicaments ou de matériel doivent être anticipées et encadrées afin de s'assurer qu'elles correspondent aux normes en vigueur et aux besoins réels du terrain.
- Sécurité : la protection des équipes, des patients et des infrastructures exige des plans de gestion adaptés au contexte et clairement communiqués.
- Qualité des installations : les structures mises en place doivent offrir un cadre adapté aux soins et répondre aux besoins essentiels des équipes, tant sur le plan fonctionnel que sanitaire.
- Capacité de mobilisation : la rapidité avec laquelle une équipe peut s'installer est cruciale. Cela suppose l'existence de procédures standardisées et éprouvées permettant un déploiement dans les délais les plus courts.

⁶⁶ U.S. Agency for International Development (USAID), *Powering Health: Electrification Options for Rural Health Centers*, Washington, D.C., USAID, 2008, p. 78.

- Évaluation et planification du site : le choix et l'aménagement de l'emplacement doivent tenir compte des conditions locales, avec la possibilité d'utiliser ou de renforcer des infrastructures déjà existantes.
- Construction progressive : il est souvent nécessaire de hiérarchiser la mise en place des espaces, en priorisant ceux indispensables aux soins urgents, tandis que les autres zones se complètent progressivement au fil de l'installation.
- Plan de retrait : enfin, la démobilisation doit être pensée dès le départ afin d'accompagner la reprise des structures locales.

Parmi l'ensemble des besoins identifiés, l'approvisionnement énergétique apparaît comme étant à prioriser car elle conditionne la mise en œuvre de plusieurs autres.

En effet, l'énergie intervient de façon transversale dans presque tous les domaines : elle alimente les systèmes de communication, permet la conservation et la préparation des aliments, garantit la continuité pharmaceutique et médicale, alimente l'éclairage du site, soutient la qualité d'installations diverse telles que les purificateurs d'eau, etc.

2.1.4.3. Priorités

Bien que fondamental, cet approvisionnement énergétique n'est pas toujours suffisant pour répondre à l'ensemble des besoins cités. Il doit donc être hiérarchisé afin de soutenir en priorité les nécessités vitales. Cette logique rejoint les recommandations de l'initiative « Sphère », un manuel de référence élaboré par les organisations humanitaires internationales, qui invitent à « donner la priorité aux interventions destinées à sauver des vies » et à « rester suffisamment flexible pour repenser toute intervention à mesure que les besoins évoluent ». ⁶⁷

En premier lieu, l'énergie doit garantir la continuité des soins de santé vitaux. Toutes les personnes en situation de crise humanitaire doivent avoir accès aux services de santé prioritaires pour lutter contre les principales causes de surmortalité et de morbidité.⁶⁸ L'accès à ces soins constitue un droit fondamental, et leur objectif en contexte de crise est de réduire ce taux de mortalité excessif dans les contextes d'urgence.

Ensuite, l'énergie doit être mobilisée pour assurer l'approvisionnement en eau et l'hygiène, des conditions essentielles de survie et de santé publique.⁶⁹ Cette priorité de satisfaire les besoins minimaux de qualité et de quantité d'eau est proche des impératifs liés aux soins vitaux.

Par ailleurs, la sécurisation des sites et la coordination des acteurs dépendent du maintien des systèmes de communication. Celles-ci s'inscrivent dans la recommandation de suivre le

⁶⁷ Association Sphère, *Le manuel Sphère : La Charte humanitaire et les standards minimums de l'intervention humanitaire*, 4e éd., Genève, Association Sphère, 2018.

⁶⁸ Cœur, *Donner la priorité aux activités de santé dans les crises humanitaires*, Rapport de fond, Plateforme des sciences sociales dans l'action humanitaire (SSHAP), 2014.

⁶⁹ Association Sphère, *Le manuel Sphère : La Charte humanitaire et les standards minimums de l'intervention humanitaire*, 4e éd., Genève, Association Sphère, 2018.

contexte politique afin de permettre aux acteurs de terrain de s'adapter à l'évolution d'une situation instable.⁷⁰

Enfin, l'énergie doit permettre la conservation et la préparation des denrées alimentaires indispensables aux équipes et aux bénéficiaires. En situation de crise, l'insécurité alimentaire accroît le risque de malnutrition et augmente la vulnérabilité face aux épidémies.⁷¹

Cette hiérarchisation n'est pas statique, elle doit être continuellement réévaluée en fonction de l'évolution du contexte, même si on observe tout de même que les besoins médicaux demeurent presque toujours prioritaires dans les premières phases d'intervention.

2.1.4.4. Centres de santé temporaires

Ces besoins médicaux nécessitent souvent la mise en place de structures provisoires capables d'assurer la prise en charge des populations affectées. Les centres de santé temporaires représentent une réponse essentielle dans les contextes où les infrastructures locales sont détruites, inaccessibles ou insuffisantes pour faire face à l'afflux massif de patients.

Ces services, indispensables à la survie des populations, génèrent toutefois un coût énergétique non négligeable. Le maintien d'un éclairage fiable, la conservation des vaccins et médicaments en chaîne du froid, ou encore l'alimentation des équipements de diagnostic et de traitement nécessitent une disponibilité continue en électricité.

Dans un contexte de stabilité, ces besoins représentent déjà une charge importante, mais lors de conflits armés ou de catastrophes majeures, ce coût énergétique devient critique. Les populations touchées voient leurs besoins s'accroître, mais les moyens de les satisfaire se réduisent. Ainsi, la pression sur les structures sanitaires et humanitaires s'intensifie, créant un cercle vicieux qui s'aggrave à mesure que la crise se prolonge.

Pour mesurer concrètement ce que représente le coût énergétique d'un centre de santé temporaire, il est nécessaire d'identifier précisément ses besoins quotidiens en électricité :

Un centre de santé de catégorie 1 ([figure 17](#)), correspondant à une petite structure de base, consomme entre 4,4 et 10,3 kWh par jour, essentiellement pour l'éclairage, la chaîne du froid et quelques appareils de diagnostic simples. En théorie, il pourrait répondre aux besoins de 1 à 60 personnes pour des interventions limitées.⁷²

⁷⁰ Association Sphère, *Le manuel Sphère : La Charte humanitaire et les standards minimums de l'intervention humanitaire*, 4e éd., Genève, Association Sphère, 2018.

⁷¹ Ibid.

⁷² U.S. Agency for International Development (USAID), *Powering Health: Electrification Options for Rural Health Centers*, Washington, D.C., Bureau for Economic Growth, Agriculture and Trade, Office of Infrastructure and Engineering, 2007.

		A	B	C = AxB	D	E = CxD	F = E/1000
Category I Health Clinic Power and Energy Consumption		Quantity	Power (Watts)	Total Watts	On-Time (watt hours/day)	Wattage (hours/ day)	kWh/day
Description of Devices	Vaccine Refrigerator/Freezer	1	60	60	6.0 - 12.0	360 - 720	0.36 - 0.72
	Small Refrigerator (non-medical use)	1	300	300	5.0	1,500	1.5
	Centrifuge	1	575	575	1.0 - 1.5	575 - 862.5	0.575 - 0.8625
	Hematology Mixer	1	28	28	1.0 - 1.5	28 - 42	0.028 - 0.042
	Microscope	1 - 2	15	15 - 30	3.0 - 4.0	45 - 120	0.045 - 0.12
	Lighting	2	10	20	2 - 10	40 - 200	0.040 - 0.2
	Incubator	1	400	400	2.0 - 12.0	800 - 4,800	0.8 - 4.8
	Water Bath	1	1,000	1,000	1.0 - 2.0	1,000 - 2,000	1 - 2
	Communication via VHF Radio	1					
	Stand-by		2	2	12.0	24	0.024
	Transmitting		30	30	1.0 - 2.0	30 - 60	0.030 - 0.060
	Total			2,430 - 2445		4,402 - 10,328.5	4.4 - 10.3

Figure 17 : Besoins énergétiques d'un centre de santé temporaire de catégorie 1.

Un centre de catégorie 2 (figure 18), voit ses besoins monter de 10,6 à 21,5 kWh par jour, en raison d'une variété et d'un usage plus large des équipements, pouvant satisfaire les besoins vitaux de 60 à 120 personnes.⁷³

		A	B	C = AxB	D	E = CxD	F = E/1000
Category II Health Clinic Power and Energy Consumption		Quantity	Power (Watts)	Total Watts	On-Time (watt hours/day)	Wattage (hours/ day)	kWh/day
Description of Devices	Vaccine Refrigerator/Freezer	2	60	120	6.0 - 12.0	720 - 1,440	0.72 - 1.44
	Small Refrigerator (non-medical use)	1	300	300	5.0	1,500	1.5
	Centrifuge	1	575	575	2.0	1,150	1.15
	Hematology Mixer	1	28	28	2.0	56	0.056
	Microscope	2	15	30	5.0	150	0.15
	Lighting	2 - 3	15	30 - 45	10.0	300 - 450	0.3 - 0.45
	Sterilizer Oven (Laboratory Autoclave)	1	1,564	1,564	1.0	1,564	1.564
	Incubator	2	400	800	2.0 - 12.0	1,600 - 9,600	1.6 - 9.6
	Water Bath	1	1,000	1,000	2.0	2,000	2.0
	Communication via VHF Radio	1					
	Stand-by		2	2	12.0	24	0.024
	Transmitting		30	30	2.0 - 3.0	60 - 90	0.060 - 0.09
	Desktop Computer	1 - 3					
	Power Save Mode		50	50 - 150	7.0	350 - 1,050	0.35 - 1.05
	In Use		150	150 - 450	5.0	750 - 2,250	0.750 - 2.25
	Printer	1	65	65	3.0	195	0.195
	Total			4,744 - 5,159		10,569 - 21,519	10.6 - 21.5

Figure 18 : Besoins énergétiques d'un centre de santé temporaire de catégorie 2.

Enfin, un centre de catégorie 3 (figure 19), souvent utilisé comme structure de référence régionale, peut atteindre 17,6 à 30,2 kWh par jour, avec des appareils lourds comme les radios portatives ou les automates de laboratoire.⁷⁴

⁷³ U.S. Agency for International Development (USAID), *Powering Health: Electrification Options for Rural Health Centers*, Washington, D.C., Bureau for Economic Growth, Agriculture and Trade, Office of Infrastructure and Engineering, 2007.

⁷⁴ Ibid.

		A	B	C = AxB	D	E = CxD	F = E/1000
Category III Health Clinic Power and Energy Consumption		Quantity	Power (Watts)	Total Watts	On-Time (watt hours/day)	Wattage (hours/ day)	kWh/day
Description of Devices	Vaccine Refrigerator/Freezer	3	60	180	6.0 - 12.0	1,080 - 2,160	1.08 - 2.16
	Small Refrigerator (non-medical use)	1	300	300	5.0	1,500	1.5
	Centrifuge	1	575	575	3.0	1,725	1.725
	Hematology Mixer	1	28	28	3.0	84	0.084
	Microscope	3	15	45	6.0	270	0.27
	Lighting	3 - 4	15	45 - 60	10.0	450 - 600	0.45 - 0.6
	Incubator	3	400	1,200	2.0 - 12.0	2,400 - 14,400	2.4 - 14.4
	Water Bath	1	1,000	1,000	2.0	2,000	2.0
	Communication via VHF Radio	1					
	Stand-by		2	2	12.0	24	0.024
	Transmitting		30	30	3.0 - 4.0	90 - 120	0.090 - 0.120
	Desktop Computer	3 - 6					
	Power Save Mode		50	150 - 300	7.0	1,050 - 2,100	1.05 - 2.1
	In Use		150	450 - 900	5.0	2,250 - 4,500	2.25 - 4.5
	Printer	1	65	65	4.0	260	0.26
	Portable X-Ray Machine	1	3,000	3,000	1.0	3,000	3.0
	Total			8,634 - 9,249		17,597 - 34,157	17.6 - 34.2

Figure 19 : Besoins énergétiques d'un centre de santé temporaire de catégorie 3.

2.1.4.5. Solutions actuelles

Au regard de tels besoins, certaines solutions solaires innovantes conçues pour les interventions d'urgence parviennent néanmoins à atteindre ce niveau de production. C'est notamment le cas d'un dispositif récemment testé par Médecins Sans Frontières (MSF) dans l'est du Tchad : un conteneur équipé de panneaux solaires extensibles (figure 20), pensé pour fournir l'énergie nécessaire aux activités médicales.⁷⁵



Figure 20 : Déploiement d'un conteneur solaire à Ourang, dans l'est du Tchad, pour soutenir les soins de santé destinés à 50 000 réfugiés soudanais.

Doté de panneaux solaires d'une superficie de 150 m², ce système peut produire jusqu'à 60 kWh, une capacité suffisante, en théorie, pour assurer le fonctionnement complet d'un centre de santé de catégorie 3.

⁷⁵ Médecins Sans Frontières Suisse, *Énergie solaire mobile : la solution réside-t-elle dans ce conteneur ?*, 15 février 2024, MSF Suisse, consulté le 8 mars 2025 sur : www.msf.ch/nos-actualites/articles/energie-solaire-mobile-solution-reside-t-elle-ce-conteneur.

Une série de modules de ce type est aujourd’hui utilisée dans diverses interventions humanitaires à travers le monde. Toutefois, ils présentent certaines limites qui réduisent leur pertinence dans les toutes premières phases d’une urgence. Leur transport reste contraignant, car leur poids et leur volume nécessitent des moyens logistiques lourds, peu compatibles avec un déploiement rapide.

À côté de ces solutions conteneurisées, on trouve également des projets d’abris temporaires intégrant des solutions énergétiques de base. Parmi eux, le projet *Better Shelter* (figure 21), développé par la Fondation IKEA en partenariat avec l’UNHCR, constitue une référence.



Figure 21 : Exemple d’abri temporaire *Better Shelter* développé par la Fondation IKEA et l’UNHCR.

Ce dispositif a été conçu comme une maison en kit destinée à loger et à donner un accès à l’énergie aux populations touchées. Comme l’explique le UNHCR, le *Better Shelter* a constitué « un réel progrès en matière d’aide au logement à visée humanitaire » et a permis « d’améliorer drastiquement les conditions de vie des populations victimes de diverses crises »⁷⁶, seulement leur production énergétique reste limitée à un usage domestique (figure 22b) et nécessite tout de même une certaine logistique (figure 22a).



Figure 22 : a) Vue extérieure

b) Vue intérieure

D’autres modules solaires portables bien plus légers sont également déployés dans les interventions d’urgence. On peut citer par exemple la *Solar Suitcase*, développée par l’ONG « We

⁷⁶ Haut-Commissariat des Nations unies pour les réfugiés (HCR), *La Fondation IKEA et le HCR élaborent ensemble une maison en kit*, communiqué de presse, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.unhcr.org/fr/actualites/communiques-de-presse/la-fondation-ikea-et-le-hcr-elaborent-ensemble-une-maison-en-kit.

Care Solar », une valise photovoltaïque robuste et simple à installer qui fournit un éclairage fiable ainsi que la possibilité d’alimenter de petits appareils médicaux. Elle est notamment utilisée dans les maternités d’urgence afin d’assurer des accouchements en conditions sûres, même en l’absence de réseau électrique.⁷⁷

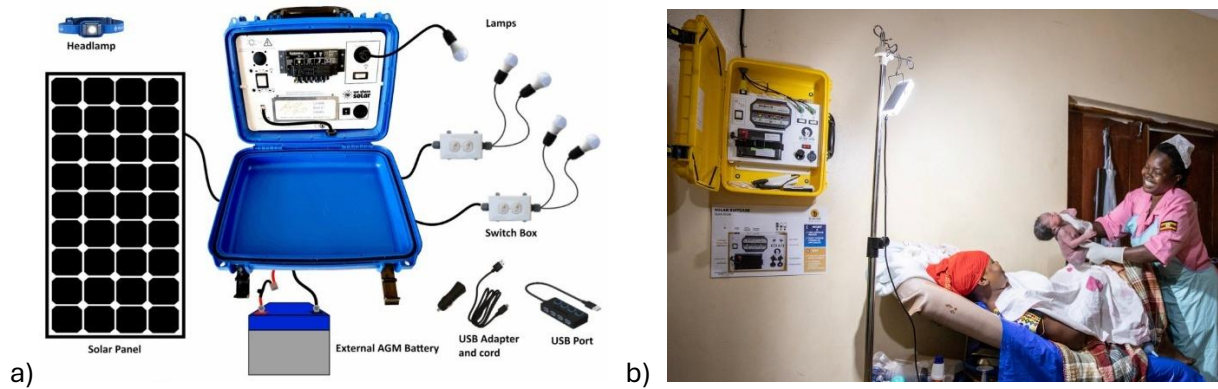


Figure 23 : Valise solaire Solar Suitcase de l'ONG We Care Solar a) schéma technique b) utilisation en maternité d'urgence.

Ces modules portables offrent une solution bien plus pertinente dans l’urgence immédiate, grâce à leur déploiement rapide et leur simplicité d’utilisation. Toutefois, leur capacité énergétique reste limitée, loin de pouvoir répondre aux besoins des centres de santé temporaires.

⁷⁷ We Share Solar, *Solar Suitcase Learning Kits*, We Share Solar (programme de We Care Solar), s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.wesharesolar.org/solar-suitcase/

2.2. Structures déployables

2.2.1. Définition

Le mot déployable signifie « qui peut être étendu ou mis en œuvre dans son intégralité ».⁷⁸ Formé du verbe « déployer », il trouve son origine dans l'ancien français « desploier », dérivé du latin « *displicare* », signifiant « étendre ». Sergio Pellegrino, professeur en génie aérospatial et civil au *California Institute of Technology (Caltech)* à Pasadena, reconnu internationalement depuis les années 1990 pour ses travaux sur le sujet, définit les structures déployables comme des structures convertibles dont la configuration change d'un état compact à un état étendu. La transformation du premier vers le second état est appelée déploiement et la transformation inverse est appelée rétraction.⁷⁹

2.2.2. Historique

Ces structures ont connu une évolution remarquable au cours du XXe siècle et continuent de susciter un intérêt croissant dans les domaines de l'architecture et de l'ingénierie. Leur capacité à passer d'un état compact à un état étendu grâce à des mécanismes de transformation intelligents permet une série d'usages exploitables dans de nombreux secteurs. Elles trouvent ainsi des applications variées, allant des stents médicaux⁸⁰, aux structures temporaires pour des événements, en passant par des installations spatiales ou encore des abris d'urgence. Leur intérêt repose essentiellement sur leur efficacité en matière de transport, de déploiement et de fonctionnalité, tout en préservant des caractéristiques structurelles solides une fois déployées.

C'est dans les années 1940 que les premiers concepts de structures capables de se déployer de manière efficace ont été attribués aux pionniers de l'architecture moderne, comme Buckminster Fuller, architecte, inventeur, designer et penseur américain, connu pour ses travaux sur les structures géodésiques.⁸¹

En 1960, leur développement a véritablement pris son essor, principalement en réponse aux besoins de l'industrie aérospatiale. Des projets développés par la Nasa tels que les *STEM* (*Storable tubular extendible member*), bandes métalliques enroulées reprenant une forme tubulaire solide faisant office de mât déployable⁸² (figure 24), ont permis de surmonter les contraintes liées au volume et au poids des charges utiles, facilitant le déploiement de structures

⁷⁸ La langue française, *Définition de « déployable »*, 12 octobre 2024, consulté le 10 mars 2025 sur : www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/deployable.

⁷⁹ PELLEGRINO, Sergio, *Deployable Structures*, CISM Courses and Lectures, n° 412, Vienne, Springer-Verlag, 2001.

⁸⁰ Petit composant médical inséré dans un canal du corps pour le garder ouvert, voir WANG, L., LEE, H. et LEE, J., « Self-deployable Origami Stent Grafts as a Biomedical Application of Ni-rich TiNi Shape Memory Alloy Foil », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 419, n° 1–2, 2006, p. 131-137.

⁸¹ HRUSKA, J., « How Buckminster Fuller Invented the Geodesic Dome », *Gizmodo*, 5 juillet 2022, consulté le 6 avril 2025 sur : www.gizmodo.com/how-buckminster-fuller-invented-the-geodesic-dome-1849658331.

⁸² BELVIN, W. K., et al., *Advanced Deployable Structural Systems for Small Satellites*, NASA/TP–2017–219631, dans *Best Practices for Risk Reduction for Space Systems*, Saragosse, Espagne, septembre 2016, p. 4.

plus grandes et plus complexes une fois en orbite. Les années 1960 ont alors jeté les bases des technologies modernes en termes de structures déployables, devenues indispensables dans la conception des satellites et des stations spatiales contemporains.

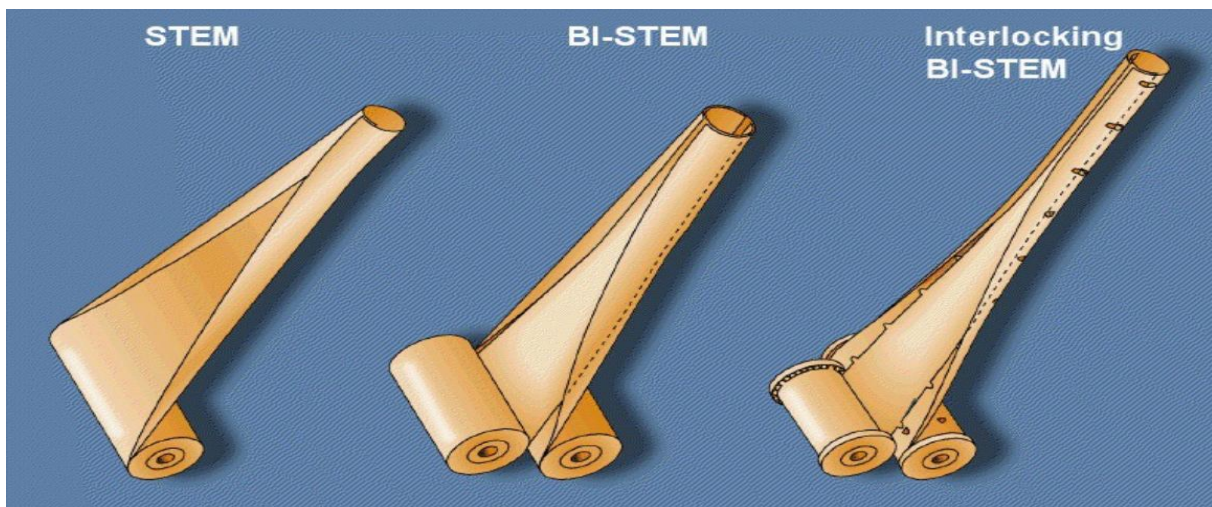


Figure 24 : Variations du concept de STEM

2.2.3. Classification

Dans les années 2000, les chercheurs ont commencé à formaliser des classifications permettant de mieux comprendre les différents types de structures déployables en fonction de leur comportement cinématique (types de mouvements impliqués) et de leur morphologie (forme générale et structure des éléments).

En 2001, Ariel Hanaor, professeur en ingénierie des structures au *Technion Institute of Technology* et membre du comité de rédaction de *l'International Journal of Space Structures*⁸³, a proposé en collaboration avec Robert Levy, professeur en ingénierie des structures ayant également exercé au *Technion* et ancien directeur du département de génie structural de *l'Université Ben-Gourion* du Néguev jusqu'en 2019⁸⁴, une répartition basée sur la distinction des structures rigides et déformables sur le plan cinématique (axe vertical [figure 25](#)) croisé à la distinction des structures treillis et continues sur le plan morphologique (axe horizontal [figure 25](#)). Cette classification permet une lecture transversale des structures déployables connues et de positionner chaque système dans un espace de référence clair.

Cette classification, va très largement influencer les nombreuses études qui suivront et se situe encore aujourd'hui comme étant la plus référencée du secteur malgré l'absence de certaines classes de structures, apparues plus tard avec l'évolution des technologies. Elle sera également une référence, dans le cadre de ce travail, afin d'identifier de manière claire les différents types de structures déployables qualifiées comme intéressantes dans la quête de solutions à la problématique posée.

⁸³ Sage Publications, « Editorial Board – International Journal of Space Structures », en ligne, consulté le 6 avril 2025 sur : <https://journals.sagepub.com/editorial-board/sps>.

⁸⁴ Sami Shamoon College of Engineering, « Prof. Robert Levy – Faculty Profile », en ligne, consulté le 6 avril 2025 sur : https://en.sce.ac.il/faculty/prof_robert_levy.

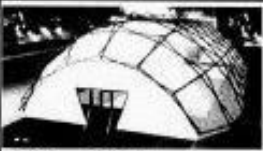
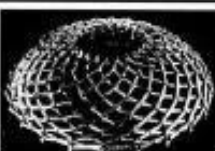
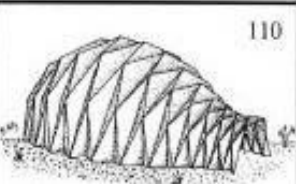
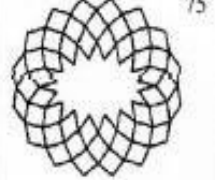
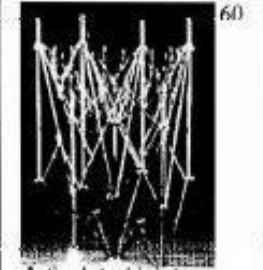
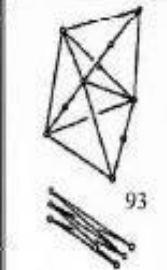
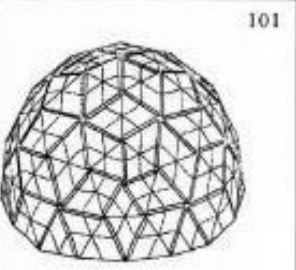
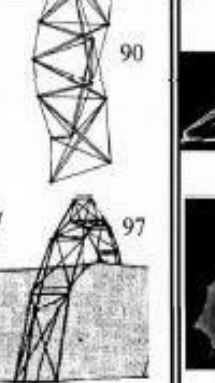
		Morphology			
Kinematics	Rigid links	Lattice			Continuous
		DLG	SLG	Spine	Plates
		Pantographic (scissors)			Folded Plates
		 Peripheral Scissors 19	 Angulated scissors (retractable roofs) 74	 Masts and arches 16	 Linear deployment 110
		 Radial scissors 22	 Others 75	 Radial deployment 98	 Radial deployment 5
		Bars			Curved surface
Kinematics	Deformable	 Articulated joints 60	 Ruled surface 83	 Reciprocal grids (Dismountable) 85	 Curved surface 101
		Strut-cable systems		Tensioned membrane	
		 Tensegrity 68	 Others 69	 Hybrid 120	 Pneumatic Low pressure
Kinematics	Deformable	 Ribbed 38	 High pressure 124		

Figure 25: Table de classification par Hanaor & Levy

La même année, d'autres chercheurs se sont emparés de la question pour affiner ou compléter le cadre existant. Les versions proposées par ces auteurs apportent une lecture qui leur est propre, souvent en fonction des contextes ou des domaines qui les intéressent.

Charalambos Gantes, doctorant au *MIT* en 1991 avec une thèse intitulée « *A design methodology for deployable structures* », aujourd'hui professeur à l'École de génie civil de l'Université technique nationale d'Athènes⁸⁵, propose une classification basée sur l'usage des structures. D'un côté, celles conçues pour la Terre et de l'autre, celles destinées aux missions spatiales. Il remarque toutefois que certaines structures, bien que classées dans des contextes différents, partagent des fonctionnements ou des formes très proches.

Sergio Pellegrino adopte, lui aussi en 2001, une approche un peu différente car il s'intéresse avant tout au type de mouvement et au mécanisme impliqué, peu importe l'usage. Il introduit ainsi dans sa classification des structures peu classifiées jusqu'ici, comme les mâts enroulables ou les systèmes bistables.

Quelques années plus tard, en 2004, Koray Korkmaz, doctorant à la faculté d'architecture de l'*Izmir Institute of Technology* où il est désormais professeur⁸⁶, propose une lecture inspirée de l'architecture cinétique (figure 26). Ce qui l'intéresse, c'est le rapport au temps. Il classe les structures selon leur changement de forme ou leur changement de position dans l'espace. Cela permet d'aborder la déployabilité de façon plus dynamique et sensible au contexte.⁸⁷

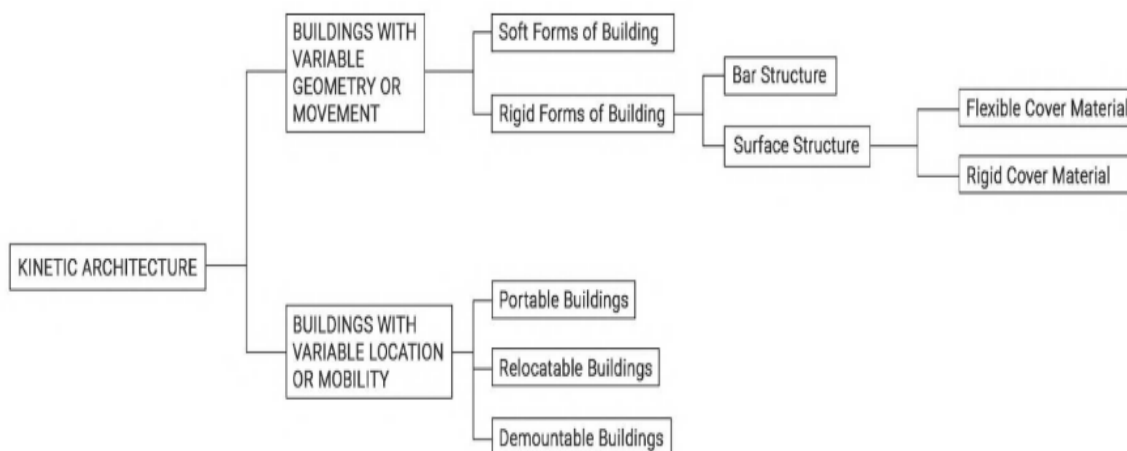


Figure 26 : Classification proposée par Koray Korkmaz

⁸⁵ GANTES, Charis, « Profil de chercheur », Laboratory of Metal Structures, NTUA, en ligne, consulté le 14 avril 2025 sur : <http://labmetalstructures.civil.ntua.gr/cms/en/people/faculty/28-gantes>.

⁸⁶ KORKMAZ, Koray, « Profil académique », İzmir Institute of Technology – Department of Architecture, consulté le 11 avril 2025 sur : <https://architecture.iyte.edu.tr/en/academics/>.

⁸⁷ FENCI, Giulia E., et CURRIE, Neil G., « Deployable structures classification: A review », *International Journal of Space Structures*, vol. 32, n° 2, 2017, p. 112-130.

A partir des années 2010, une nouvelle vague de recherches consacrées à l'analyse critique et à l'actualisation des classifications existantes a été menée notamment par l'apparition de matériaux intelligents et de technologies de déploiement plus complexes, qui échappaient aux cadres de classification précédents.

Parmi les auteurs majeurs de cette période figurent, en 2010, Michael-Marcus Vogt et Oliver Schaeffer, architectes à Munich et auteurs de « *MOVE : Architecture in Motion - Dynamic Components and Elements* », largement référencés pour leur proposition de classification. Ils apportent des nuances aux compositions rigides où ils identifient trois types de mouvement de base : la rotation, la translation et une combinaison des deux. Les modules déformables, quant à eux, présentent une plus grande variété de mouvements en vue des matériaux flexibles qui peuvent changer de forme de manière permanente sous l'effet d'une force externe, tandis que les matériaux élastiques retrouvent leur forme initiale après la déformation.⁸⁸

Peu de temps après Schaeffer et Vogt, Carolina M. Stevenson, architecte chercheuse spécialisée en architecture cinétique et ancienne enseignante à l'Université de Liverpool⁸⁹, a introduit en 2011 une classification (figure 27) complète et fonctionnelle des structures déployables qui se concentre sur la morphologie (forme + organisation spatiale) et la stratégie de transformation. Contrairement à d'autres approches plus techniques, sa méthode s'intéresse avant tout à la forme globale, aux motifs d'agencement des éléments et à l'effet produit par l'ensemble plutôt qu'au fonctionnement individuel des composants.⁹⁰

En 2013, Andrea Enrico Del Grosso, professeure à l'Université de Gênes en Italie, reconnue pour ses travaux sur l'ingénierie des structures adaptatives⁹¹, propose en collaboration avec Paolo Basso⁹², ingénieur civil italien spécialisé dans les structures déployables et les formes architecturales non conventionnelles, une classification fondée sur les propriétés cinématiques des structures.

Esther Rivas Adrover⁹³, doctorante à l'Université de Cambridge, architecte, chercheuse et enseignante à l'Oxford Brookes University, a élaboré en 2015, une classification des structures déployables en tenant compte des matériaux et des propriétés géométriques, contribuant à une meilleure compréhension des typologies déployables.

⁸⁸ FENCI, Giulia E., et CURRIE, Neil G., « Deployable structures classification: A review », *International Journal of Space Structures*, vol. 32, n° 2, 2017, p.122

⁸⁹ STEVENSON, Caroline M., « Curriculum Vitae – Caroline M. Stevenson », SlideShare, en ligne, consulté le 6 avril 2025 sur : <https://fr.slideshare.net/slideshow/pdf-cv-66688676/66688676>.

⁹⁰ FENCI, Giulia E., et CURRIE, Neil G., « Deployable structures classification: A review », *International Journal of Space Structures*, vol. 32, n° 2, 2017, p. 124

⁹¹ DEL GROSSO, Andrea E., « Profil de chercheur », ResearchGate, en ligne, consulté le 6 avril 2025 sur : <https://www.researchgate.net/profile/Andrea-Del-Grosso>.

⁹² BASSO, Paolo, « Profil de chercheur », ResearchGate, en ligne, consulté le 6 avril 2025 sur : <https://www.researchgate.net/profile/Paolo-Basso>.

⁹³ ADROVER, Esther Rivas, « Biography », Esther Rivas Adrover, en ligne, consulté le 6 avril 2025 sur : <https://www.estherrivasadrover.com/biography>.

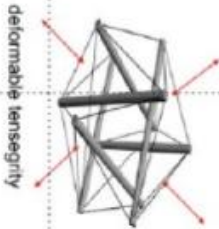
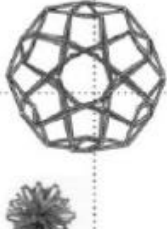
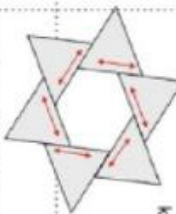
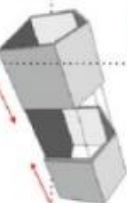
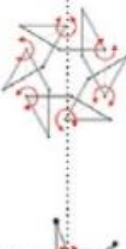
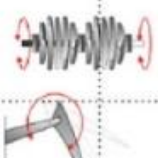
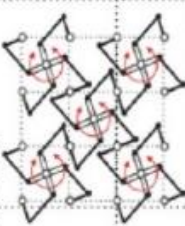
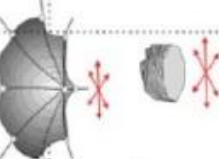
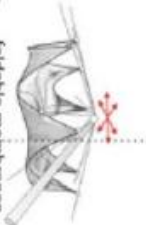
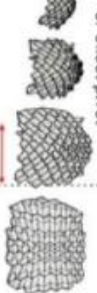
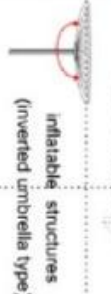
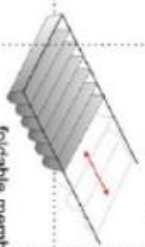
PHYSICAL TRANSFORMATION						POSITION IN SPACE AND DIRECTION OF TRANSFORMATION									
change in shape ← change in size → change in position						3D ← → 2D ← → 3D									
Deform	Fold	Deploy	Retract	Slide	Revolve	Patterns with Centric Configuration					Patterns with Linear Configuration				
						Spherical movement	Circular tangential movement	Radial movement	Pivoting movement	Monocoaxial movement	Biaxial movement	Multi-axial movement			
 deformable tensegrity	 angulated scissor structures (Hoberman sphere)	            	 retractable reciprocal plates	 angulated and multi-angulated scissor structures (iris dome)	 retractable plates	 sliding frames	 spatial grids with swivel diaphragm	 peripheral and central swivel diaphragm	 pivoting devices	 planar grids with swivel diaphragm					
 deformable net structures	 foldable membranes	 curved scissor structures	 cable-scissor structures	 straight scissors with central or offset pivot	 origami inspired structures										
 rolled membranes	 inflatable structures (inverted umbrella type)	 foldable membranes													

Figure 27 : Table de classification par Carolina M. Stevenson

Une série d'autres auteurs, repris en [figure 28](#), ont également proposé des modèles se rapprochant de ceux que nous venons de parcourir. Ces propositions riment souvent avec une nouvelle façon de trier les structures sur les axes principaux cinématique et morphologique, se différenciant en général par la tendance à apporter une vision nuancée dirigée par les intérêts qui sont propres à chacun (architecture cinétique, matériaux intelligents, secteur spatial, etc.).

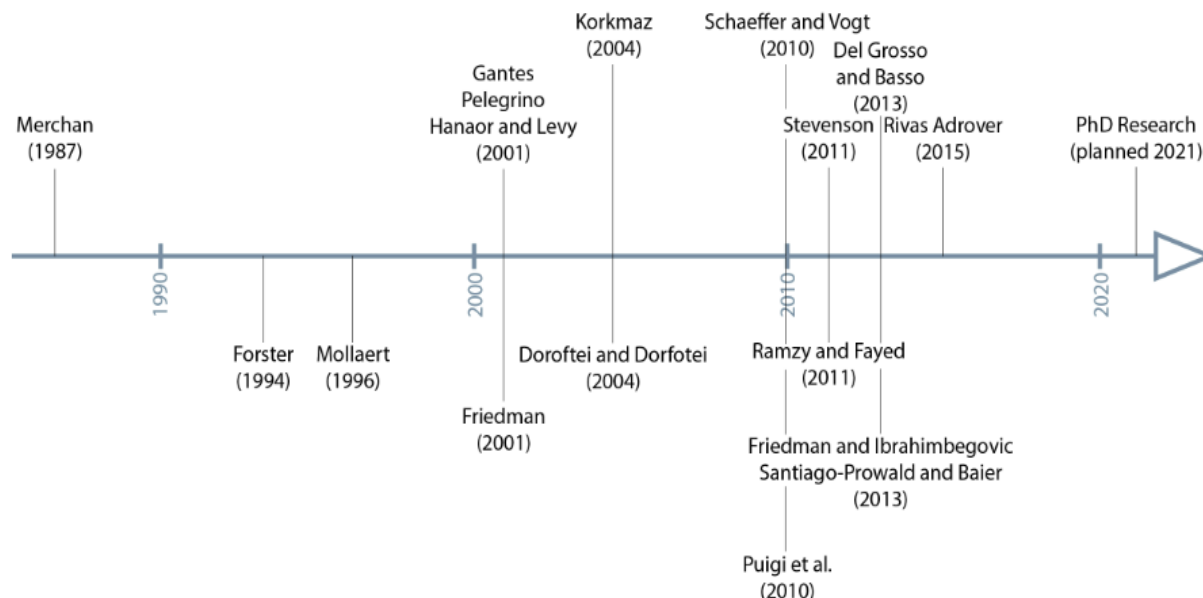


Figure 28 : Ligne situant les classifications des différents auteurs dans le temps

Les classifications constituent un domaine complexe et dynamique en constante évolution. Si les premières classifications ont permis de poser les bases d'une compréhension des mécanismes de déploiement, les recherches récentes ont élargi et affiné ces modèles en introduisant de nouvelles catégories qui elles aussi seront probablement revues dans les années qui viennent.

2.2.4. Sélection du corpus

Bien que ce chapitre n'ait pas pour but d'approfondir tout le cadre théorique des structures déployables, il est important de comprendre l'importance des classifications, que nous venons d'aborder de manière exhaustive, car elles restent une problématique centrale dans le secteur. Certaines d'entre elles sont obsolètes, mal catégorisées, ou se contentent de lister des exemples utiles à une sphère d'application précise, ce qui limite la construction d'un vocabulaire commun.

L'objectif est d'identifier une base saine dans l'énonciation des différents types de systèmes existant. Malgré les différentes propositions d'évolution, la classification qualifiée comme étant la plus complète reste à ce jour celle établie en 2001 par Hanaor et Levy. Ceci témoigne de la solidité des bases établies dans le domaine, mais souligne la nécessité d'une approche évolutive. L'innovation constante des matériaux, des techniques de fabrication et des applications architecturales, impose une vigilance continue afin d'explorer pleinement le potentiel des structures déployables dans le cadre d'enjeux contemporains et d'orienter leur développement vers des objectifs précis et pertinents. Les principes structuraux étudiés dans l'exploration de la problématique énergétique en contexte d'urgence, feront donc référence au tableau de classification établi par Hanaor et Levy, synthétisé en [figure 29](#). Certaines nuances d'auteurs plus

récents que nous avons pu citer, resteront intéressantes à développer dans l'exploration de certaines typologies structurelles.

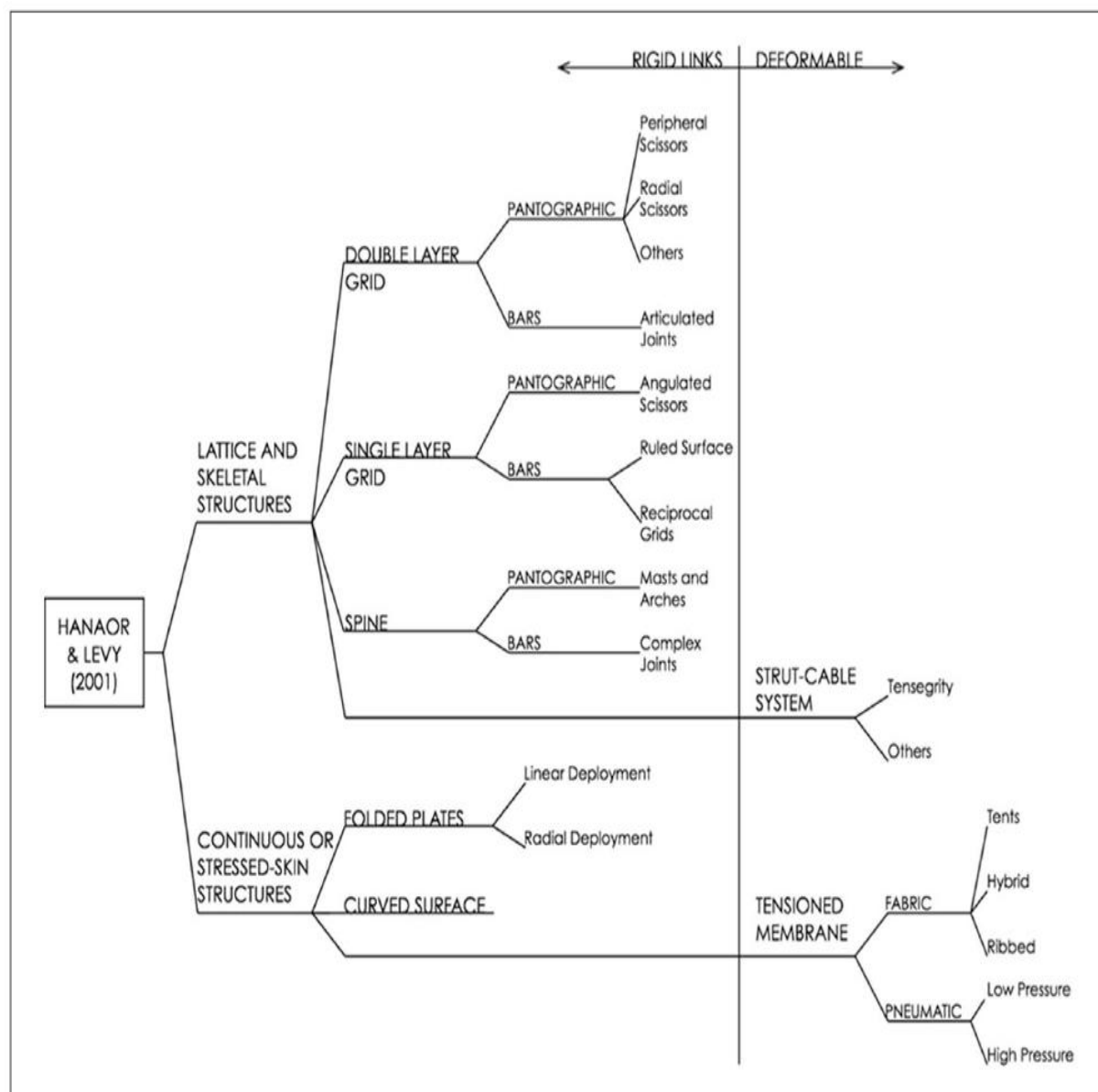


Figure 29 : Synthèse de la classification d'Hanaor & Levy

Au vu de la diversité des systèmes présentés par Hanaor et Levy, il est essentiel de sélectionner les options à traiter selon les contraintes posées. Le chapitre « Architecture humanitaire » a introduit une série de modules utilisés dans le déploiement de structures d'urgence. Maintenant que nous avons fixé un vocabulaire commun (figure 29), nous pouvons associer les solutions contemporaines aux typologies correspondantes.

Il est évident que certains modèles soient plus appropriés que d'autres aux contraintes posées par le contexte. Cette démarche vise donc à établir une présélection des typologies structurelles pertinentes à développer dans cette partie préliminaire.

3. ANALYSE SYSTEMIQUE

3.1. Méthode de sélection multicritère

La méthodologie multicritère d'aide à la décision (MMCAD), telle que définie par son fondateur Bernard Roy, mathématicien et chercheur français ayant posé les fondements de cette approche en 1960, est « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision »⁹⁴. Cette démarche vise à éclairer les choix sans prétendre à une solution unique optimale, mais en apportant un raisonnement structuré à travers un ensemble de critères pertinents.

La MMCAD permet de prendre en compte plusieurs dimensions parfois conflictuelles d'un problème, en les traduisant en critères d'évaluation explicites, pouvant ensuite être pondérés ou comparés entre eux. Elle s'adresse à des situations où l'intuition et le bon sens ne suffisent plus à fonder une décision robuste. Cette méthode ne cherche pas à « dire ce qu'il faut faire », mais à structurer la réflexion, en mettant en évidence les compromis possibles, les priorités contextuelles et les conséquences de chaque option.

3.1.1. Contextualisation

Au vu de la diversité des systèmes présentés précédemment, il est essentiel de trier, de comparer et de hiérarchiser les options en fonction des objectifs posés par les enjeux contextuels.

Comme nous avons pu le voir au chapitre dédié à l'architecture humanitaire, les critères relayés par les acteurs de terrain concernant le déploiement de structures sur site sont ;

- La rapidité de déploiement
- La compacité
- Le poids
- La robustesse aux aléas relatifs aux contextes de crise

Par ailleurs, il est évident que d'autres critères soient à prendre en compte dans le cadre de la problématique traitée, tels que ;

- La modularité
- Le coût
- La surface photovoltaïque
- La flexibilité d'usage
- La durabilité

⁹⁴ ROY, Bernard, *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*, Paris, Economica, 1993.

Dès lors, la suite des recherches s'appuiera sur cette démarche d'évaluation multicritère ayant pour but de mieux cibler les structures exploitables dans la problématique d'urgence énergétique.

3.1.2. Pondération des critères

Chaque critère a un impact sur l'évaluation des différentes typologies. Cependant, il est important de reconnaître que tous les paramètres d'évaluation ne se valent pas. Leur poids varie en fonction du contexte, des besoins immédiats sur le terrain, des contraintes logistiques ou encore des objectifs visés par l'intervention. C'est pourquoi il est nécessaire de hiérarchiser ces critères pour guider les résultats vers des solutions cohérentes.

Il sera donc associé à chaque critère un niveau de pertinence, défini sur l'étude des retours d'acteurs de terrain et des objectifs du projet, afin que le résultat se rapproche le plus possible des attentes identifiées.

De manière générale, les critères les plus déterminants sont la compacité, le poids et la résistance aux conditions climatiques. Une structure trop lourde ou trop volumineuse est difficile, voire impossible à acheminer dans certaines zones. De la même manière, si elle ne résiste pas aux vents ou aux intempéries, sa mise en place aura peu d'intérêt, voire représentera un danger.

D'autres critères, comme la rapidité de déploiement, la modularité ou la surface disponible pour l'installation de panneaux photovoltaïques, prennent également leur importance, notamment dans une perspective d'autonomie rapide des acteurs sur place.

Le coût, la durabilité et la flexibilité d'usage restent également des paramètres importants, mais ils peuvent être relativisés dans les impératifs liés aux états d'urgence. La priorité va généralement à ce qui fonctionne, est fiable et rapide à mettre en œuvre. En revanche, dès que l'on entre dans des phases de consolidation ou de réplique à plus grande échelle, ils sont susceptibles de retrouver une place centrale dans le poids des décisions.

Il faut donc voir ces critères comme des éléments dynamiques, dont l'importance peut évoluer selon la temporalité de l'intervention⁹⁵ : en situation d'urgence immédiate, la vitesse, la légèreté et le poids sont par exemple mis en avant, alors que dans un second temps⁹⁶ on pourra accorder davantage d'attention à l'efficacité énergétique, la flexibilité d'usage, la durabilité ou encore à la viabilité économique.

⁹⁵ Voir ; 2.1.4.1. Temporalité des interventions

⁹⁶ Phase de consolidation à plus long terme

3.1.3. Détermination des paramètres

Les objectifs actuels visent à répondre à la problématique du manque d'énergie renouvelable en contexte d'urgence immédiate. Les enjeux soulevés par les acteurs humanitaires sont clairs : pouvoir accéder à une source d'énergie en tout lieu, dans des délais très courts, afin de répondre aux besoins vitaux dans des contextes instables, difficiles d'accès, aux ressources limitées, à la logistique contraignante, et à la durée d'occupation incertaine.

Dans ce contexte, la hiérarchie des différents critères est fixée par ordre de pertinence opérationnelle, allant des essentiels aux complémentaires, en passant par ceux qualifiés comme importants. Cette pondération permettra plus tard d'évaluer les différentes typologies structurelles en fonction des différents critères et de leur pertinence, 3 étant le degré d'importance le plus élevé ;

- Essentiel (pondération 3) : Critère déterminant pour que la solution soit exploitable.
- Important (pondération 2) : Critère fortement souhaitable, mais qui peut être compromis.
- Complémentaire (pondération 1) : Critère intéressant à considérer, mais optionnel.

Ainsi, chaque critère a été analysé de la manière suivante ;

Degré de pertinence	Pondération	Critère	Justification
Essentiel	3	Rapidité de déploiement	Décisif dans l'accès rapide à l'énergie pour assurer les besoins vitaux sur site.
		Poids	Indispensable pour permettre l'acheminement par des moyens limités.
		Compacité	Condition clé pour optimiser la logistique de transport et de stockage.
		Robustesse	Garanti la sécurité et la continuité de service dans des conditions difficiles.
Important	2	Modularité	Utile dans la recherche de forme visant à optimiser l'exposition. Elle impacte directement la production énergétique.
		Surface PV	Elle impacte la production énergétique, même si des alternatives plus flexibles (membranes PV) sont envisageables.
		Durabilité	Favorise la réutilisation des structures pour des déploiements multiples ou prolongés.
		Coût	Le coût est secondaire à court terme, mais il reste un facteur à maîtriser pour des déploiements multiples.
Complémentaire	1	Flexibilité d'usage	Utile pour adapter les structures à des usages variés, mais non essentiel dans une réponse immédiate.

Figure 30 : Tableau de hiérarchisation des critères de pertinence

Chaque typologie, citée par Hanaor et Levy, sera évaluée sur base de ces critères, en tenant compte de leur pondération respective menant vers un résultat de performance en lien avec le contexte posé par cette étude.

Leur évaluation reposera sur une notation ordinale, consistant à positionner les solutions les unes par rapport aux autres sur 3 niveaux d'appréciation ;

- | : réponse limitée
- || : réponse acceptable
- ||| : réponse optimale

Chaque modèle structurel sera ainsi comparé de manière qualitative sur chaque critère en fonction de son niveau d'adéquation. L'ensemble des résultats pondérés permettra ensuite de dégager les typologies les plus pertinentes à développer.

3.1.4. Evaluation des différentes typologies

Afin de comprendre les notes attribuées à chaque typologie, cette partie propose de développer un regard critique sur les structures déployables classées par Hanaor et Levy. Chaque modèle est analysé de manière qualitative, selon les critères définis précédemment. Cette analyse comparative repose donc sur la méthode de notation à 3 niveaux d'appréciation (|||, ||, |) et se conclura par un tableau synthétique regroupant l'ensemble des notes attribuées, qui seront ensuite pondérées pour faire émerger les solutions les plus cohérentes dans la problématique posée.

3.1.4.1. Grille à simple nappe – Ciseaux (SLG – scissors)

La typologie de ciseaux à simple nappe est classée dans les morphologies treillis à liens rigides, plus largement associé au principe de pantographe (figure 31a). Le fonctionnement des structures à ciseaux repose sur un système d'éléments rigides croisés et articulés, formant des modules capables de s'ouvrir et se refermer simultanément lorsqu'on exerce une traction ou une poussée à leurs extrémités (figure 31b). Cette typologie précise s'organise sur un seul plan, ce qui simplifie grandement le déploiement de l'ensemble du système.

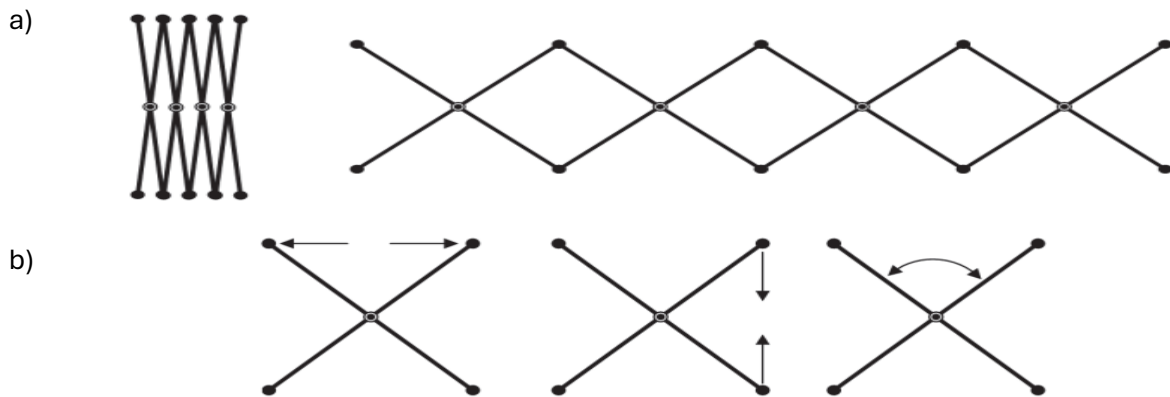


Figure 31: a) principe du pantographe b) activation du mécanisme de ciseau

Ce principe est un avantage considérable pour la rapidité de déploiement (|||) car le mécanisme permet un déploiement quasi instantané, surpassant d'autres structures favorables à ce critère que nous aborderons plus tard.

Cette facilité de déploiement aura cependant un impact sur la modularité (I) de la typologie car même si elle peut être étendue en connectant latéralement (figure 32), ses limites de forme sont un réel frein dans la recherche d'optimisation de la forme visant à maximiser l'exposition solaire.

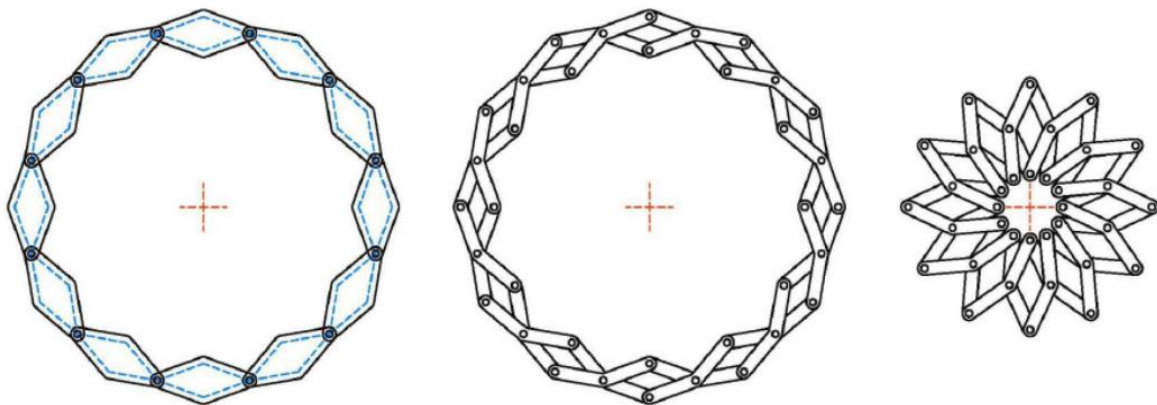


Figure 32 : Séquence de déploiement radial illustrant les limites morphologiques en plan de ce type de système.

La robustesse (II) est correcte. Bien que la grille puisse supporter des charges modérées, elle reste tout de même plus fragile sur le long terme que certaines typologies plus stables comme les doubles nappes ou les typologies à barres ne nécessitant pas de liens articulés dynamiques parfois source de problème.

En ce qui concerne la durabilité (II), cette typologie présente donc une tenue modérée dans le temps. Les articulations mécaniques, bien que facilitant le déploiement, sont sujettes à l'usure,

notamment dans des environnements exposés à des conditions climatiques variables. Une maintenance régulière est nécessaire pour assurer la longévité de la structure.

En termes de poids (II), l'organisation limitée sur un seul plan réduit considérablement la masse totale. La structure est plus légère que les doubles nappes composées de barres ou de ciseaux, et se rapproche du poids des structures à câbles tendus, selon les matériaux utilisés. Cet avantage se fait au détriment de la modularité du système et de la surface destinée à l'installation de panneaux photovoltaïques par rapport à d'autres typologies plus complexes.

Bien que cette surface dédiée aux panneaux photovoltaïques (II) soit limitée par rapport à d'autres modèles, la nappe simple offre tout de même des appuis exploitables à des systèmes souples (figure 33), mais évidemment moins stables que ceux proposés par les modèles à surfaces planes où les panneaux peuvent être installés de manière optimale.

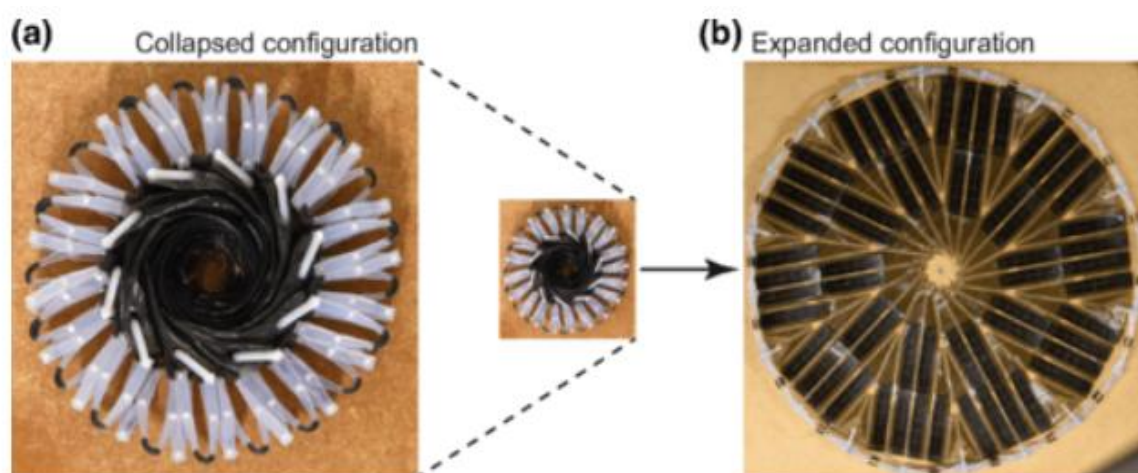


Figure 33 : Dispositif déployable à base de ciseaux intégrant des panneaux photovoltaïques. (a) Configuration repliée compacte. (b) Configuration déployée destinée à l'exposition solaire.

En ce qui concerne la compacité (II), bien qu'étant moins compacte que les membranes textiles, la structure se replie en un volume assez réduit en comparaison à d'autres typologies treillis, permettant un transport et un stockage efficace.

Sur le plan du coût (II), le pantographe est relativement abordable. Comme toutes les typologies que nous allons aborder, le type de matériau utilisé aura un impact sur ce facteur. Celle-ci en nécessite moins que les surfaces pliées par exemple mais reste moins économique que d'autres modèles par la nécessité de lien articulés dynamiques.

Enfin, sur le critère de flexibilité d'usage (I), la grille reste contrainte par son organisation en plan simple, ce qui limite ses possibilités d'adaptation et la cantonne, par exemple, à un usage éventuel en de toiture légère ou en ombrière.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

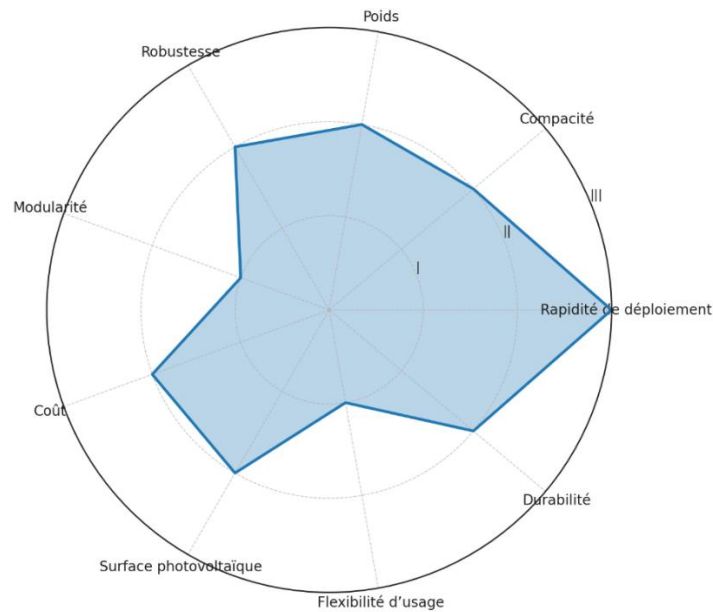


Figure 34 : Graphique radar ; Grille à simple nappe – Ciseaux

3.1.4.2. Grilles à double nappe – Ciseaux (DLG – scissors)

La typologie de ciseaux à double nappe constitue une évolution plus modulable de sa version organisée sur un seul plan que l'on vient d'aborder. Elle appartient également aux morphologies en treillis à liens rigides mais s'organise cette fois-ci sur plusieurs plans, formant un mécanisme de ciseaux en trois dimensions (figure 35).

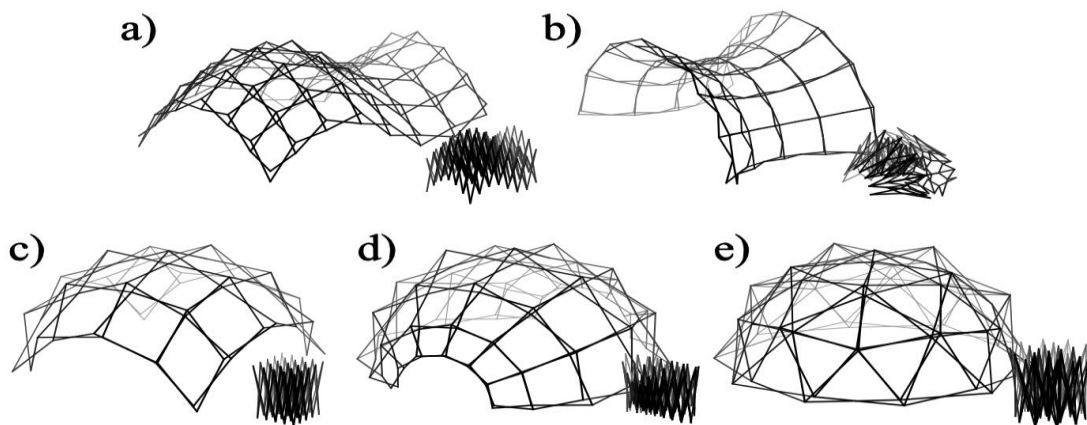


Figure 35 : Exemples de structures à ciseaux à double nappe selon différentes configurations spatiales.

La modularité du système (III) permet une plus large variation de la forme, un élément clé dans la conception cherchant à optimiser l'exposition au soleil. Contrairement à son modèle à simple couche, les doubles nappes permettent de développer des volumes plus complexes par cette interaction de plans multiples articulés.

La robustesse (III) apparaît également comme un atout. La typologie assure une excellente résistance mécanique, surpassant les simples nappes ou les structures treillis câblées sujettes au relâchement par exemple.

Concernant la rapidité de déploiement (II), bien que le mécanisme de ciseaux permette un montage nettement plus rapide que les structures rigides classiques, la présence d'une double nappe alourdit et complexifie légèrement le processus par rapport aux structures plus simples comme les structures axiales, ou plus légères comme les membranes tendues. Contrairement aux grilles à nappe simple, elle ne garantit pas toujours un déploiement sans contraintes. Bien que la structure soit conçue pour être compatible dans sa position déployée et sa position repliée, des défauts d'alignement géométrique peuvent apparaître entre les deux états selon la forme adoptée. Il est possible d'atténuer cet effet en ajoutant des éléments flexibles, en supprimant certaines unités, ou en ajoutant des degrés de liberté cinématique aux unités, comme démontré en [figure 36](#).⁹⁷

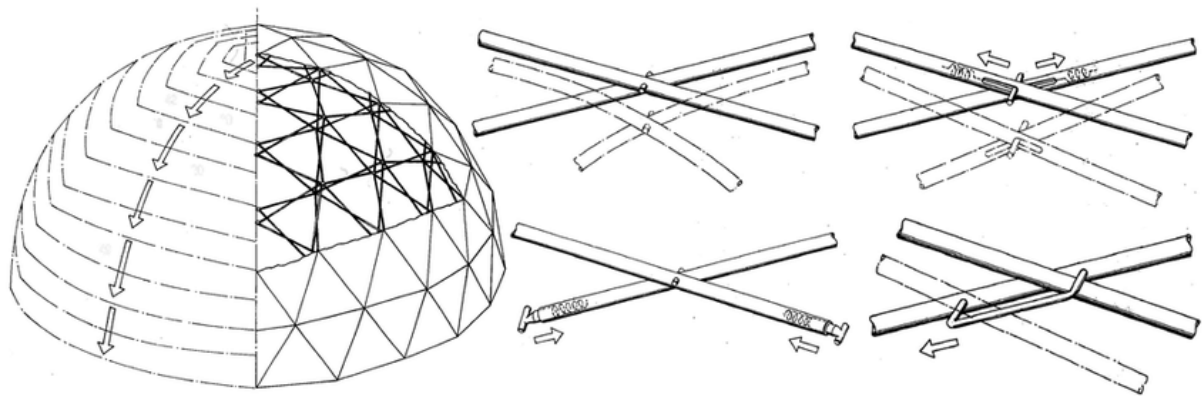


Figure 36 : Principes de résolution des conflits géométriques par ajout de degrés de liberté cinématiques.

Sur le plan de la durabilité (II), la complexité de la structure peut entraîner une usure plus rapide des composants mobiles. Bien que la robustesse générale soit supérieure à celle des simples nappes, une attention particulière doit être portée à l'entretien des articulations pour maintenir la performance structurelle sur le long terme.

En ce qui concerne la compacité (III), ces grilles constituent un niveau intermédiaire. Selon la morphologie adoptée, la structure reste encombrante par rapport à des typologies plus souples mais, comme illustré sur la [figure 37a](#), le système peut être compacté dans un volume très réduit.

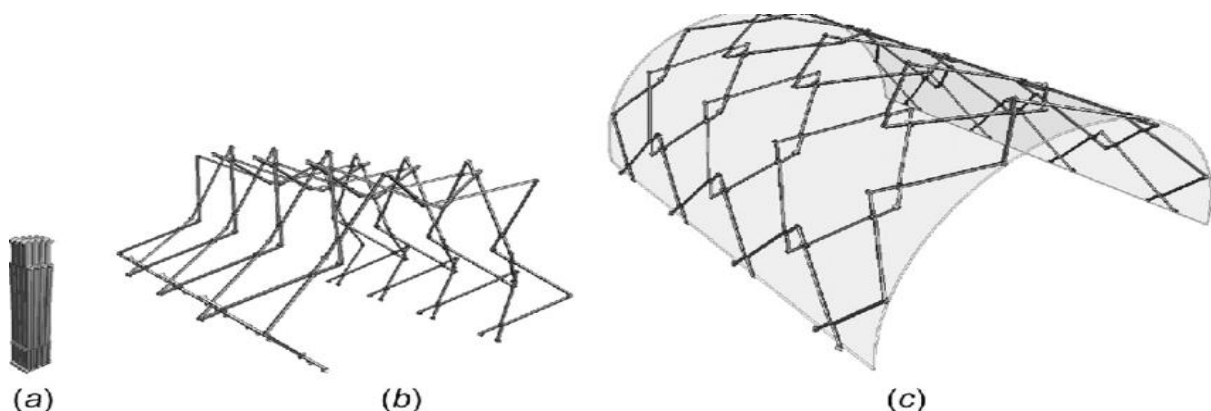


Figure 37 : (a) Configuration repliée. (b) Déploiement intermédiaire. (c) Configuration entièrement déployée avec couverture d'un matériau souple.

⁹⁷ ROOVERS, Kelvin et DE TEMMERMAN, Niels, « Digital Design of Deployable Scissor Grids Based on Circle Packing », dans *Proceedings of the IASS 2015 Symposium "Future Visions"*, Amsterdam, 17-20 août 2015, Vrije Universiteit Brussel, 2015.

Quant à la surface disponible pour l'installation photovoltaïque (|), la grille offre également un potentiel intéressant illustré en [figure 37c](#). Bien qu'elle ne soit pas aussi optimale que des surfaces lisses continues comme les surfaces pliées qui favorisent une installation directe et homogène, les ciseaux en double nappe permettent tout de même l'installation de modules photovoltaïques orientés sur des appuis rigides.

Cependant, en matière de poids (|), la superposition des nappes et des éléments d'articulations induit une surcharge ce qui pénalise la typologie par rapport à d'autres modèles.

D'autre part, le coût (|) est un point faible, la complexité de fabrication des articulations et de la géométrie spécifique rend cette solution encore plus coûteuse que sa variante en plan.

Enfin, en termes de flexibilité d'usage (|), la grille présente une certaine capacité d'adaptation à divers scénarios d'installation (abris, toitures, etc.), mais reste limitée dans sa reconfiguration une fois montée.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

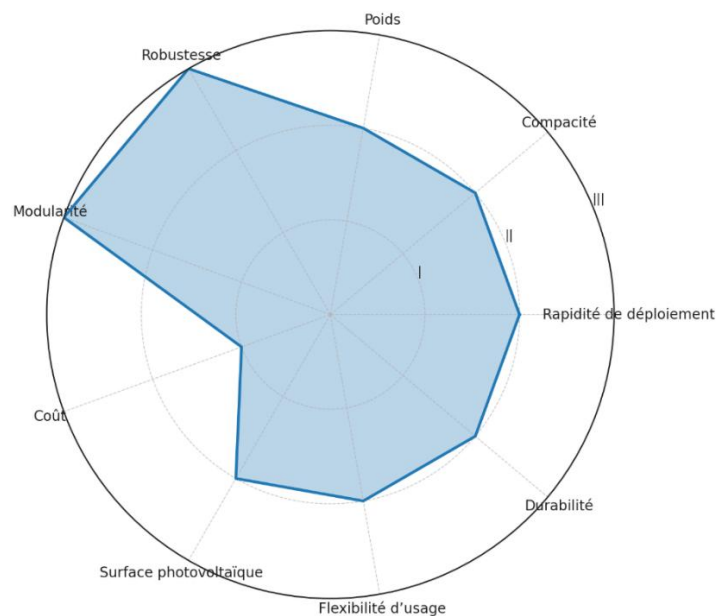


Figure 38 : Graphique radar ; Grille à double nappe – Ciseaux

3.1.4.3. Structures axiales – Ciseaux (spine – scissors)

La typologie des structures à ciseaux de type "spine" s'inscrit elle aussi dans la famille des ciseaux de morphologie en treillis à liens rigides, mais se distingue par une organisation linéaire de ses éléments (figure 39). Contrairement aux configurations de nappe plane ou multiple, le système repose ici sur une succession d'unités alignées selon un axe unique, formant une structure axiale extensible.

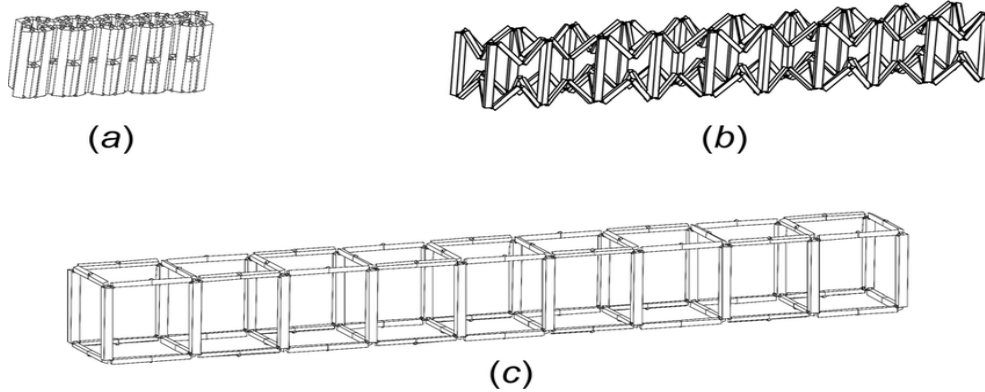


Figure 39 : (a) Module axial en configuration repliée. (b) Déploiement intermédiaire. (c) Déploiement complet.

Pour la compacité (I), elles se replient efficacement sur elles-mêmes grâce au mécanisme articulé illustré en figure 40b. Toutefois, le fait qu'elles s'organisent selon une séquence linéaire de modules juxtaposés limite l'optimisation du repli des modules plus étendus. En comparaison avec les grilles sur un ou plusieurs axes, ce repli unidirectionnel génère un volume final plus allongé (figure 40a) pouvant représenter un handicap pour le transport et le stockage.

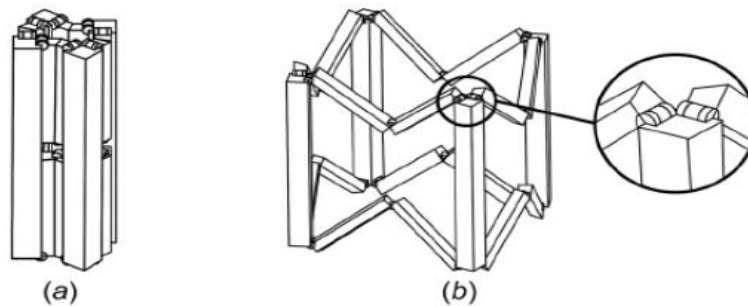


Figure 40 : (a) Vue compacte d'un seul module de la structure. (b) Détail du mécanisme de déploiement articulé.

Cependant, la configuration linéaire est un réel avantage dans la rapidité de déploiement (III). La morphologie du système permet un déploiement plus simple que sa variante à double nappe, comparable, voire parfois supérieur, aux grilles sur un plan ou encore aux membranes tendues.

Bien que relativement résistantes, le critère de robustesse (II) reste modéré. Ces structures sont plus vulnérables à la flexion ou aux forces latérales. Elles doivent être ancrées ou contreventées pour garantir une certaine stabilité.

La durabilité (II) de cette typologie est également acceptable. La simplicité morphologique de la structure réduit les points de défaillance potentiels, mais les articulations restent des éléments sensibles à l'usure. Un entretien est encore une fois recommandé pour préserver la fonctionnalité et la stabilité de la structure au fil du temps.

En matière de modularité (I), bien que les structures axiales présentent des possibilités d'extension intéressantes dans la conception de mâts ou d'arches déployables, leur organisation strictement linéaire limite fortement les possibilités de variation formelle. Contrairement aux grilles à double nappe, qui permettent une exploration plus riche en termes de géométries spatiales, elles ne permettent pas une exploration de configurations destinées à optimiser l'exposition solaire.

Concernant la surface disponible au photovoltaïque (III), la section linéaire offre une base solide et continue due au motif répétitif qui caractérise cette typologie, ce qui la place parmi les meilleures sur ce plan.

En termes de poids (II), elles sont comparables à leur homologue à double nappe. Elles sont légères par l'économie de matières en comparaison aux systèmes à surfaces pliables mais restent pénalisées par le poids des articulations et la superposition des modules.

Sur le plan du coût (II), la structure est relativement abordable. L'assemblage de ciseaux linéaires est plus simple et économique que la fabrication de grilles complexes, bien que légèrement plus coûteux que les systèmes à membrane tendue par exemple.

Pour clôturer l'évaluation des typologies à ciseaux, la flexibilité d'usage (II) de modèles axiaux offrent une certaine adaptabilité (poteaux, supports pour bâches, arches, etc.) mais restent très limitées par la forme linéaire qui leur est associée.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

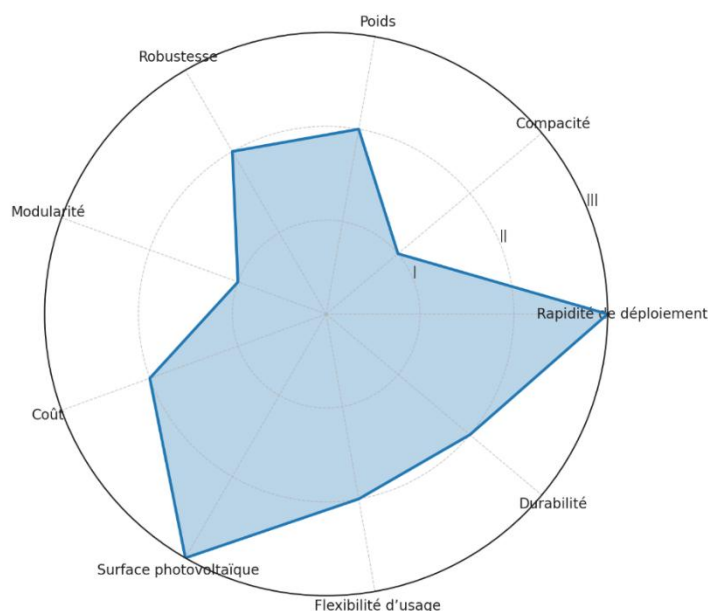


Figure 41 : Graphique radar ; Structures axiales – Ciseaux

3.1.4.4. Grille à simple nappe – Barres (SLG – bars)

Les typologies reposant sur un ensemble de barres fixes s'inscrivent également dans la catégorie des structures à treillis à liens rigides. Cette fois, les grilles à simple nappe sont constituées d'éléments linéaires interconnectés sur un même plan, à l'image des structures en ciseaux, mais sans mécanisme d'articulation dynamique. Ces grilles s'appuient sur l'assemblage de barres rigides croisées selon un modèle de réciprocité, un système autoportant où les composants sont disposés de manière à se soutenir mutuellement. Chaque élément repose partiellement sur l'élément suivant, formant une boucle fermée, où la stabilité de l'ensemble dépend de l'interdépendance des pièces (figure 42). Elle permet ainsi de verrouiller la géométrie du système et de conférer à l'ensemble un équilibre suffisant pour résister aux sollicitations qui lui sont imposées.

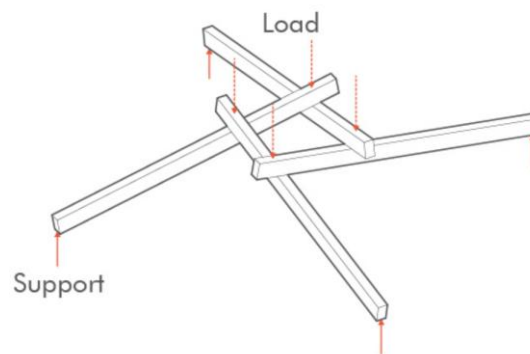


Figure 42 : Schéma de principe d'un système réciproque autoportant de base, où chaque barre repose partiellement sur une autre, assurant une stabilité mutuelle sans articulation mécanique grâce à l'interdépendance des appuis.

Il convient de souligner que cette stabilité engage une certaine robustesse (||). Selon le modèle adopté, la structure montre une certaine résilience aux charges modérément conséquentes. Néanmoins, elle peut se montrer plus vulnérable dans de mauvaises conditions géographiques, pouvant avoir un impact sur la qualité de l'assemblage, ainsi que sur les matériaux utilisés (notamment en cas d'utilisation de ressources locales non traitées).

En termes de poids (||), les éléments qui constituent le modèle peuvent être modérément léger permettant un assemblage manuel, même si la typologie reste globalement plus lourde que les membranes textiles ou les systèmes à câbles par exemple.

Toutefois, sa rapidité de déploiement (|) présente certaines limites. Elle dépend essentiellement de la main-d'œuvre mobilisée. Étant donné l'absence de mécanisme articulé ou pré-intégré, chaque élément doit être positionné, ajusté et fixé manuellement. Le temps de montage varie selon le nombre de personnes disponibles, leur niveau d'expérience, mais aussi de la qualité de préparation en amont (pré-assemblage, numérotation des éléments, logistique sur site).

Concernant la durabilité (||), l'absence de mécanismes articulés devient un atout car elle réduit les risques d'usure mécanique. Cependant, la durabilité dépend fortement de la qualité des matériaux utilisés et de la protection contre les éléments extérieurs, notamment l'humidité et les variations de température.

En termes de compacité (I), il s'agit de barres rigides fixes qui nécessitent un volume de stockage plus important que les modèles dépliables limitant l'encombrement. Une fois montée, la structure est stable mais volumineuse et impossible à replier sans un démontage complet.

Concernant la modularité (I), cette typologie permet seulement une variation du nombre de modules et des points d'appuis pouvant faire varier la structure en surface. Comme pour les structures ciseaux à nappe simple, son organisation limite considérablement les variations spatiales, et donc les possibilités d'optimisation visant à maximiser l'exposition solaire.

Le critère de la surface disponible dédiée à une installation photovoltaïque (II) constitue une caractéristique légèrement plus favorable car les grilles à barres simples fournissent un support étendu en plan (figure 43), stable et régulier, idéal pour l'installation de modules variés. Seulement, cette installation reste toutefois conditionnée par sa faible diversité formelle, limitant les possibilités de disposition orientée.

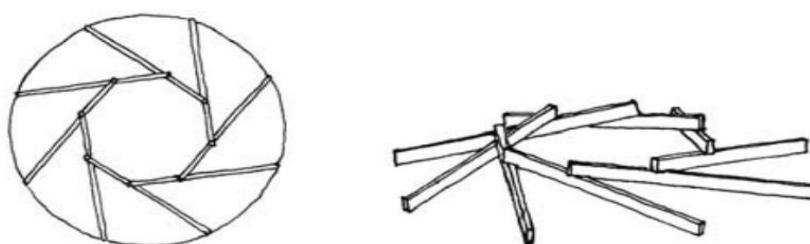


Figure 43 : Dispositif de grille réciproque en plan (gauche) illustrant la surface disponible. Vue tridimensionnelle du modèle réciproque (droite).

Cette surface disponible permet également une certaine flexibilité d'usage (II). Bien qu'elle soit limitée pour la création d'abris ou d'enveloppes protectrices, cette structure peut néanmoins jouer un rôle fonctionnel dans des dispositifs complémentaires (toiture, ombrière, etc.). Comme le montre la figure 44, elle peut préciser ses variantes et servir de support à la collecte et l'assainissement des eaux de pluie, dans un contexte où l'accès à l'eau potable représente un enjeu aussi important que l'accès à l'énergie (voir chapitre 2.2. Architecture humanitaire).



Figure 44 : Distillateur solaire portable réalisé par Henry Glogaupa

L'avantage de ce système réside dans le coût (|||) car la structure est techniquement simple à produire, au détriment de sa vitesse de déploiement, notamment si elle n'est pas préassemblée. L'avantage de pouvoir être entièrement fabriquée à partir de matériaux disponibles sur site, comme du bois brut ou du bambou, en fait également une solution particulièrement économique.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

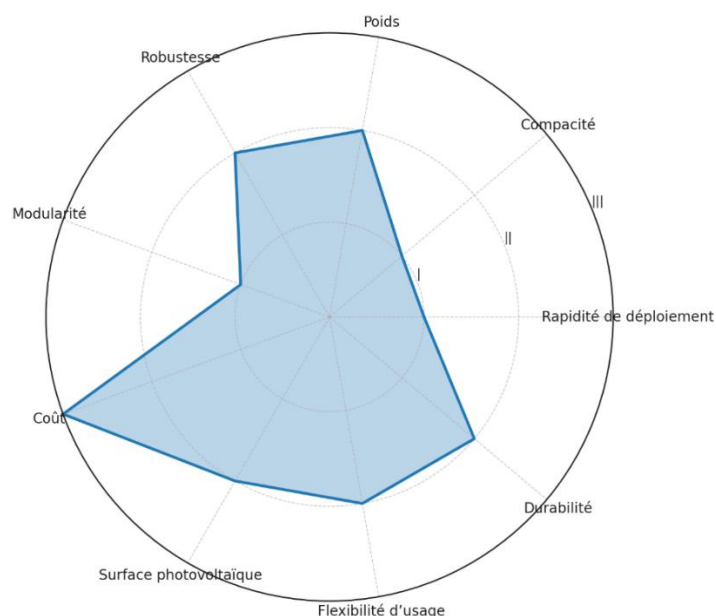


Figure 45 : Graphique radar ; Grille à simple nappe – Barres

3.1.4.5. Grilles à double nappe – Barres (DLG – bars)

La typologie des grilles à double nappe constituée de barres fixe s'inscrit dans la continuité des morphologies treillis à liens rigides. À la différence des grilles à simple nappe, elles se déploient sur plusieurs axes générant des configurations spatiales plus complexes, assemblées par des joints articulés fixes (figure 46). Cette typologie permet la création de structures autoportantes stable plus variées, de la même façon que les structures ciseaux à double nappe.



Figure 46: Exemple de grille à double nappe rigide (gauche). Exemple de nœuds articulés fixes assurant la stabilité et la connectivité entre les barres (droite).

Ces deux typologies sont évidemment comparables sur le critère de la modularité (II). Même si les barres précontraintes à double nappe sont limitées par des formes plus régulières, leur capacité à produire des variations morphologiques reste très variée, et largement plus exploitable que les grilles limitées à un seul axe comme nous pouvons le voir à la [figure 47](#).

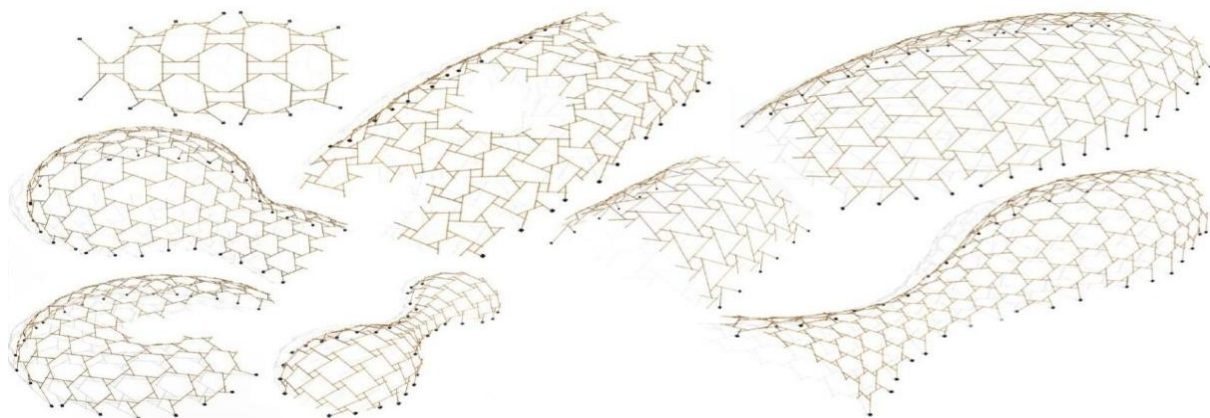


Figure 47 : Variantes de configurations générées par des grilles à double nappe précontraintes.

Son point fort réside dans sa robustesse (III) car elle offre une excellente résistance aux efforts mécaniques, aussi bien verticaux que latéraux. Grâce à sa forme en treillis organisée sur plusieurs axes, elle résiste mieux que les grilles planes aux sollicitations comme le vent, assurant une certaine longévité lorsqu'elle est réalisée avec des matériaux robustes et traités.

Cependant, cette robustesse a un impact sur le poids (III). La multiplication des éléments (deux nappes et connexions intermédiaires) induit une masse structurelle supérieure à celle des simples nappes comme nous avons déjà pu le constater pour les systèmes à ciseaux. Elle reste tout de même plus légère que les structures à surface pliées.

Ce facteur se répercute également sur la compacité (I). La structure n'étant pas repliable, elle nécessite un volume conséquent pour le stockage et le transport des éléments qui la constitue. Chaque barre doit être conservée dans ses dimensions pleines, ce qui en fait l'une des typologies les plus encombrantes.

En ce qui concerne la rapidité de déploiement (I), elle présente les mêmes limites que les grilles à simple nappe. L'assemblage manuel, élément par élément, demande du temps, des outils et une main-d'œuvre conséquente comme nous pouvons le voir en [figure 48](#).



Figure 48 : Mise en œuvre manuelle d'une structure à barres fixes double nappe.

Cela dit, elle permet une certaine durabilité (II) lorsque l'assemblage est correct. La structure est rigide et ne dépend pas de mécanismes articulés fragiles. Ceci réduit les risques sur le long terme même si la qualité d'assemblage et des matériaux restent des facteurs pouvant limiter son efficacité sur ce critère.

La surface disponible pour l'installation photovoltaïque (III) est également pertinente. La double nappe crée des plateaux stables, rigides et continus, adaptés à la pose de panneaux photovoltaïques de nature variée, même si elles restent devancées par les surfaces continues homogènes.

Cette même surface peut également être mise à profit dans des usages complémentaires (III), comme le support d'un système de récolte des eaux de pluie selon la morphologie adoptée, une toiture légère ou encore un plancher surélevé. En revanche, la structure, par sa rigidité, reste peu adaptée à des configurations évolutives.

Enfin, sur le plan économique (II), la grille à double nappe constituée de barres se situe dans une zone intermédiaire. Bien que techniquement simple à produire avec des matériaux standards, la quantité d'éléments à assembler, les nœuds articulés et la complexité logistique du montage en augmentent le coût global. Sa complexité limite considérablement la possibilité d'utiliser les matériaux disponibles sur site, contrairement à sa version organisée sur un seul plan.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

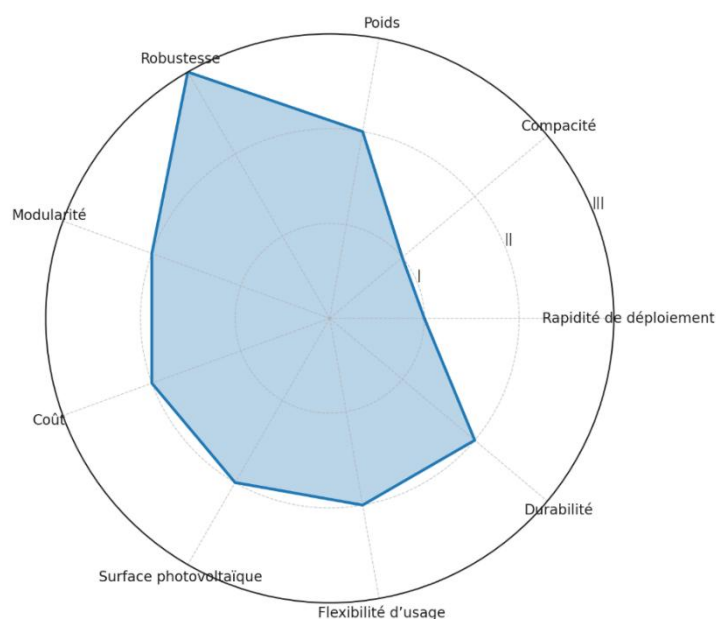


Figure 49 : Graphique radar ; Grilles à double nappe – Barres

3.1.4.6. Structures axiales – Barres (spine – Bars)

Cette typologie clôture l'analyse des morphologies en treillis à liens rigides. Contrairement aux configurations en nappe plane ou en double nappe, cette configuration axiale se développe de manière linéaire selon un axe unique, à travers la répétition ordonnée d'un motif structural réciproque. Il s'agit d'une déclinaison allongée des variantes de grilles réciproques classiques que nous avons analysé ci-dessus. Cette morphologie, par analogie avec les structures à ciseaux axiales, favorise une nouvelle fois des formes rectilignes ou arquées (figure 50), souvent employées dans la conception de mâts, d'arcs ou de portiques.

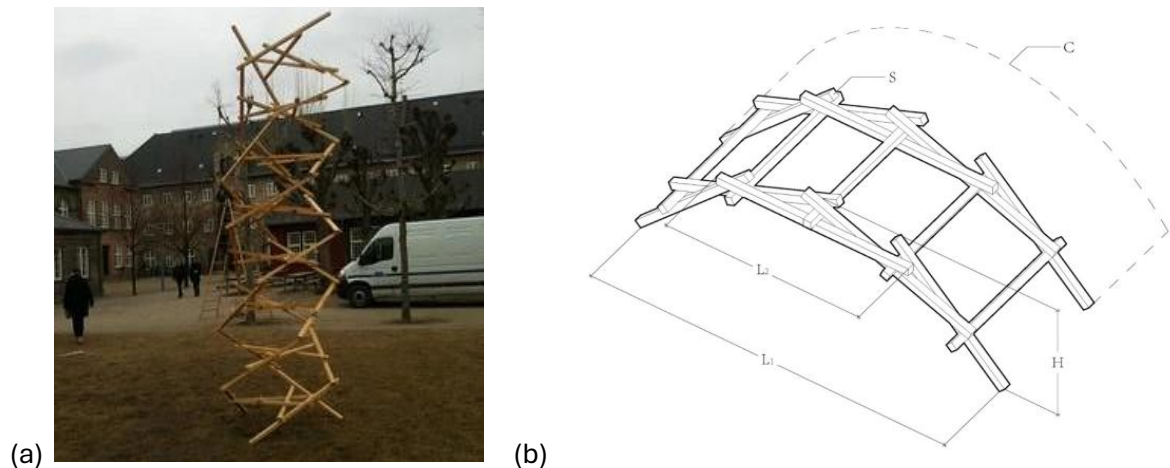


Figure 50 : (a) Structure axiale à barres développée verticalement pour former un mât autoportant. (b) Configuration arquée par la répétition d'un motif réciproque.

En matière de robustesse (I), la structure offre une tenue correcte, toutefois, comme pour les autres configurations axiales, elle peut présenter une vulnérabilité aux efforts latéraux, notamment dans une configuration verticale. La morphologie adoptée et la qualité de l'assemblage influencent une nouvelle fois sa tenue dans le temps.

Du point de vue de la rapidité de déploiement (I), elle partage les limites des autres structures à barres fixes. Chaque module doit être positionné et assemblé manuellement, rendant la mise en place relativement longue en comparaison des mécanismes articulés dynamiques. La répétition des éléments n'est pas complexe, mais nécessite de la rigueur et un effectif suffisant.

En termes de poids (II), la structure peut rester relativement légère selon les matériaux choisis et par l'économie des éléments structuraux en comparaison aux systèmes à surfaces pliables. Elle reste tout de même plus lourde que les membranes textiles ou les systèmes à câbles.

Une nouvelle fois, la compacité (I) est limitée par l'encombrement des éléments rigides non pliables. Le repli de ce type de structure exige un démontage complet, et l'aspect linéaire du système génère un volume allongé peu pratique.

Concernant la modularité (II), sa capacité de variation géométrique est correcte mais reste limitée face au potentiel des structures à double nappe. Elle offre une certaine flexibilité dans son prolongement par la combinaison à d'autres modules pouvant faire varier sa portée (figure 51) mais ne permet pas d'ajustements directionnels complexes.

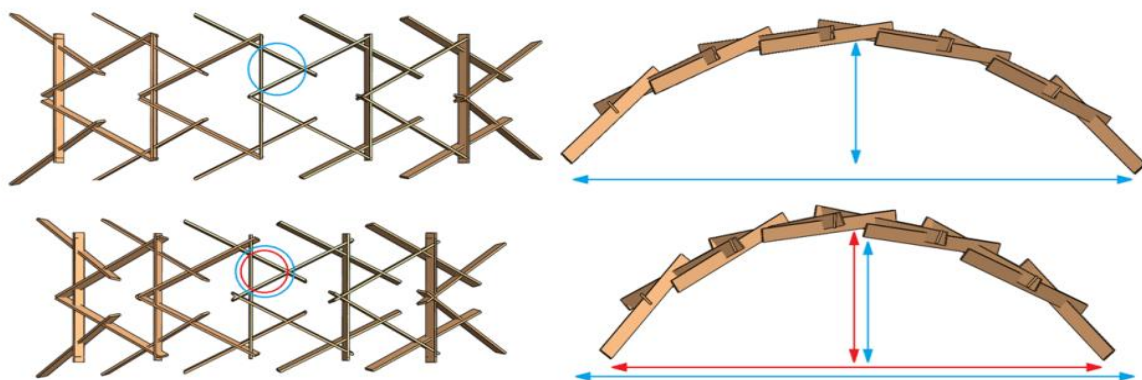


Figure 51 : Vue en plan de l'impact d'une variation de portée d'une composition arquée (gauche). Impact de la variation de portée sur la structure montrant les possibilités d'extension en longueur et en hauteur (droite).

En termes de durabilité (II), la structure offre une performance satisfaisante. La simplicité de la conception et l'absence de composants mobiles réduisent les risques de défaillance. Toutefois, la durabilité est une nouvelle fois conditionnée par la qualité d'assemblage et des matériaux, en particulier pour les applications extérieures.

Quant à la surface disponible pour le photovoltaïque (III), elle reste correcte notamment en ce qui concerne les modèles arqués. L'axe peut accueillir des dispositifs solaires malgré les limites en termes d'orientation posées par la morphologie.

Sur le plan de la flexibilité d'usage (II), la structure peut servir de toiture ou encore de plancher par exemple mais elle ne permet toutefois pas d'accueillir des usages enveloppants tels que des abris, comme pourraient le faire les typologies à double nappe.

Pour conclure sur le coût (II), cette typologie se révèle assez abordable avec des matériaux standards et une conception simple. L'absence de liaisons dynamiques complexes limite les frais de fabrication, même si la quantité de barres nécessaires et la logistique du montage peuvent rapidement faire varier les besoins selon le modèle.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

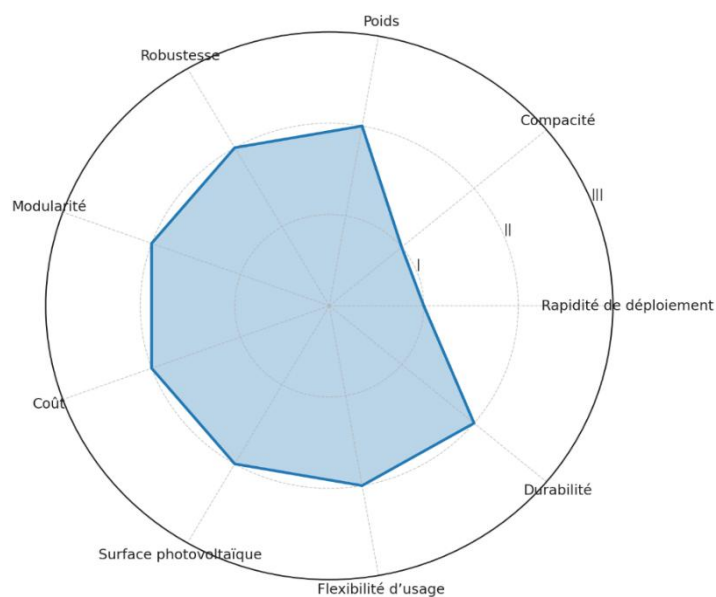


Figure 52 : Graphique radar ; Structures axiales – Barres

3.1.4.7. Surfaces pliées (folded plates)

Les surfaces pliées, ou structures origami, se distinguent des morphologies treillis par une morphologie continue formée de panneaux rigides articulés selon des lignes de pli permettant leur déploiement (figure 53).

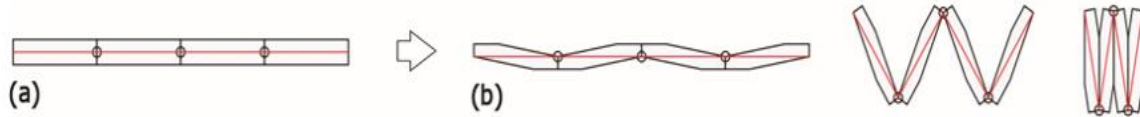


Figure 53 : Schéma illustrant le principe de pliage des structures en origami : (a) structure dépliée, (b) passage d'un état déployé à un état replié.

Cette typologie tire parti d'un enchaînement de plis organisés qui, une fois figés, donnent lieu à des configurations spatiales variant selon les patterns de plis appliqués. On peut distinguer deux grands types de déploiement : le déploiement linéaire, dans lequel les plis se développent selon un axe unique (figure 54a), et le déploiement radial, où la structure se déploie à partir d'un point central (figure 54b).

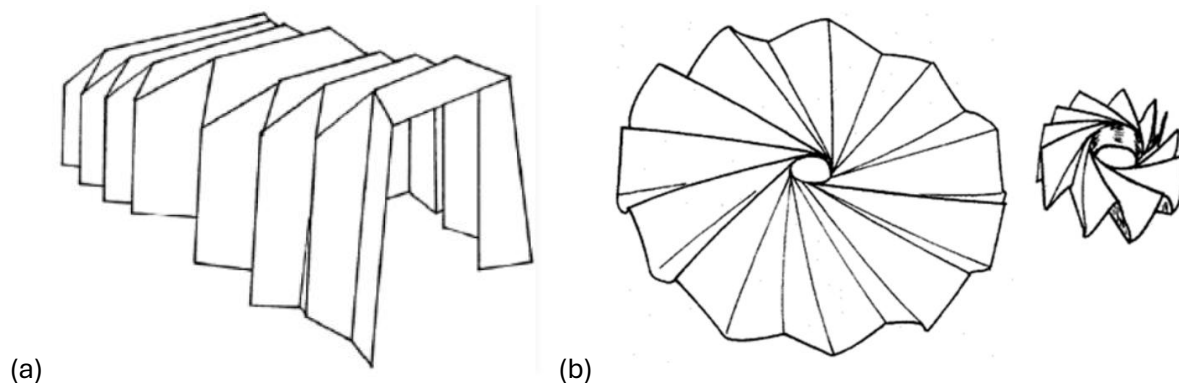


Figure 54 : (a) Déploiement linéaire selon un axe unique. (b) Déploiement radial à partir d'un point central

En matière de robustesse (III), les surfaces pliées offrent un excellent comportement structurel. Selon la géométrie adoptée, les plis renforcent considérablement la rigidité des panneaux, ce qui leur permet de résister autant aux charges verticales que latérales, même avec des matériaux légers.

La durabilité (II) est également remarquable notamment par sa robustesse aux sollicitations mécaniques et aux conditions environnementales, même si un point faible reste présent sur les modèles plus rigides nécessitant des articulations sujettes à l'usure.

Concernant la modularité (II), les structures pliées offrent une diversité formelle appréciable grâce à la variété de patrons géométriques. Comme illustré en figure 55, ces systèmes peuvent être organisés sur plusieurs plans, permettant de générer des formes couvrant aussi bien des configurations plates que spatiales. Toutefois, les structures pliées restent dépendantes de patrons réguliers, contrairement aux morphologies en treillis à double nappe, où les unités modulaires peuvent être librement juxtaposées et orientées pour explorer des formes plus souples.

En termes de poids (I ou III), la structure est plus lourde que les autres typologies dû au manque d'économie en termes de matériaux structurels, bien que le modèle puisse se montrer relativement léger selon les matériaux choisis, en particulier si on envisage l'intégration directe des panneaux photovoltaïques pliables comme éléments structurants. L'hypothèse de cette stratégie permettrait d'éliminer les charges additionnelles liées à des supports intermédiaires.

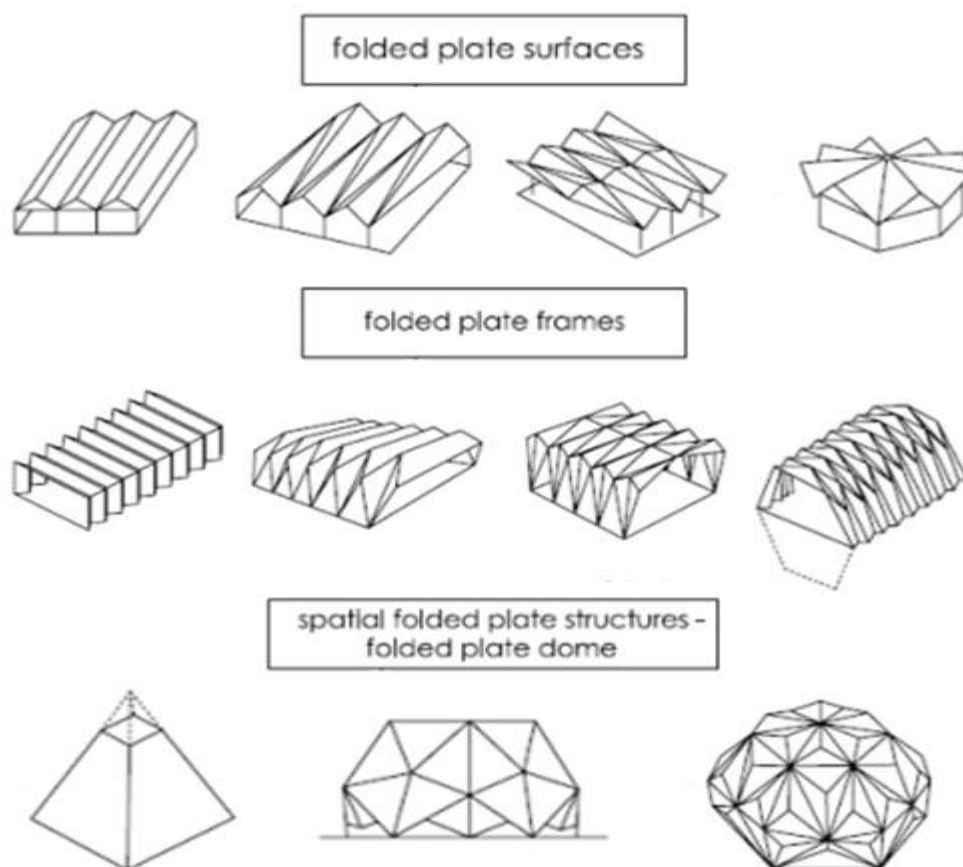


Figure 55 : Classification des structures pliées illustrant la diversité géométrique de la typologie.

Il convient également de noter que les surfaces pliées sont généralement préfabriquées en atelier et déployées sur site à l'aide de charnières ou d'articulations textiles intégrées ce qui facilite la rapidité de déploiement (II). Certains modèles, comme celui en [figure 56](#), peuvent se déployer en quelques gestes sans outils ou main-d'œuvre conséquente. Il faut tout de même nuancer cet avantage car plus la géométrie du modèle est complexe, notamment si elle intègre des pliages multidirectionnels ou des motifs de tessellation denses, plus le processus de déploiement peut se révéler délicat.

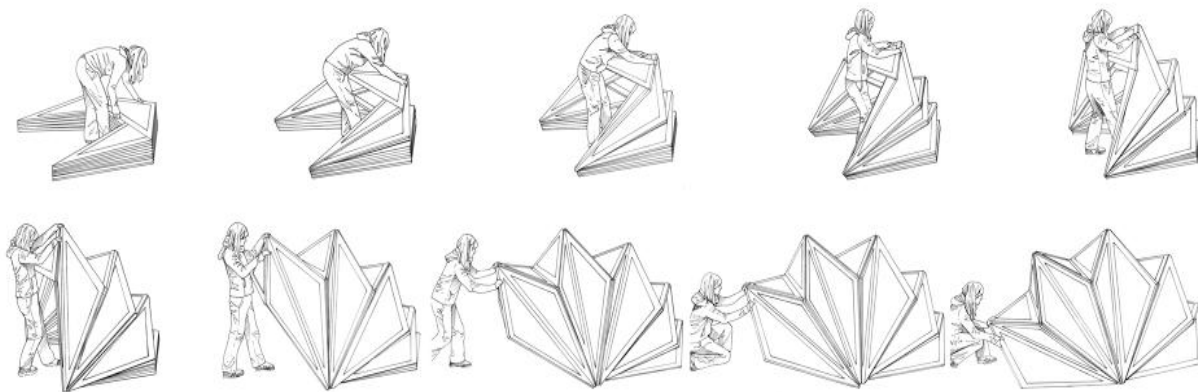


Figure 56 : Séquence de déploiement manuel d'un système à surface pliée.

Du point de vue de la compacité (II), leur capacité de repli dépend encore une fois du patron utilisé. Certaines typologies pliables peuvent se compacter en volumes plats très fins, mais ce n'est pas toujours le cas, en particulier pour les surfaces spatiales plus complexes.

Le réel avantage du modèle réside dans la surface disponible dédiée aux panneaux photovoltaïques (III). Les surfaces pliées offrent une continuité plane propice à l'installation directe de tout type de modules solaires. Leur rigidité garantit un bon maintien, et les orientations peuvent être optimisées selon le motif retenu. Ce critère pourrait également être renforcé par l'hypothèse évoquée plus haut, consistant à utiliser directement les panneaux photovoltaïques comme surfaces structurelles pliables.

En termes de coûts (II), cette typologie demande une fabrication précise (découpe CNC, pliage automatisé) et nécessite une certaine quantité de matériaux, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur ce plan. Toutefois, leur simplicité structurelle (absence de nœuds complexes) permet un équilibre avec les autres typologies structurelles étudiées.

Pour finir, la flexibilité d'usage (II) est elle aussi modérée. Ces structures peuvent faire office de toitures, de façades, ou d'abris temporaires, mais leur reconfiguration après montage est généralement rare mais envisageable, notamment lorsque le pattern de pli à initialement été pensé pour plusieurs configurations (figures 21).

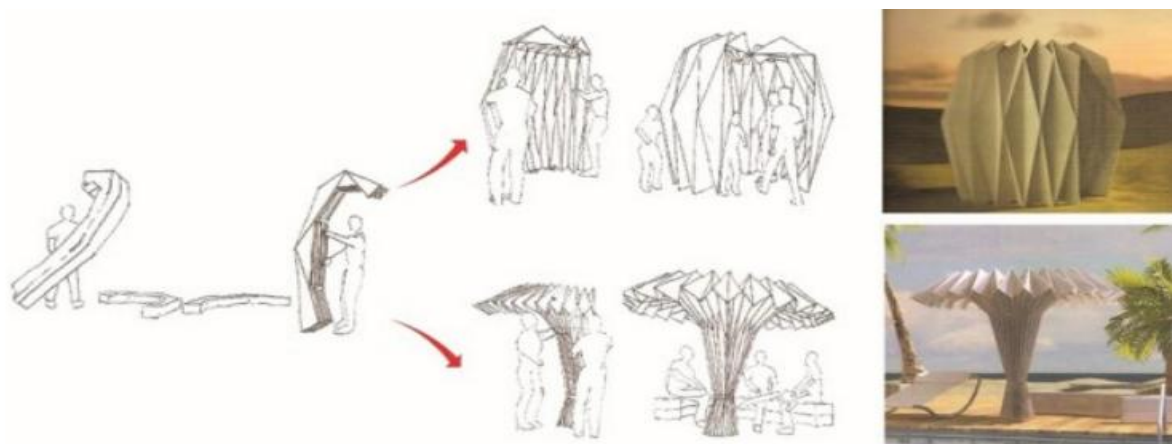


Figure 57 : Exemples de scénarios d'usages variés d'un même modèle.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

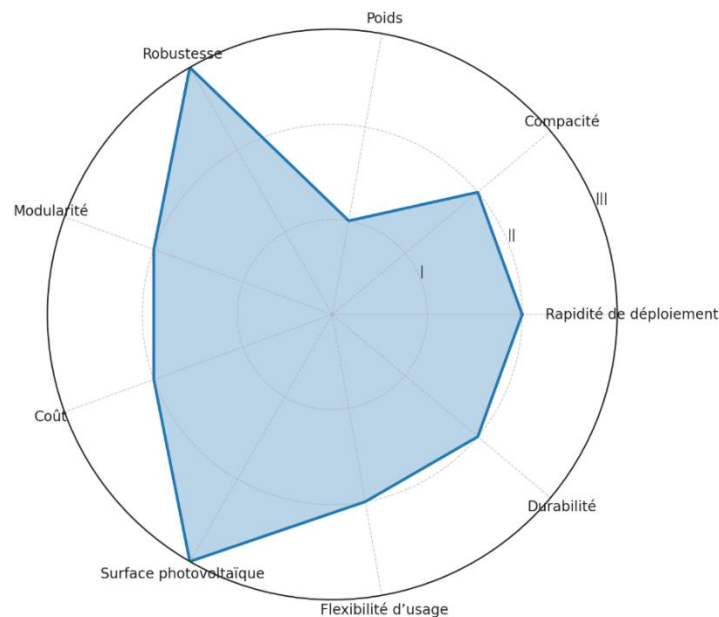


Figure 58 : Graphique radar ; Surfaces pliées

3.1.4.8. Surfaces courbées (Curved Surfaces)

Les surfaces courbées, fréquemment associées aux dômes géodésiques popularisés par Richard Buckminster Fuller, font également parties des structures de morphologie continue à liens rigides. À la différence des typologies en treillis, les surfaces courbées de cette classification ne reposent pas sur des barres isolées ou des éléments articulés mais sur l'assemblage de panneaux rigides connectés formant une voûte sphérique (figure 59).

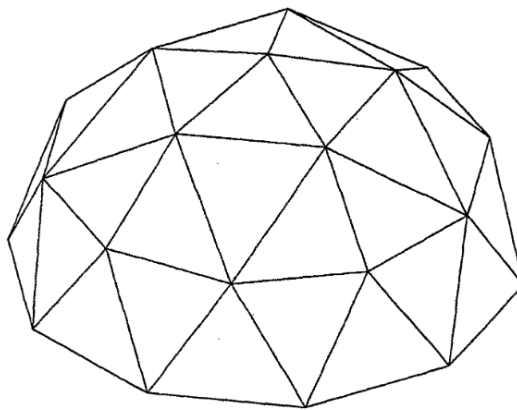


Figure 59 : Module de panneaux rigides assemblés formant une voûte sphérique

La typologie repose sur la répétition de triangles ou de trapèzes rigides reliés entre eux, venant répartir les efforts mécaniques à travers l'ensemble de la structure (figure 60). Chaque élément contribue à transmettre les forces de compression ou de traction aux éléments voisins, créant un système coopératif autoporté.

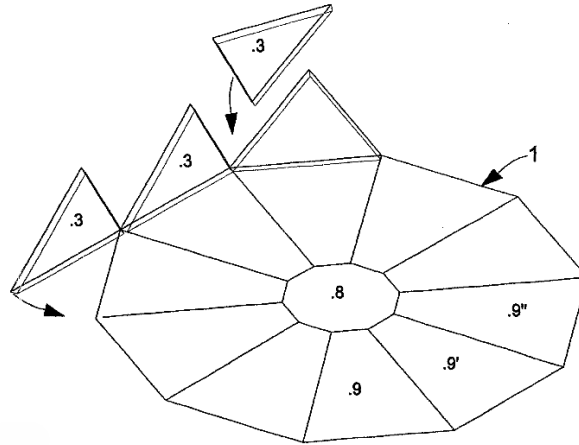


Figure 60 : Répartition structurelle

La forme sphérique du dôme agit comme une voûte et permet aux charges comme le vent, la neige ou simplement son poids propre, d'être efficacement redistribuées, ce qui en fait une des typologies déployable les plus résistantes (|||).

Cet aspect est en lien direct avec la durabilité (|||). La répartition uniforme des charges augmente la résistance globale permettant à cette typologie d'être maintenue sur de longues périodes sans bouger et avec un entretien minimal.

Cette durabilité se fait au détriment de sa rapidité de déploiement (|). A l'image des structures réciproques, les surfaces courbées sont défavorisées par une mise en œuvre fastidieuse. Selon la complexité du modèle, elles nécessitent des supports permettant l'assemblage, et une main d'œuvre conséquente et qualifiée faisant d'elle la structure déployable la plus chronophage de la classification.

Malheureusement, cette variation de complexité ne se traduit pas par un avantage sur le critère de la modularité (|). La forme peut légèrement varier selon la fréquence géodésique, c'est-à-dire le nombre de subdivisions appliquées à la forme de base (un icosaèdre dans le cas de la [figure 61](#)). Plus cette fréquence est élevée, plus le nombre de composants augmente, et plus la structure est lisse. Le modèle initial (icosaèdre, octaèdre, tétraèdre, etc.) influence la répartition et l'orientation des facettes, surtout lorsque la fréquence est faible, mais conserve une morphologie géodésique simple.

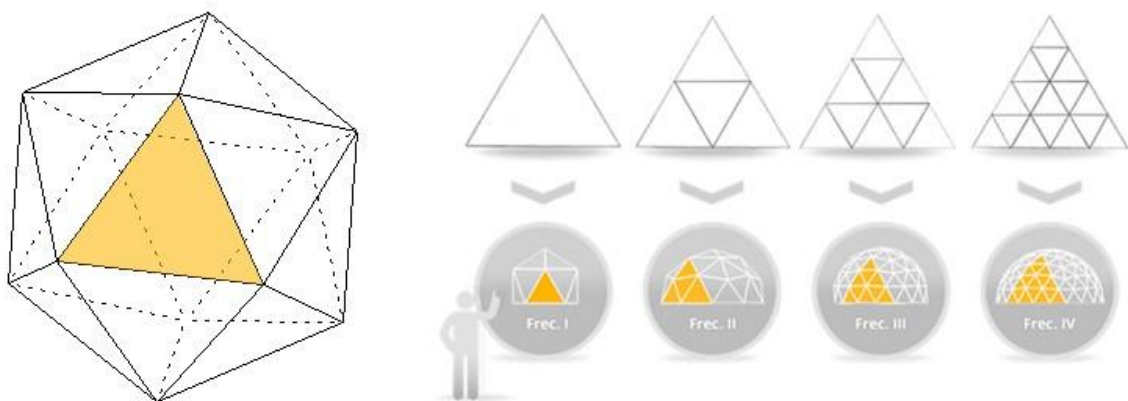


Figure 61 : Exemple de subdivision géodésique

Le choix de la section, illustrée en [figure 62](#), influence également la hauteur, la surface totale et l'emprise au sol mais pas la forme même de la structure. Ainsi, la morphologie présente des contraintes majeures en termes de modularité ne permettant pas d'optimiser l'exposition solaire des modules qui lui seront associés.

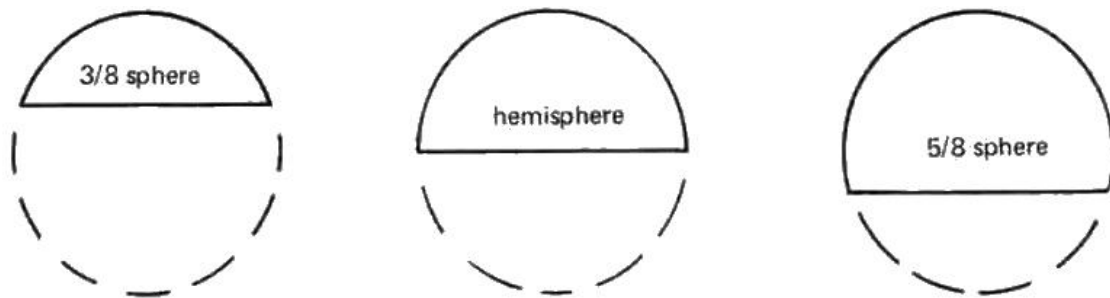


Figure 62 : Variations de sections sphériques

Malgré l'impact des critères précédents sur la surface disponible pour les panneaux photovoltaïques (||), les surfaces courbées offrent tout de même un vaste espace continu et stable adapté à l'installation modules variés.

Un manque se fait également ressentir sur la compacité (|) car ces structures sont évidemment difficiles à transporter. Les plaques, plus ou moins nombreuses selon le niveau de fréquence adopté, ne sont pas repliables ce qui représente un volume de matériaux conséquent à stocker ou à transporter.

Le poids (|), à l'image des structures pliées, est un frein par le manque d'économie en termes de matériaux structurels. L'impact de leur nature est déterminant en comparaison à d'autres typologies plus économes.

Ceci aura un impact sur le coût (||). La quantité de matière, la complexité en termes de transport et d'assemblage induit une hausse potentielle des dépenses, bien que ces coûts restent globalement inférieurs à ceux des systèmes articulés plus sophistiqués comme les ciseaux à double nappe.

Enfin, la flexibilité d'usage (|) est très faible, la structure est associée à des usages d'abris et sa reconfiguration est quasiment impossible.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

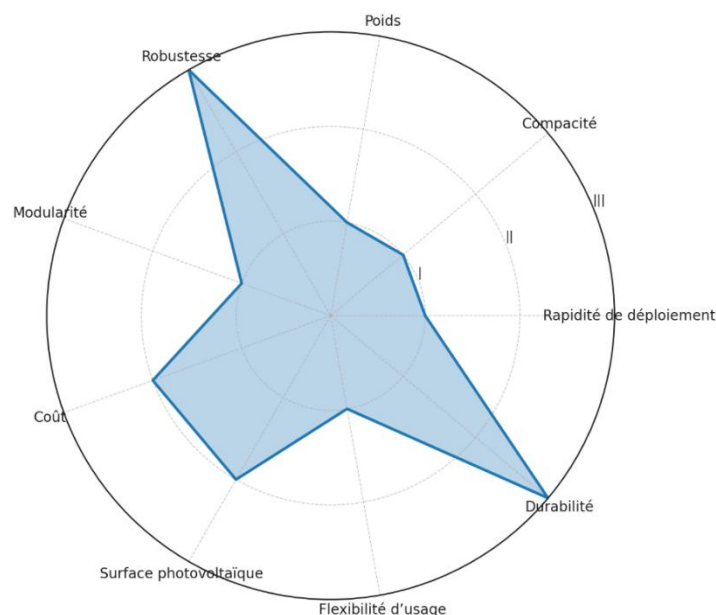


Figure 63 : Graphique radar ; Surfaces courbées

3.1.4.9. Structures à barres et câbles tendus (Strut-Cable Systems)

Les structures constituées de barres et de câbles introduisent la catégorie déformable par la morphologie en treillis. Elles reposent sur une répartition spatiale d'éléments en compression (barres) et d'éléments en tension (câbles), stabilisés par un état d'autocontrainte propre à la géométrie du système. Ce principe est notamment illustré par les systèmes de tensegrité, dans lesquels les éléments rigides ne se touchent pas et sont uniquement maintenus en place par la tension des câbles. Leur stabilité découle ainsi d'un équilibre interne entre compression et tension, illustré en [figure 64](#) par l'évolution du pattern de base à 3 barres (simplex).

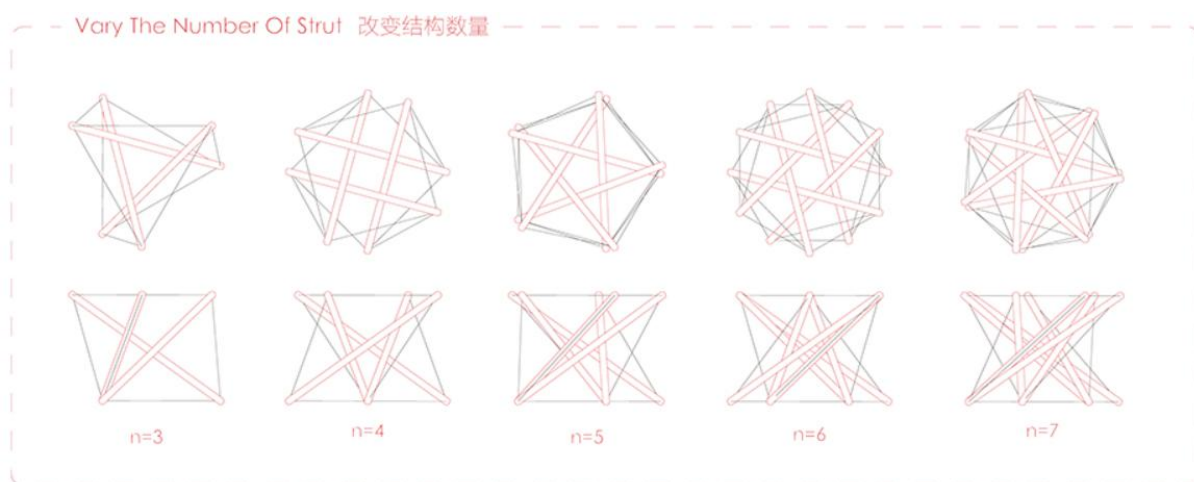


Figure 64 : Évolution morphologique d'un tripode en tensegrité de base, selon le nombre de barres.

Des variantes à barres contiguës ont également été développées. Contrairement aux tensegrités classiques, ces systèmes autorisent des connexions rigides entre les éléments compressifs,

limitant la flexibilité au bénéfice de la stabilité. Plusieurs patterns de base (figure 65) ont été proposées pour cette configuration : Reciprocal Prism (RP), Cell Pyramid (CP), Star Prism (SP) et Cross Prism (CrP).⁹⁸

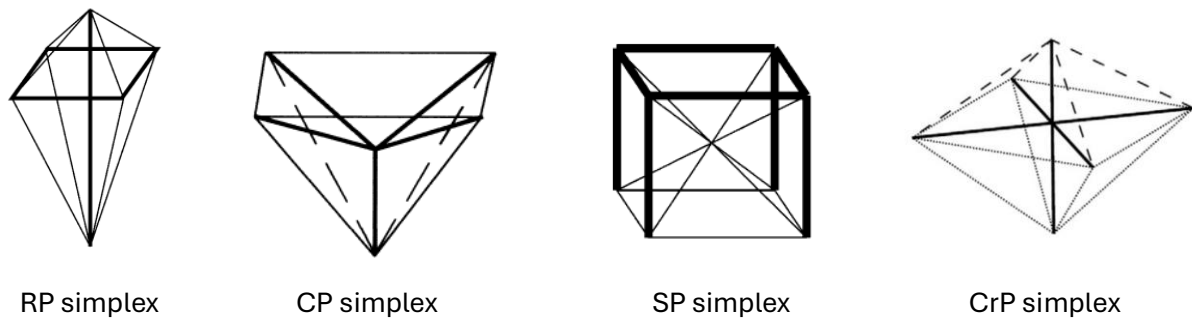


Figure 65 : Typologies élémentaires de systèmes à barres contiguës : RP, CP, SP et CrP simples.

Le critère de poids (|||) associé à cette typologie se distingue par sa légèreté. Une partie des efforts mécaniques étant repris par les câbles en tension, les éléments rigides peuvent être réduits. Cela permet une réduction de matière impactant la masse totale de la structure.

En parallèle, cette économie permet une compacité (|||) remarquable. Lorsqu'on relâche les câbles de leur état de précontrainte, ils retrouvent une certaine souplesse afin d'être repliés. Comme illustré en figure 66, ce processus permet aux barres de se rétracter dans une configuration compacte, facilitant le stockage et le transport, sans nécessiter de démontage complexe.

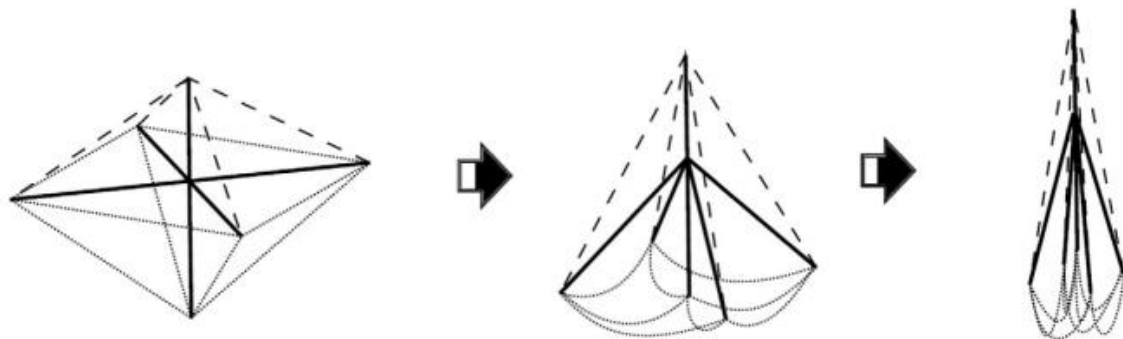


Figure 66 : Rétractation du modèle Cross Prism (CrP).

De plus, ces systèmes câblés bénéficient d'une certaine rapidité de déploiement (||) en raison des critères que nous venons d'évoquer. La structure est légère ce qui facilite les manipulations manuelles, et le seul paramètre de mise en tension permet le déploiement quasi instantané du module. Cependant, ce facteur n'est pas des plus simple à mettre en place et sa précision est cruciale pour assurer la stabilité et la robustesse de la structure, nécessitant la mobilisation d'une main d'œuvre qualifiée.

⁹⁸ LIEW, J. Y. Richard et LEE, B. H., « Experimental study on reciprocal prism (RP) grid for space structures », *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, n° 10, 2003, p. 1363-1384.

En outre, la complexité de mise en œuvre varie également selon l'agencement et la combinaison des modèles déployés. Les structures à câbles tendus peuvent être organisées selon différentes logiques de trame permettant une certaine modularité (||).

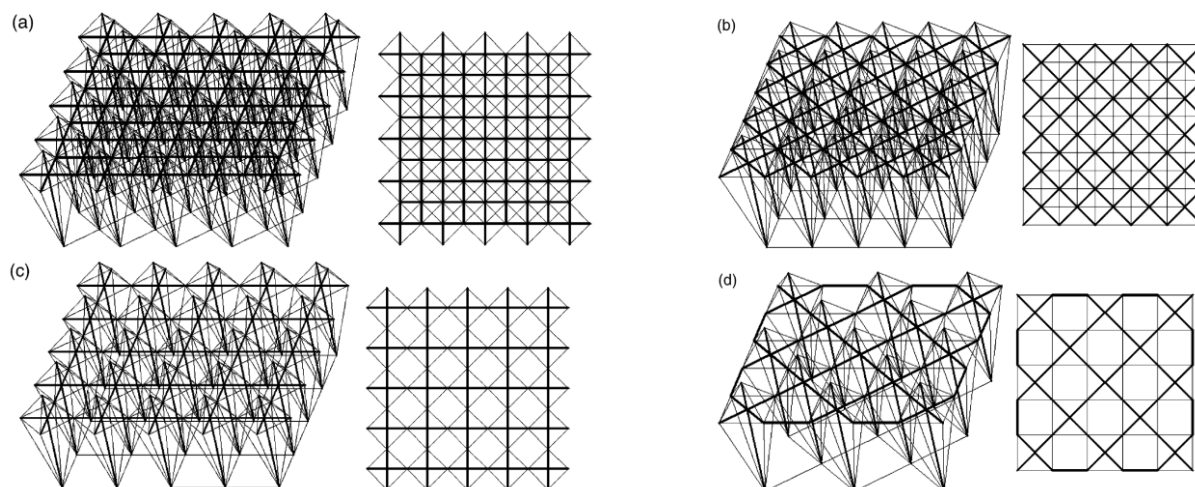


Figure 67 : Configurations modulaires des patterns de base.

Ce champ d'exploration a permis l'émergence de grilles plus complexes. Notamment illustrées en [figure 68](#) par les systèmes en tensegrité, elles offrent une certaine souplesse morphologique grâce à la liaison des patterns de base. Les variantes à barres contiguës sont quant à elles plus rigides ce qui réduit généralement leur utilisation à des configurations telles qu'illustrées en [figure 67](#).

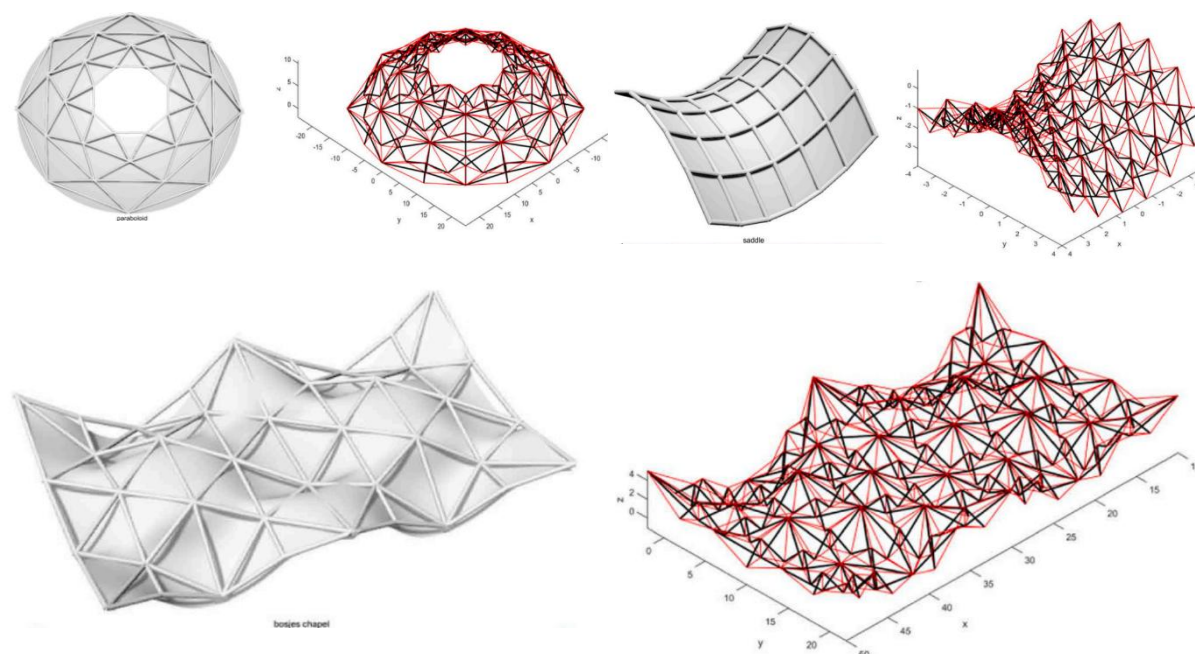


Figure 68 : Exemples de grilles barres-câbles déployées selon des géométries complexes en double courbure.

Quant à la robustesse (||), cette typologie présente une forme de résilience liée à sa souplesse, elle peut encaisser certaines déformations sans rupture immédiate, ce qui est un atout dans des

contextes instables ou imprévisibles. Toutefois, cette souplesse structurelle implique aussi une sensibilité à la qualité des matériaux utilisés, notamment en ce qui concerne les câbles. Une rupture ou une faiblesse dans un élément tendu peut entraîner une perte d'équilibre, voire l'effondrement de la structure. La fiabilité de l'ensemble dépend donc étroitement de la résistance des composants et de la rigueur de la mise en tension initiale.

Ceci aura un impact sur la durabilité (II). Bien que la combinaison de barres et de câbles offre une flexibilité et une légèreté appréciables, les câbles restent tout de même vulnérables au relâchement et nécessite une plus grande maintenance que les structures à barres rigides ou surfaces pliées pour assurer la longévité de la structure.

En termes de surface disponible pour les panneaux photovoltaïques (II), les typologies à barres contiguës présentent cette fois-ci un avantage par rapport aux tensegrités. Elles offrent une meilleure surface et de meilleurs supports (figure 69) permettant l'installation de modules solaires variés.

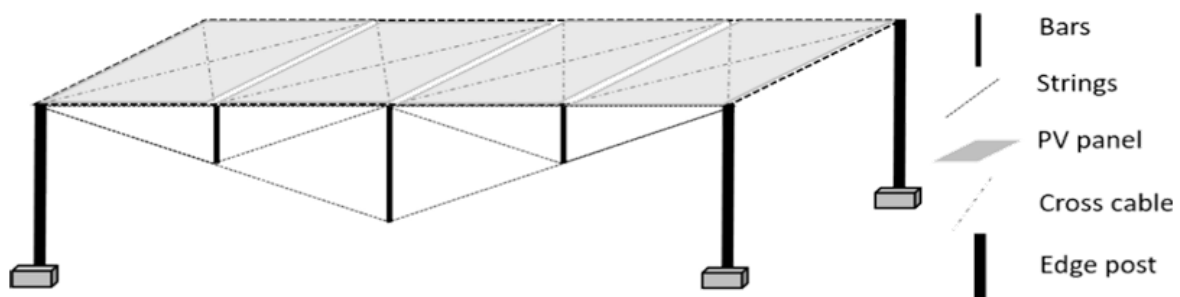


Figure 69 : Proposition de support photovoltaïque à barres contiguës.

Les systèmes en tensegrité, de nature plus ajourée, offrent un support moins adapté aux dispositifs photovoltaïques rigides. Elles pourront toutefois accueillir des solutions plus souples et légères, comme nous pouvons le voir en figure 70.

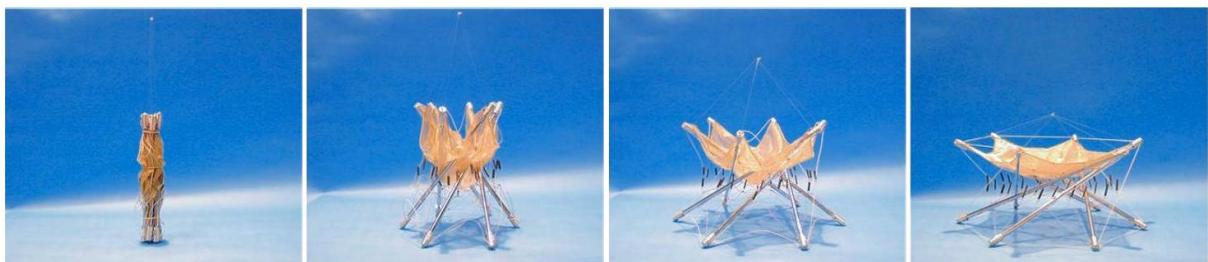


Figure 70 : Antenne à réflecteur en tensegrité rapidement déployable sur satellite en contexte de missions spatiales.

Sur le plan financier, le coût (I) est un inconvénient. La complexité de la mise en tension et de l'assemblage initial peut générer des coûts supplémentaires en main-d'œuvre et en dispositifs de précontrainte. La typologie nécessite l'utilisation d'une série d'outils de technologie avancée comme les câbles, ou les nœuds de liaison entre les différents éléments.

Le dernier critère concernant la flexibilité d'usage (II) est correct en phase de conception car la typologie peut être utilisée pour une série d'usages spécifiques (mâts déployables, abris, support membrane, etc.), mais peut très rarement être reconfigurée une fois déployée.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

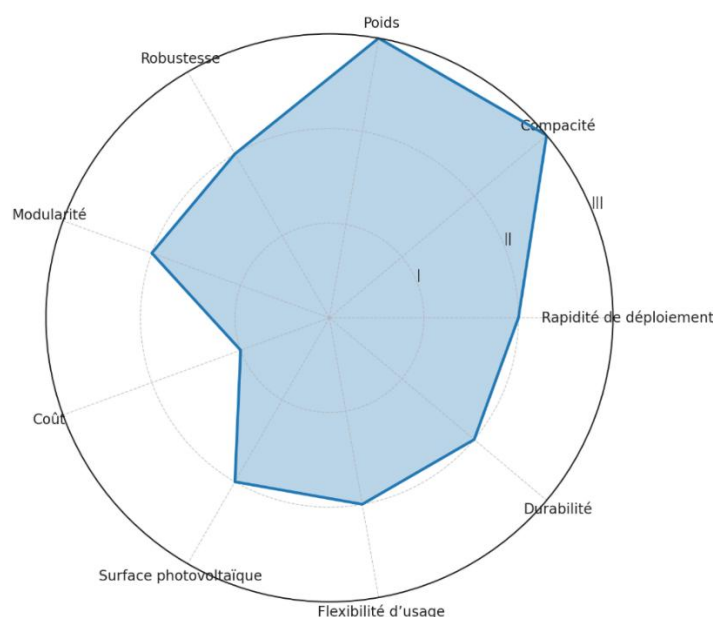


Figure 71 : Graphique radar ; Structures à barres et câbles tendus

3.1.4.10. Membranes tendues – Textile (Tensioned Membrane – Fabric)

Les structures à membranes textiles représentent elles aussi une catégorie de morphologies treillis déformables. Elles se caractérisent ici par l'utilisation de surfaces souples, et non plus de câbles, mises en tension entre plusieurs points d'ancrage d'un assemblage de barres flexibles ou rigides. Les membranes travaillent exclusivement en traction, leur morphologie émerge non pas d'une géométrie imposée mais d'un équilibre des forces internes. Cette tension induit une double courbure inverse, menant à cette forme en selle de cheval (figure 72) nommée géométrie anticlastique⁹⁹.

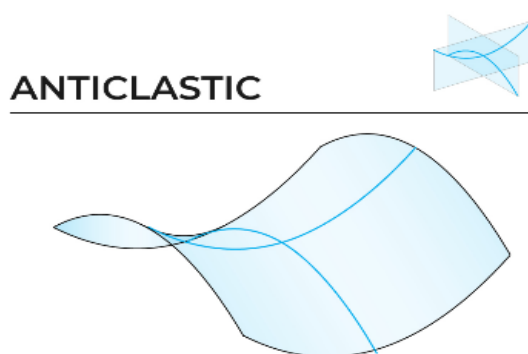


Figure 72: Schéma de double courbure inverse qui caractérise la géométrie anticlastique.

Hanaor et Levy distinguent 2 types de membranes textiles ;

⁹⁹ LEYRAL, Marc, *Faire tenir, structure et architecture*, p. 265

- Les systèmes hybrides¹⁰⁰, où la membrane agit en tension pour précontraindre des éléments porteurs en flexion ¹⁰¹ (figure 73). Ici, la co-action entre la membrane et le squelette permet la stabilisation de l'ensemble. La structure d'appui est active : elle travaille en interaction directe avec la membrane, et ne peut assurer seule la stabilité sans la tension textile. La membrane et la structure sont ainsi structurellement interdépendantes.

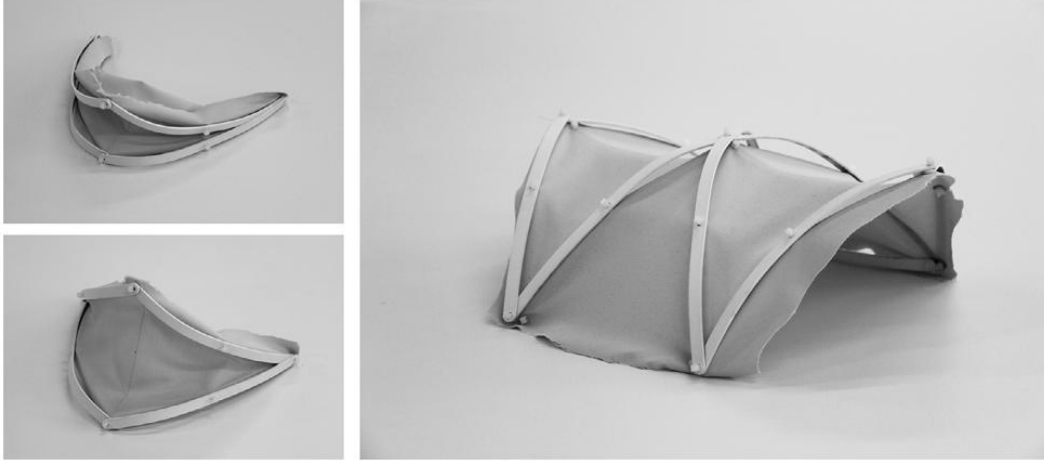


Figure 73: Maquettes illustrant le déploiement des structures déployables actives en flexion.

- Les systèmes nervurées¹⁰², où la membrane tendue est portée par des éléments structuraux, tels que des mâts, des câbles ou encore des arches comme c'est le cas en figure 3. Ces nervures forment une partie intégrante de la membrane, contribuant à guider la forme et à reprendre les efforts, notamment en cas de vent ou de surcharge. Dans ce cas, la structure d'appui est secondaire, elle sert à ancrer ou tendre la membrane, sans participer activement à son déploiement.

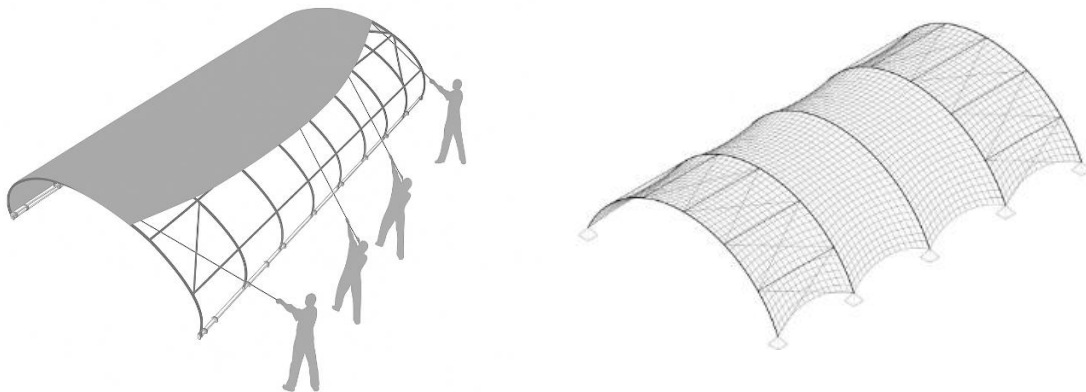


Figure 74: Déploiement manuel d'une membrane textile tendue sur une structure d'arcs rigides

Le premier atout de cette typologie est sa rapidité de déploiement (|||), même s'il peut varier selon le modèle. La surface textile peut être mise en tension manuellement en quelques

¹⁰⁰ « Hybrid » dans la classification d'Hanaor & Levy

¹⁰¹ BRANCART, Stijn, DE LAET, Lars et TEMMERMAN, Niels, « Deployable Textile Hybrid Structures: Design and Modelling of Kinetic Membrane-restrained Bending-active Structures », *Procedia Engineering*, vol. 155, 2016, p. 195-204. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.020>.

¹⁰² « Ribbed » dans la classification d'Hanaor & Levy

gestes (figure 74), à condition que le système de support soit préalablement installé pour les modèles portés. En ce qui concerne les membranes hybrides, leur configuration permet un déploiement rapide sans installation préalable puisque la membrane et les éléments en flexion se déploient de manière conjointe.

Le poids (|||) est également un atout majeur de cette typologie. Les membranes textiles sont réalisées avec des tissus techniques légers renforcés (PVC, PTFE, etc.). Cette légèreté facilite, l'acheminement, la manutention et le déploiement dans des contextes contraints.

En parallèle, cette même propriété favorise la compacité (|||). Les membranes sont souples et peuvent être roulées (figure 75) ou pliées dans des volumes réduits, ce qui les rend particulièrement facile à transporter et à stocker, notamment dans les premières phases d'intervention.



Figure 75: Déploiement d'un rouleau d'une membrane d'étanchéité produisant de l'électricité solaire

La surface disponible pour les panneaux photovoltaïques (||) n'apparaît plus seulement comme un point faible. Les membranes ne sont évidemment pas un support idéal pour les panneaux solaires rigides, une série de configurations textiles peuvent toutefois accueillir des modules solaires souples comme nous pouvons le voir en figure 76. Ce type d'installation est un avantage logistique même s'il est important de relever qu'il se fait au détriment de la performance énergétique.

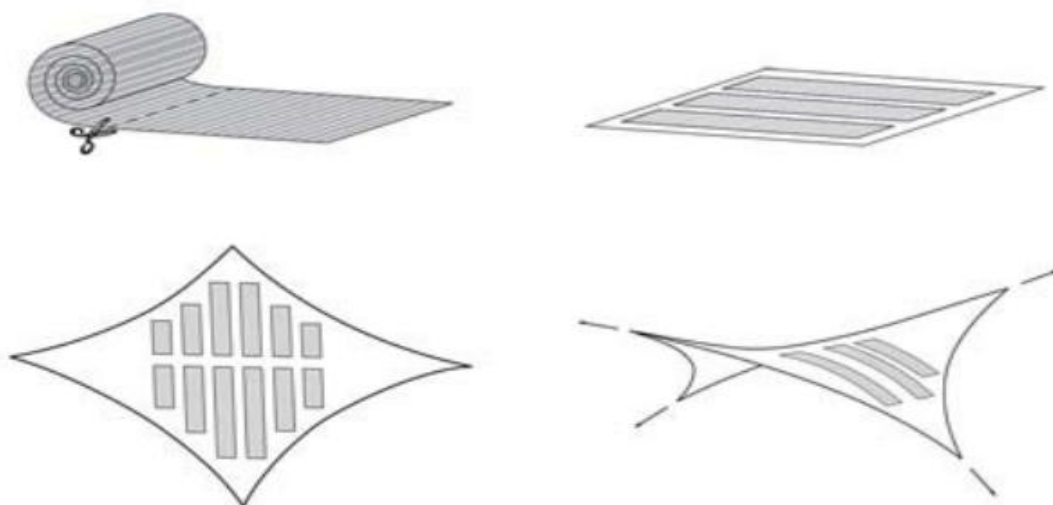


Figure 76 : : Structure monocouche précontrainte avec photovoltaïque flexible : a) Rouleau de film photovoltaïque ; b) Modules laminés ; c) Laminés appliqués ; d) Forme anticlastique d'une structure membranaire en PTFE photovoltaïque entièrement intégrée.

Les avantages du système font défaut à sa robustesse (I). Les membranes présentent des limites aux vents forts, à la neige ou aux chocs en comparaison aux typologies de structures que nous avons pu voir précédemment. Les panneaux photovoltaïques souples associés aux membranes tendues sont composés d'éléments plus fragiles que les panneaux photovoltaïques classiques, ce qui ajoute une limite supplémentaire sur ce plan.

L'aspect durabilité (II) en est également impacté. Les textiles exposés au soleil, à la pluie ou aux variations thermiques se dégradent avec le temps. Une maintenance régulière est nécessaire, notamment pour prévenir les effets des UV, de l'humidité, des moisissures ou de l'abrasion aux points de contact. Même les textiles techniques les plus performants présentent une durée de vie limitée, en particulier lorsqu'ils sont soumis à des cycles répétés de montage, démontage et stockage.

Concernant la modularité (III), les membranes textiles sont relativement limitées : leur forme dépend de lois physiques et des points d'ancrage, ce qui rend leur forme difficile à modifier ou à adapter sans revoir l'ensemble de la structure.¹⁰³ Malgré ses limites en termes de *form finding*, il existe néanmoins une certaine variété de formes exploitables selon l'organisation des nervures de la membrane et les points d'appuis de la structure porteuse (figure 77).

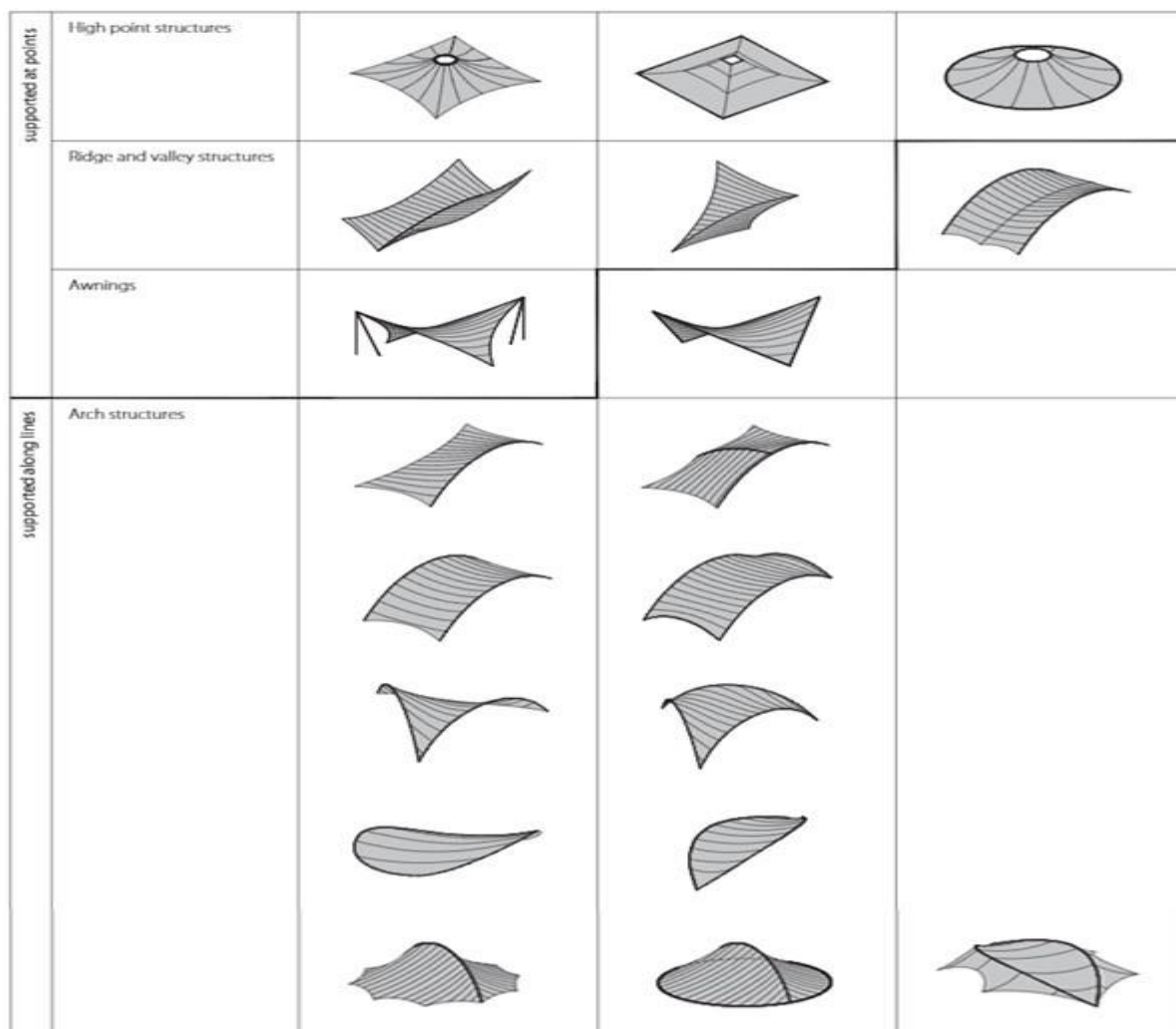


Figure 77: Typologie des structures à membrane textile : types de base selon leur forme et leur mode de soutien- Michael Seidel

¹⁰³ LEYRAL, Marc, *Faire tenir. Structure et architecture*, Paris, Éditions de La Villette, 2021, p. 266.

En termes de coûts (||), les membranes tissues restent abordables. La fabrication est en général peu coûteuse par rapport aux autres typologies de la classification. Elles sont souvent compatibles avec des matériaux locaux ou recyclés, dont l'assemblage est réalisable sans outillage lourd. L'utilisation de certains types de textiles techniques et de panneaux photovoltaïques souples peuvent cependant faire défaut sur ce critère.

Enfin, la flexibilité d'usage (||) est un dernier point acceptable de la typologie. Les membranes peuvent servir de tentes, de toitures, de parois, d'enveloppes ou d'ombrières, avec une capacité d'adaptation à une certaine variété de contextes mais restent dépendantes de leurs structures portantes pouvant limiter leur polyvalence.

Les membranes textiles tendues se distinguent donc avant tout par leur légèreté, leur compacité et leur rapidité de déploiement, trois qualités essentielles pour des usages temporaires ou mobiles. Leur capacité à être pliées, transportées et installées sans outillage lourd en fait une solution adaptée à des contextes d'urgence.

Ces qualités ont déjà été exploitées dans des projets concrets, comme ceux menés par l'armée américaine. Depuis 2010, plusieurs systèmes de membranes textile photovoltaïques, comme



celui illustré en [figure 78](#), ont été déployés en zones de conflit ou de crise humanitaire (Afghanistan, Djibouti).¹⁰⁴ Ces structures souples ont montré une production électrique variable entre 200 W et 3 kW, tout en remplissant une fonction d'abri. L'objectif est d'assurer un apport énergétique pour des petits groupes afin de remplir des besoins en termes de communications, d'éclairage ou d'équipements médicaux de base, sans recours aux générateurs carburant.

Figure 78: Tente militaire avec auvent « Power Shade » à membrane textile tendue intégrant des panneaux solaires flexibles développée par l'armée américaine pour les zones isolées.

Ces exemples confirment la viabilité des membranes textiles tendues comme supports d'infrastructures énergétiques mobiles dans des contextes d'urgence. Cependant, ceci s'accompagne tout de même de certaines limites. La fragilité structurelle et la durabilité réduite face aux intempéries, limitent leur usage sur le long terme ou dans des environnements extrêmes.

¹⁰⁴ Army News Service, « Army Evaluating Transportable Solar-Powered Tents », *U.S. Army*, 8 décembre 2010, consulté le 10 juin 2021 sur : https://www.army.mil/article/49138/army_evaluating_transportable_solar_powered_tents.

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

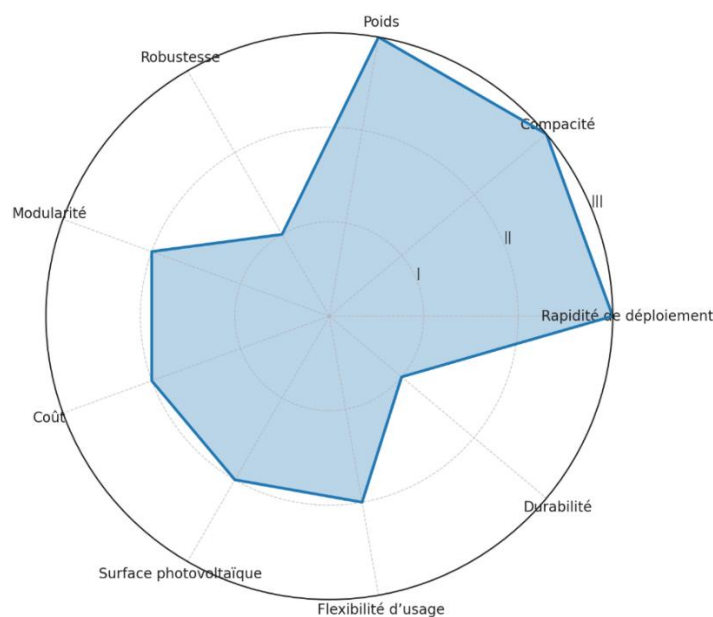


Figure 79: Graphique radar ; Membranes tendues – textiles.

3.1.4.11. Membranes tendues – Pneumatique (Tensioned Membrane – Pneumatic)

Les structures à membranes pneumatiques représentent la seule morphologie continue déformable de la classification. Elles se caractérisent par l'utilisation de surfaces souples continues exploitant la pression d'air pour maintenir leur forme et assurer leur stabilité. Cette catégorie se distingue des membranes textiles par une géométrie synclastique (figure 80), la tension étant générée par la pression interne plutôt que par des points d'ancrage. L'équilibre résulte de la relation pression-tension dans l'enveloppe, menant à des formes principalement sphériques ou cylindriques.

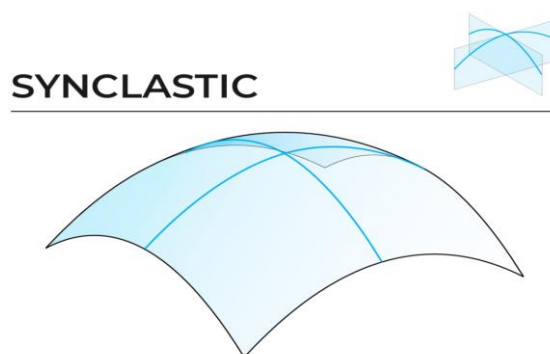


Figure 80: Schéma de surface synclastique, dont les centres de courbure se trouvent du même côté de la surface.

Hanaor & Levy distinguent à nouveau deux catégories :

- Les systèmes à basse pression¹⁰⁵ : Ils comprennent les structures à support d'air, constituées d'une membrane unique maintenue en forme par une pression d'air constante, légèrement

¹⁰⁵ « Low pressure » dans la classification d'Hanaor & Levy

supérieure à la pression atmosphérique ¹⁰⁶. La stabilité dépend du maintien de cette pression (figure 81), ce qui nécessite des dispositifs pour éviter les pertes d'air.

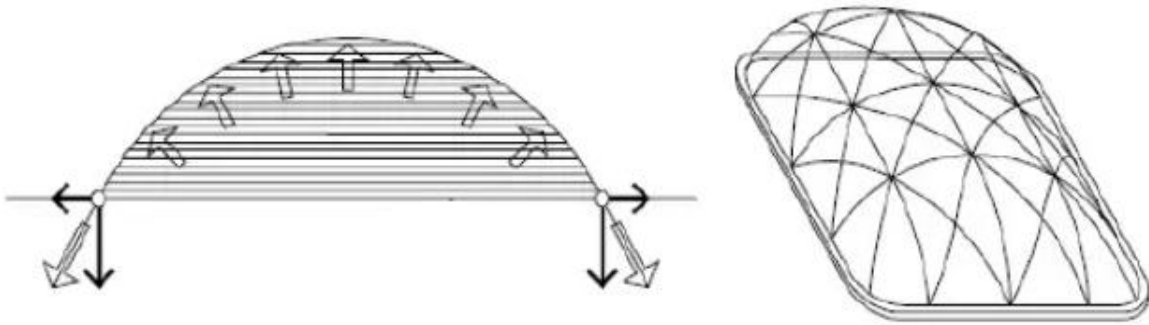


Figure 81: Principe de fonctionnement d'une structure pneumatique basse pression avec maintien de pression interne.

- Les systèmes à haute pression¹⁰⁷ : Ils utilisent des éléments pneumatiques individuels, comme éléments porteurs où l'air est emprisonné à l'intérieur des membranes. Ces systèmes ne dépendent pas d'un maintien constant de la pression de l'espace, et conservent donc leur forme en cas d'ouverture vers l'extérieur (figure 82).

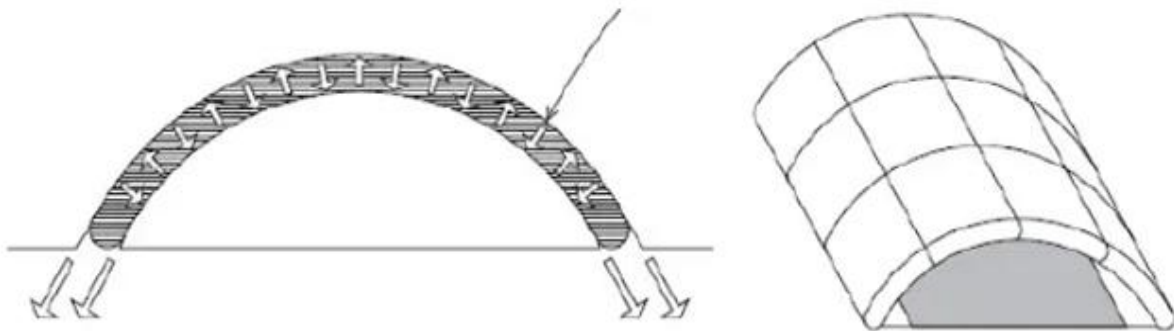


Figure 82: Structure haute pression utilisant des éléments gonflés comme ossature porteuse.

La rapidité de déploiement (|||) de ces systèmes constitue l'atout majeur. Ils peuvent être déployés en quelques minutes grâce à des compresseurs ou pompes électriques portables. Les structures haute pression conservent leur forme une fois mises en place et permettent donc l'utilisation de l'énergie disponible à d'autres fins.

Le poids (|||) reste à nouveau un avantage notable. Les enveloppes pneumatiques utilisent des matériaux similaires aux membranes textiles (PVC, TPU, etc.). Les membranes sont légèrement plus épaisses pour assurer l'étanchéité mais ne dépendent pas de structure secondaire. Le

¹⁰⁶ RICHES, C. G., et GOSLING, P. D., « Pneumatic Structures: A Review of Concepts, Applications and Analytical Methods », Department of Civil Engineering, University of Newcastle-upon-Tyne, 1975, p. 3.

¹⁰⁷ « High pressure » dans la classification d'Hanaor & Levy

système de gonflage (compresseur, régulateur) ajoute du poids au système mais reste généralement acceptable pour des applications mobiles.

En ce qui concerne la compacité (|||), cette typologie également l'une des plus performante de la classification. La structure pneumatique dégonflée occupe un volume minimal, largement inférieur à son volume déployé. Cette caractéristique en fait une solution de choix pour des moyens restreints en termes de stockage et de transport.

Ces avantages se font à nouveau au détriment de la robustesse (|). Les membranes pneumatiques présentent des performances variables selon le type de structure mais restent dans tous les cas très vulnérables aux forces externes et aux perforations qui constituent des points critiques en zone sinistrées. Ceci dépendra évidemment du matériau utilisé, par exemple les films en ETFE sont réputés pour leur grande résistance mais restent utilisés dans des conditions climatiques modérées.¹⁰⁸

L'aspect durabilité (|) est quant à lui influencé par plusieurs facteurs spécifiques. L'étanchéité de l'enveloppe est cruciale et se dégrade avec le temps, particulièrement aux jonctions et points de sollicitation. La dépendance à un système de gonflage fonctionnel constitue un facteur de maintenance supplémentaire, en particulier pour les systèmes basse pression, avec des risques de défaillance des composants mécaniques (compresseurs, valves, régulateurs).

Sur le plan de la surface disponible pour les panneaux photovoltaïques (||), la typologie présente certaines limites. La courbure des surfaces pneumatiques et leur souplesse rendent difficile l'installation de panneaux rigides. Cependant, des solutions avec films photovoltaïques flexibles ou des panneaux souples (figure 83), similaires à ceux que nous avons pu voir pour les membranes textiles, restent envisageables mais avec des performances énergétiques réduites et des contraintes d'installation spécifiques liées à la pression et aux déformations.

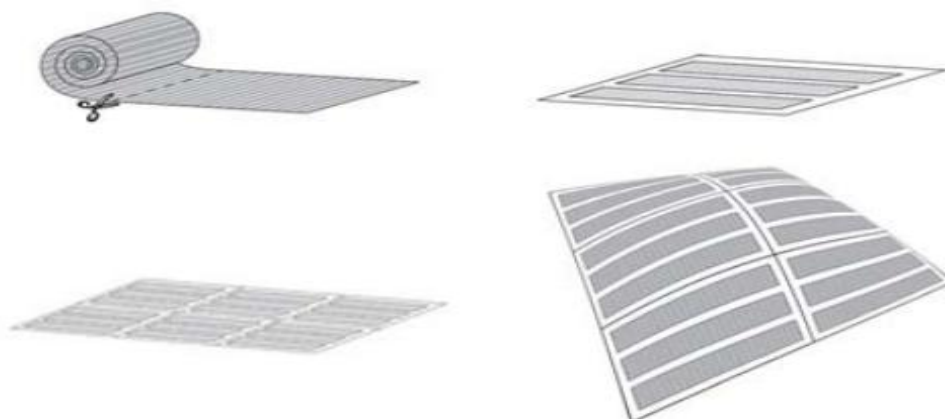


Figure 83: Structures pneumatiques avec photovoltaïque flexible : a) Rouleau de film photovoltaïque ; b) Modules laminés ; c) Laminés assemblés ; d) Forme synclastique d'une structure membranaire photovoltaïque.

Quant à la modularité (|), elle reste également limitée par les contraintes physiques du système. La forme des structures pneumatiques est déterminée par l'équilibre pression-tension dans

¹⁰⁸ MORITZ, K., et HAFNER, A., « Transparency Carried by Air – Pneumatic ETFE-Foil Cushion Technology », communication présentée à la conférence NASSC 2010 – North American Steel Construction Conference, mai 2010.

l'enveloppe, ce qui limite les possibilités d'adaptation géométrique¹⁰⁹. Il existe tout de même des catégories de bases (figure 84) exploitables dans la quête de formes plus ou moins variables.

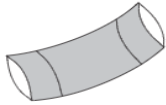
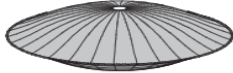
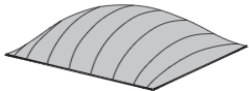
supported by air from underneath or top	Element pillow structures			
	Large pillow structures			
	Hall structures			

Figure 84: Typologie des structures à membrane pneumatiques : types de base selon leur forme et leur mode de soutien- Michael Seidel

Le coût (||) présente des aspects contrastés. Le coût initial des enveloppes reste modéré, mais les systèmes de gonflage, de régulation et de sécurité représentent un investissement supplémentaire. Les coûts opérationnels incluent également un coût énergétique notamment dans le cas des systèmes basse pression.

La flexibilité d'usage (||) constitue un dernier point appréciable. Les structures pneumatiques peuvent s'adapter à diverses fonctions : abris temporaires, espaces de stockage, structures d'accueil, ou même dans certains cas de configurations à haute pression permettent la mise en place de poutres gonflables utilisables comme ponts provisoires¹¹⁰.

À ce jour, aucun projet de terrain lié au déploiement des panneaux solaires gonflables en contexte d’urgence n’est apparu. Cependant, des exemples laissent croire que le concept pourrait être viable pour aller dans ce sens, notamment à travers des démonstrateurs tels que celui présenté figure 85, qui illustrent la faisabilité technique de l’intégration photovoltaïque dans des membranes pneumatiques.



Figure 85 : Système pv flexible associant des cellules photovoltaïques à des membranes translucides en PTFE et transparentes en ETFE dans le cadre d'un prototype intégré à un bâtiment. ; a) Vue extérieure. ; b) Vue intérieure.

¹⁰⁹ DU, Chaoyu, WANG, Ziqi, VAN MELE, Tom, et BLOCK, Philippe, « Design of Restrained Pneumatic Formwork – Inverse Form Finding and Materialisation for Free Form Geometries », communication présentée au Symposium IASS 2024 – Redefining the Art of Structural Design, Zurich, Suisse, août 2024, p. 26-30.

¹¹⁰ Voir « Tensairité »

Parallèlement, une série de projets ont été menés afin de déployer des abris temporaires gonflables dans des contextes familiers à ceux traités par cette étude. Ces abris bénéficient d'une certaine autonomie grâce à l'installation de panneaux photovoltaïques souples sur leur membrane comme nous pouvons le voir sur la [figure 86](#) avec le projet SSI shelter de O&H visant à fournir électricité et éclairage dans des camps de réfugiés.



Figure 86: a) Visualisation du module pneumatique photovoltaïque. ; b) Module taille réelle en cours de déploiement

Pour conclure, le projet *Lightweight Inflatable Solar Array (LISA)*¹¹¹, mené par la NASA en 2015, vise quant à lui à créer des panneaux solaires déployables, légers et repliables sur une structure gonflable. Le seul but ici étant de générer de l'énergie à partir de rayons solaires pour alimenter des équipements précis. ([figure 87](#)).

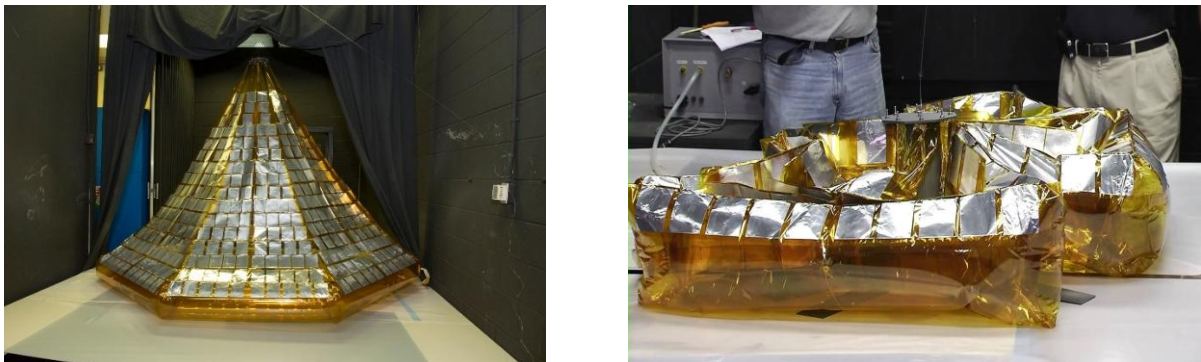


Figure 87: a) Prototype en phase dépliée de la structure gonflable solaire déployable du projet LISA. ; b) Module replié en configuration de transport, illustrant la compacité du système.

¹¹¹ NASA. « Inflatable Solar Array Technology Packs Incredible Power in Small Package ». *NASA Marshall Space Flight Center*, publié le 4 août 2015. Consulté le 10 juin 2025 sur ; <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/inflatable-solar-array-technology-packs-incredible-power-in-small-package/>

La synthèse des critères évalués est illustrée sur le schéma radar qui suit, mettant en évidence les forces et les faiblesses relatives de la typologie :

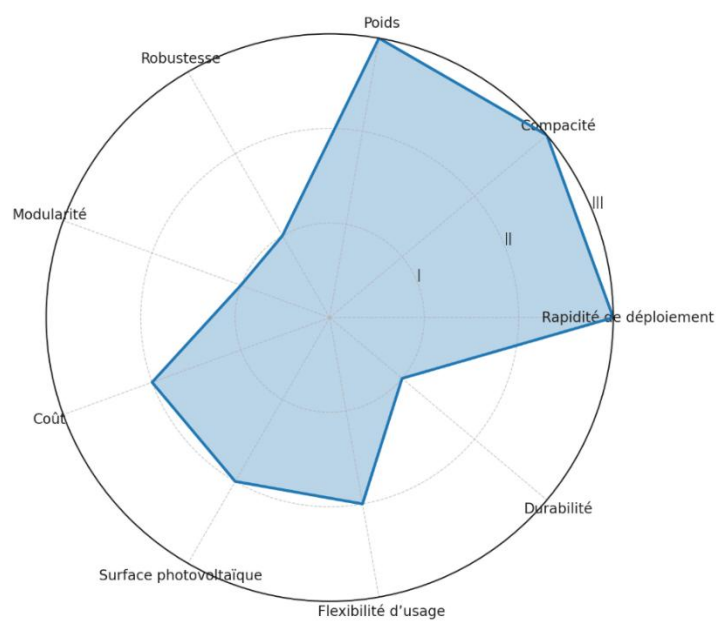


Figure 88: Graphique radar ; Membranes tendues – pneumatique

3.1.5. Tableau synthétique

		Rapidité (3)		Poids (3)		Compacité (3)		Robustesse (3)	
Structures treillis et ossatures	Liens rigides	Grilles à simple nappe – Ciseaux (Single layer grid – Cissors)	III	II	II	II			
		Grilles à double nappe – Ciseaux (Double layer grid – Cissors)	II	II	II	III			
		Structures axiales – Ciseaux (Spine – Cissors)	III	II	I	II			
		Grilles à simple nappe – Barres (Single layer grid – Bars)	I	II	I	II			
		Grilles à double nappe – Barres (Double layer grid – Bars)	I	II	I	III			
		Structures axiales – Barres (Spine – Bars)	I	II	I	II			
	Déformable	Structures barres et câbles (Strut-cable systems)	II	III	III	II			
	Structures continues et membranes	Liens rigides	Surfaces pliées (Folded plates)	II	I	II	III		
			Surfaces courbées (Curved surface)	I	I	I	III		
Déformable		Membranes tendues - Tissu (Tensioned membrane – Fabric)	III	III	III	I			
		Membranes tendues - Pneumatique (Tensioned membrane – Pneumatic)	III	III	III	I			

Durabilité (2)		Surface PV (2)		Coût (2)		Modularité (1)		Flexibilité d'usage (1)		Total pondéré (X)
—		—		—		—		—		41
—		—		—		—		—		42
—		—		—		—		—		41
—		—		—		—		—		35
—		—		—		—		—		37
—		—		—		—		—		34
—		—		—		—		—		44
—		—		—		—		—		42
—		—		—		—		—		36
—		—		—		—		—		44
—		—		—		—		—		43

3.2. Discussion des résultats

Cette section vise à examiner plus en détail les typologies les mieux notées. La figure ci-dessous synthétise les performances globales pondérées des différents modèles évalués dans la section précédente. Les scores finaux permettent de les classer, de la plus à la moins adaptée, selon les critères définis.

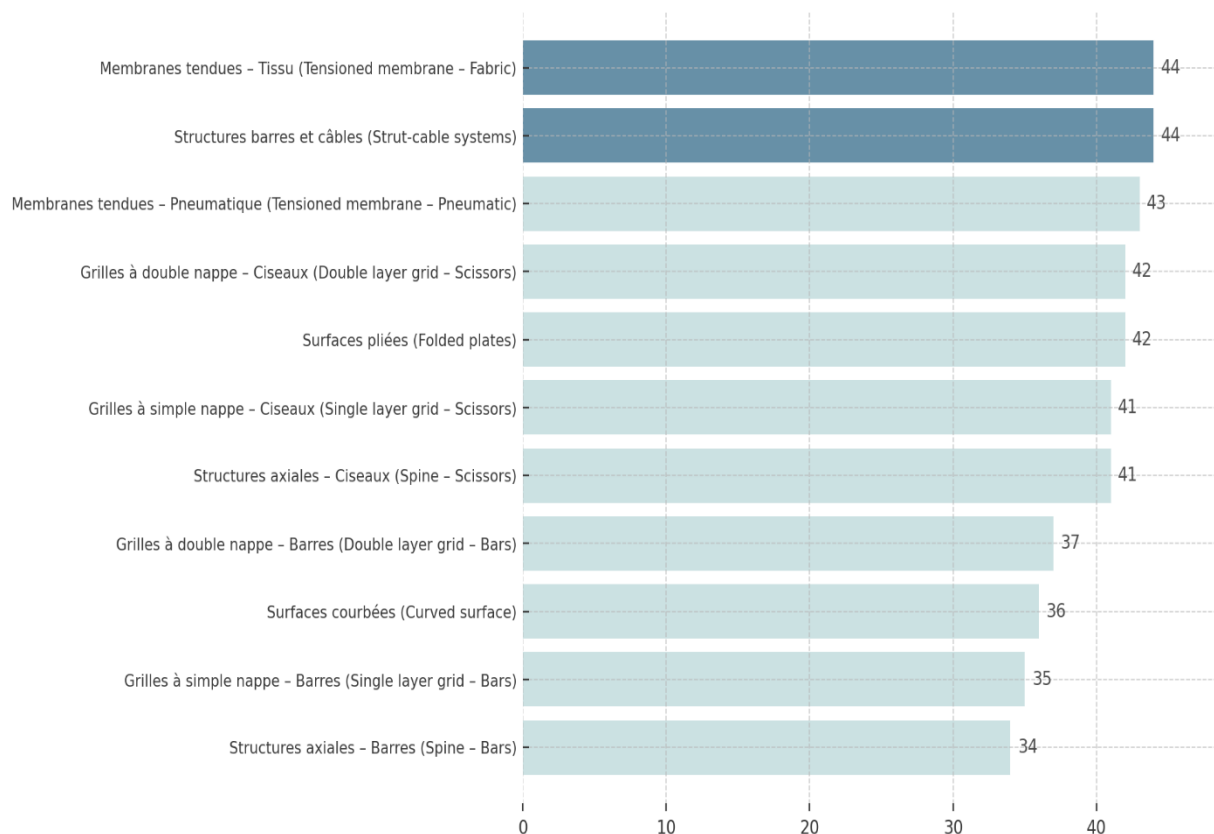


Figure 89 : Classement comparatif des typologies selon leur score global pondéré

Les membranes tendues et les structures à barres et câbles se distinguent avec un score identique de 44. Ce résultat montre qu'elles affichent des performances globales proches, mais cela ne signifie pas pour autant qu'elles offrent les mêmes atouts sur le terrain. Chacune possède ses spécificités, qui peuvent faire la différence selon les conditions d'intervention et l'usage visé. Il pourrait alors être intéressant d'approfondir l'analyse afin de déterminer si ces deux solutions, ou l'une plus que l'autre, répondent mieux au contexte précis porté par les objectifs spécifiques de cette étude.

Pour rappel, ces objectifs visent à identifier des systèmes facilement déployables par les acteurs de terrain, afin de garantir un accès rapide à l'énergie dans les toutes premières phases d'intervention. Cette énergie doit notamment permettre l'alimentation d'un centre de santé provisoire de catégorie 2 en zone sinistrée, pour répondre aux besoins médicaux immédiats.

L'analyse complémentaire qui va suivre s'attache donc à dépasser les critères généraux définis par les acteurs humanitaires, en examinant les écarts pratiques entre ces deux typologies dans la perspective des objectifs spécifiques à cette étude (cf.1.4. Objectifs). Elle s'appuie non seulement sur des ressources théoriques, mais aussi sur un regard critique nourri par une familiarité préalable avec l'expérimentation pratique des structures à barres et câbles, acquise au cours des travaux menés durant mon cursus (cf. Avant-propos).

3.2.1. Ecart pratiques

Comme nous avons pu le voir, ces deux typologies reposent sur un principe structurel d'équilibre entre traction et compression. La membrane, comme les câbles, travaille en tension, tandis que les éléments rigides qui assurent leur stabilité travaillent en compression. Cette logique constructive souple permet une économie de matière et explique les scores particulièrement élevés obtenus sur des critères déterminants tels que le poids et la compacité.

Malgré cette parenté et des performances théoriques similaires, leurs caractéristiques pratiques divergent sur plusieurs points. Le premier apparaît dès la phase de déploiement. La plupart des systèmes à membranes tendues peuvent être installés de manière relativement intuitive, avec peu d'équipement et une technicité nécessitant peu voire aucune formation préalable. Certains modèles comme les tentes « igloo » sont d'ailleurs bien connus du grand public pour leur montage simple dans des contextes variés.

Les structures à barres et câbles, en revanche, sont beaucoup moins répandues. Leur mise en place exige une tension rigoureuse pour un équilibrage précis des efforts et donc une bonne compréhension du fonctionnement global. Elles nécessitent une main d'œuvre qualifiée et des outils de réglage spécifiques, plus difficiles à mobiliser sur le terrain. Cette complexité explique en grande partie pourquoi leur usage reste limité à des secteurs spécialisés, comme l'aérospatial, où plusieurs projets d'antennes ou de réflecteurs, mentionnés plus tôt, ont été déployés avec succès.

Un autre écart concerne leur comportement en cas de dégradation. Bien qu'elles obtiennent un score légèrement inférieur en robustesse et durabilité, les membranes présentent une certaine résilience sur le terrain. Dans certaines limites, elles peuvent continuer à remplir leur fonction même lorsqu'elles sont usées, perforées ou partiellement sectionnées. Une déchirure localisée peut être réparée par un simple rapiécage, et un joint endommagé peut être ressoudé sur place pour rétablir l'intégrité de la surface.¹¹²

À l'inverse, dans un système à barres et câbles, la rupture d'un seul élément ou le relâchement d'un point de tension peut compromettre l'ensemble de la structure, voire provoquer son effondrement. Cette vulnérabilité a été observée non seulement en théorie, mais aussi lors de travaux pratiques réalisés au cours de mon cursus (cf. Avant-propos) sur le développement d'un pavillon en tensegrité (figure 72 a). L'un des modules de base avait cédé brutalement à la rupture d'un élément en tension entraînant l'effondrement immédiat de la maquette (figure 72c).

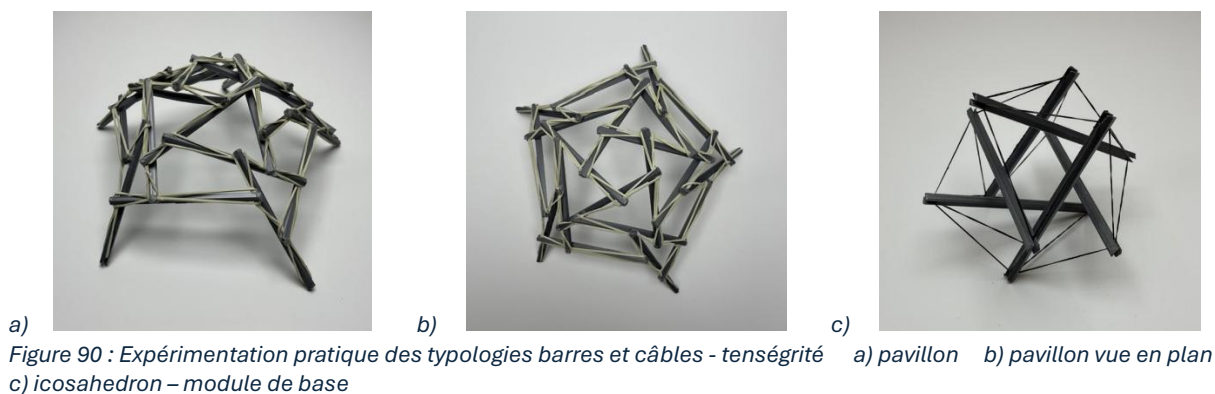


Figure 90 : Expérimentation pratique des typologies barres et câbles - tensegrité a) pavillon b) pavillon vue en plan c) icosaèdre - module de base

¹¹² YAP, Steven, « Tears in Tensile Membranes: Don't Panic, Here's What You Need to Know », *Tensile Fabric Structure*, 19 mai 2024, consulté le 5 août 2025 sur : <https://temembrane.com/what-happen-to-tears-in-tensile-membranes-dont-panic-heres-what-you-need-to-know>.

Bien que les composants de cette typologie soient plus robustes et durables que les tissus en tension, les réparations restent complexes et impossibles à effectuer sur site, ce qui limite leur résilience en situation d'intervention.

Cela dit, il ne faut pas oublier que les typologies à barres et câbles présentent aussi plusieurs atouts qui peuvent s'avérer plus pratiques dans certains contextes d'utilisation. Même si une réparation sur le terrain reste compliquée, leur robustesse structurelle leur permet de mieux résister aux sollicitations mécaniques que les membranes sur le long terme. Elles peuvent supporter des charges bien plus conséquentes, là où le tissu risque de se déformer, de se détendre ou de se déchirer sous l'effet d'un poids localisé.

Bien que leur installation soit plus exigeante, leur aptitude à rester stable dans des environnements difficiles peut rendre leur adoption plus pertinente dans certains scénarios. Le projet « La mer pour tous » illustre plutôt bien ce dernier point où des systèmes en tenségrité sont déployables en milieu maritime durant l'été afin de permettre l'accès et l'immersion en toute autonomie des personnes à mobilité réduite. Ce type d'application avait déjà été identifié comme référence dans mes travaux précédents portant sur le déploiement d'abris temporaires en zones inondées, illustrant en [figure 73](#) la capacité de ces structures à conserver leur intégrité même dans des environnements contraignants.



Figure 91 : Adaptation d'abris déployables en tenségrité dans des conditions de zone inondée. Collage personnel sur base des travaux de Riddhi Oswal

3.2.2. Pertinence contextuelle

L'analyse des écarts pratiques permet de mieux comprendre comment les spécificités de chaque typologie influencent leur utilisation en situation réelle, en fonction de la temporalité, des objectifs, et de la situation de l'intervention.

Dans le cadre de la temporalité d'intervention, qu'elle soit urgente ou temporaire (cf. 2.1.3.3. Architecture d'urgence) c'est-à-dire lors des premières phases suivant une catastrophe, la rapidité de déploiement et la facilité de mise en œuvre priment. Les membranes tendues sont alors les plus aptes à répondre à cette temporalité.

À l'inverse, lorsque la durée d'occupation prévue dépasse cette phase initiale, notamment pour des installations transitoires ou progressives (cf. 2.1.3.3. Architecture d'urgence), les systèmes à barres et câbles présentent un meilleur potentiel. Les matériaux qui les composent sont plus robustes et leur stabilité se maintient dans le temps même sous l'effet de charges variables.

En tenant compte des objectifs visés par l'action humanitaire, le choix de la typologie dépend aussi des usages prévus pour la structure. Si ceux-ci doivent impliquer le support d'équipements

spécifiques lourds, les systèmes à barres et câbles offrent une base plus fiable pour intégrer ces charges supplémentaires et résister à des contraintes mécaniques plus élevées.

Les membranes tendues, en revanche, se prêtent mieux à des objectifs moins exigeants centrés sur la création rapide d'un espace fonctionnel ou le support d'équipement légers.

La situation de déploiement constitue également un facteur déterminant. Dans des environnements tels que des zones inondables ou enneigées, les structures à barres et câbles semblent plus aptes à maintenir leur intégrité offrant ainsi une solution plus fiable.

En ce qui concerne les membranes tendues, elles sont plus pertinentes dans des contextes où le relief est accessible et où les conditions climatiques restent modérées, par exemple en zones arides à faible humidité ou dans des régions tempérées sans vents violents ni fortes chutes de neige.

3.2.3. Sélection finale

L'examen combiné des écarts pratiques et de la pertinence selon le contexte montre que, malgré un score identique dans l'évaluation multicritère, les membranes tendues et structures à barres et câbles répondent à des logiques d'usage différentes.

Dans le cadre défini par ce travail dont les objectifs sont d'assurer au plus vite l'alimentation en zone sinistrée notamment pour répondre aux besoins d'un centre de santé provisoire, les impératifs de rapidité de déploiement, de simplicité de mise en œuvre et de résilience sur site orientent clairement la sélection vers les membranes tendues. Les scénarios considérés portent principalement sur des zones présentant des conditions climatiques chaudes à tempérées, avec des niveaux d'humidité modérés et des contraintes météorologiques compatibles avec ce type de structure, telles que celles rencontrées dans de nombreuses régions d'intervention humanitaire actuelles (cf. 2.1.1. Pourquoi le solaire ?).

Cela ne remet pas en cause l'intérêt des systèmes à barres et câbles dans d'autres configurations, notamment pour des occupations prolongées, des supports de charges importantes ou des environnements particulièrement contraignants. Cette typologie pourrait d'ailleurs répondre à certaines problématiques spécifiques évoquées par les secteurs d'urgence et documentées en annexe.

Les membranes tendues sont donc retenues comme la typologie la plus adaptée au contexte étudié. Cette identification constitue une étape clé car elle ouvre désormais la voie à une analyse approfondie d'une seule typologie visant à comprendre pourquoi, malgré sa pertinence, elle n'est que très peu mobilisées comme réponse à la problématique énergétique traité dans ce mémoire.

3.3. Membranes tendues

La section qui suit s'attache à examiner cet écart entre pertinence théorique et usage réel, non pas de façon générale, mais à partir d'une analyse ciblée sur l'intégration des systèmes photovoltaïques aux membranes tendues.

Elle commence par l'étude de cas concrets de module à membrane souple photovoltaïque déjà commercialisé, d'abord sélectionné pour leur pertinence logistique puis analysés sur leurs performances énergétiques. Ces performances sont simulées en condition réelles à l'aide de l'outil PVGIS ¹¹³ développé par le centre commun de recherche de la Commission européenne, qui permet d'estimer la production potentielle de systèmes photovoltaïques en fonction des données climatiques et géographiques, ici utilisé sur un site d'intervention humanitaire du conflit israélo-palestinien actuel (figure 92). Les résultats sont confrontés aux besoins des structures médicales mobiles afin de déterminer si ces modules sont capables de répondre aux objectifs énergétiques d'un centre de catégorie 2.

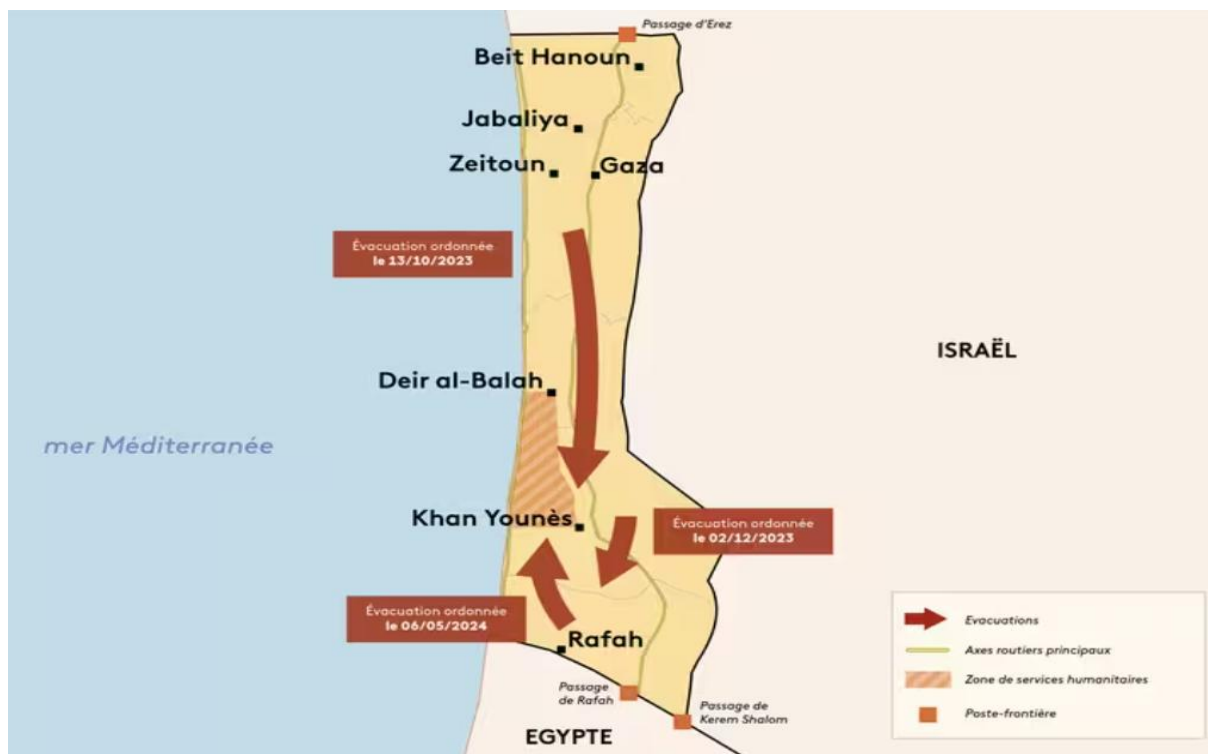


Figure 92 : Carte du territoire de Gaza et zones d'intervention humanitaire.

Vient ensuite le dimensionnement opérationnel qui estime la surface et la masse de panneaux photovoltaïques souples sur membrane qui serait alors nécessaire pour couvrir ces besoins selon les différentes catégories de centres de santé, tout en évaluant l'impact logistique et les contraintes d'intégration sur des membranes déployables.

¹¹³ Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), *PVGIS-PV tools*, s.d., consulté le 2 août 2025 sur : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en.

Enfin, la dernière partie explore les évolutions récentes comme leviers susceptibles d'aider les membranes tendues dans l'optimisation de production énergétique sans sacrifier leurs atouts logistiques.

En rassemblant ces données cette analyse constitue la dernière étape de cadrage avant d'engager une première esquisse conceptuelle qui tiendra compte de l'ensemble des paramètres étudiés dans ce travail pour esquisser une réponse cohérente à l'objectif principal du mémoire.

3.3.1. Etude de cas

En accord avec les avantages propres à cette typologie, certains modules existants intègrent déjà des panneaux photovoltaïques souples et sont utilisés depuis un certain temps pour répondre à des besoins énergétiques. Des modules de ce type sont aujourd'hui commercialisés notamment par la marque *Pvilion*, issue de l'entreprise *FTL Solar*, considérée aujourd'hui comme l'un des leaders du marché.

Les structures déployables légères de leur catalogue, destinées à un usage civil, offrent une puissance relativement faible de 210 W pour des dimensions de 3,05 m sur 3,66 m, avec une hauteur d'avant-toit de 3,35 m, au prix initial de 8 000 \$ l'unité.¹¹⁴ Un département de l'entreprise travaille en collaboration avec l'armée américaine pour le développement de modules photovoltaïques déployables capables de fournir davantage d'énergie pour des besoins comparables à ceux des acteurs humanitaires.

Parmi ces développements figure le *Solar Powered Integrated Structure* (SPIS), une tente photovoltaïque intégrant jusqu'à 7,6 kW de puissance et 24 kWh de stockage, conçue en 2022 pour résister à des conditions climatiques extrêmes et fournir de l'énergie en totale autonomie sur le terrain. Seulement, ces modules restent encore beaucoup trop lourds et encombrants pour être transportés facilement avec des moyens logistiques restreints (figure 93).



Figure 93 : Structure solaire déployable SPIS (Solar Powered Integrated Structure) de l'entreprise Pvilion a) installation sur site ; b) transport logistique.

¹¹⁴ Pvilion, *Lightweight Solar Canopy*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.pvilion.com/products/solar-canopies/lightweight-solar-canopy/

En 2024, il y a quelques mois à peine, *Pvilion* a bénéficié d'un financement du programme américain SBIR (*Small Business Innovation Research*) pour développer une nouvelle génération de cette structure solaire déployable SPIS (*Solar Powered Integrated Structure*).

La phase I, d'un montant de 249 759 \$, s'est déroulée de mars à octobre 2024 et visait à valider la faisabilité technique d'un module plus léger et compact.¹¹⁵ Aucun document public n'a été diffusé à ce jour sur les résultats ou les performances obtenues, probablement dû au fait qu'une phase 2 ait été lancée le 19 juillet 2024 sous la forme d'un contrat de 1,899 M \$ attribué par l'*Air Force Research Laboratory*, avec une durée prévue de deux ans.¹¹⁶

3.3.1.1. PowerMod

Parmi l'historique de *FTL Solar*¹¹⁷, on retrouve le développement de la membrane « *PowerMod* » (figure 94), utilisant des cellules photovoltaïques souples fournies par *Ascent Solar Technologies*. Ce projet, initiée en 2011 également dans le cadre militaire, se distingue par une structure déployable avec des moyens beaucoup plus légers que les autres systèmes proposés par l'entreprise, offrant ainsi un objet d'étude beaucoup plus adapté aux objectifs du mémoire.



Figure 94 : Membrane solaire déployable *PowerMod* développée par *FTL Solar*.

Sa conception permet un assemblage rapide en moins de 15 minutes par deux personnes, sans nécessiter d'outillage lourd ni de fondations permanentes. Un module mesure 6,1 m sur 6,1 m en phase déployée et pèse 75 kg, ce qui permet son transport par un petit groupe aux moyens logistiques restreints. Sa surface photovoltaïque de 12 m² affiche une puissance nominale de 1kW (85 W/m²) ce qui permettrait d'atteindre jusqu'à 4,5 kWh par jour en conditions optimales.¹¹⁸

¹¹⁵ SBIR.gov, "Award on Secure.gov website: *Pvilion* 4th generation Solar Power Integrated Structures," 15 mars 2024, consulté le 19 août 2025 sur : www.sbir.gov/awards/209396

¹¹⁶ HigherGov, « Contract FA527024P0112 – U.S. Air Force Research Laboratory », HigherGov, consulté le 19 août 2025 sur : www.highergov.com/contract/FA527024P0112

¹¹⁷ *Pvilion*, *History*, s.d., consulté le 19 août 2025 sur : www.pvilion.com/company/history

¹¹⁸ DESIGN FOR DISASTER (blog), « *PowerMod* solar tent », 21 décembre 2011, consulté le 19 août 2025 sur : www.design4disaster.org/2011/12/21/powermod-solar-tent

Afin de définir la production énergétique du module dans des conditions réelles, il a été simulé en zone de service humanitaire localisé dans la bande de Gaza :

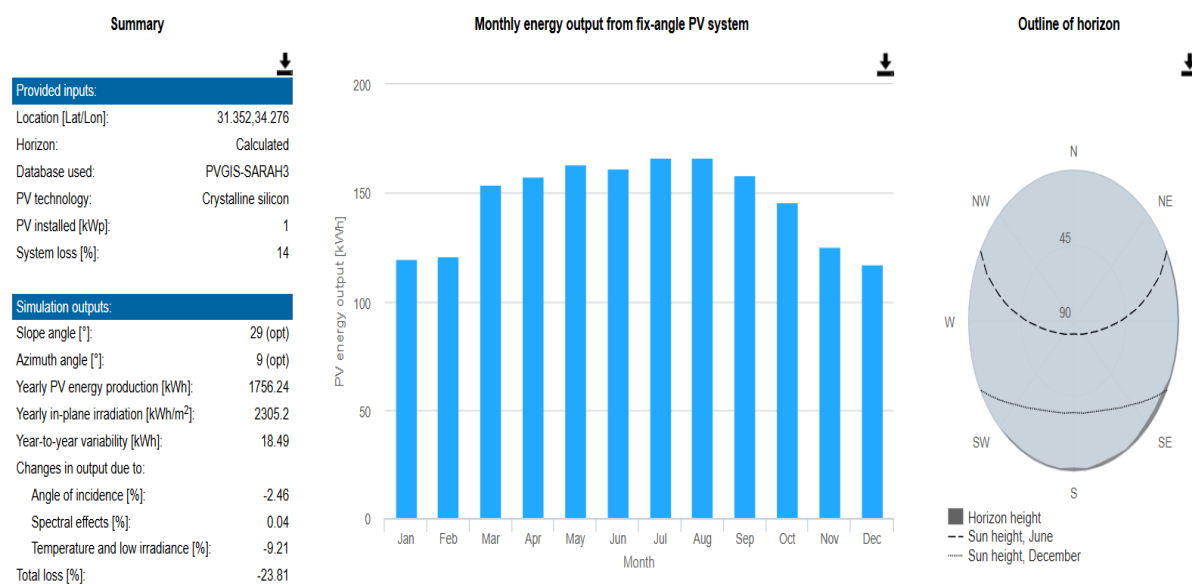


Figure 95 : Simulation de la production énergétique de PowerMod en zone humanitaire à Gaza.

Sur base des données de PVGIS (figure 95), la membrane produirait 1 756,24 kWh/an, soit une moyenne d'environ 4,8 kWh/jour. Ce rendement, obtenu dans des conditions d'ensoleillement optimales, est suffisant pour assurer l'alimentation de petits appareils électriques et des moyens de communications mais reste nettement insuffisant pour des infrastructures de santé plus exigeantes.

Pour rappel, un centre de catégorie 1 consomme jusqu'à 10,3 kWh par jour, soit environ la moitié de la demande d'un centre de catégorie 2, dont la consommation quotidienne peut atteindre 21,5 kWh. Pour les centres de catégorie 3, avec une consommation de 34,2 kWh par jour, l'écart entre les capacités réelles du module et les besoins visés est encore plus important.

Malgré sa légèreté, sa rapidité de déploiement et sa portabilité qui en font un outil pertinent, le *PowerMod* reste limité pour des missions à faible consommation énergétique, ou comme complément dans un système hybride associant plusieurs unités ou d'autres sources d'énergie.

3.3.1.2. Pure Tension

Bien que conçu pour un usage civil et sans lien direct avec *Pvilion* ou le secteur militaire, *Pure Tension* fait partie des rares projets présentant les caractéristiques clés recherchées dans cette étude. De la même façon que le module *PowerMod*, il offre un exemple intéressant pour explorer le potentiel de ce type de structure dans un contexte humanitaire.

Le *Pure Tension Pavilion* est une structure membranaire tendue, légère et rapidement déployable, faisant office de station de recharge portable. Il a été conçu par Synthesis Design + Architecture pour *Volvo Car Italia* à l'occasion du lancement de la *Volvo V60 Hybrid Electric Diesel* et présenté officiellement à Milan en octobre 2013 (figure 96).



Figure 96 : Pure Tension, structure déployée pour le lancement de la Volvo V60 Hybrid Electric Diesel

Conçu pour être rangé dans le coffre d'un véhicule, il se replie en deux caisses de transport de 1,65 m x 0,38 m x 0,38 m pour un poids total de 68 kg. Son assemblage ou son démontage complet peut être réalisé en moins d'une heure par une équipe de deux à trois personnes. Comme l'illustre la [figure 100](#), le module adopte une structure déployée de 6,3 m sur 7 m sur une hauteur de 4 m, définie par un cadre périphérique en 24 tubes d'aluminium cintrés avec des connexions à emboîtement. Sa forme est définie par des fixations en carbone ancrées au sol en trois points (voir étape 3 de la [figure 97](#)) et permet la mise en tension de l'enveloppe textile composée de deux membranes en maille polyester avec couture zippée.¹¹⁹

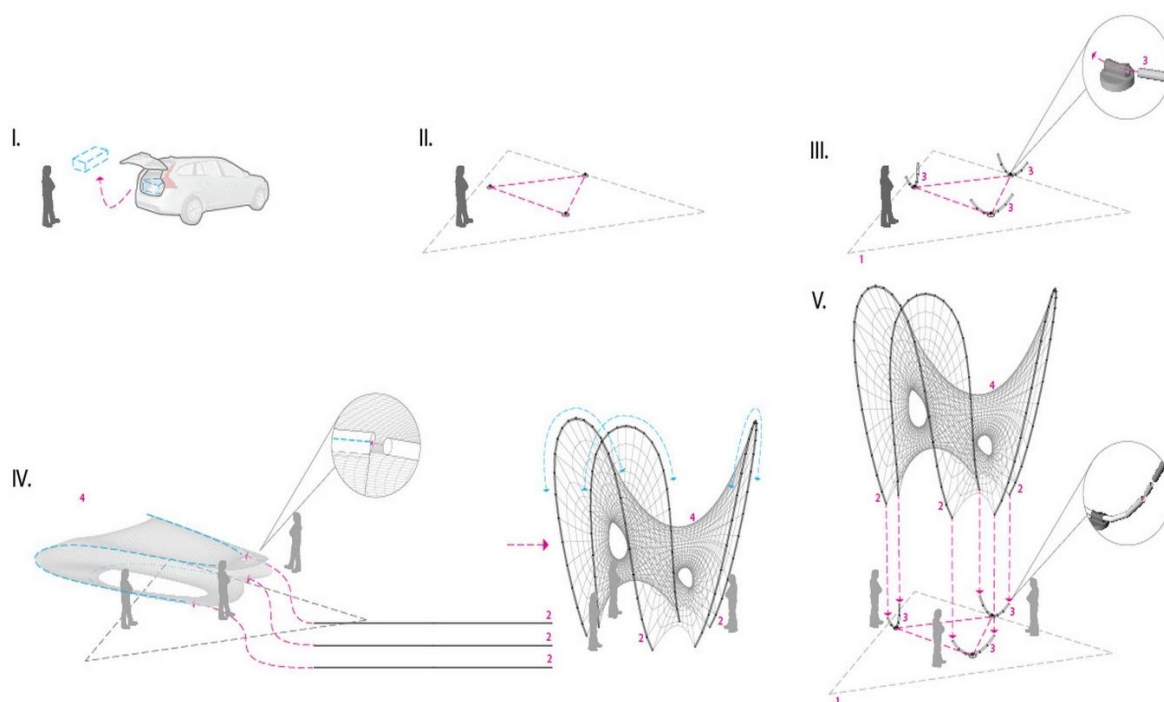


Figure 97 : Schémas d'installation de la membrane Pure Tension.

Le module intègre 252 panneaux photovoltaïques souples, répartis selon une analyse d'incidence solaire visant à optimiser la production énergétique. Cette configuration permet de générer

¹¹⁹ Synthesis Design + Architecture, *Volvo Pure Tension Pavilion*, projet présenté sur Archello, s.d., consulté le 19 août 2025 sur : www.archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion.

environ 450 W en conditions optimales, soit la possibilité de recharger complètement une batterie de voiture en environ 12 heures.

La surface exacte des panneaux photovoltaïques souples n'est pas documentée. Toutefois, il est possible d'en proposer une estimation à partir des données communiquées, en considérant un rendement typique de 10 % à 12 % pour des cellules photovoltaïques souples (cf. 2.1.2.3. Systèmes photovoltaïques) ;

Puissance totale annoncée du système : 450 W

Nombre de panneaux : 252

Puissance d'un panneau individuel :

$$P_{\text{panneau}} = \frac{450 \text{ W}}{252} \approx 1,79 \text{ W}$$

Les conditions standards d'ensoleillement¹²⁰ fixent l'irradiance à 1000 W/m².

Si l'on note η le rendement, la surface S d'un panneau se déduit de¹²¹ :

$$S = \frac{P_{\text{panneau}}}{\eta \times 1000 \text{ W/m}^2}$$

Pour un rendement de 10 % (0,10) :

$$S = \frac{1,79 \text{ W}}{0,10 \times 1000 \text{ W/m}^2} = 0,0179 \text{ m}^2$$

Pour un rendement de 12 % (0,12) :

$$S = \frac{1,79 \text{ W}}{0,12 \times 1000 \text{ W/m}^2} = 0,0149 \text{ m}^2$$

En supposant un rendement de 12 %, chaque panneau photovoltaïque souple présenterait une surface d'environ 0,0149 m² soit un format carré d'environ 12,2 cm de côté, ce qui semble cohérent avec les modules observés en [figure 98](#). Pour l'ensemble des 252 modules, la surface photovoltaïque totale atteindrait environ 3,75 m². La puissance annoncée étant de 450 W, cette surface correspond à une densité de 120 W/m², ce qui semble également très cohérent selon les performances moyennes des panneaux photovoltaïques souples (cf. 2.1.2.3. Systèmes photovoltaïques).

¹²⁰ MARKVART, Tomas, et Luis CASTANER, *Understanding Solar Photovoltaic System Performance*, Southampton, University of Southampton, 2013, p. 3.

¹²¹ Penn State College of Earth and Mineral Sciences, *Example of Efficiency Calculation*, s.d., consulté le 19 août 2025 sur : www.e-education.psu.edu/eme812/node/4

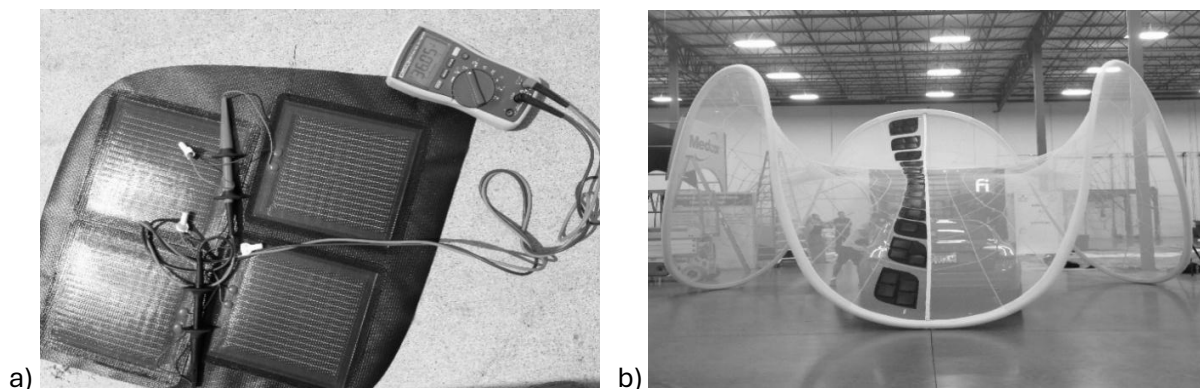


Figure 98 : Structure photovoltaïque Pure Tension a) modules photovoltaïques associé à la membrane b) installation des modules sur la membrane

Afin de comprendre ce que cela peut produire en situation réelle, le modèle a été simulé dans les mêmes conditions que le *PowerMod* :

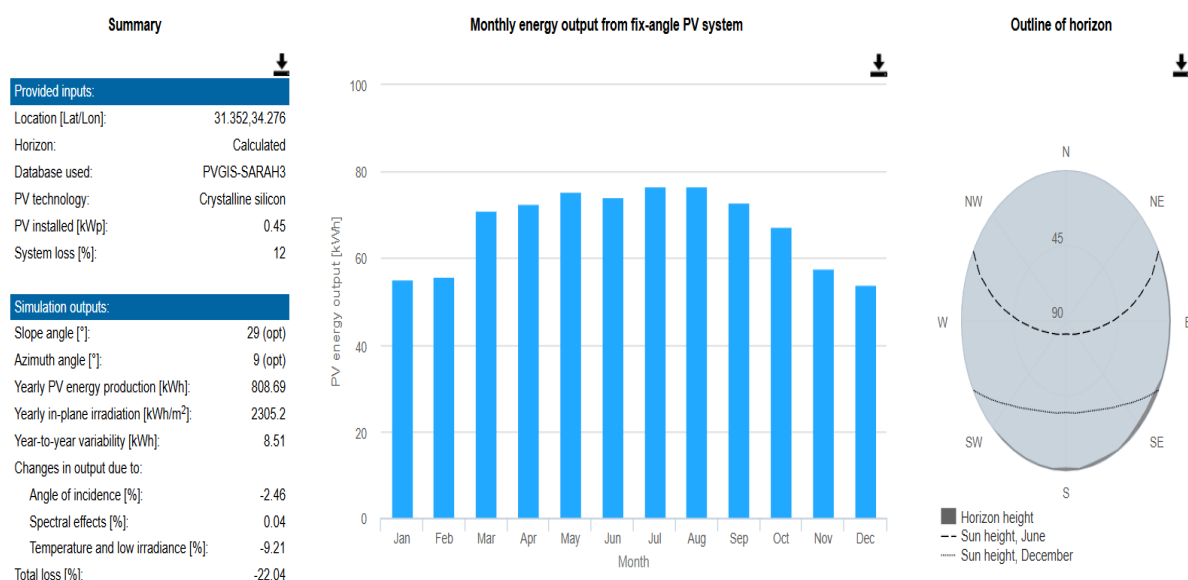


Figure 99 : Simulation de la production énergétique de Pure Tension en zone humanitaire à Gaza.

Sur base des données de PVGIS (figure 99), la membrane produirait 808,69 kWh/an, soit une moyenne d'environ 2,22 kWh/jour. Ce rendement, à nouveau obtenu dans des conditions d'ensoleillement optimales, ne suffit pas non plus à assurer l'alimentation d'infrastructures de santé. Ce résultat ne couvrirait qu'environ 21 % des besoins quotidiens d'un centre de santé de catégorie 1 (10,3 kWh/jour), 10 % pour un centre de catégorie 2 (21,5 kWh/jour) et à peine 6 % pour un centre de catégorie 3 (34,2 kWh/jour).

Ces résultats confirment que, malgré ses atouts logistiques, le Pure Tension Pavilion reste adapté uniquement à des situations où les besoins en énergie sont modestes et ne répond pas, là encore, aux exigences énergétiques visées dans ce travail.

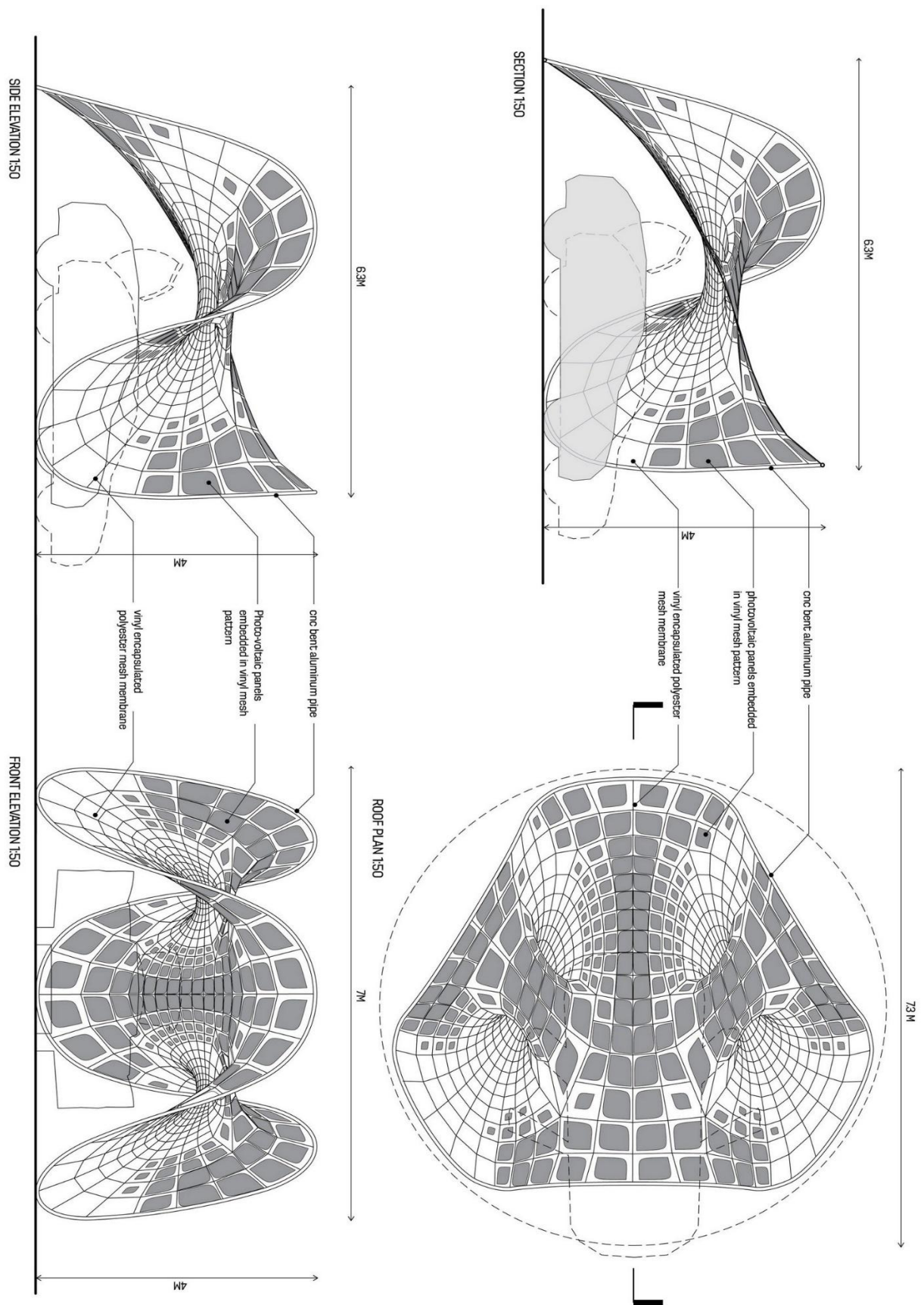


Figure 100 : Coupe, plan et élévations de la structure Pure Tension.

3.3.2. Identification des limites

Cette étude de cas met en évidence un écart important entre performance et logistique. Les solutions mobiles capables de couvrir la consommation quotidienne d'un centre de santé de catégorie 2 impliquent une logistique importante et restent aujourd'hui indissociables de moyens de transport par camion, hélicoptère ou avion.

Le manque est identifié dans les situations où les moyens sont restreints, nécessitant des modules plus légers, comme le *PowerMod* ou le *Pure Tension Pavilion* étudiés dans la section précédente. Toutefois, cette mobilité se paie par une production énergétique réduite qui s'explique par une surface photovoltaïque restreinte.

En se basant sur le module *Pure Tension* de 3,75 m² (surface pv), d'un rendement de 120 W/m² et générant 2,22 kWh/jour dans les conditions réelles simulées plus tôt, le rapport de la production journalière par la surface photovoltaïque du module ($\frac{2,22 \text{ kWh/j}}{3,75 \text{ m}^2}$) donne une production de 0,592 kWh/m²/jour.

La surface pv nécessaire pour couvrir la demande quotidienne des centres de santé atteindrait alors :

- 17,4 m² pour un centre de catégorie 1 (10,3 kWh/jour)
- 36,3 m² pour un centre de catégorie 2 (21,5 kWh/jour)
- 57,8 m² pour un centre de catégorie 3 (34,2 kWh/jour)

Ces ordres de grandeur montrent que, pour répondre pleinement aux besoins d'un centre de catégorie 2, il faudrait multiplier la surface photovoltaïque du modèle par environ 9,7, ce qui impliquerait une logistique similaire aux modules déployables plus lourds expliquant la rareté des solutions ultralégères.

Le défi réside dans la conciliation de deux paramètres antagonistes : augmenter la surface active pour atteindre les besoins énergétiques visés, mais en conservant la légèreté, la compacité et la rapidité de déploiement.

Cette limite de surface tient de l'efficacité des panneaux photovoltaïques souples.¹²² Cette perspective introduit la voie aux pistes d'évolutions récentes et futures permettant peut-être d'atteindre les objectifs souhaités.

3.3.3. Evolutions récentes comme levier d'amélioration

Le premier levier d'amélioration repose évidemment sur les matériaux de production énergétique souples. Les avancées récentes en matière de cellules flexibles ouvrent des perspectives prometteuses.

¹²² PV Magazine, « Miasolé sets new flexible CIGS efficiency record », *PV Magazine International*, 9 juillet 2019, consulté le 19 août 2025 sur : www.pv-magazine.com/2019/07/09/miasole-sets-new-flexible-cigs-efficiency-record.

Certaines études affichent des prototypes atteignant désormais des rendements dépassant les 20 %. Par exemple, l'Institut coréen de recherche sur l'énergie (KIER) a très récemment mis au point une cellule solaire tandem (pérovskite/CIGS) ultralégère et flexible atteignant un rendement record de 23,64 %, le niveau le plus élevé rapporté à ce jour pour ce type de dispositif. La cellule conserve 97,7 % de son efficacité initiale après 100 000 cycles de flexion, ce qui en fait un candidat prometteur pour une série de secteur allant du bâtiment à l'aéronautique en passant évidemment par les structures déployables.¹²³ Certaines études en cours de développement visent des rendements allant jusque 30% ¹²⁴, et permettraient de doubler voire tripler la production énergétique des membranes de même surface, sans compromis majeur sur la masse ou la compacité.

Une seconde avancée consiste à transformer l'enveloppe textile elle-même en surface photovoltaïque active. A la place d'intégrer de simples modules souvent limités sur une toile, il s'agirait de concevoir des membranes entièrement actives. Cette approche « monolithique » permettrait de maximiser le ratio de la surface photovoltaïque.

Des recherches explorent actuellement des textiles capables de produire de l'électricité tout en conservant les propriétés essentielles du tissu. ¹²⁵ Dans ce scénario, le tissu deviendrait une surface active, maximisant la zone de captation solaire.

Plus concrètement, un projet initié par l'Université Cornell, située à Ithaca dans l'état de New York, a récemment vu le jour sous le nom de *HelioSkin*¹²⁶. Il s'agit d'un prototype de membrane photovoltaïque légère, souple et à morphologie active, conçu pour s'adapter à des surfaces complexes permettant de maximiser l'exposition à la lumière. L'équipe de recherche explore les possibilités de créer des enveloppes architecturales énergétiques capables de se déformer passivement ou mécaniquement afin de suivre la course du soleil.

Développé dans le cadre du programme *Convergence accelerator* de la *National science foundation*, *HelioSkin* bénéficie d'un cadre structuré allant de l'innovation scientifique aux partenariats industriels, jusqu'aux stratégies de commercialisation. Un premier financement de 650 000 \$ a été accordé pour la phase initiale de développement, et une demande est en cours pour une seconde phase de 5 millions de dollars sur trois ans destinés au développement d'un projet pilote. Plusieurs entreprises participent au développement de ce projet : *E Ink* société américaine connue pour sa technologie d'encre électronique et basée dans le Massachusetts, et

¹²³ Park, Kyungmin. 2025. "Ultralight, Flexible Solar Cells Achieve World-Record Efficiency." Tech Xplore, 10 avril 2025. Consulté le 24 juillet 2025 sur : <https://techxplore.com/news/2025-04-ultralight-flexible-solar-cells-efficiency.html>

¹²⁴ SUN, Yinqing, LI, Faming, ZHANG, Hao, LIU, Wenzhu, WANG, Zenghui, MAO, Lin, LI, Qian, *et al.*, « Flexible perovskite/silicon monolithic tandem solar cells approaching 30% efficiency », *Nature Communications*, vol. 16, n° 1, 1er juillet 2025.

¹²⁵ SAEED, Haroon A. M., KAZIMOTO, Veronica Valerian, XU, Weilin et YANG, Hongjun, « The application of textile materials in interfacial solar steam generation for water purification and desalination », *Polymers*, vol. 16, n° 6, 2024, p. 793.

¹²⁶ NUTT, David, « Solar solutions : bio-inspired approach creates bespoke photovoltaics », *Cornell Chronicle*, Ithaca (NY), Cornell University, 20 février 2025, consulté le 2 août 2025 sur : <https://news.cornell.edu/stories/2025/02/solar-solutions-bio-inspired-approach-creates-bespoke-photovoltaics>.

Rainier Industries, fabricant d'architectures textiles et de structures tendues établi à Tukwila, dans l'État de Washington, travaillent sur l'intégration des composants photovoltaïques et des surfaces électroniques dynamiques dans des tissus architecturaux légers et extensibles. *SunFlex* entreprise spécialisée dans les solutions photovoltaïques souples et implantée en Californie, se concentre sur l'optimisation technique des prototypes, incluant câblage, capteurs et configuration des modules.

Le projet pilote illustré en [figure 101](#) prend la forme d'un auvent solaire 14 m², conçu pour assurer les besoins énergétiques d'équipements extérieurs. Bien qu'aucune information sur ses performances énergétiques n'ait été communiquée, l'intérêt réside dans la capacité du modèle à suivre les courbes d'une surface souple monolithique, épousant l'intégralité de surfaces complexes tel qu'illustré en [figure 102](#) avec une adaptation dynamique sur la membrane textile tendue.

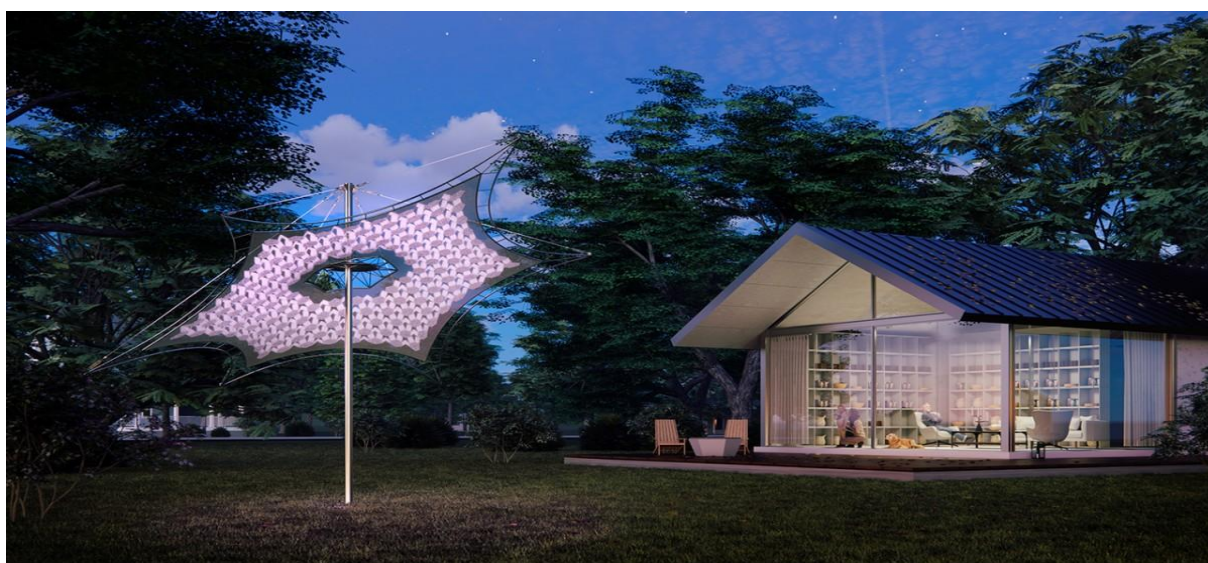


Figure 101 : Prototype du projet pilote d'un auvent solaire HelioSkin - Rendu 3D.

Celui-ci servira de tremplin vers les premières étapes de commercialisation, avec une montée en échelle dans les prochaines phases de développement destinées à des toitures légères, des structures rétractables ou des enveloppes dynamiques de bâtiments.

D'après l'équipe de développement, les analyses de marché laissent entrevoir des performances techniques et économiques compétitives par rapport aux solutions photovoltaïques actuelles. Toutefois, elles n'ont pas été communiquées publiquement et le dispositif n'a pas encore été testé en conditions réelles, laissant place à des incertitudes concernant certains points décisifs tels que sa résistance aux intempéries ou sa durabilité à long terme par exemple.

Ces pistes ouvrent des perspectives enthousiasmantes : l'amélioration des matériaux photovoltaïques flexibles et l'optimisation de la surface de captation constituent des axes de recherche porteurs. Toutefois, ils demeurent encore trop immatures pour répondre immédiatement aux exigences opérationnelles, même si l'avancement de certains projets laisse entrevoir que ces limites pourraient être franchies dans un avenir proche.

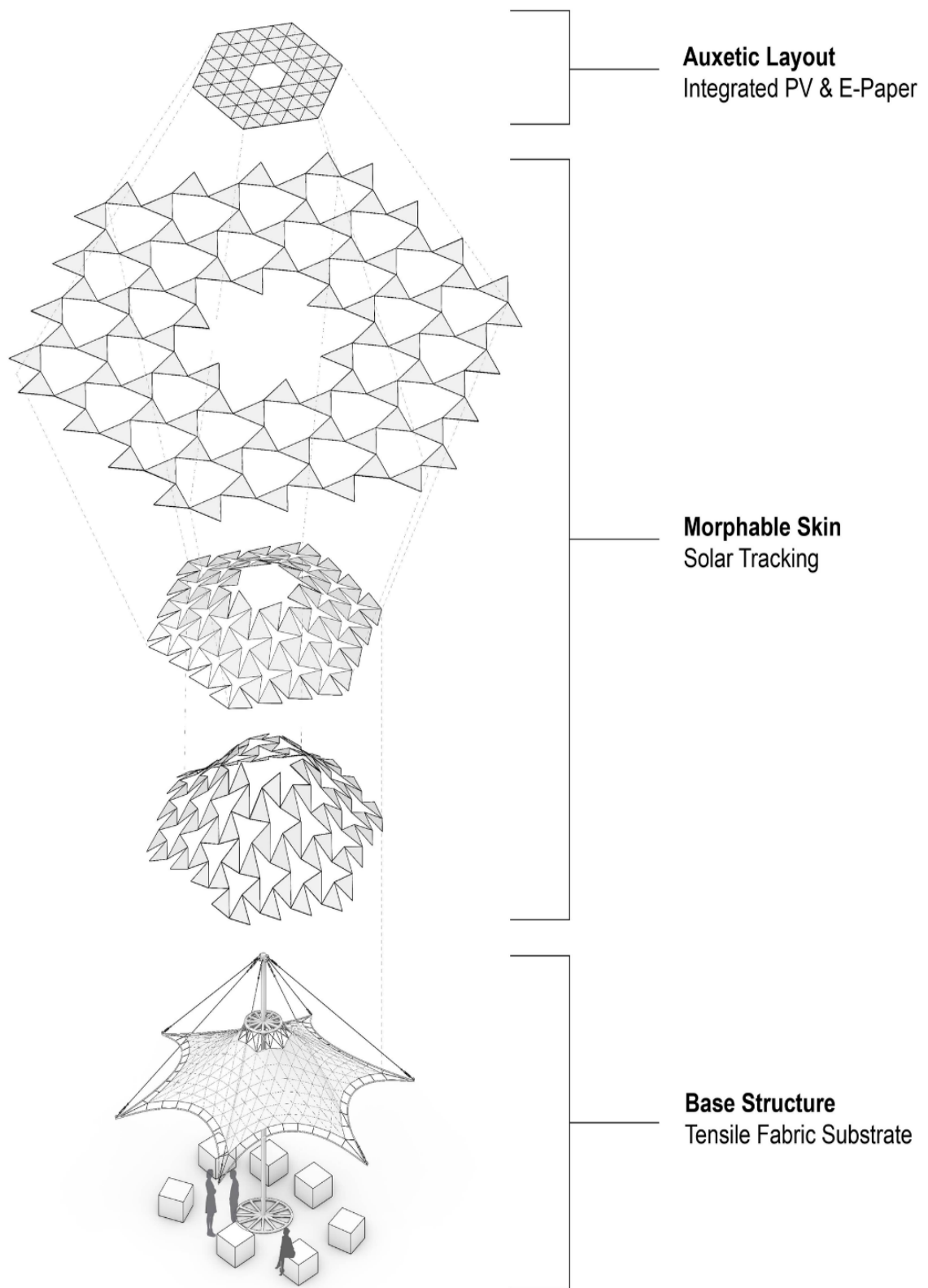


Figure 102 : Axonométrie éclaté du système HelioSkin sur une structure textile tendue.

3.3.4. Esquisse conceptuelle

Cette section présente la traduction de l'ensemble des paramètres étudiés précédemment sous la forme d'une esquisse de projet d'un module déployable à membrane tendue, pensé pour répondre aux contraintes identifiées tout au long de ce travail.

La démarche ne vise pas à figer un prototype définitif, mais à esquisser une vision conceptuelle définissant les principes structurels, fonctionnels et énergétiques d'un module. Cette base permettra, à terme, d'expérimenter sa faisabilité technique avec les moyens actuels et d'orienter d'éventuels développements ultérieurs.

3.3.4.1. Formulation des enjeux

L'objectif est de proposer une solution architecturale conciliant deux enjeux principaux : la simplicité logistique, avec un transport simple et une mise en œuvre rapide par un effectif réduit, et la production énergétique, adaptée aux besoins des acteurs humanitaires.

Pour y répondre, le projet prend la forme d'un module déployable dont la conception s'articule autour de paramètres clairement définis :

- Pour qui ? Destiné en priorité aux organisations humanitaires et aux équipes de secours d'urgence intervenant dans des contextes de catastrophes naturelles, de conflits armés ou de crises sanitaires.
- Pourquoi ? Fournir une source d'énergie autonome capable de répondre aux besoins immédiats d'un centre de santé provisoire de catégorie 2 allant de 10,6 à 21,5 kWh/jour, lorsque l'accès au réseau électrique sur site est inexistant ou compromis.
- Où ? Optimisé pour des interventions en zones chaudes et tempérées, ici simulé sur le site d'intervention humanitaire actuel du conflit israélo-palestinien.
- Quand ? Dans les premières phases d'intervention, lorsque la rapidité de mise en service est essentielle pour répondre aux besoins vitaux immédiats.
- Comment ? Par un système déployable de membrane photovoltaïque tendue, transportable par des moyens logistiques restreints, manipulable par une petite équipe non spécialisée et installable rapidement sans recourir à un outillage lourd, tout en restant suffisamment robuste pour assurer la production énergétique jusqu'à l'arrivée de soutiens plus conséquents.

Le modèle final est conçu pour ne pas dépasser un poids de 60 kg et, une fois replié, présenter des dimensions compatibles avec un transport manuel par deux personnes. Il doit fournir en moyenne 21,5 kWh par jour et pouvoir être déployé en moins de deux heures par une équipe de deux à trois personnes.

Il s'inspire de projets évoqués au cours de ce travail : « *Pure Tension* » de Synthesis Design + Architecture ([figure 103a](#)) pour ses aspects logistiques, mais également de réalisations architecturales construites, telles que « *Bota Solar* » de Sunsoak Design et Ney & Partners ([figure](#)

103b) ou « Solar Pavilion » de V8 Architects (figure 103c), dont l'étude a nourri le développement formel du modèle final.



Figure 103 : Références architecturales inspirant le concept de module photovoltaïque déployable ; a) Pure Tension ; b) Bota Solar ; c) Solar Pavilion

3.3.4.2. Exploration intuitive

Avant d'aboutir à la forme finale, l'esquisse est passée par plusieurs stades de réflexion matérialisés par des schémas intuitifs.

Les premières intentions visaient à concevoir une structure alliant production énergétique et fonctionnalité spatiale, de manière à optimiser les ressources mobilisées sur le terrain et à renforcer l'impact du dispositif. Comme l'illustre l'exemple schématique de la figure 104, cette proposition devait pouvoir offrir un espace polyvalent, pouvant servir aussi bien à l'accueil temporaire des populations ou du personnel humanitaire qu'à la gestion logistique et au stockage des ressources.

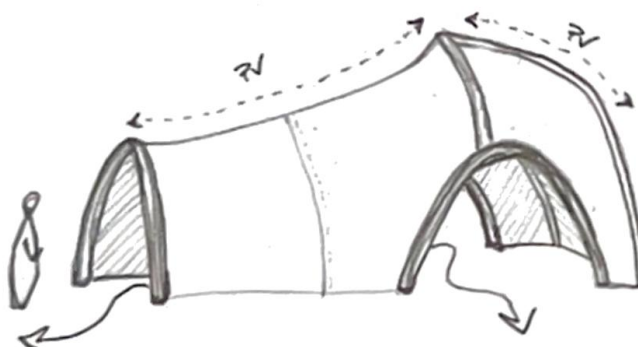


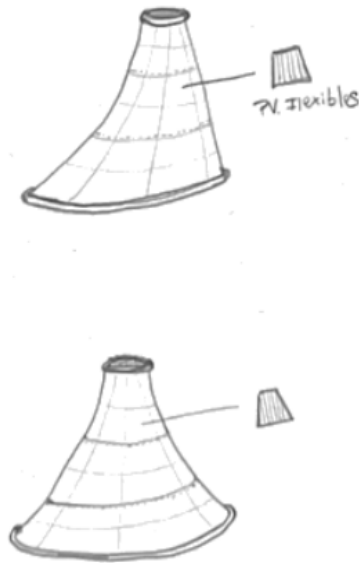
Figure 104 : Schéma exploratoire d'un module polyvalent destiné à l'accueil temporaire et à la production d'énergie. (source : auteur)

Cependant, ces premières orientations, bien que porteuses d'une vision plus polyvalente, ont rapidement montré certaines limites. L'intégration d'usages multiples impliquait une augmentation du volumes risquant de compromettre la légèreté et la rapidité de déploiement recherchées.

Il s'en est suivi une réflexion recentrée sur les objectifs principaux du projet, privilégiant une conception en adéquation avec une logistique simple donnant un accès quasi immédiat au module énergétique. Comme l'illustre les schémas de la figure 105, l'accent a été mis sur une

morphologie simple capable de se déployer rapidement. Entièrement habillée de panneaux photovoltaïques souples, la structure est exclusivement dédiée à la production d'énergie.

Morphologie



Déploiement

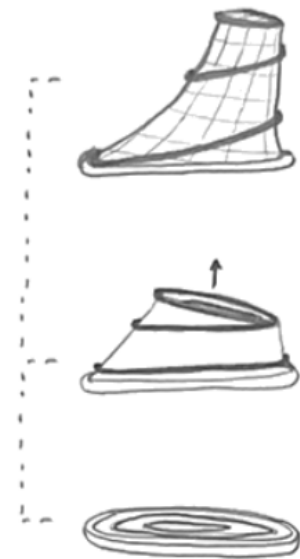


Figure 105 : Schéma exploratoire d'un module entièrement dédié à la production d'énergie. (source : auteur)

3.3.4.3. Exploration référencée

C'est à ce stade de la conception que les références étudiées ont influencé la recherche formelle. L'approche sensible des équipes de *Sunsoak Design* et *V8 Architects*, dans la mise en œuvre de formes simples et esthétiques optimisées pour maximiser l'exposition solaire (figure 106), a orienté la morphologie de cette première esquisse.

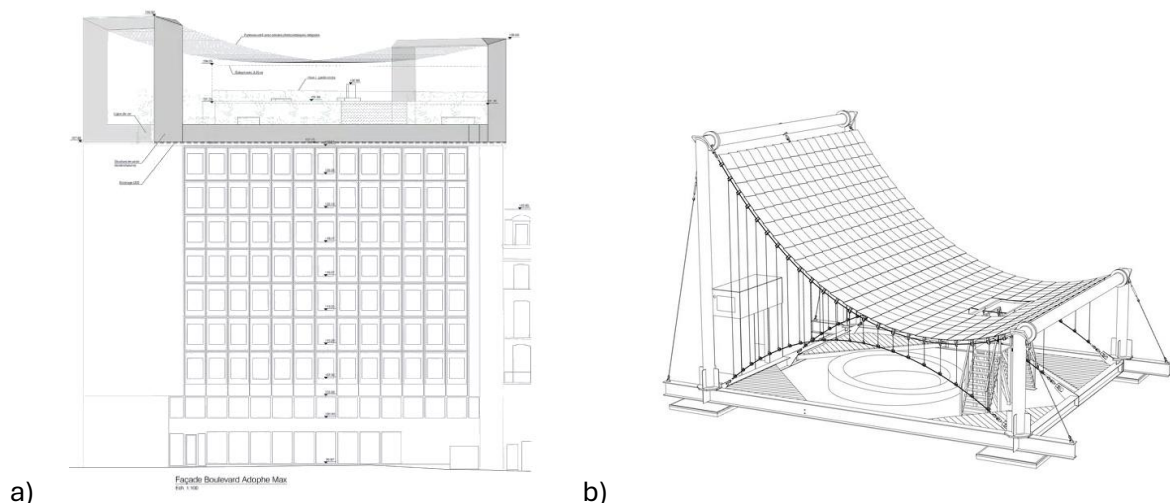


Figure 106 : Références architecturales ayant inspiré la conception : a) Solar Pavilion de Sunsoak Design ; b) Solar Pavilion de V8 Architects.

L'appropriation de ces projets a guidé mes explorations intuitives vers une enveloppe plus étendue et épurée, illustrée ci-dessous (figure 107) par un schéma et une modélisation réalisée à

l'aide de l'extension *SoapSkin* permettant l'expérimentation de surface simulant la tension de membrane sur *SketchUp*.



Figure 107 : Schéma traduit en modélisation 3D expérimentale d'une membrane tendue (source : auteur).

Cet outil a permis de faire évoluer les esquisses en 3D, et d'expérimenter la variation de la structure et la tension de la membrane permettant différents tests de mise en forme. Cette étape permet également un premier aperçu des qualités visuelles possibles de l'enveloppe et des matériaux associés à la structure du modèle (figure 108).

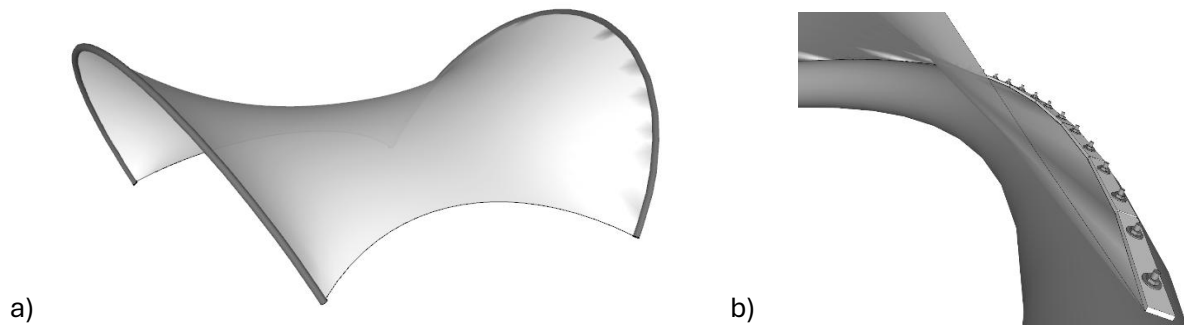


Figure 108 : Surfaces morphologiques et association de matériaux testées en simulation 3D (source : auteur).

3.3.4.4. Aspect énergétique

La poursuite du développement s'est appuyée sur l'analyse morphologique du projet de *Synthesis Design + Architecture* (figure 109).

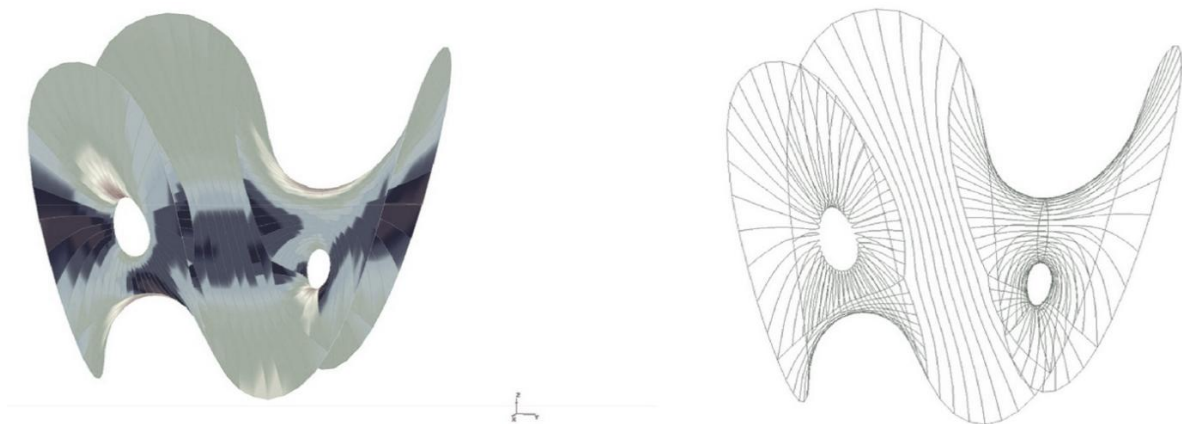


Figure 109 : Analyse structurelle du projet Pure Tension Pavilion - Buro Happold.

L'incidence solaire sur le modèle *Pure Tension* a révélé que certaines zones de la surface bénéficiaient d'une exposition nettement supérieure au reste de l'enveloppe (figure 110). Ces « points chauds », identifiés par les zones rouges sur la carte de rayonnement, ont servi de base à la poursuite du travail formel de l'esquisse.

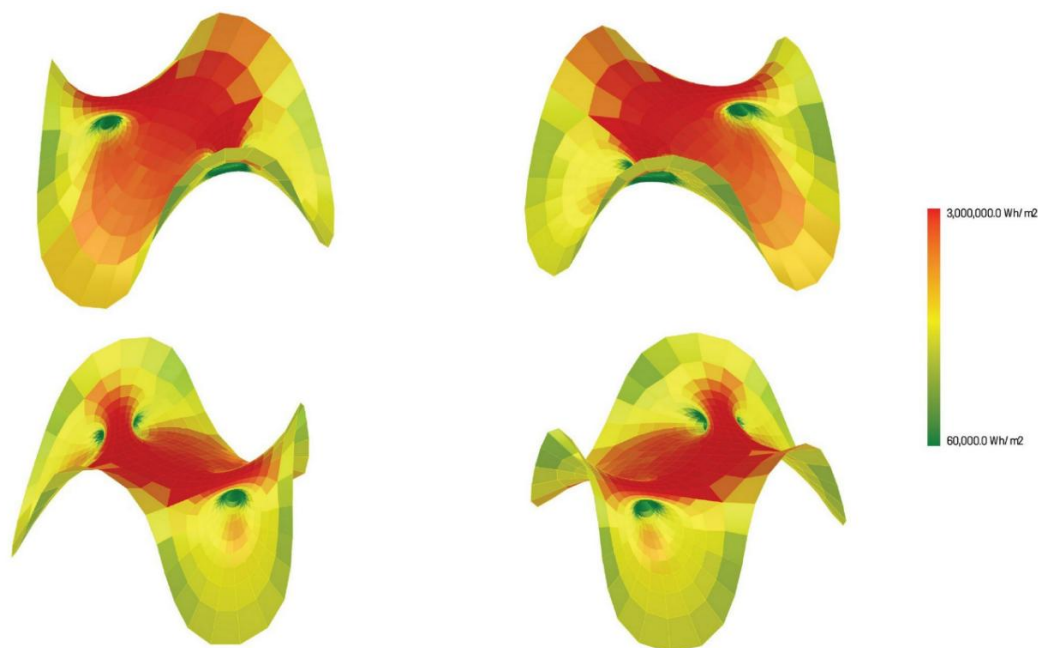


Figure 110 : Étude d'incidence solaire sur le pavillon *Pure Tension* - Cartographie en rouge des zones à fort potentiel énergétique.

La zone présentant le meilleur rendement été mise en relief par extrusion (figure 111a), générant une variation de volume qui a directement inspiré l'évolution du modèle présenté précédemment (figure 111b).

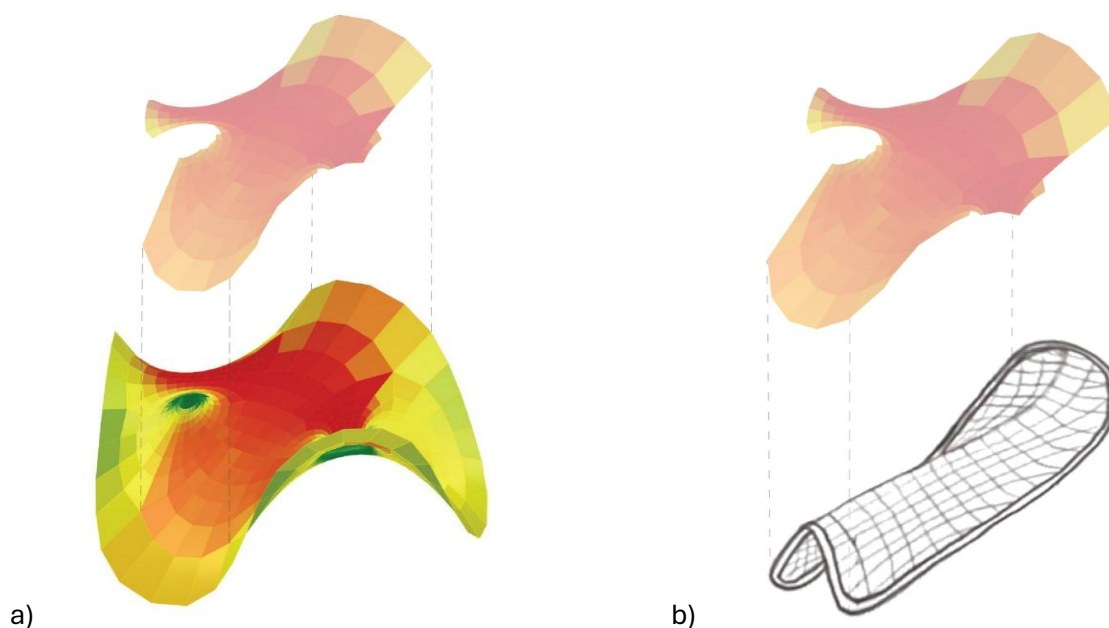


Figure 111 : Extrusion et évolution volumétrique du modèle : a) extrusion de la zone à meilleur rendement ; b) schéma morphologique issu de l'extrusion (source : auteur).

La forme obtenue a ensuite été modélisée en 3D afin d'intégrer les volumes extrudés à une proposition harmonieuse et d'en affiner les proportions (figure 112).



Figure 112 : Modélisation 3D des volumes extrudés pour affiner la morphologie (source : auteur).

3.3.4.5. Système de déploiement

Avec une morphologie désormais plus aboutie, l'attention se tourne vers les modalités de déploiement du module. Il s'agit de concevoir un système de mise en place répondant aux enjeux de rapidité et de simplicité, tout en pouvant être manipulé par un effectif réduit.

Pour amorcer cette réflexion, la forme a été explorée physiquement à l'aide d'un petit modèle de toile tendue précontrainte, permettant d'expérimenter les principes d'ouverture et de tension de la membrane (figure 113).

Déploiement

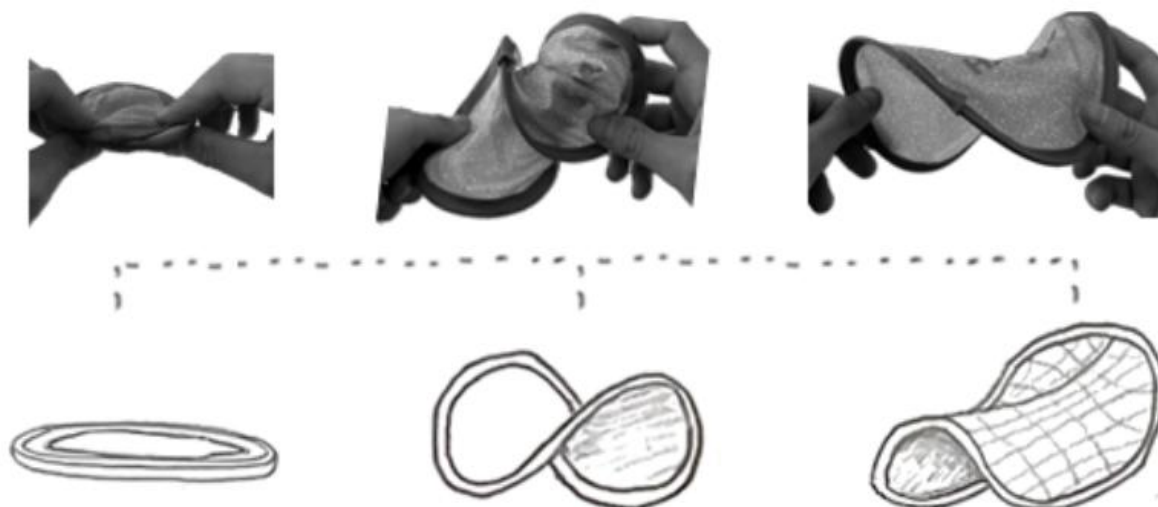


Figure 113 : Exploration physique d'un principe de déploiement « pop-up » (source : auteur).

Les premières intentions s'inspiraient du principe des tentes « pop-up » deux secondes, dont l'ouverture se fait presque instantanément grâce à un système similaire à celui exploré physiquement. Adapté au module, ce type de mécanisme devait permettre un déploiement rapide et intuitif comme l'illustre la figure 114, tout en limitant au maximum les manipulations et le temps d'installation.



Figure 114 : Illustration du déploiement « pop-up » (source : auteur).

Ce système offre des avantages clairs mais il reste limité par la surface qu'il peut couvrir. Il convient à des petits modules mais devient moins adapté lorsque les dimensions augmentent et que les précontraintes se renforcent.

Cette première approche intuitive a donc été remplacée par un dispositif plus adapté. Il se rapproche de l'installation des tentes basiques où l'armature et la membrane sont assemblées au montage. Ce dispositif a également été utilisé pour le projet Pure Tension (cf. Etude de cas) qui permettra d'illustrer cette approche à une échelle comparable à l'esquisse présentée.

Le dispositif s'organise autour d'une armature indépendante démontable en plusieurs segments (figure 115a). Ces différentes parties, préalablement cintrées selon la forme recherchée, peuvent être rapidement associées par un système d'emboîtement (figure 115b). Cette configuration représente un atout en termes de compacité car il peut être rangé dans des sacs transportables par une ou deux personnes (figure 115c).

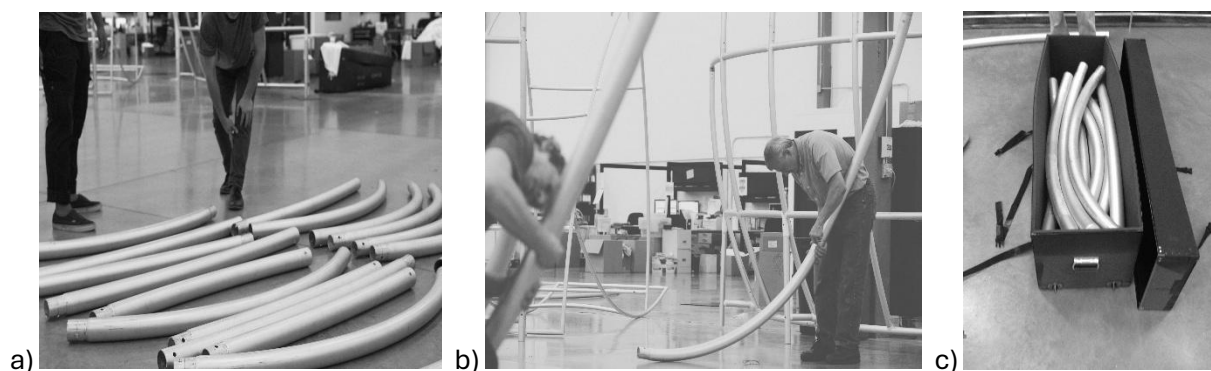


Figure 115 : Mise en tension de la membrane sur l'armature périphérique du projet Pure Tension ; a) composants de l'armature ; b) assemblage de l'armature ; c) transport de l'armature démontée

Une fois la structure périphérique assemblée, la membrane peut être appliquée et tendue. Sur le modèle du pavillon de *Synthesis Design + Architecture*, l'extrémité de la toile est enroulée autour de l'armature (figure 116a) puis verrouillée par une fermeture zippée (figure 116b) permettant de mettre la membrane en tension.

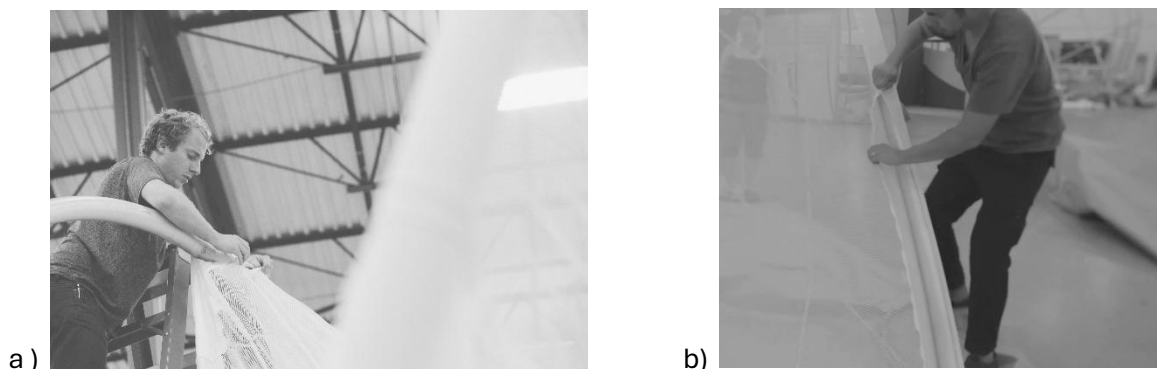


Figure 116 : Mise en place de la membrane textile : a) enroulement de la toile autour de l'armature ; b) verrouillage par fermeture zippée

3.3.4.6. Sélection des matériaux

Le système de déploiement nécessite une sélection adéquate des matériaux constitutifs. Elle a un impact non seulement sur la faisabilité de la mise en tension, mais aussi sur les enjeux logistiques notamment en termes de poids, de compacité et de durabilité.

En ce qui concerne la membrane, le rapport poids/surface de l'ETFE semble idéal (figure 117), mais sa faible résistance mécanique le rend fragile et principalement adapté aux membranes pneumatiques. Ce niveau de performance est ici qualifié comme insuffisant pour supporter les contraintes de modèle, contrairement au PTFE ou au PVC.

Le PTFE est fréquemment utilisé dans les projets à membranes tendues mais présente une mauvaise aptitude au pliage, ce qui limite sa pertinence pour une proposition nécessitant un transport compact.

Matériau	Masse surfacique (g/m ²)	Résistance à la traction chaîne/trame (N/50 mm)	Entretien	Durée de vie estimée (années)	Aptitude au pliage
PTFE (fibre de verre enduite de PTFE)	800	3500 / 3500	Auto-nettoyant	> 25	Mauvaise
ETFE (film)	87,5	64 / 56	Auto-nettoyant	50	Mauvaise
PVC (polyester enduit PVC - type I)	750	3000 / 2800	Nettoyage facile avec finition protectrice	15 - 20	Excellente

Figure 117 : Tableau synthétique de performances des matériaux de type membrane – traduction.

Le PVC a donc été retenu pour sa résistance mécanique et son excellente aptitude au pliage. Sa masse surfacique restant relativement élevée, le choix s'est porté sur une solution de maillage fréquemment employée permettant de réduire le poids à 240 g/m² tout en maintenant les performances attendues¹²⁷.

¹²⁷ Unisign, « M1212B – maille enduite sans doublure, dos noir », *Unisign Flex*, consulté le 10 août 2025 sur : <https://unisignflex.com/fr/Les-produits/maille-de-couleur>.

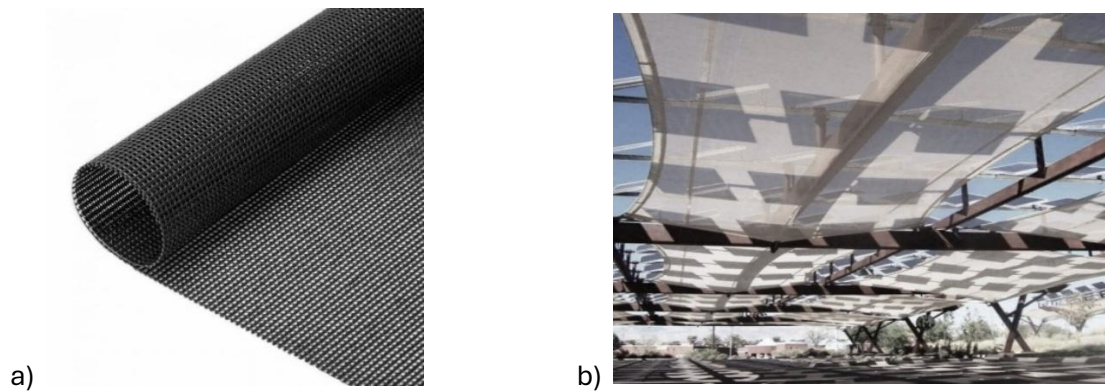


Figure 118 : Textiles techniques utilisés a) toile PVC enduite b) application architecturale.

Sur le plan de la structure portante, l'acier est très résistant mais semble trop lourd ($7,8 \text{ g/cm}^3$) pour un système transportable. L'aluminium, avec une densité réduite ($2,8 \text{ g/cm}^3$), offre un bon compromis entre solidité et légèreté mais son rapport résistance/poids reste inférieur à celui des matériaux composites (figure 119).

Les composites en fibre de verre et surtout en fibre de carbone affichent des performances nettement supérieures en rapport résistance/poids. Ces atouts en font des options idéales pour le modèle, mais leur prix élevé¹²⁸ réduit leur pertinence dans le cadre humanitaire.

Matériau	Densité (g/cm^3)	Résistance à la traction (GPa)	Résistance spécifique (10^6 cm)
Alliage d'aluminium	2.8	0.47	1.7
Composite fibre de verre	2.0	1.06	5.3
Composite fibre de carbone	1.45	1.5	10.3
Acier	7.8	1.03	1.3

Figure 119 : Tableau synthétique de performances des matériaux de structures porteuses – traduction.

Dans ce contexte, l'aluminium apparaît comme la solution la plus équilibrée : résistance fiable, suffisamment léger et à un coût abordable. C'est un matériau largement disponible qui permet d'être modelé simplement à l'aide d'une cintruse à rouleaux (figure 120a), ce qui permet d'obtenir des rayons précis. Ainsi, dans cette esquisse de projet, le choix s'oriente vers l'utilisation de tubes ronds en aluminium 6060 T6, de 76 mm de diamètre extérieur et de 3 mm d'épaisseur¹²⁹ (figure 120b), répondant à la fois aux exigences de solidité et de mise en œuvre.

¹²⁸ CarbonFibertelescopicPole.com, « Carbon fiber vs aluminum », *News section*, consulté le 11 août 2025 sur : <https://www.carbonfibertelescopicpole.com>.

¹²⁹ Alu Pour Tous, « Tube rond 76 × 3 mm – Aluminium 6060 T6 », *Alu Pour Tous*, consulté le 11 août 2025 sur : <https://alupourtous.com/produits/profils-standards/tube-rond/tube-rond-76-x-3-mm>.



Figure 120 : a) Cintrage de tube rond aluminium pour la structure du pavillon Pure Tension b) Coupe transversale du tube rond en aluminium 6060 T6, Ø76 mm, épaisseur 3 mm, utilisé pour la structure de l'esquisse.

Pour ce qui est des panneaux photovoltaïques souples, la sélection s'est portée sur des modèles récents actuellement commercialisés, sans tenir compte des avancées technologiques évoquées précédemment qui, bien que prometteuses, ne sont pas encore disponibles. Les critères de choix se sont concentrés sur la puissance par surface (W/m^2), afin de réduire au maximum les dimensions de la structure et donc d'en faciliter le transport, l'installation et le poids total, ainsi que sur la puissance par poids (W/kg) pour également limiter la masse totale.

Deux produits ont été retenus après une évaluation plus large du marché : L'EcoFlow 100 W Flexible ¹³⁰(figure 121a) qui affiche un rendement de 155 W/m^2 pour un poids de $3,57 \text{ kg/m}^2$, soit $43,4 \text{ W/kg}$ et l'HeliaSol 55 ¹³¹(figure 121b) qui offre quant à lui 63 W/m^2 pour 2 kg/m^2 . Le premier se distingue par sa compacité et son rendement surfacique, tandis que le second privilégie la légèreté et la souplesse.

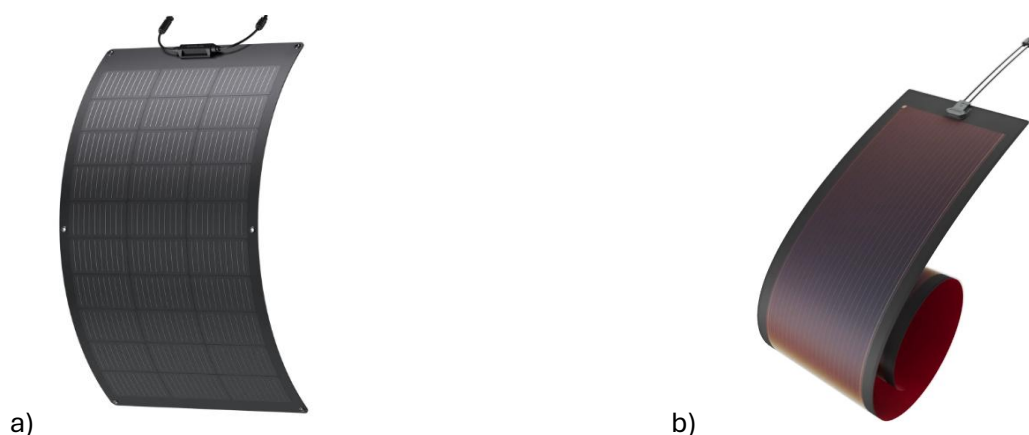


Figure 121 : Panneaux photovoltaïques flexibles sélectionnés ; a) EcoFlow 100 W Flexible Solar Panel ; b) HeliaSol 55 <https://fr.ecoflow.com/products/100w-flexible-solar-panel?variant=43245599654114#&gid=1&pid=01>

Le choix entre ces deux modèles repose sur un dimensionnement plus précis simulé en contexte réel et tenant compte des enjeux de logistiques et énergétiques cité en introduction de l'esquisse. Cette analyse complémentaire doit permettre de déterminer lequel des deux compromis, rendement surfacique ou légèreté, répond le plus efficacement aux exigences opérationnelles du module.

¹³⁰ EcoFlow France, « Panneau solaire flexible EcoFlow 100 W », *EcoFlow France*, consulté le 12 août 2025 sur : fr.ecoflow.com.

¹³¹ Heliatic GmbH. *Fiche technique HeliaSol 436-2000-CFF*. Dresde : Heliatic GmbH, avril 2025.

3.3.4.7. Dimensionnement

Selon la simulation *PVGIS* réalisée dans le cadre géographique des aides humanitaires dans la bande de Gaza, la capacité de puissance du module doit atteindre 4,47 kWc pour répondre aux besoins énergétiques quotidiens d'un centre de santé de catégorie 2, estimés à 21,5 kWh/jour (figure 122).

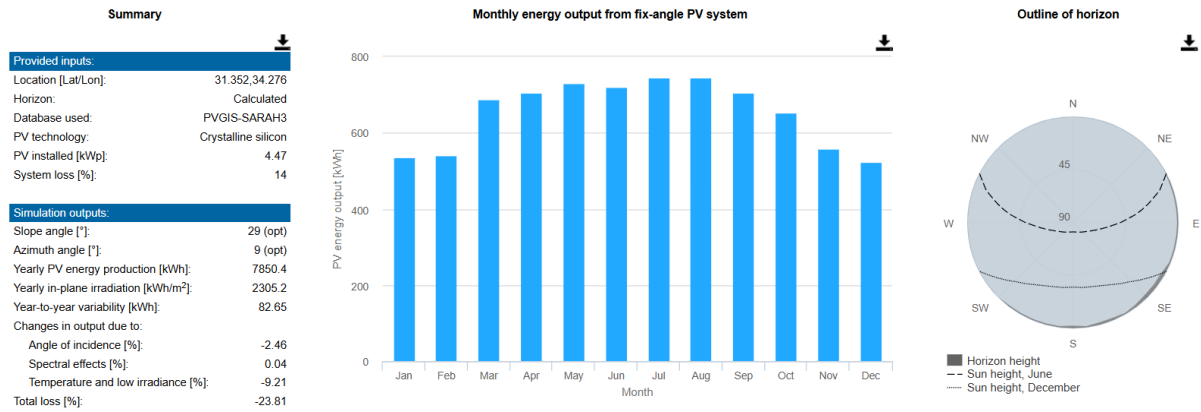


Figure 122 : Simulation de la production énergétique atteignant 21,5 kWh/jour en zone humanitaire à Gaza.

Pour l'*EcoFlow 100 W Flexible*, dont la densité de puissance est de 155 W/m², atteindre 4,47 kW nécessite une surface photovoltaïque de :

$$\frac{4470 \text{ W}}{155 \text{ W/m}^2} \approx 28,8 \text{ m}^2$$

avec une masse surfacique de 3,57 kg/m², cette surface représente :

$$28,8 \text{ m}^2 \times 3,57 \text{ kg/m}^2 \approx 102,8 \text{ kg}$$

Pour l'*HeliaSol 55*, dont la densité de puissance est de 63 W/m², atteindre 4,47 kW nécessite :

$$\frac{4470 \text{ W}}{63 \text{ W/m}^2} \approx 71 \text{ m}^2$$

avec une masse surfacique de 2,0 kg/m², cela représente :

$$71 \text{ m}^2 \times 2 \text{ kg/m}^2 \approx 142 \text{ kg}$$

Ces résultats montrent que, l'*EcoFlow* permettrait de réduire significativement la surface et le poids par rapport à l'*HeliaSol* mais ils montrent surtout que, dans les deux cas, la masse totale des panneaux photovoltaïques dépasse déjà les objectifs fixés, et ce sans inclure la structure porteuse et la membrane.

À titre de comparaison, pour un centre de santé de catégorie 1 nécessitant 10,3 kWh/jour, la puissance installée devrait atteindre 2,14 kWc (figure 123).

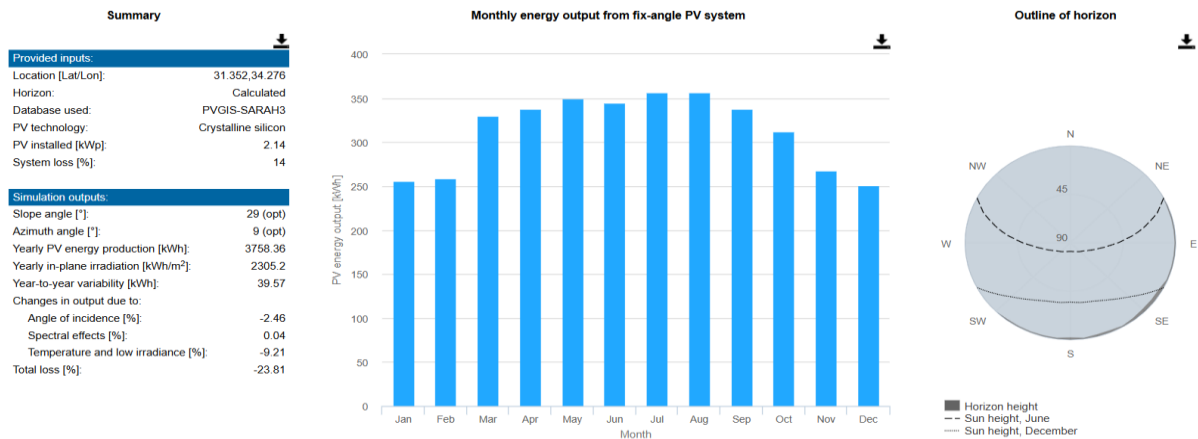


Figure 123 : Simulation de la production énergétique atteignant 10,3 kWh/jour en zone humanitaire à Gaza.

Dans ce scénario revu à la baisse, l'EcoFlow exigerait une surface de :

$$\frac{2140 \text{ W}}{155 \text{ W/m}^2} \approx 13,8 \text{ m}^2$$

et un poids de :

$$13,8 \text{ m}^2 \times 3,57 \text{ kg/m}^2 \approx 49,3 \text{ kg}$$

Quant à l'HeliaSol, il nécessiterait :

$$\frac{2140 \text{ W}}{63 \text{ W/m}^2} \approx 34 \text{ m}^2$$

pour un poids de :

$$34 \text{ m}^2 \times 2 \text{ kg/m}^2 \approx 68 \text{ kg}$$

Ces résultats montrent que, dans le cadre d'un centre de santé de catégorie 1, l'EcoFlow 100 W Flexible pourrait théoriquement répondre à la demande tout en respectant les contraintes logistiques, avec un poids total de panneaux photovoltaïques estimé à 49,3 kg. Toutefois, pour rester dans l'objectif global de 60 kg, la structure porteuse et la membrane ne devraient pas dépasser à elles deux 10,7 kg.

Dans cette configuration, l'EcoFlow exige une surface 13,8 m². Sur base des observations, on laisserait 20% de marge pour les zones sans cellules nécessaires au pliage, coutures, câbles et à une meilleure tolérance à la forme imposée.

Dans cette hypothèse, la surface du maillage en PVC d'un poids surfacique de 240 g/m² serait de :

$$13,8 \text{ m}^2 \times 1,20 = 16,56 \text{ m}^2$$

Le poids de la membrane en PVC serait alors de :

$$16,56 \text{ m}^2 \times 240 \text{ g/m}^2 = 3974,4 \text{ g} \approx 4 \text{ kg}$$

Soit, avec les panneaux photovoltaïques, un poids total de :

$$49,3 \text{ kg} + 4 \text{ kg} = 53,3 \text{ kg}$$

Il reste toutefois à évaluer le poids de la structure porteuse du modèle. Pour ce faire, une nouvelle modélisation du module est nécessaire afin de déterminer la longueur totale des tubes en aluminium requis pour assurer la forme de la structure permettant de mettre en tension la membrane de 16,56 m².

Pour rappel, les tubes utilisés sont des tubes ronds en aluminium (76 x 3 mm) et présentent une masse métrique de 1,93 kg/m.¹³² La longueur totale de tubes nécessaires est fixée à 16,25 m sur base de la 3D (figure 124).

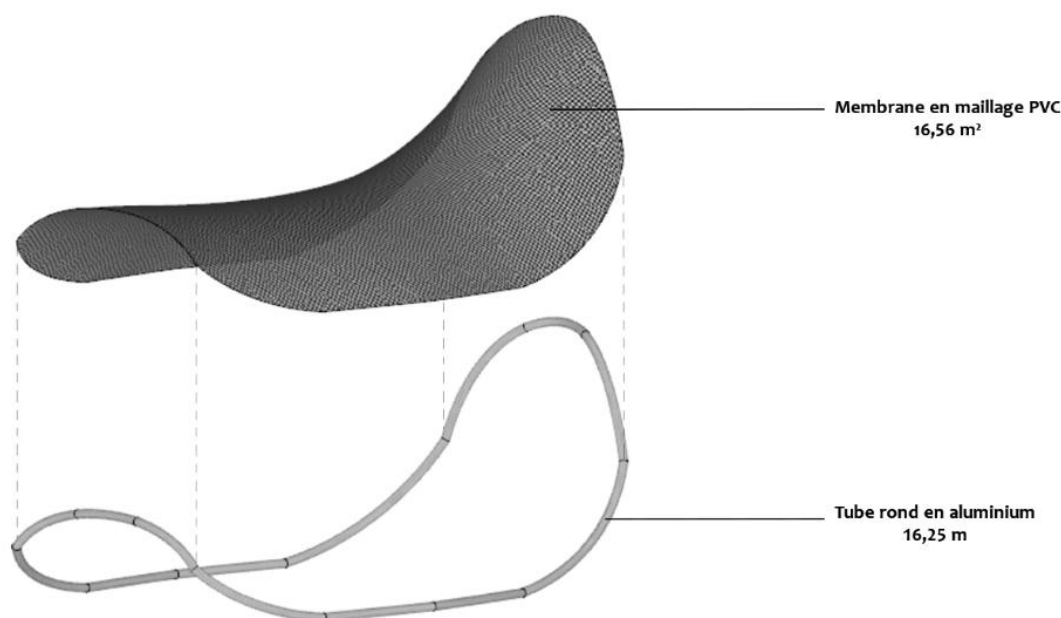


Figure 124 : Modélisation 3D du module final de l'esquisse ; membrane en maillage PVC (16,56 m²) et tubes ronds en aluminium (16,25 m). (source : auteur).

L'armature présente donc une masse de :

$$16,25 \text{ m} \times 1,93 \text{ kg/m} = 31,36 \text{ kg} \approx 31,4 \text{ kg}$$

En l'état, le total des 3 composants principaux atteint :

- pv EcoFlow : 49,3 kg
- membrane PVC : 4,0 kg
- armature aluminium (16,25 m) : 31,4 kg

Soit une masse totale de 84,7 kg, c'est-à-dire 24,7 kg au-delà du seuil des 60 kg fixé.

¹³² Alu Pour Tous, « Tube rond 76 x 3 mm – Aluminium 6060 T6 », *Alu Pour Tous*, consulté le 15 août 2025 sur : <https://alupourtous.com/produits/profils-standards/tube-rond/tube-rond-76-x-3-mm>.

4. CONCLUSION

À l'heure où les besoins humanitaires augmentent face à la multiplication des crises, la question de l'accès à une énergie fiable et durable apparaît comme l'un des principaux freins opérationnels aux interventions.

Cette recherche s'est inscrite dans ce constat, avec l'objectif d'évaluer le potentiel de solutions énergétiques renouvelables et de structures déployables, en tenant compte des contraintes logistiques propres aux phases initiales d'urgence.

Le cas étudié qui a été porté sur le déploiement d'un centre de santé temporaire de catégorie 2, dont les besoins énergétiques peuvent atteindre 21,5 kWh/jour, s'est avéré comme étant un seuil ambitieux, compte tenu de la mobilité attendue et des limitations de poids imposées. L'étude a été ancrée dans la situation géographique de la bande de Gaza, permettant de confronter les analyses à une crise actuelle et de simuler les performances énergétiques des solutions existantes. Cette mise en situation a conduit au constat d'une inefficacité relative des moyens actuellement disponibles pour répondre à de tels besoins.

4.1. Identification du système énergétique

Parmi l'ensemble des énergies renouvelables, l'énergie solaire apparaît comme la plus pertinente pour répondre aux besoins humanitaires. Elle présente plusieurs atouts ayant mené à cette conclusion : une abondance quasi inépuisable, une adéquation géographique avec les principales zones d'intervention, une durabilité encouragée par de nombreux organismes internationaux, une réduction progressive des coûts, et enfin une flexibilité logistique permettant une installation rapide à travers les systèmes photovoltaïques faisant d'eux la technologie la plus adaptée à des contextes d'urgence pour fournir une source d'électricité fiable au bénéfice des infrastructures temporaires.

4.2. Identification d'une typologie

L'identification de ces systèmes d'installation pv sur les sites d'intervention a conduit à l'analyse des structures déployables. Un corpus typologique, établi sur la base de la classification d'Hanaor & Levy, évalué sur des critères d'intégration des technologies photovoltaïques mais surtout d'aptitude à répondre aux contraintes logistiques propres aux interventions d'urgence, a permis de dégager deux typologies pertinentes : les structures à membrane tendues en tissu et les structures à barres-câbles.

L'étude approfondie de ces modèles a montré que la typologie à barres et câbles convenait davantage à des interventions de longue durée, nécessitant des solutions robustes, mais au prix d'un déploiement plus complexe. En revanche, les membranes tendues se sont révélées les plus adaptées aux phases initiales d'intervention, grâce à leur mise en œuvre logistique simplifiée.

Ainsi, la typologie des membranes tendues a été identifiée comme la plus apte à répondre simultanément aux impératifs énergétiques et logistiques des situations d'urgence, mettant en évidence l'un des objectifs centraux de ce travail.

4.3. Identification des limites

Cette étape a permis de cibler les projets les plus pertinents à analyser et d'identifier les freins au développement de solutions énergétiques adaptées aux acteurs de l'urgence. Seuls quelques projets, menés dans des conditions proches de celles recherchées, ont pu être retenus. Leur analyse a mis en évidence la difficulté de concilier production énergétique et souplesse logistique. À ce jour, aucune solution ne répond simultanément aux contraintes opérationnelles et aux besoins énergétiques comparables à un centre de santé de catégorie 2 (21,5 kWh/jour), voire de catégorie 1 (10,3 kWh/jour).

Inspirée des projets recensés et fondée sur les technologies et matériaux actuellement disponibles, l'esquisse conceptuelle a confirmé les limites liées au poids et à la puissance, écartant l'option d'un module léger et facilement déployable pour couvrir les besoins énergétiques d'un centre de santé de catégorie 2.

Un objectif réduit a néanmoins été envisagé : l'étude montre le potentiel d'un module capable de satisfaire les besoins d'un centre de catégorie 1. Bien que dépassant encore les contraintes de poids initialement fixées, cette solution semble néanmoins pouvoir être déployée avec des moyens restreints afin de répondre aux besoins vitaux lors des premières phases d'intervention.

4.4. Réserves et conditions

Dans le cadre des objectifs fixés, cette esquisse de projet affiche des performances théoriques supérieures à celles des solutions actuelles étudiées. Toutefois, l'approche proposée comporte de nombreuses limites. Cette esquisse a essentiellement permis d'explorer l'ensemble des paramètres identifiés tout au long de ce travail, à travers une approche pratique illustrée par une première proposition.

Il convient de souligner que certaines étapes ayant conduit à celle-ci reposent sur des hypothèses et des jugements personnels. De même, plusieurs quantifications relèvent d'estimations ou de modélisations simplifiées, qui nécessiteraient des conditions d'analyse plus approfondies dans la perspective d'un projet de réalisation à échelle réelle.

4.5. Perspectives

Une large partie de ce travail a été consacrée à l'identification des systèmes énergétiques et des typologies de structures déployables les plus adaptées au contexte humanitaire. Les résultats obtenus ont conduit à retenir les membranes tendues en tissu comme typologie prioritaire, en raison de leur adéquation logistique avec les premières phases d'urgence. La perspective d'un travail entièrement dédié à cette typologie dans un contexte similaire pourrait affiner l'exploration menée dans ce travail. Une telle recherche pourrait approfondir la capacité réelle de ces structures à répondre aux besoins énergétiques visés, en particulier à la lumière des évolutions technologiques à venir, notamment avec l'émergence de systèmes photovoltaïques souples à haut rendement (30%) ou de projets comme HelioSkin qui pourraient permettre de reconsidérer l'infaisabilité d'alimenter des infrastructures similaires aux centres de catégorie 2 avec des structures légères et facilement déployables.

En parallèle, la typologie des structures à câbles et barres, identifiée comme pertinente dans cette étude, ouvre également des perspectives intéressantes. Si leur mise en œuvre plus

complexe apparaît moins adaptée aux premières phases d'urgence, leur robustesse et leur capacité à constituer une base stable pourraient répondre à d'autres problématiques relevées par les acteurs humanitaires lors des entretiens (voir annexes). Par exemple, la difficulté d'installer des infrastructures sur des sols instables ou endommagés représente un frein logistique majeur nécessitant une préparation lourde des sites d'accueil. Dans ce contexte, un système déployable à barres et câbles pourrait offrir une solution résiliente, facilitant l'ancrage et l'installation d'infrastructures essentielles dans des zones sinistrées.

BIBLIOGRAPHIE

I. Livres et monographies

- LEYRAL, Marc, *Faire tenir. Structure et architecture*, Paris, Éditions de La Villette, 2021.
- MARKVART, Tomas, et CASTAÑER, Luis, *Understanding Solar Photovoltaic System Performance*, Southampton, University of Southampton, 2013.
- PELLEGRINO, Sergio, *Deployable Structures*, CISM Courses and Lectures, n° 412, Vienne, Springer-Verlag, 2001.
- ROY, Bernard, *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*, Paris, Economica, 1993.

II. Articles de revues scientifiques

- BOULANGER, Pascal, et DESMETTRE, Daniel, « Les trois voies de l'énergie solaire », *Clefs CEA*, n° 44, hiver 2000–2001.
- FENCI, Giulia E., et CURRIE, Neil G., « Deployable structures classification: A review », *International Journal of Space Structures*, vol. 32, n° 2, 2017, p. 112-130.
- GEORGE, A. Shaji, « Industrial Revolution 5.0: The Transformation of the Modern Manufacturing Process to Enable Man and Machine to Work Hand in Hand », *Seybold Report*, vol. 15, 2020, p. 219.
- LIEW, J. Y. Richard, et LEE, B. H., « Experimental study on reciprocal prism (RP) grid for space structures », *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, n° 10, 2003, p. 1363-1384.
- SAEED, Haroon A. M., KAZIMOTO, Veronica Valerian, XU, Weilin, et YANG, Hongjun, « The application of textile materials in interfacial solar steam generation for water purification and desalination », *Polymers*, vol. 16, n° 6, 2024, p. 793.
- SUN, Yinqing, LI, Faming, ZHANG, Hao, LIU, Wenzhu, WANG, Zenghui, MAO, Lin, LI, Qian, et al., « Flexible perovskite/silicon monolithic tandem solar cells approaching 30% efficiency », *Nature Communications*, vol. 16, n° 1, 1er juillet 2025.
- THOURET, Jean-Claude, et D'ERCOLE, Robert, « Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales », *Cahiers des Sciences Humaines*, vol. 32, n° 2, 1996, p. 407-422.
- WANG, L., LEE, H., et LEE, J., « Self-deployable Origami Stent Grafts as a Biomedical Application of Ni-rich TiNi Shape Memory Alloy Foil », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 419, n° 1–2, 2006, p. 131-137.

III. Rapports

- Association Sphère, *Le manuel Sphère : La Charte humanitaire et les standards minimums de l'intervention humanitaire*, 4^e éd., Genève, Association Sphère, 2018.
- Banque mondiale et Solargis, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, Washington, D.C., World Bank, 2020.
- Cœur, *Donner la priorité aux activités de santé dans les crises humanitaires*, Rapport de fond, Plateforme des sciences sociales dans l'action humanitaire (SSHAP), 2014.
- Cour des comptes européenne, *Énergies renouvelables et développement rural durable : d'importantes synergies sont possibles, mais rarement exploitées*, Rapport spécial n° 05/2018, Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2018.
- ESMAP, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, Washington, D.C., World Bank, juin 2020.
- European Renewable Energy Council (EREC), *RE-thinking 2050: A 100 % Renewable Energy Vision for the European Union*, Bruxelles, EREC, 2010.

- GPA, *The State of the Humanitarian Energy Sector: Challenges, Progress and Issues in 2022*, Genève, UNITAR Publishing, 2022.
- Global Platform for Action (GPA), *Humanitarian Energy Outlook 2023*, Berlin, GPA Coordination Unit, UNITAR, 2023.
- GOGLA et World Bank Group, *Off-Grid Solar Market Trends Report 2024*, Utrecht, GOGLA, 2024.
- International Energy Agency (IEA), *Renewables 2024 – Electricity*, Paris, IEA, 2024.
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC), *Post-disaster Shelter: Ten Designs*, Genève, IFRC, 2013.
- International Renewable Energy Agency (IRENA), *IOREC: Outcomes Report 2022 – Fourth International Off-grid Renewable Energy Conference*, Abu Dhabi, IRENA, 2022.
- OECD, *The Climate Action Monitor 2024*, Paris, OECD Publishing, 2024.
- Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), *Aperçu humanitaire mondial 2025 – Rapport abrégé*, Genève, Nations Unies, 2025.
- U.S. Agency for International Development (USAID), *Powering Health: Electrification Options for Rural Health Centers*, Washington, D.C., Bureau for Economic Growth, Agriculture and Trade, 2007.
- UNHCR, *Energy Needs, Emergency Handbook*, mise à jour le 24 janvier 2025.
- ZERO CARBON ANALYTICS, *Unnatural disasters: The connection between extreme weather and fossil fuels*, Briefing, juillet 2024.

IV. Communications de conférences

- BELVIN, W. K., et al., *Advanced Deployable Structural Systems for Small Satellites*, communication présentée à *Best Practices for Risk Reduction for Space Systems*, Saragosse, septembre 2016.
- BRANCART, Stijn, DE LAET, Lars, et TEMMERMAN, Niels, « Deployable Textile Hybrid Structures: Design and Modelling of Kinetic Membrane-restrained Bending-active Structures », *Procedia Engineering*, vol. 155, 2016, p. 195-204.
- DU, Chaoyu, WANG, Ziqi, VAN MELE, Tom, et BLOCK, Philippe, « Design of Restrained Pneumatic Formwork – Inverse Form Finding and Materialisation for Free Form Geometries », communication présentée au Symposium IASS 2024, Zurich, août 2024, p. 26-30.
- MORITZ, K., et HAFNER, A., « Transparency Carried by Air – Pneumatic ETFE-Foil Cushion Technology », communication présentée à *NASSC 2010 – North American Steel Construction Conference*, mai 2010.
- ROOVERS, Kelvin, et DE TEMMERMAN, Niels, « Digital Design of Deployable Scissor Grids Based on Circle Packing », *Proceedings of the IASS 2015 Symposium "Future Visions"*, Amsterdam, 17-20 août 2015.

V. Ressources en ligne

Articles de presse

- Banque mondiale, « Selon un nouveau rapport, l'accès de base à l'énergie est à la traîne malgré des opportunités en matière d'énergie renouvelable », *Banquemonde.org*, 6 juin 2023, consulté le 20 janvier 2025 sur : <https://www.banquemonde.org/fr/news/press-release/2023/06/06/basic-energy-access-lags-amid-renewable-opportunities-new-report-shows>.
- France Inter, « Géopolitique du jeudi 19 septembre 2024 », *France Inter*, 19 septembre 2024, consulté le 10 décembre 2024 sur : www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/geopolitique/geopolitique-du-jeudi-19-septembre-2024-6206280.

- Park, Kyungmin, « Ultralight, Flexible Solar Cells Achieve World-Record Efficiency », *Tech Xplore*, 10 avril 2025, consulté le 24 juillet 2025 sur : <https://techxplore.com/news/2025-04-ultralight-flexible-solar-cells-efficiency.html>.
- RTBF Info, « Inondations : 15 millions de sinistrés au Pakistan, 132 morts en Inde », *RTBF.be*, 6 août 2010, consulté le 10 décembre 2024 sur : www.rtb.be/article/inondations-15-millions-de-sinistres-au-pakistan-132-morts-en-inde-4987703.
- RTBF Info, « Cyclone Chido : Mayotte dévastée par des vents de 220 km/h, au moins deux morts », *RTBF.be*, 9 mai 2024, consulté le 10 décembre 2024 sur : www.rtb.be/article/cyclone-chido-mayotte-devaste-par-des-vents-de-220km-h-au-moins-deux-morts-11477849.
- RTBF, « Guerre Israël-Gaza : “Pas d’eau, de gaz et d’électricité”, la bande de Gaza à quelques jours de vivre une catastrophe humanitaire », *RTBF.be*, 9 octobre 2023, consulté le 20 janvier 2025 sur : <https://www.rtb.be/article/guerre-israel-gaza-pas-d-eau-de-gaz-et-d-electricite-la-bande-de-gaza-a-quelques-jours-de-vivre-une-catastrophe-humanitaire-11270419>.

Sites pédagogiques et encyclopédiques

- Connaissance des Énergies, *Solaire photovoltaïque – Fiche pédagogique*, dernière mise à jour le 26 avril 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque.
- Connaissance des Énergies, *Solaire photovoltaïque : que signifie la puissance « crête » ?*, dernière modification le 20 mars 2025, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/solaire-photovoltaïque-que-signifie-la-puissance-crete.
- Connaissance des Énergies, *Solaire thermique*, dernière mise à jour le 11 juillet 2019, consulté le 25 juillet 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique.
- Connaissance des Énergies, *Solaire thermodynamique à concentration*, dernière mise à jour le 6 juillet 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration.
- Connaissance des Énergies, *Les installations solaires peuvent-elles fonctionner quand le ciel est nuageux ?*, dernière mise à jour le 17 octobre 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/les-installations-solaires-peuvent-elles-fonctionner-quand-le-ciel-est-nuageux.
- EDF Solutions Solaires, *Watt crête : définition*, mis à jour en 2024, consulté le 16 juillet 2025 sur : www.edf-solutions-solaires.com/lexique/watt-crete/.
- France Renouvelables, *Énergie solaire : comment fonctionne la technologie thermique ?*, mis à jour en 2024, consulté le 15 février 2025 sur : <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energie-solaire/energie-solaire-differences-similitudes-thermique-vs-photovoltaïque>.
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), *PVGIS-PV tools*, s.d., consulté le 2 août 2025 sur : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en.
- Solargis, *Solar irradiance difference map of 2024*, publié en 2024, consulté le 16 juillet 2025 sur : www.solargis.com/resources/blog/solargis-news/solar-irradiance-difference-map-of-2024.

Blogs et magazines spécialisés

- Design for Disaster (blog), « PowerMod solar tent », 21 décembre 2011, consulté le 19 août 2025 sur : www.design4disaster.org/2011/12/21/powermod-solar-tent.
- Espaces contemporains, *L’architecture solaire en révolution grâce au nouveau visage des panneaux photovoltaïques et les innovations*, s.d., consulté le 25 juillet 2025 sur : espacescontemporains.ch/larchitecture-solaire-en-revolution-grace-le-nouveau-visage-des-panneaux-photovoltaïques-et-les-innovations/.

- PV Magazine, « Miasolé sets new flexible CIGS efficiency record », *PV Magazine International*, 9 juillet 2019, consulté le 19 août 2025 sur : www.pv-magazine.com/2019/07/09/miasole-sets-new-flexible-cigs-efficiency-record.
- YAP, Steven, « Tears in Tensile Membranes: Don't Panic, Here's What You Need to Know », *Tensile Fabric Structure*, 19 mai 2024, consulté le 5 août 2025 sur : <https://temembrane.com/what-happens-to-tears-in-tensile-membranes-dont-panic-heres-what-you-need-to-know>.

Organisations et entreprises

- EcoFlow France, « Panneau solaire flexible EcoFlow 100 W », *EcoFlow France*, consulté le 12 août 2025 sur : fr.ecoflow.com.
- Heliatek GmbH, *Fiche technique HeliaSol 436-2000-CFF*, Dresde, avril 2025.
- Médecins Sans Frontières Suisse, « Énergie solaire mobile : la solution réside-t-elle dans ce conteneur ? », 15 février 2024, *MSF Suisse*, consulté le 8 mars 2025 sur : www.msf.ch/nos-actualites/articles/energie-solaire-mobile-solution-reside-t-elle-ce-conteneur.
- Pvilion, *History*, s.d., consulté le 19 août 2025 sur : www.pvilion.com/company/history.
- Pvilion, *Lightweight Solar Canopy*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.pvilion.com/products/solar-canopies/lightweight-solar-canopy/.
- SBIR.gov, « Award on Secure.gov website: Pvilion 4th generation Solar Power Integrated Structures », 15 mars 2024, consulté le 19 août 2025 sur : www.sbir.gov/awards/209396.
- Socomec, *Définition et usages d'un onduleur*, consulté le 25 juillet 2025 sur : www.socomec.fr/fr/definition-et-usages-dun-onduleur.
- SPW Énergie, *Zoom sur le Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*, *Portail de l'Énergie en Wallonie*, s.d., consulté le 25 juillet 2025 sur : energie.wallonie.be/fr/zoom-sur-le-building-integrated-photovoltaics-bipv.html.
- Solaris Store, « Principe de fonctionnement d'un régulateur solaire », consulté le 23 juillet 2025 sur : www.solaris-store.com/content/44-principe-de-fonctionnement-d-un-regulateur-solaire.
- Unisign, « M1212B – maille enduite sans doublure, dos noir », *Unisign Flex*, consulté le 10 août 2025 sur : <https://unisignflex.com/fr/Les-produits/maille-de-couleur>.
- We Share Solar, *Solar Suitcase Learning Kits*, programme *We Care Solar*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.wesharesolar.org/solar-suitcase/.

Ressources audiovisuelles

- NASA, « Inflatable Solar Array Technology Packs Incredible Power in Small Package », *NASA Marshall Space Flight Center*, vidéo, publié le 4 août 2015, consulté le 10 juin 2025 sur : <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/inflatable-solar-array-technology-packs-incredible-power-in-small-package/>.

VI. Glossaires, définitions et fiches techniques

- Alu Pour Tous, « Tube rond 76 × 3 mm – Aluminium 6060 T6 », consulté le 11 août 2025 et le 15 août 2025 sur : <https://alupourtous.com/produits/profils-standards/tube-rond/tube-rond-76-x-3-mm>.
- EcoFlow France, « Panneau solaire flexible EcoFlow 100 W », *EcoFlow France*, consulté le 12 août 2025 sur : fr.ecoflow.com.
- Heliatek GmbH, *Fiche technique HeliaSol 436-2000-CFF*, Dresde, avril 2025.
- Institut National de l'Énergie Solaire (INES), *Guide d'installation des systèmes photovoltaïques – Édition 2024*, Chambéry, INES, 2024.

- Ministère de la Culture (France), « Fluide caloporteur », *FranceTerme, Journal officiel* du 22 septembre 2000, consulté le 15 février 2025 sur : www.culture.gouv.fr/franceterme/terme/EQUI84.
- Ministère de l'Éducation nationale, *L'énergie solaire photovoltaïque*, France, 2013.
- Solaris Store, « Principe de fonctionnement d'un régulateur solaire », consulté le 23 juillet 2025 sur : www.solaris-store.com/content/44-principe-de-fonctionnement-d-un-regulateur-solaire.
- TeachEngineering (University of Colorado Boulder) – YOWELL, Julie, YOWELL, Janet, ZARSKE, Malinda Schaefer, et BROOKS, David R., *Photovoltaic Efficiency*, dernière mise à jour le 8 juillet 2022, consulté le 23 juillet 2025 sur : www.teachengineering.org/lessons/view/cub_pveff_lesson03.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Cour des comptes européenne, *Énergies renouvelables et développement rural durable : d'importantes synergies sont possibles, mais rarement exploitées. Rapport spécial n° 05/2018*, Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, 2018, consulté le 15 février 2025 sur : www.op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/renewable-energy-5-2018/fr/

Figure 2 : European Renewable Energy Council. *RE-thinking 2050: A 100 % Renewable Energy Vision for the European Union*. Bruxelles : EREC, 2010, p.16

Figure 3 : Croix-Rouge française, *Stratégie internationale – Horizon 2030*, Paris, Croix-Rouge française, 2021.

Figure 4 : Solargis, *Solar resource maps & GIS data for 200+ countries*, Solargis, consulté le 15 février 2025 sur : www.solargis.com/resources/free maps and gis data

Figure 5 : International Energy Agency (IEA), *Electricity*, dans *Renewables 2024*, Paris, IEA, 2024, consulté le 15 février 2025 sur : www.iea.org/reports/renewables-2024/electricity

Figure 6 : SolarPedia, *Le solaire thermique*, consulté le 15 février 2025 sur : www.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Le_solaire_thermique

Figure 7 : Connaissance des Énergies, *Solaire thermodynamique (à concentration)*, dernière mise à jour le 6 juillet 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration

Figure 8 : Connaissance des Énergies, *Solaire photovoltaïque – Fiche pédagogique*, dernière mise à jour le 26 avril 2023, consulté le 15 février 2025 sur : www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque.

Figure 9 : ESMAP, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*, Washington, D.C., World Bank, juin 2020

Figure 10 : Ibid.

Figure 11 : Solaire Sans Frontières, *Systèmes photovoltaïques autonomes*, dernière mise à jour non précisée (s.d.), consulté le 25 juillet 2025 sur : www.ssf-asso.org/systemes-photovoltaïques-autonomes/

Figure 12 : Solar Power World, *Anatomy of a rooftop solar mounting system*, mars 2014, consulté le 25 juillet 2025 sur : www.solarpowerworldonline.com/2014/03/anatomy-rooftop-solar-mounting-system/.

Figure 13 : Brugel, *Conditions pour la certification*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.brugel.brussels/blog/energies-renouvelables-11/conditions-pour-la-certification-286

Figure 14 : Invisible Solar (Dyaqua), *Technology*, s.d., consulté le 25 juillet 2025 sur : www.invisiblesolar.it/EN/technology/

Figure 15 : Sunsoak Design, *Bota Solar*, consulté le 15 février 2025 sur : www.sunsoak-design.com/botasolar

Figure 16 : International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, *Post-disaster Shelter: Ten Designs*, Genève, IFRC, 2013, p. 8-9.

Figure 17 : U.S. Agency for International Development (USAID), *Powering Health: Electrification Options for Rural Health Centers*, Washington, D.C., Bureau for Economic Growth, Agriculture and Trade, Office of Infrastructure and Engineering, 2007.

Figure 18 : Ibid.

Figure 19 : Ibid.

Figure 20 : Médecins Sans Frontières Suisse, *Énergie solaire mobile : la solution réside-t-elle dans ce conteneur ?*, 15 février 2024, MSF Suisse, consulté le 8 mars 2025 sur : www.msf.ch/nos-actualites/articles/energie-solaire-mobile-solution-reside-t-elle-ce-conteneur.

Figure 21 : Metalocus, *Better Shelter. UNHCR signs for 10,000 flat-pack shelters*, publié le 4 avril 2015, consulté le 15 février 2025 sur : www.metalocus.es/en/news/better-shelter-unhcr-signs-10000-flat-pack-shelters.

Figure 22 : Ibid.

Figure 23 : We Share Solar, *Solar Suitcase Learning Kits*, We Share Solar (programme de We Care Solar), s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.wesharesolar.org/solar-suitcase/

Figure 24 : BELVIN, W. K., et al., *Advanced Deployable Structural Systems for Small Satellites*, NASA/TP–2017–219631, dans *Best Practices for Risk Reduction for Space Systems*, Saragosse, Espagne, septembre 2016, p. 4.

Figure 25 : FENCI, Giulia E., et CURRIE, Neil G., « Deployable structures classification: A review », *International Journal of Space Structures*, vol. 32, n° 2, 2017, p.8

Figure 26 : Ibid. p.10

Figure 27 : Ibid. p.12

Figure 28 : Ibid. p.3

Figure 29 : Ibid. p.9

Figure 30 : *Tableau de hiérarchisation des critères de pertinence*

Figure 31 : ESTVANKO, Bryan, « Numerical analysis of a tape spring hinge folded about two axes », 2012.

Figure 32 : GÜR, Şebnem, Koray KORKMAZ et Gökhan KIPER, « Radially Expandable Ring-Like Structure with Antiparallelogram Loops », *International Symposium of Mechanism and Machine Science*, Bakou, septembre 2017.

Figure 33 : CHEN, Tian, BILAL, Osama, LANG, Robert, DARAIO, Chiara et SHEA, Kristina, « Autonomous Deployment of a Solar Panel Using an Elastic Origami and Distributed Shape Memory Polymer Actuators », *arXiv*, 2018, doi:10.48550/arXiv.1810.08978.

Figure 34 : *Graphique radar ; Grille à simple nappe – Ciseaux* (auteur, 2025).

Figure 35 : ROOVERS, Kelvin et DE TEMMERMAN, Niels, « Geometric Design of Deployable Scissor Grids Consisting of Generalized Polar Units », *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, vol. 58, 2017, p. 227-238. DOI : 10.20898/j.iass.2017.193.865.

Figure 36 : DOROFTEI, Ioan et DOROFTEI, Ioan-Alexandru, « Deployable Structures for Architectural Applications – A Short Review », *Applied Mechanics and Materials*, vol. 658, 2014, p. 233-240. DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMM.658.233.

Figure 37 : LYU, Shengnan, ZLATANOV, Dimiter et DING, Xilun, « Approximation of Cylindrical Surfaces with Deployable Bennett Networks », *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 9, 2017. DOI : 10.1115/1.4035801.

Figure 38 : *Graphique radar ; Grille à double nappe – Ciseaux* (auteur, 2025).

Figure 39 : QI, Xiaozhi, HUANG, Hailin, MIAO, Zhihui, LI, Bing et DENG, Zongquan, « Design and Mobility Analysis of Large Deployable Mechanisms Based on Plane-Symmetric Bricard Linkage », *Journal of Mechanical Design*, vol. 139, 2016. DOI : 10.1115/1.4035003.

Figure 40 : Ibid.

Figure 41 : *Graphique radar ; Structures axiales – Ciseaux* (auteur, 2025).

Figure 42 : Goossens & Bauwens ingénieur-architecte, « Construction d'un hangar de stockage de sel - Grobbendonk », *Util -Ingénierie de structure*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.util.be/fr/selection/goossens-bauwens-ingenieur-architecten-bvba/construction-d-un-hangard-de-stockage-de-sel-grobbendonk?origin=architects.

Figure 43 : CHILTON, John C., CHOO, B. S. et POPOVIC, O., « Reciprocal Frame Retractable Roofs », *Proceedings of the IASS 1995 Symposium – Spatial Structures: Heritage, Present and Future*, Milan, juin 1995.

Figure 44 : NetKulture, « Distillateur solaire eau potable d'Henry Glogau », Rédigé par NK2, 6 avril 2022, consulté le 15 février 2025 sur : www.netkulture.fr/article607/distillateur-solaire-d-eau-potable-d-henry-glogau

Figure 45 : *Graphique radar ; Grille à simple nappe – Barres* (auteur, 2025).

Figure 46 : DOUTHE, C., et O. BAVEREL, « Design of nexorades or reciprocal frame systems with the dynamic relaxation method », *Computers & Structures*, vol. 87, n° 21-22, 2009, p. 1296-1307, consulté le 15 février 2025 sur : <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.06.011>.

Figure 47 : Parametric House, *What is a self-supporting structure?*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.parametrichouse.com/what-is-a-self-supporting-structure/

Figure 48 : Ibid.

Figure 49 : *Graphique radar ; Grilles à double nappe – Barres* (auteur, 2025).

Figure 50 : XU, Peiqi, ZHAO, Pengyang, LIU, Yiming et LIU, Nianxiong, « Reciprocal frame (RF) architecture design based on statistical analysis of geometrical form parameters from built cases and parametric simulations », *Construction and Building Materials*, vol. 447, 2024, art. 138082, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138082>.

Figure 51 : GHERARDINI, Federico et LEALI, Francesco, « Reciprocal Frames in Temporary Structures: An Aesthetical and Parametric Investigation », *Nexus Network Journal*, vol. 19, n° 4, décembre 2017, p. 741-762, <https://doi.org/10.1007/s00004-017-0352-x>.

Figure 52 : *Graphique radar ; Structures axiales – Barres* (auteur, 2025).

Figure 53 : STROUD, John, *Reciprocal Frame Architecture*, PhD thesis, University of Nottingham, 2011.

Figure 54 : THAKER, Megha, JOSHI, Shashikant J., ARORA, Hemant et SHAH, Dhaval B., « Tape spring for deployable space structures: A review », *Advances in Space Research*, vol. 73, n° 10, 2024, p. 5188-5219. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.02.027>.

Figure 55 : ŠEKULARAC, Nenad, IVANOVIC-ŠEKULARAC, Jelena et TOVAROVIC, J., « Folded structures in modern architecture », *Facta Universitatis, Architectura and Civil Engineering*, vol. 10, 2012, p. 1-16.

Figure 56 : IMLACH, Hannah, *Origami Shelter*, mai 2011, consulté le 15 février 2025 sur : www.hannahimlach.com/Origami-Shelter.

Figure 57 : TIBERT, Gunnar, « Deployable tensegrity masts for space applications », *Journal of Deployable Structures in Aerospace Applications*, vol. 1, n° 2, 2002, p. 20-37.

Figure 58 : *Graphique radar ; Surfaces pliées* (auteur, 2025).

Figure 59 : Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (OMPI), *Habitable foldable structure*, Brevet international WO2007054110A1, publié le 10 mai 2007.

Figure 60 : Ibid.

Figure 61 : Midomo, *Mi Domo*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.midomo.es/mi-domo

Figure 62 : REBÊLO, Hugo, SANTOS, Filipe, CISMASIU, Corneliu et SANTOS, Duarte, « Exploratory study on geodesic domes under blast loads », *International Journal of Protective Structures*, vol. 10, 2019, p. 1-16, <https://doi.org/10.1177/2041419618820540>.

Figure 63 : *Graphique radar ; Surfaces courbées* (auteur, 2025).

Figure 64 : Qi Architects, *Mi Domo*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.midomo.es/mi-domo.

Figure 65 : LIEW, J. Y. Richard et LEE, B. H., « Experimental study on reciprocal prism (RP) grid for space structures », *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 59, n° 10, 2003, p. 1363-1384.

Figure 66 : Ibid.

Figure 67 : Ibid.

Figure 68 : YANG, Z., OKUMURA, K. et SUEHIRO, K., « Simulation and Optimization Method of Tensegrity Structure with Elastic Membrane as Tension Material », dans YUAN, P., XIE, Y., YAO, J. et YAN, C., éd., *Proceedings of the 2019 DigitalFUTURES. CDRF 2019*, Springer, Singapore, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8153-9_1

Figure 69 : AREFEEN, Shamsul et DALLAS, Tim, « Low-cost racking for solar photovoltaic systems with renewable tensegrity structures », *Solar Energy*, vol. 224, 2021, p. 798-807, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.020>.

Figure 70 : YOU, Guoqiang, « Application of Flexible Reflector Space-Borne Deployable Antenna », dans XU, Z., PARIZI, R. M., LOYOLA-GONZÁLEZ, O. et ZHANG, X., éd., *Cyber Security Intelligence and Analytics. CSIA 2021, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1342, Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70042-3_15

Figure 71 : *Graphique radar ; Structures à barres et câbles tendus* (auteur, 2025).

Figure 72 : WE WANT TO LEARN (blog), « Asymptotic Grid Structure of a Triply Periodic Minimal Surface », *WeWantToLearn.net*, 3 février 2019, consulté le 15 février 2025 sur : www.wewanttorearn.wordpress.com/tag/anticlastic/

Figure 73 : BRANCART, Stijn, DE LAET, Lars et TEMMERMAN, Niels, « Deployable Textile Hybrid Structures: Design and Modelling of Kinetic Membrane-restrained Bending-active Structures », *Procedia Engineering*, vol. 155, 2016, p. 195-204. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.020>.

Figure 74 : TOOLPORT GmbH, *CONTOP Container Shelter Instruction Manual*, Norderstedt, TOOLPORT, s.d., consulté le 19 août 2025 sur : <https://manuals.plus/toolport/contop-container-shelter-manual>

Figure 75 : Shandong Sinoltech International Co., Ltd., *Flex-03N Thin-Film BIPV (Building Integrated PhotoVoltaic) Modules*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.sinoltech.en.made-in-china.com/product/PSuJrqLEsgUN/China-Flex-03n-Thin-Film-BIPV-Building-Integrated-PhotoVoltaic-Modules-FLEX-03N-.html.

Figure 76 : CREMERS, Jan et LAUSCH, F., « PV Flexibles – Photovoltaics Integrated in Transparent ETFE- and Translucent PTFE/Glass-Membrane Structures », *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valence, 2008.

Figure 77 : Maco Technology, *Tensile structures and large span membrane roofs for architecture*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.macotechnology.com/en/prodotti/tensile-structures-and-large-span-roofs/

Figure 78 : OSBORN, Kris, « Army evaluating transportable solar-powered tents », *U.S. Army News Service*, 8 décembre 2010, consulté le 15 février 2025 sur : www.army.mil/article/49138/army_evaluating_transportable_solar_powered_tents.

Figure 79 : *Graphique radar ; Membranes tendues – textiles* (auteur, 2025).

Figure 80 : WE WANT TO LEARN, « Asymptotic Grid Structure of a Triply Periodic Minimal Surface », 3 février 2019, consulté le 15 février 2025 sur : www.wewanttorelearn.wordpress.com/tag/anticlastic/

Figure 81 : Micah Europa, *Pneumatic Structures*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.scribd.com/document/415210966/Pneumatic-Structures.

Figure 82 : Ibid.

Figure 83 : CREMERS, Jan et LAUSCH, F., « PV Flexibles – Photovoltaics Integrated in Transparent ETFE- and Translucent PTFE/Glass-Membrane Structures », *Actes de la 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valence, 2008.

Figure 84 : Maco Technology, *Tensile structures and large span membrane roofs for architecture*, s.d., consulté le 15 février 2025 sur : www.macotechnology.com/en/prodotti/tensile-structures-and-large-span-roofs/

Figure 85 : CREMERS, J. M., « Textiles for insulation systems, control of solar gains and thermal losses and solar systems », dans POHL, Goeran (éd.), *Textiles, Polymers and Composites for Buildings*, Woodhead Publishing Series in Textiles, Woodhead Publishing, 2010, p. 351-374.

Figure 86 : DE INGENIEUR (Redactie), « Vluchtelingentent met zonnepanelen », *De Ingenieur*, 6 avril 2016, consulté le 15 février 2025 sur : www.deingenieur.nl/artikelen/vluchtelingentent-met-zonnepanelen

Figure 87 : Nasa, « Inflatable Solar Array Technology Packs Incredible Power in Small Package », *Nasa Marshall Space Flight Center*, 4 août 2015, consulté le 10 juin 2025 sur : <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/inflatable-solar-array-technology-packs-incredible-power-in-small-package/>.

Figure 88 : *Graphique radar ; Membranes tendues – pneumatique* (auteur, 2025).

Figure 89 : *Classement comparatif des typologies selon leur score global pondéré* (auteur, 2025).

Figure 90 : *Expérimentation pratique des typologies barre et câbles - tenségrité* (auteur, 2025).

Figure 91 : *Adaptation d'abris déployables en tenségrité dans des conditions de zone inondée* (auteur, 2025).

Figure 92 : Franceinfo, « Cartes. Guerre à Gaza : visualisez où en est le conflit dans l'enclave palestinienne », *Franceinfo*, consulté le 2 août 2025 sur : www.franceinfo.fr/monde/proche-orient/israel-palestine/cartes-guerre-a-gaza-visualisez-ou-en-est-le-conflit-dans-l-enclave-palestinienne_6534440.html.

Figure 93 : MC CANN, Chris, « Solar-hybrid systems make logistical impact on JBER », *U.S. Air Force News*, 12 avril 2022, consulté le 19 août 2025 sur : <https://www.477fg.afrc.af.mil/News/Article-Display/Article/2995788/solar-hybrid-systems-make-logistical-impact-on-jber>.

Figure 94 : Pvilion, *Military Solar Structures*, s.d., consulté le 2 août 2025 sur : www.pvilion.com/military-solar-structures.

Figure 95 : Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), *PVGIS-PV tools*, s.d., consulté le 2 août 2025 sur : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en.

Figure 96 : Synthesis Design + Architecture, *Volvo Pure Tension Pavilion*, projet présenté sur *Archello*, 2013, consulté le 2 août 2025 sur : www.archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion.

Figure 97 : Ibid.

Figure 98 : Ibid.

Figure 99 : Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), *PVGIS-PV tools*, s.d., consulté le 2 août 2025 sur : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en.

Figure 100 : Synthesis Design + Architecture, *Volvo Pure Tension Pavilion*, projet présenté sur *Archello*, 2013, consulté le 2 août 2025 sur : www.archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion.

Figure 101 : NUTT, David, « Solar solutions : bio-inspired approach creates bespoke photovoltaics », *Cornell Chronicle*, Ithaca (NY), Cornell University, 20 février 2025, consulté le 2 août 2025 sur : <https://news.cornell.edu/stories/2025/02/solar-solutions-bio-inspired-approach-creates-bespoke-photovoltaics>.

Figure 102 : Sabin Design Lab, *HelioSkin* ; *projet pilote*, Cornell University, s.d., consulté le 4 août 2025 sur : www.sabinlab.com/helioskin

Figure 103 :

a) Synthesis Design + Architecture, *Volvo Pure Tension Pavilion*, projet présenté sur *Archello*, 2013, consulté le 4 août 2025 sur : www.archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion.

b) Sunsoak Design, *Bota Solar*, consulté le 15 février 2025 sur : www.sunsoak-design.com/botasolar

c) V8 Architects, *Solar Pavilion*, projet présenté sur *ArchDaily* (galerie photo), consulté le 19 août 2025 sur : www.archdaily.com/992733/solar-pavilion-v8-architects/637fcae6d2dc580169a16dff-solar-pavilion-v8-architects-photo.

Figure 104 : Schéma exploratoire d'un module polyvalent destiné à l'accueil temporaire et à la production d'énergie (auteur, 2025).

Figure 105 : Schéma exploratoire d'un module entièrement dédié à la production d'énergie (auteur, 2025).

Figure 106 :

a) Sunsoak Design, *Bota Solar*, consulté le 15 février 2025 sur : www.sunsoak-design.com/botasolar

b) V8 Architects, *Solar Pavilion*, projet présenté sur *ArchDaily* (galerie photo), consulté le 4 août 2025 sur : www.archdaily.com/992733/solar-pavilion-v8-architects/637fcae6d2dc580169a16dff-solar-pavilion-v8-architects-photo.

Figure 107 : Schéma traduit en modélisation 3D expérimentale d'une membrane tendue (auteur, 2025).

Figure 108 : Surfaces morphologiques et association de matériaux testées en simulation 3D (auteur, 2025).

Figure 109 : Synthesis Design + Architecture, *Volvo Pure Tension Pavilion*, projet présenté sur *Archello*, 2013, consulté le 4 août 2025 sur : www.archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion.

Figure 110 : Ibid.

Figure 111 : *Extrusion et évolution volumétrique du modèle : a) extrusion de la zone à meilleur rendement ; b) schéma morphologique issue de l'extrusion* (auteur, 2025).

Figure 112 : *Modélisation 3D des volumes extrudés pour affiner la morphologie* (auteur, 2025).

Figure 113 : *Exploration physique d'un principe de déploiement « pop-up »* (auteur, 2025).

Figure 114 : *Illustration du déploiement « pop-up »* (auteur, 2025).

Figure 115 : Synthesis Design + Architecture, *Volvo Pure Tension Pavilion*, projet présenté sur *Archello*, 2013, consulté le 4 août 2025 sur : www.archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion.

Figure 116 : Ibid.

Figure 117 : ARIFF, Azlan, ARIFF, Ali, MAZDI, Muhammad Zharfan, DELOS SANTOS, Ilagan, PAULA, Ana, et SHAFIE, Nur Zawani, « PVC Mesh as Adaptable Recycled Textile Waste towards Innovative Tropical Building Façade », *Asian Journal of Environment-Behaviour Studies*, vol. 8, janvier-avril 2023, p. 64.

Figure 118 : Unisign, *Maille de couleur*, s.d., consulté le 10 août 2025 sur : www.unisignflex.com/fr/Les-produits/maille-de-couleur.

Figure 119 : DAWOUD, Mohamed M. et SALEH, Hosam M., « Introductory Chapter: Background on Composite Materials », *Characterizations of Some Composite Materials*, Londres, IntechOpen, 2018, doi:10.5772/intechopen.80960, consulté le 10 août 2025 sur : <https://www.intechopen.com/chapters/63509>.

Figure 120 :

a) Synthesis Design + Architecture, *Volvo Pure Tension Pavilion*, projet présenté sur Archello, 2013, consulté le 4 août 2025 sur : www.archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion.

b) Alu Pour Tous, *Tube rond 76 × 3 mm – Aluminium 6060 T6*, consulté le 11 août 2025 sur : www.alupourtous.com/produits/profils-standards/tube-rond/tube-rond-76-x-3-mm.

Figure 121 :

a) EcoFlow France, « Panneau solaire flexible EcoFlow 100 W », *EcoFlow France*, consulté le 12 août 2025 sur : fr.ecoflow.com.

b) Heliatek GmbH. *Fiche technique HeliaSol 436-2000-CFF*. Dresde : Heliatek GmbH, avril 2025.

Figure 122 : Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), *PVGIS-PV tools*, s.d., consulté le 2 août 2025 sur : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en.

Figure 123 : Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), *PVGIS-PV tools*, s.d., consulté le 2 août 2025 sur : https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en.

Figure 124 : *Modélisation 3D du module final de l'esquisse ; membrane en maillage PVC (16,56 m²) et tube rond en aluminium (16,25 m).* (auteur, 2025).

ANNEXES

A. Retour acteurs de terrain

a. Echanges oraux

1. Uriel Aboim, architecte responsable de la planification et de la conception chez MSF, Teams (01:29:17), 05/11/2024, notes manuscrites :

- Culture, coutumes -> crucial pour design d'abris

Exemple Soudan : latrines sans toit (préférence -> voir le ciel)

Espaces communs / privés -> tenir compte pratiques religieuses, sociales (orientation lit/toilettes vers La Mecque, etc.)

Genre / rôles sociaux -> espaces séparés, enfants -> différent selon région

- Transport = avion, bateau, camion -> contraintes taille, poids, volume

Choix : facile à transporter -> fragile ; solide -> lourd, difficile logistique

Fabrication / supply chain -> délais et coûts varient (ex : Dubaï rapide, Ukraine plus lent)

- Pas d'abri universel -> été, hiver, humidité, etc. -> besoins très différents

Ventilation, protection pluie, chaleur, froid -> besoin en énergie

Matériaux -> résistants + dispo localement (bois, bambou, recyclé) -> réparations faciles + durabilité

Réutiliser bâtiments existants (ex : hôtel abandonné aux Philippines -> tentes + électricité temporaire + filtres eau)

Kits modulaires -> pas d'abri tout fait mais matériaux de base -> gens construisent eux-mêmes (adaptés à leur culture / savoir-faire)

- Kits NFI = essentiels (lampes solaires, radios, nourriture, eau, matériel abris)

Doivent rester flexibles -> selon environnement

Abri ≠ juste tente -> aussi bâtiments réutilisés, structures de fortune

Importance -> urgence + culture + santé + durabilité

2. Magali Clerbaux, responsable gestion de crise chez la Croix Rouge, Teams (00 : 51 : 05), 08/11/2024, notes manuscrites :

- Objectif principal -> développer structures temporaires modulables pour urgences (catastrophes naturelles, inondations)

Intervenante -> Magali Clerbaux (spécialiste interventions de crise, abris temporaires)

- Besoin d'espace -> priorité = sanitaires, protection intempéries, sécurité

Structure -> dépend de critères comme résilience aux intempéries (ex : Better Shelter en plastique)

Matériaux -> réfléchir aux risques (ex : effet de serre dans zones chaudes)

- Évacuation rapide -> installation plus lente (gymnases, hôtels, etc.)

Phase de transition -> après urgence, solutions plus longues -> plusieurs jours / 1 semaine

- Adaptation -> besoins spécifiques + culturels (allaitement, espace privé femmes/enfants)

Exemple -> système modulaire avec tubes carton pour compartimenter grands espaces (gymnases, halls) -> facile transport + installation, améliore confort

- Modèle éco -> dépend contexte (Belgique = autorités impliquées ; international = dons, financements privés)

Plateformes -> IFRC = dons pour projets secours ; site Croix-Rouge = infos financements / besoins par crise

- Local vs international -> projet applicable en Belgique + Afrique subsaharienne (catastrophes récurrentes comme inondations)

Flexibilité / modularité -> structures modulables -> adaptées à divers contextes / échelles

- Intimité -> essentielle pour bien-être (souvent tentes préférées aux dortoirs -> plus de solitude)

Psychologie -> perception espace/confort varie selon individus -> à prendre en compte

- Aspects à approfondir -> culturels + psychologiques dans conception abris

Financement -> varie selon pays, crise (dons, autorités locales/internationales)

Modularité / flexibilité -> clé pour adaptation à différents contextes sociaux / géographiques

3. Monia Belkhir, Architecte, team leader de l'équipe construction chez MSF, Teams (01 : 02 : 04), 13/11/2024 , notes manuscrites :

- Nom -> Monia Belkhir

Poste -> Team Leader Construction chez MSF

Formation -> Architecte diplômée de Saint Luc

- Transport et déploiement -> enjeu majeur = structures temporaires rapides

Modules transportables facilement (ex : en valise) -> éviter logistique lourde (hélicos, véhicules spéciaux)

Problème transport -> moyens limités, volume + poids influencent choix

Idée -> modules déployables rapidement sur place -> atout majeur

- Sols difficiles -> argileux, instables, mauvaise qualité

Travailler le sol -> nécessaire -> retarde le déploiement

Conséquences -> travaux préparatoires pour rendre le sol apte -> moyens supplémentaires

Question -> résilience des installations selon environnements très différents

- Mission Soudan du Sud -> problème = maladies liées à l'eau (pas humidité)

Risque choléra -> conditions hygiéniques difficiles

Défi MSF -> assurer hygiène + gestion eau/déchets dans abris temporaires

- Exemple -> hôpital de campagne monté en 2 semaines

Structures gonflables -> poste opératoire

Problème terrain -> préparation reste critique -> retarde interventions

- Modules réglables -> pieds ajustables -> adapter plancher au terrain

Limites -> hauteur pieds + charge -> pas toujours efficace en terrain irrégulier

- NFI kits -> tentes, couvertures, matelas... mais pas toujours suffisants long terme

MSF -> organisé par sections géographiques (Paris, Bruxelles, Amsterdam)

Chaque section -> financements propres -> interventions fragmentées

- Isolation -> structures pas toujours adaptées extrêmes (chaud, froid, vent)

Transport -> poids + volumes compliquent déploiement

Stabiliser le sol -> logistique supplémentaire

- Terrain instable -> gros challenge

Besoin de structures résilientes -> recherche et développement prometteur

Ressources qualifiées -> crucial pour rapidité + efficacité

Équipe formée + équipement adapté -> clé du succès

- Potentiel projet -> structures résilientes adaptées aux terrains difficiles -> très intéressant

Flexibilité + rapidité -> besoins critiques

Question -> financement déjà prévu ?

Si non -> Monia propose d'étudier documents du projet -> voir comment aider / apporter expertise

b. Echanges par mails

1. Thibaut Colette, Architecte, Major Div Sp / Infra Ops à La Défense, mails, 05/11/2024, échanges écrits :

24IG6550 Demande d'information - Master Architecture

Colette Thibaut <Thibaut.Colette@mil.be>

À : ☺ GRAS Loïc
Cc : Moyen Christophe <Christophe.Moyen@mil.be>; **+1 autre**



Mar 05/11/2024 18:48

 Vous y avez répondu le Mer 13/11/2024 03:24

Bonjour M. Gras

Veuillez trouver ci-dessous nos éléments de réponse (intégrés dans votre texte **en jaune**) concernant votre demande dans le cadre de votre Master en architecture

N'hésitez pas à me contacter si vous avez des questions

Cordialement

Major Thibaut COLETTE

“Je me permets de vous contacter dans le cadre d'un projet de recherche universitaire en architecture, axé sur le développement de structures temporaires destinées aux situations d'urgence, notamment en cas de catastrophes de nature diverse exposant des occupants aux risques d'inondation.

L'objectif principal est de **mieux comprendre les problématiques réelles** rencontrées par les acteurs sur le terrain, afin de pouvoir adapter le projet de recherche aux besoins concrets en situation de crise. En tant qu'experts/acteurs expérimentés dans l'intervention d'urgence, vos retours sur les défis logistiques, techniques et humains auxquels vous faites face lors de telles opérations seraient d'une grande aide.

- L'engagement de moyens d'infrastructure déployable de la Défense se fait majoritairement dans le cadre des déploiements opérationnels de nos forces armées à l'étranger
- Ces moyens sont mis en œuvre lorsque les moyens du pays hôte ou d'un tiers sont insuffisants ou non disponibles pour nos troupes
- L'infrastructure déployable de la Défense est rarement engagé lors de catastrophes naturelles à l'étranger

Pour orienter le travail de manière pertinente, il serait intéressant de savoir :

- - **Quels sont les principaux obstacles** que vous rencontrez dans la mise en place d'infrastructures temporaires en zone sinistrée (accessibilité du site, temps de déploiement, stabilité des sols, etc.) ?
 - Transport - projection stratégique du matériel (container 20' – 10 tonnes) vers des zones enclavées
 - Travaux préparatoires afin de stabiliser la zone devant accueillir les infrastructures déployables: Matériaux nécessaires et temps de mise en œuvre élevé
 - Approvisionnement en énergie fossile quantitativement et qualitativement

- **Quelles sont les priorités** en termes de conception et d'installation d'abris ou d'infrastructures d'urgence (protection contre les intempéries, capacité, durabilité, etc.) ?

- Identification du besoin fonctionnel du client
- Identification d'une zone « saine » pour l'implantation de l'infrastructure (à l'abri des inondation, pollution,...)
- Priorité en terme capacitaire : Approvisionnement en eau et énergie de la zone (De préférence via le réseau local)

- **Quels manques identifiez-vous dans les solutions actuelles**, et où voyez-vous un besoin d'innovation pour faciliter vos interventions ?

- Développement de solutions de production d'énergie renouvelable déployable (solaire et éolien)

Dans le cadre de cette réflexion, il est développé des hypothèses sur l'usage de **structures en tenségrité** – un système architectural léger et modulaire. Ces structures, grâce à leur conception basée sur l'équilibre entre tension et compression, pourraient offrir des solutions pratiques pour l'hébergement temporaire ou la mise en place d'infrastructures d'urgence. Voici quelques pistes envisagées à ce stade :

- - **Structures surélevées** : des unités pouvant être installées à une certaine hauteur du sol pour minimiser la vulnérabilité des infrastructures temporaires à l'impact des sols submergés.

- **Modularité et adaptabilité** : concevoir des unités modulaires adaptées à différents besoins (hébergement, espaces médicaux ou logistiques).

- **Déploiement sur site** : permettre la mise en place des structures rapidement déployables directement dans les zones touchées, limitant le déplacement et la concentration des foules dans des lieux spécifiques, tout en offrant une réponse immédiate et décentralisée aux besoins d'hébergement.

- **Rapidité de déploiement** : favoriser une préfabrication facilitant le transport et l'installation rapide sur place.

- **Durabilité et réutilisation** : utiliser des matériaux légers mais robustes, permettant une réutilisation dans diverses crises.

- Les principes de la Défense dans l'acquisition du matériel infrastructure déployable sont les suivants :
 - Modules autonomes et réutilisables
 - Structure flexibles et modulables



Thibaut COLETTE
Major (OF-3)
Div Sp / Infra Ops
ACOS Readiness & Operations

Thibaut.colette@mil.be
www.mil.be