
Application à la conception d'un système solaire

V.1 Avant-propos

Le cas d'application présenté dans ce chapitre a comme principal objectif l'illustration des démarches proposées. Pour éviter d'induire en erreur le lecteur, il convient de noter que les données présentées sur le cas d'application, ainsi que les descriptions des produits étudiés ou les choix de conception adoptés, peuvent ne pas correspondre au cas industriel réel pour des raisons de confidentialité.

V.2 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons d'appliquer l'ensemble des démarches d'aide à la décision développées dans cette thèse pour aider le concepteur à aboutir à un réflecteur solaire qui répond au mieux aux objectifs de conception. Le cas d'étude considéré dans ce chapitre est tiré du projet industriel SolR², qui vise à développer une centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel, ainsi que son usine de fabrication. Un travail de développement a déjà été effectué au sein de l'équipe de développement du projet. Ce premier travail nous a permis de développer des modèles de comportement adaptés à différents concepts de réflecteur et de collecter les informations relatives aux préférences du décideur. Ces informations seront formalisées dans la section V.4. Le développement au sein de l'entreprise nous a aussi permis de mettre en évidence les difficultés rencontrées chez l'industriel pour faire des choix de conception face à des problématiques comme la méconnaissance ou la faible exactitude des modèles de comportement utilisés. Cela a permis notamment de mettre en évidence les améliorations apportées sur les prises de décision grâce aux démarches développées dans cette thèse, que ce soit pour les décisions sur les choix de concepts ou pour celles sur la définition de l'architecture du produit.

V.3 Présentation du cas industriel

V.3.1. Centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel

Avant d'aborder plus en détail la conception du support réflecteur, qui fait l'objet de notre cas d'étude, il est important de comprendre d'abord le fonctionnement d'une centrale solaire à concentration (ou CSP pour "*Concentrated Solar Power*") qui utilise des miroirs de Fresnel. Cela contribue notamment à la compréhension des objectifs de conception exigés dans la conception du support réflecteur (détaillés dans la section V.4).

Le CSP est une technologie qui permet de convertir l'énergie liée au rayonnement solaire en énergie électrique. Une centrale CSP utilise des panneaux réfléchissants pour concentrer et rediriger les rayons du soleil vers des tubes absorbeurs (appelées récepteurs). Cela permet à un fluide caloporteur, circulant à l'intérieur de ces tubes, d'être chauffé à des températures très élevées. Le fluide caloporteur à haute température est, soit utilisé directement dans un cycle thermodynamique pour générer de l'électricité, soit utilisé pour chauffer un autre fluide via des échangeurs thermiques pour être utilisé ensuite dans un cycle thermodynamique.

Comparé aux panneaux photovoltaïques, l'avantage majeur d'une centrale CSP est la possibilité de stocker de l'énergie thermique dans des réservoirs, ce qui permet de produire de l'électricité indépendamment du cycle du soleil. De plus, la chaleur générée peut être utilisée pour d'autres applications industrielles ou urbaines comme la désalinisation, le refroidissement, la climatisation, etc.

Des études ont montré que les systèmes CSP pourront combler jusqu'à 25% des besoins énergétiques de la planète d'ici 2050 [Jha09]. Ils représentent donc une contribution majeure dans la transition énergétique mondiale. Les systèmes CSP à miroirs de Fresnel sont l'une des quatre variantes de cette technologie. Les trois autres variantes sont : le CSP à tour, le CSP à miroirs cylindro-paraboliques et le CSP à miroirs paraboliques. Dans le Tableau V-1, un comparatif est donné entre les trois variantes du système CSP. D'après ce tableau, le système CSP à miroirs de Fresnel a un avantage économique par rapport aux trois autres variantes. Cependant, le rendement thermique nominal est moins élevé que les autres variantes.

Technologie	Cylindro-parabolique	Tour	Parabole	Fresnel
Rendement thermique nominal	70 %	73 %	75 %	60 %
Puissance des installations	80 à 300 MW _{th}	10 à 100 MW _{th}	1 à 100 kW _{th}	5 à 150 MW _{th}
Température de travail	70 à 450 °C	50 à 1 000 °C	600 à 1 200 °C	≈ 70 à 400 °C
Prix du champ solaire	210 à 250 €/m ²	140 à 220 €/m ²	≈ 150 €/m ²	≈ 130 à 200€/m ²
Coût total d'investissement	2,8 à 3,5 €/We	3 à 4 €/We	10 à 14 €/We	≈ 1,6 à 2,6 €/We

Tableau V-1 Comparatif des principales caractéristiques des différentes variantes de centrales solaires à concentration [Gaz11, Ben10]

V.3.2. Une technologie peu mature

Malgré l'avantage économique qu'offre l'utilisation des centrales solaires thermodynamiques à miroirs de Fresnel, leur utilisation reste relativement limitée dans le monde. C'est une technologie naissante et peu mature mais qui présente un grand potentiel d'amélioration [Int10]. Cependant, le peu de centrales solaires commerciales qui existent à ce jour offrent très peu de retour d'expérience, ce qui constitue une difficulté pour les ingénieurs dans leurs choix de solutions de conception.

V.3.3. Le réflecteur solaire

Le composant étudié dans notre cas est le réflecteur solaire. Sa fonction principale est de se concentrer et de rediriger les rayons du soleil sur les tubes absorbeurs pour chauffer le fluide caloporteur. La chaleur récupérée est ensuite utilisée pour produire de la vapeur à haute pression qui actionne une turbine pour produire de l'électricité. Comme nous pouvons le voir sur la Figure V-1, un réflecteur solaire est composé d'un panneau réfléchissant et d'un support réflecteur dont la fonction est de maintenir la forme du panneau réfléchissant (une forme légèrement incurvée). Un dispositif de fixation est réalisé entre les panneaux réfléchissants et le support réflecteur pour assurer la liaison entre les deux (voir Figure V-1). Le réflecteur solaire est entraîné par un mouvement de rotation afin de s'adapter à la position du soleil dans la journée. Dans notre étude, seule la conception du support réflecteur est traitée.

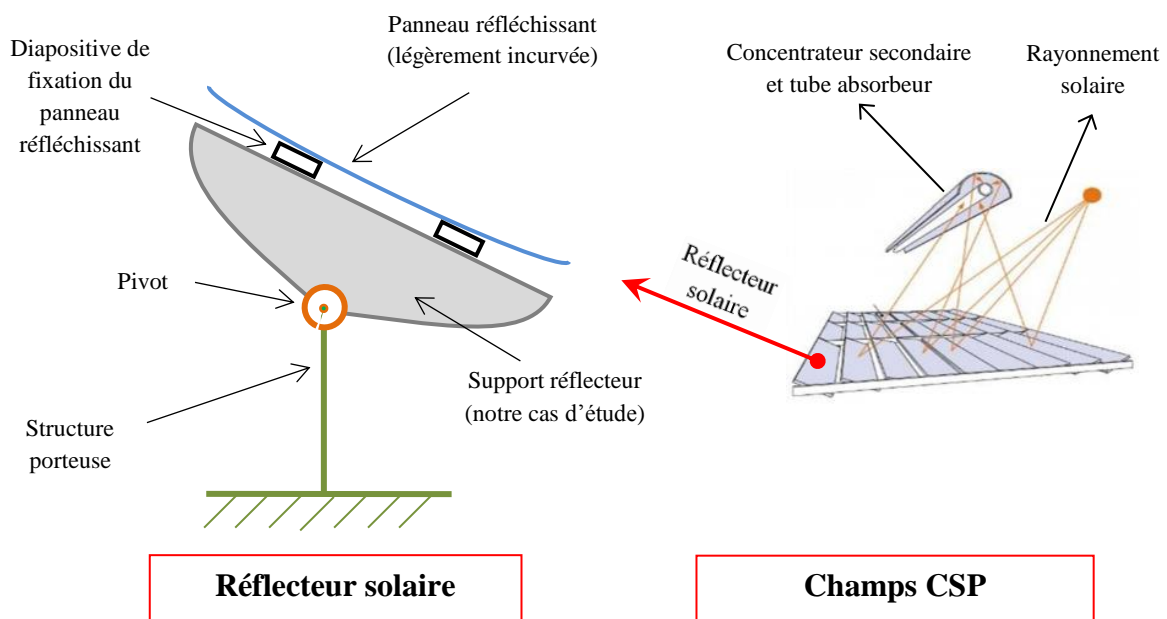


Figure V-1 Structure du réflecteur solaire

V.4 Formalisation des préférences du décideur

Comme nous l'avons évoqué auparavant, la formalisation des préférences du décideur constitue une étape de base dans nos démarches. Le modèle présenté dans cette section sera utilisé dans la phase de sélection préliminaire des concepts (section V.7) et dans la phase de conception architecturale (section V.8). Ces informations traduisent les préférences de conception qui ont été recueillies auprès des différents intervenants dans le projet de développement. Les principaux intervenants sont :

- ✓ Des ingénieurs d'étude qui ont des compétences en développement de systèmes mécaniques, et en particulier en solaire à concentration. Ils sont au nombre de trois ;
- ✓ Le responsable du projet SOLR² (projet de développement de la centrale solaire) qui a une connaissance accrue des stratégies de l'entreprise et des objectifs globaux liés au développement de la centrale ;

V.4.1. Identification et structuration des objectifs de conception

Les objectifs de conception dans notre cas industriel sont structurés dans la Figure V-2. L'objectif global est d'assurer la concentration optimale des rayons solaires, d'une manière durable dans le temps, tout en étant compétitif. L'objectif global est ainsi décomposé en trois principaux objectifs de conception qui sont : « avoir un coût de fabrication faible », « avoir une performance optique élevée » et « bien résister à l'environnement extérieur ».

D'après l'étude de Kumara et al. [Kum15], le coût de fabrication des supports réflecteur représente 50 % environ du coût global d'investissement pour une centrale CSP à miroirs de Fresnel. Il est donc considéré par l'entreprise comme l'objectif de conception le plus important. Cela permet entre autres de maintenir l'avantage économique qui distingue le système CSP à miroirs de Fresnel des autres technologies CSP. Le coût de fabrication n'est pas lié uniquement au coût de la matière première mais à d'autres coûts comme le coût d'acquisition des machines de fabrication ou le coût de la main d'œuvre. Cependant, pour simplifier notre cas d'application, nous supposons que le coût de fabrication est lié uniquement au coût de la matière première (présenté en Figure V-2).

Dans notre cas d'étude, la performance optique désigne la capacité du réflecteur à concentrer et à réfléchir correctement les rayons du soleil sur les tubes absorbeurs. Cette dernière influe directement sur le rendement thermique de la centrale. Pour limiter le pourcentage des rayons déviés de leur cible, il faut limiter le plus possible les déformations

des miroirs réflecteurs et donc spécifiquement du support réflecteur. L'objectif de la performance optique est alors décomposé en deux sous-objectifs qui sont : « avoir une torsion faible de la structure » et « avoir une déflexion faible de la structure ».

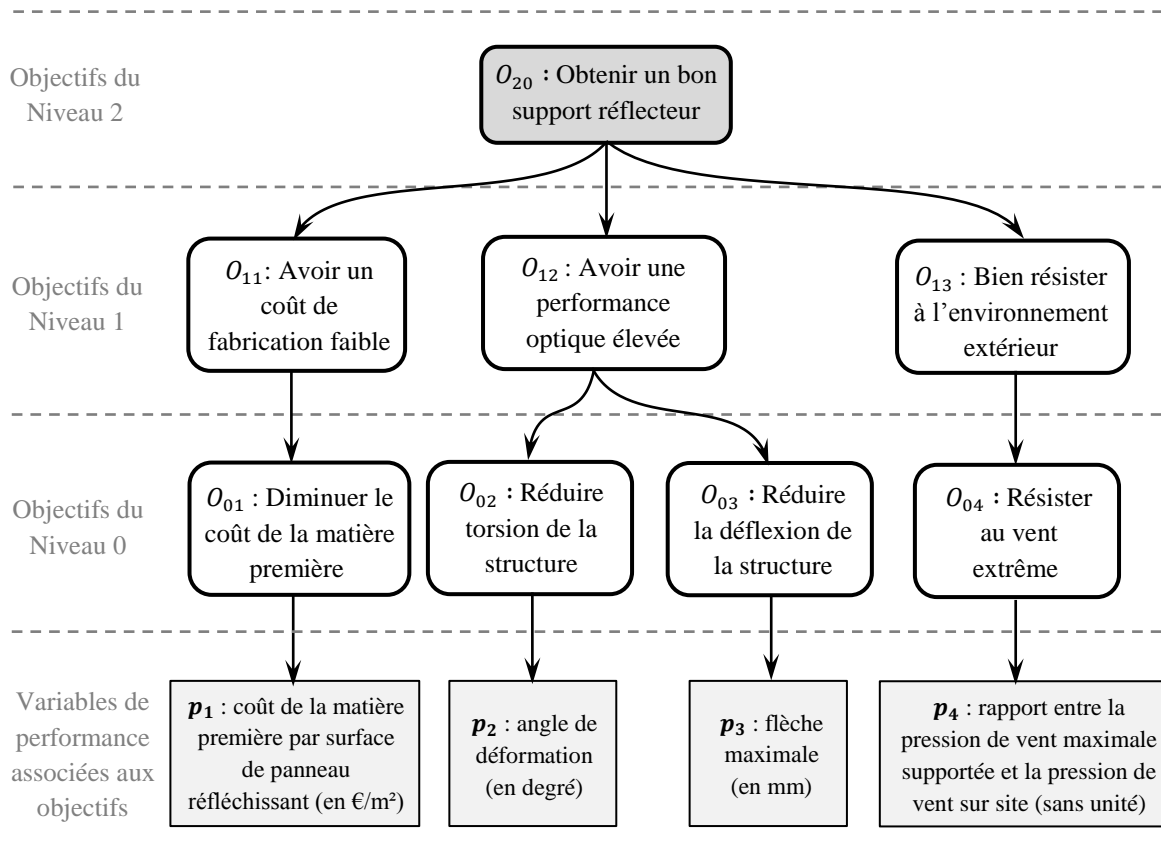


Figure V-2 Décomposition de l'objectif global de conception en plusieurs sous-objectifs de conception

Le support réflecteur doit résister aux conditions climatiques qui caractérisent le site d'implantation. Plus le support réflecteur sera résistant, plus les possibilités de sites d'implantation seront variées, ce qui constitue un avantage non négligeable pour l'entreprise qui souhaite développer ses solutions pour plusieurs sites d'implantation. Cependant, cet objectif (qui peut favoriser des épaisseurs plus importantes de la structure) peut être en opposition avec l'objectif de minimisation du coût de la matière première. Pour simplifier notre cas d'application, l'objectif « résister à l'environnement extérieur » est lié uniquement à la résistance au vent extrême (comme le montre la Figure V-2). En réalité, le support réflecteur doit résister à d'autres sources de dégradation comme la corrosion ou l'abrasion.

Comme nous pouvons constater sur la Figure V-2, chaque objectif du niveau 0 (niveau le plus bas notre décomposition) a été associé à une variable de performance qui permet de vérifier sa satisfaction. Ces variables de performance (p_1 , p_2 , p_3 et p_4) sont à déterminer sur

la solution du support réflecteur considérée. La section V.6 présente les modèles de comportement utilisés dans notre cas industriel pour déterminer ces variables. Les paramètres du milieu environnant PE_i qui interviennent dans le calcul des p_i seront également présentés dans la section V.6.

V.4.2. Modèle d'interprétation ϕ

Les préférences des concepteur vis-à-vis des variables de performance (introduits dans la section précédente) sont formalisées dans le modèle d'interprétation ϕ . Ce modèle est basé sur l'utilisation de fonctions de désirabilité de Harrington [Har65]. A Chaque variable de performance p_i correspond une fonction de désirabilité ϕ_i . L'allure de ces fonctions ainsi que les paramètres qui ont permis de les établir sont donnés dans le Tableau V-2. Ces paramètres ont été définis en collaboration avec différents intervenants du projet.

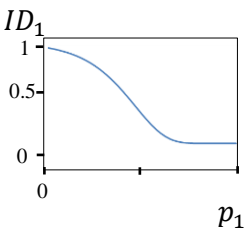
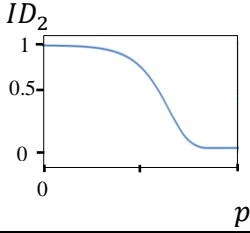
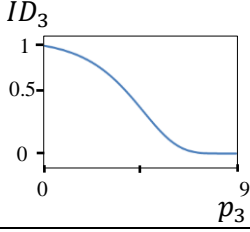
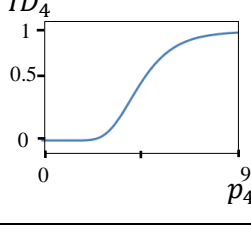
Variables de performance p_i	Allure de la fonction de désirabilité ϕ_i	AC_i	d_i^{AC}	SL_i	d_i^{SL}
Coût de la matière première p_1 (en €/m ²)		_€/m ²	_	_€/m ²	_
Déformation angulaire p_2 (en degré)		_°	_	_°	_
Flèche maximale p_3 (en mm)		_mm	_	_mm	_
Résistance au vent p_4 (sans unité)		_	_	_	_

Tableau V-2 Paramètres des fonctions de désirabilité de Harrington pour le modèle d'interprétation

Les points de paramétrage AC_i ont un intérêt particulier dans notre étude. Ils définissent le seuil minimal d'acceptabilité du produit. Il suffit qu'un seul de ces seuils ne soit pas respecté pour que la validation du support réflecteur soit compromise. Ces seuils sont définis en adéquation avec la stratégie globale de l'entreprise. Par exemple, le coût de la matière première doit être en adéquation avec le budget maximal qui a été initialement fixé par l'entreprise. Pour les performances optiques, ils doivent respecter le rendement minimal de production électrique annoncé par l'entreprise.

V.4.3. Modèle d'agrégation φ

La satisfaction de l'objectif global de conception est formalisée par l'indice global de désirabilité IGD . Cet indice est déterminé à partir des indices ID_i (obtenus à la sortie du modèle d'interprétation ϕ) en utilisant des opérateurs d'agrégation. D'après la décomposition retenue des objectifs (Figure V-2), deux opérateurs d'agrégation sont nécessaires dans notre cas : un premier opérateur sert à déterminer l'indice de désirabilité lié à l'objectif intermédiaire « avoir une bonne performance optique » et un deuxième opérateur sert à déterminer l' IGD . Nous avons choisi la méthode des points équivalents [Sco99, Sco00] pour fixer les poids w_i et les degrés de compensation s_i en adéquation avec les préférences et les affinités du décideur. Les points équivalents établis par le décideur sont donnés dans le Tableau V-3 (en rouge les valeurs estimées). Les poids et les degrés de compensation obtenus à partir de ces points équivalents sont donnés dans le Tableau V-4.

	Agrégation niveau 1			Agrégation niveau 0		
	ID_2	ID_3		ID_1	ID_{23}	ID_4
Point de référence	0.5	0.5	Point de référence	0.5	0.5	0.5
Point équivalent 1	0.23	0.5	Point équivalent 1	0.17	0.5	0.5
Point équivalent 2	0.5	0.17	Point équivalent 2	0.5	0.28	0.5
			Point équivalent 3	0.5	0.5	0.30

ID_{23} : indice de désirabilité correspondant à l'objectif "Performance optique"

ID_1, ID_2, ID_3 et ID_4 sont définis dans le Tableau V-2

Tableau V-3 Les points équivalents utilisés pour déterminer les opérateurs d'agrégation

Agrégation niveau 1		
Objectifs		
	Avoir une torsion faible de la structure	Avoir une déflexion faible de la structure
Poids	0.58	0.42
Degré de compensation : $s_1 = -0.22$		

Agrégation niveau 0			
Objectifs			
	Avoir un coût de fabrication faible	Avoir une bonne performance optique	Bien résister à l'environnement extérieur
Poids	0.55	0.21	0.24
Degré de compensation : $s_0 = -0.12$			

Tableau V-4 Paramètres des opérateurs d'agrégation utilisés (poids et degrés de compensation)

V.5 Concepts du support réflecteur proposés initialement

L'étape de formalisation des préférences présentée dans la section précédente permet de mettre au clair, et d'une manière structurée, les préférences et intentions du décideur. Cela contribue, non seulement à faciliter les choix de solutions de conception, mais aussi à proposer des concepts plus pertinents vis-à-vis des objectifs de conception. Dans notre cas industriel, plusieurs structures ont été proposées initialement. Une présélection rapide a été faite au tout début du projet de développement. Elle s'est soldée par le choix de trois concepts jugés faisables par les concepteurs. Ces concepts sont : la structure treillis, la structure sandwich et la structure tube. Ils sont tous schématisés dans la Figure V-3 avec les paramètres de conception qui leurs correspondent.

Comme on peut le voir sur la Figure V-3, la structure treillis est composée de barres diagonales supérieures, de barres diagonales inférieures, de membrures supérieures et de la membrure inférieure. La structure sandwich est composée d'une âme qui est constituée de plusieurs poutres en I et de peaux sous forme de tôle métallique. Enfin, la structure en tube est composée d'un tube central qui longe toute la structure et sur lequel sont fixées des traverses pour porter les panneaux réfléchissants. Le choix du matériau et du revêtement anticorrosion est fixé dès le début du projet et il est le même pour les trois concepts. Ce choix n'est pas communiqué dans ce document pour des raisons de confidentialité. Même chose pour le choix

du procédé d'assemblage (fixation entre composants). La longueur du réflecteur (L) et sa largeur (l) ont été également fixées dès le début du projet et sont les mêmes pour les trois concepts. La hauteur du réflecteur (h) est quant à elle considérée comme un paramètre de conception et elle doit être fixée pour chacun des concepts en adéquation avec les objectifs de conception. Dans la suite de ce chapitre, l'ajout de l'acronyme "tr", "sd", ou "tb" en tant qu'exposant dans une grandeur quelconque (variable de performance, paramètre de conception, etc) signifie que cette grandeur est liée respectivement aux concepts treillis ("tr"), sandwich ("sd") ou tube ("tb").

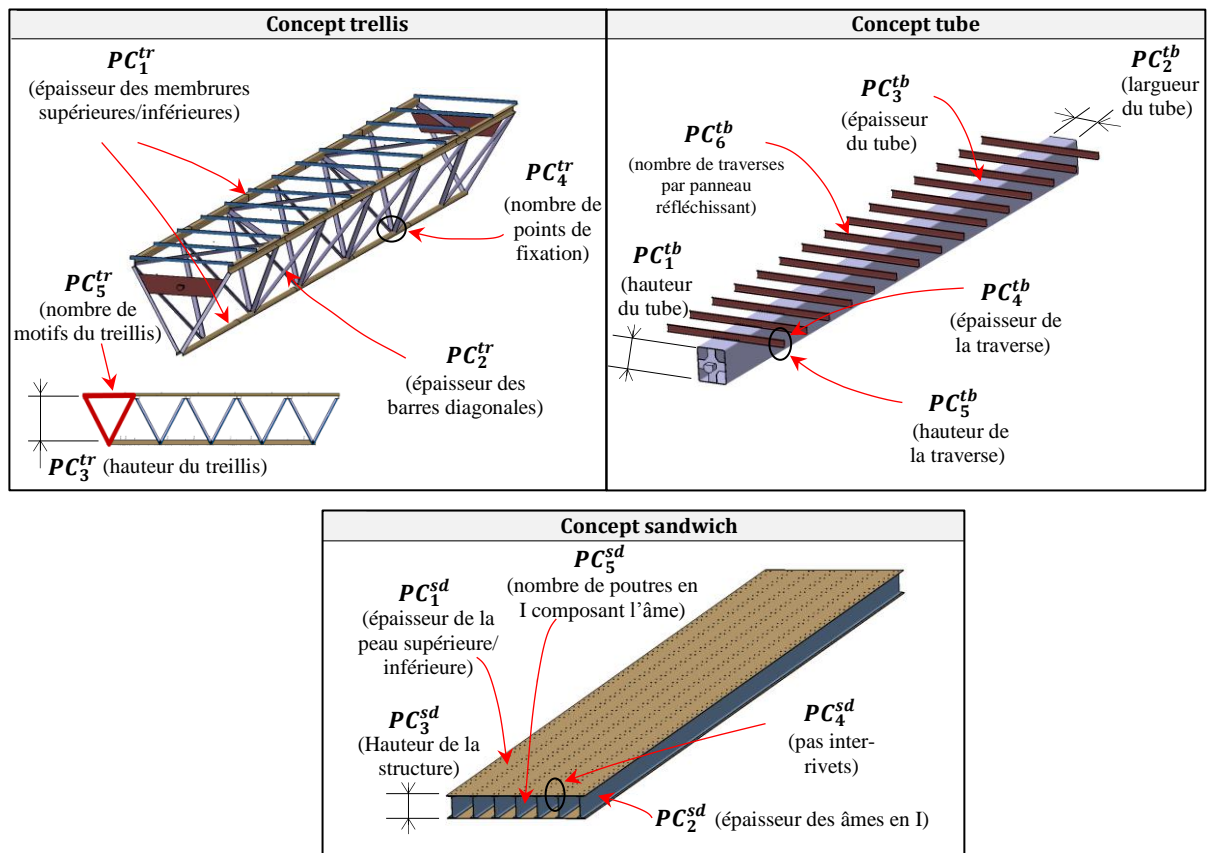


Figure V-3 Concepts de support réflecteur proposés initialement et les paramètres de conception qui leur sont associés

V.6 Modèles de comportement utilisés

Dans le chapitre III, nous avons abordé la notion de modèle de comportement comme étant une composante indissociable du processus global d'aide à la décision. Le modèle de comportement reçoit en entrée les paramètres de conception et les paramètres du milieu environnant. En sortie, il fournit des informations qui décrivent le comportement du produit et qui permettent ainsi de vérifier la satisfaction des objectifs de conception. Le travail de

formalisation et de structuration des préférences, présenté dans la section V.4, nous a permis de mettre en évidence les variables de performance qu'il faudra déterminer sur le support réflecteur. Dans cette section, nous détaillons les modèles de comportement permettant d'évaluer ces variables pour les trois concepts de support réflecteur.

Il est important de noter que les modèles de comportement utilisés dans notre cas industriel évoluent au fur et à mesure que le projet avance et que le produit est affiné. Dans la section V.6.1, nous présentons des modèles préliminaires qui ont été utilisés dans les toutes premières phases d'étude (pour les trois concepts). Ces modèles utilisent beaucoup d'hypothèses de simplifications et sont, pour la plupart, très approximatifs. Ils seront principalement utilisés pour faciliter le choix des concepts les plus pertinents (section V.7). Pour la phase de conception architecturale, nous étudierons uniquement le cas du concept treillis et nous présenterons des modèles de comportement plus développés et plus représentatifs de la réalité que ceux utilisés dans les phases préliminaires d'étude.

Etant donné que nous comparons trois concepts différents dans la phase préliminaire, il est important que les conditions de calcul utilisées (conditions aux limites, état de chargement, paramètres du milieu environnant) soient les mêmes pour les trois concepts. Nous commencerons ainsi par présenter ces conditions de calcul, pour chacune des variables de performance, avant de présenter les modèles de comportement spécifiques à chaque concept. Pour une variable de performance p_i donnée, les modèles de comportement correspondant aux concepts treillis, sandwich et tube seront respectivement notés δ_i^{tr} , δ_i^{sd} et δ_i^{tb} . Les variables de performance fournies par ces trois modèles seront respectivement notées p_i^{tr} , p_i^{sd} et p_i^{tb} .

V.6.1. Modèles de comportement préliminaires

V.6.1.1 Coût de la matière première

Nous avons besoin de connaître le coût de la matière première par unité de surface de panneaux réfléchissant. La variable coût de la matière première, notée p_1^X (X désigne le concept considéré), est donc en *euro/m²*. Le calcul de p_1^X dépend de la masse surfacique du support réflecteur (en Kg/m²), du prix du matériau utilisé (en euro/Kg) et du prix du revêtement utilisé (en euro/Kg également). Ces deux derniers paramètres sont considérés dans notre étude comme des paramètres du milieu environnant et sont notés respectivement PE_1 et PE_2 . Ils sont dépendants du site d'implantation choisi ainsi que d'autres facteurs. Leur valeur ne peut pas être déterminée précisément car le choix du site dans les premières phases du

projet n'est pas figé. La variable p_1^X est calculée en fonction de PE_1 , PE_2 , de la masse surfacique de la structure M^X par l'expression suivante :

$$p_4^X = M^X \times (PE_1 + PE_2) \quad (V.1)$$

En faisant abstraction de la difficulté d'estimer les paramètres PE_1 et PE_2 , l'estimation du coût de la matière première est relativement simple pour les trois concepts : nous utilisons des modèles géométriques pour estimer la masse surfacique de la structure (M^X) en fonction des paramètres de conception. Nous ne détaillerons pas ces modèles dans ce chapitre.

V.6.1.2 Performance optique

a. Conditions générales de calcul : cas de la rigidité en torsion

Le modèle de rigidité en torsion permet de déterminer l'angle de torsion (variable de performance p_2^X) du support réflecteur lorsqu'il est entraîné en rotation et soumis au couple de frottement dans les liaisons pivot. Il s'agit plus exactement de l'angle formé entre les deux sections extrêmes du support réflecteur (sections adjacentes aux deux liaisons pivot). Ce modèle est noté δ_2^X , où X désigne le concept considéré. Avant de présenter les trois modèles δ_2^{tr} , δ_2^{sd} et δ_2^{tb} , nous présentons d'abord les conditions aux limites et l'état de chargement qui seront communs aux trois modèles.

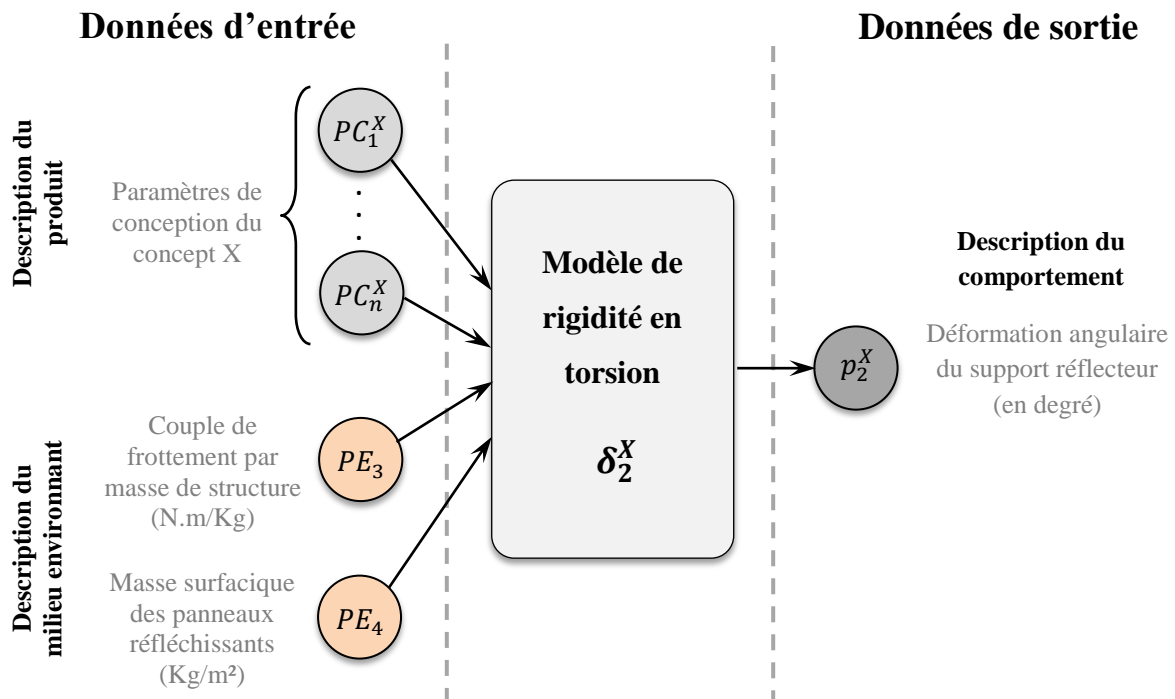


Figure V-4 Structure du modèle de rigidité en torsion

La Figure V-4 montre la structure du modèle δ_2^X avec ses entrées et ses sorties. Les conditions aux limites et l'état de chargement sont illustrés dans la Figure V-5. Les conditions aux limites utilisées sont : une extrémité des sections (adjacentes aux liaisons pivot) est encastree et l'autre est libre. Le couple de frottement est appliqué au niveau de la section libre du support réflecteur. Ce couple de frottement généré au niveau des liaisons pivot n'est pas dépendant uniquement de la solution utilisée pour les liaisons pivot, mais aussi de la masse du support réflecteur car il s'agit dans notre cas de frottements solides. Ce couple de frottement (noté C_t) qui est appliqué sur la section libre du support réflecteur est calculé par la relation suivante :

$$C_t = PE_3 \times (PE_4 + M^X).L.l \quad (V.2)$$

PE_3 est un paramètre qui caractérise la résistance au frottement dans les liaisons pivot. Il est exprimé en N.m/Kg. Le paramètre PE_4 correspond à la masse surfacique des panneaux réfléchissants (en Kg/m²). Les deux paramètres PE_3 et PE_4 sont dépendants respectivement du choix de la solution de liaison pivot et du choix des panneaux réfléchissants. Etant donné que ces deux éléments ne font pas partie de notre périmètre d'étude, PE_3 et PE_4 sont considérés comme des paramètres du milieu environnant. M^X est la masse surfacique du support réflecteur.

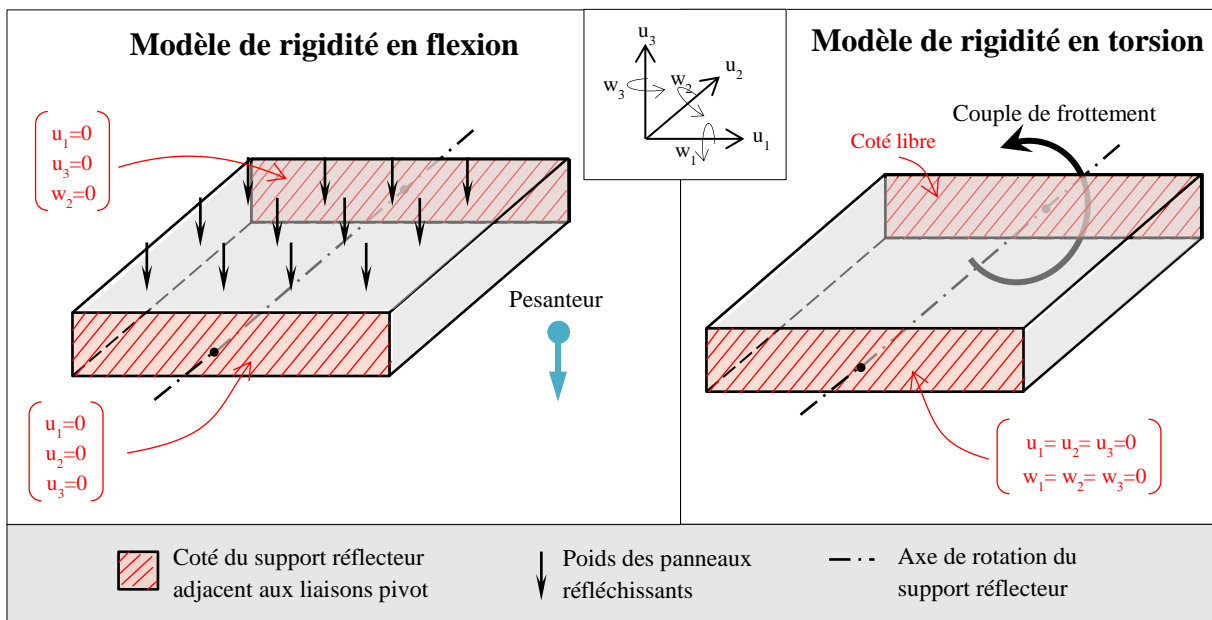


Figure V-5 Conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion

b. Conditions générales de calcul : cas de la rigidité en flexion

Afin de garantir une bonne performance optique, le support réflecteur doit également avoir une déflexion faible. Le modèle de rigidité en flexion permet d'évaluer la flèche maximale du support réflecteur (variable p_2) lorsque ce dernier supporte les panneaux réfléchissants. Avant de présenter les trois modèles δ_3^{tr} , δ_3^{sd} et δ_3^{tb} , nous présentons les conditions aux limites et l'état de chargement communs à ces trois modèles.

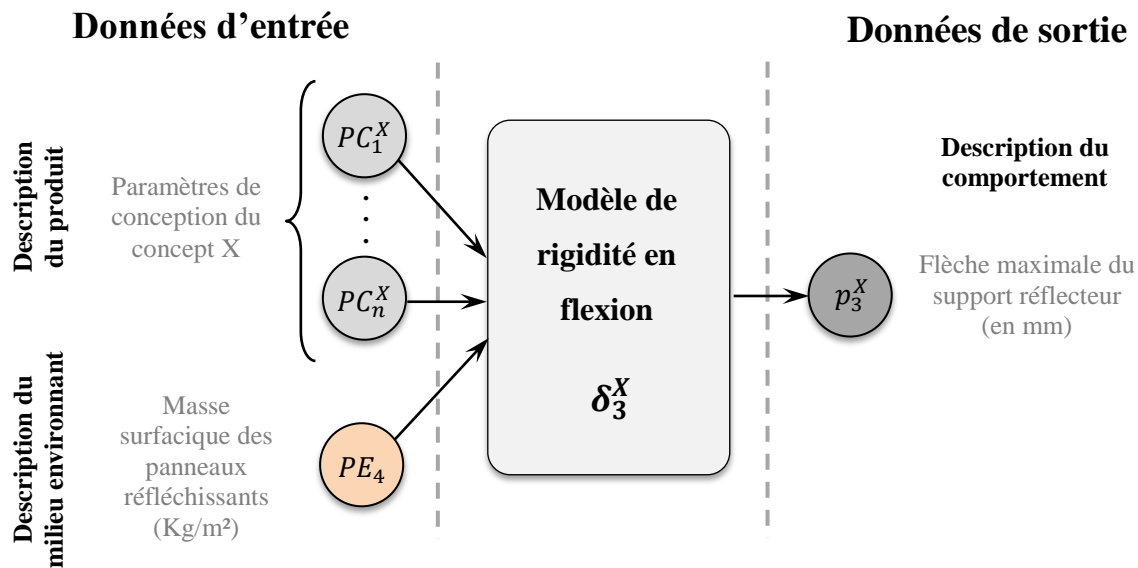


Figure V-6 Structure du modèle de rigidité en flexion

Les conditions aux limites et l'état de chargement sont illustrés dans la Figure V-5. Les seules sollicitations considérées dans le calcul de la flèche maximale sont le poids des panneaux réfléchissants et le poids propre de la structure de support. Nous négligeons l'effet du vent régulier sur la flèche et nous supposons que les panneaux réfléchissants et le dispositif d'accroche ne participent pas à la rigidité en flexion du réflecteur. La Figure V-6 montre la structure du modèle δ_3^X avec ses entrées et ses sorties.

V.6.1.2.1 Concept treillis

Pour le cas de la performance optique, la structure treillis est modélisée par des barres qui sont connectées entre elles par des nœuds, centres des liaisons rotules. Le comportement du matériau est supposé élastique linéaire isotrope. La théorie des poutres est employée dans ce modèle. Nous utilisons la méthode des éléments finis, avec des éléments de type "barre", pour faire le calcul. Le modèle utilisé est schématisé dans la Figure V-7. Les articulations dans ce modèle sont supposées parfaites. Il en résulte que les barres ne sont sollicitées qu'en

traction ou compression (efforts normaux). Cette simplification permet de résoudre le problème d'une manière relativement simple. Dans la structure réelle, les barres diagonales de la structure ne sont pas concourantes aux nœuds et les liaisons ne sont pas réellement des rotules mais des liaisons assemblées (voir Figure V-3). Cela induit des moments de flexion dans les membrures supérieures, inférieures et dans les barres diagonales du treillis. Ce premier modèle de comportement reste peu représentatif du comportement réel de la structure et plusieurs phénomènes physiques sont négligés. Cependant, son avantage principal est qu'il est simple et permet de faire des calculs rapides.

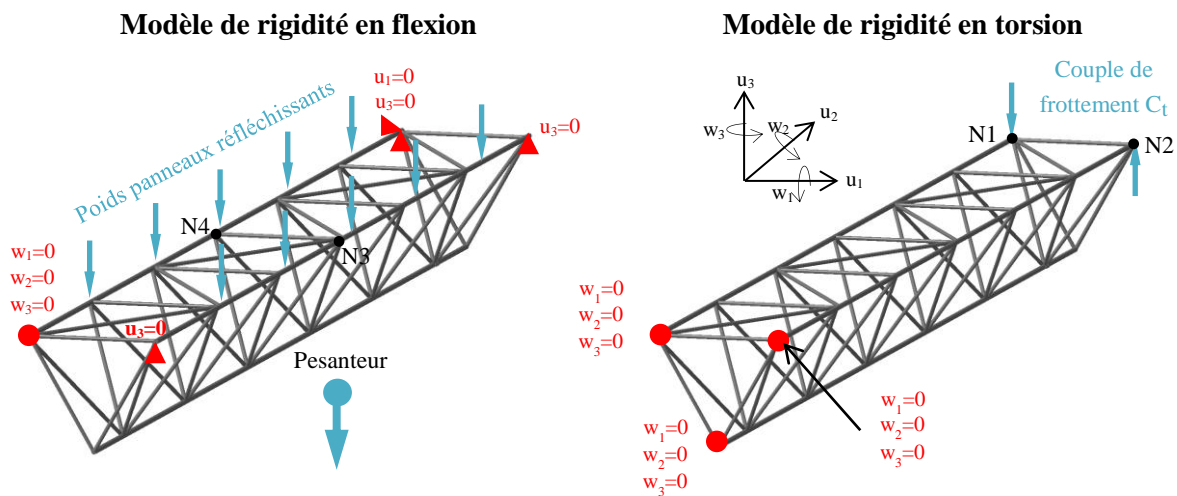


Figure V-7 : Configuration géométrique, conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion du concept treillis

Le modèle illustré à la Figure V-7 permet d'obtenir les déplacements des différents nœuds du treillis mais ne permet pas de calculer directement l'angle de torsion de la structure. L'angle de torsion (en degré) est calculé en fonction des déplacements en z des nœuds N1 et N2 (voir Figure V-7) et de la largeur du support réflecteur (l) en utilisant la relation suivante :

$$p_2^{tr} = \sin^{-1} \left(\frac{|d_1 - d_2|}{l} \right) \quad (V.3)$$

d_1 et d_2 correspondent respectivement aux déplacements dans les nœuds N1 et N2.

Le même modèle est utilisé pour calculer la flèche maximale de la structure treillis. Seules les conditions aux limites et l'état de chargement sont différents comme nous pouvons le voir sur la Figure V-7. La flèche maximale (variable p_3^{tr}) est égale à la moyenne des déplacements en z dans les deux nœuds N3 et N4.

V.6.1.2.2 Concept sandwich

Nous appliquons ici la théorie des poutres pour calculer l'angle de torsion et la flèche maximale de la structure sandwich. Le comportement du matériau est supposé élastique linéaire isotrope. La structure sandwich est modélisée par une poutre à section uniforme sur toute sa longueur L . Nous supposons que l'âme et les peaux sont parfaitement solidaires (liaison d'encastrement parfaite). La Figure V-8 montre les conditions aux limites et l'état de chargement utilisés pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion.

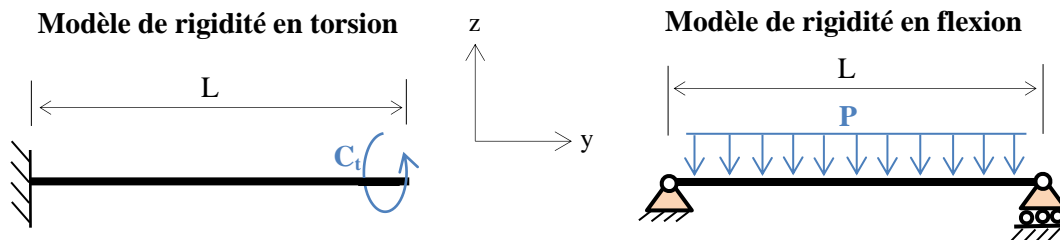


Figure V-8 Conditions aux limites et état de chargement utilisés pour le modèle de rigidité en torsion et le modèle de rigidité en flexion du concept sandwich

En se basant sur la théorie des poutres, l'angle de torsion p_2^{sd} et la flèche maximale p_3^{sd} de la structure sandwich sont respectivement déterminés par les relations (V.4) et (V.5).

$$p_2^{sd} = \frac{C_t \times L}{G \times I_{xz}} \quad (\text{V.4})$$

$$p_3^{sd} = -\frac{5 \cdot P \cdot L^2}{384 \cdot E \cdot I_x} \quad (\text{V.5})$$

Avec P la charge linéaire équivalente appliquée sur la poutre (incluant le poids propre de la structure et le poids des panneaux réfléchissants), I_{xz} et I_x les moments quadratiques du plan (x, z) et de l'axe x respectivement (ils dépendent de la forme de la section), E le module d'Young du matériau utilisé et G son module de Coulomb. Pour calculer les moments quadratiques I_{xz} et I_x , nous décomposons dans un premier temps la structure en plusieurs éléments de formes usuelles : des sections en I (qui constituent l'âme) et des sections rectangulaires (qui constituent les peaux). Les moments quadratiques de ces deux formes sont bien connus dans la littérature. Les moments quadratiques (I_{xz} et I_x) correspondant à la structure sandwich sont alors obtenus en faisant la somme des moments quadratiques de chaque élément et en utilisant le théorème de transport de Huygens.

V.6.1.2.3 Concept tube

Dans le cas du concept tube, nous appliquons aussi la théorie des poutres pour calculer l'angle de torsion et la flèche maximale de la structure. Le modèle de comportement est le même que celui utilisé pour le cas de la structure sandwich. Le calcul des moments quadratiques I_{xz} et I_x est beaucoup plus simple dans le cas du concept tube. Ils sont calculés directement en fonction de la hauteur du tube central PC_1^{sd} , de sa largeur PC_2^{sd} et de son épaisseur PC_3^{sd} .

V.6.1.3 Résistance au vent extrême

Le support réflecteur doit résister au vent extrême sur le site d'implantation. Pour chacun des trois concepts, nous décrivons dans cette section le modèle de comportement permettant de calculer la pression de vent maximale qui peut être supportée par le support réflecteur. Les données d'entrée et de sortie qu'utilise ce modèle sont présentées à la Figure V-9. La Figure V-10 montre les conditions aux limites et l'état de chargement utilisés. Il convient de noter que la résistance du support réflecteur au vent varie selon sa position angulaire autour de son axe de rotation. Dans notre étude, nous considérons la position dans laquelle le support réflecteur est le plus vulnérable au vent. Elle correspond au cas où les panneaux réfléchissants forment un angle de $\alpha = 45^\circ$ avec le plan horizontal (position illustrée dans la Figure V-10). Bien que les sollicitations mécaniques liées au vent extrême soient prépondérantes par rapport à celles liées à la masse propre du support réflecteur ou à la masse des panneaux réfléchissants, ces trois sources de sollicitation sont prises en compte comme on peut le constater sur la Figure V-10.

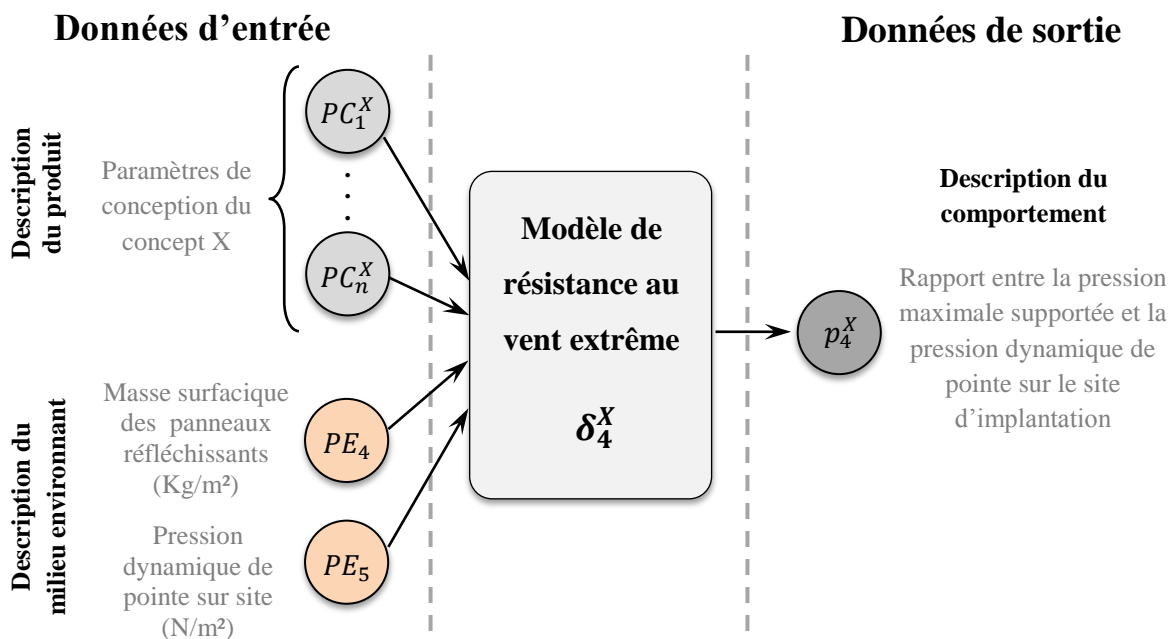


Figure V-9 Structure du modèle de résistance au vent extrême

Pour un choix donné de site d'implantation, il faut trouver la pression surfacique maximale appliquée sur les panneaux réfléchissants à cause du vent extrême. Cette pression, exprimée en N/m^2 , est appelée dans la littérature "pression dynamique de pointe". Elle est notée PE_5 dans notre étude. Le calcul de PE_5 prend en compte la vitesse maximale du vent $V_{b,0}$ sur le site d'implantation ainsi que d'autres paramètres en lien avec le site d'implantation comme le coefficient d'orographie C_0 , le coefficient de rugosité du terrain C_r , la valeur de turbulence du vent I_v , le coefficient de force C_f et la masse volumique de l'aire ρ . La pression dynamique de pointe PE_5 est calculée en fonction de ces coefficients à l'aide de la relation (V.6) [Bsi10]. Cette pression est toujours dans la direction perpendiculaire aux panneaux réfléchissants (voir Figure V-10). Les méthodes pour déterminer les différents coefficients mis en jeu pour le calcul de PE_5 sont données dans l'annexe A. Des méthodes sont issues de la norme Eurocode 1. Etant donné que le choix du site d'implantation n'est pas encore figé au début du projet, le paramètre PE_5 ne peut pas être défini d'une manière précise.

$$PE_5 = (C_r \cdot C_0 \cdot V_{b,0})^2 \cdot [1 + 7 \cdot I_v] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot C_f \quad (V.6)$$

La variable recherchée à la sortie du modèle de comportement, que nous notons p_4^X , est le rapport entre la pression maximale supportée par la structure et la pression dynamique de pointe PE_5 sur le site d'implantation. Ces deux grandeurs ont la même unité, ce qui fait que p_4^X est une variable adimensionnée.

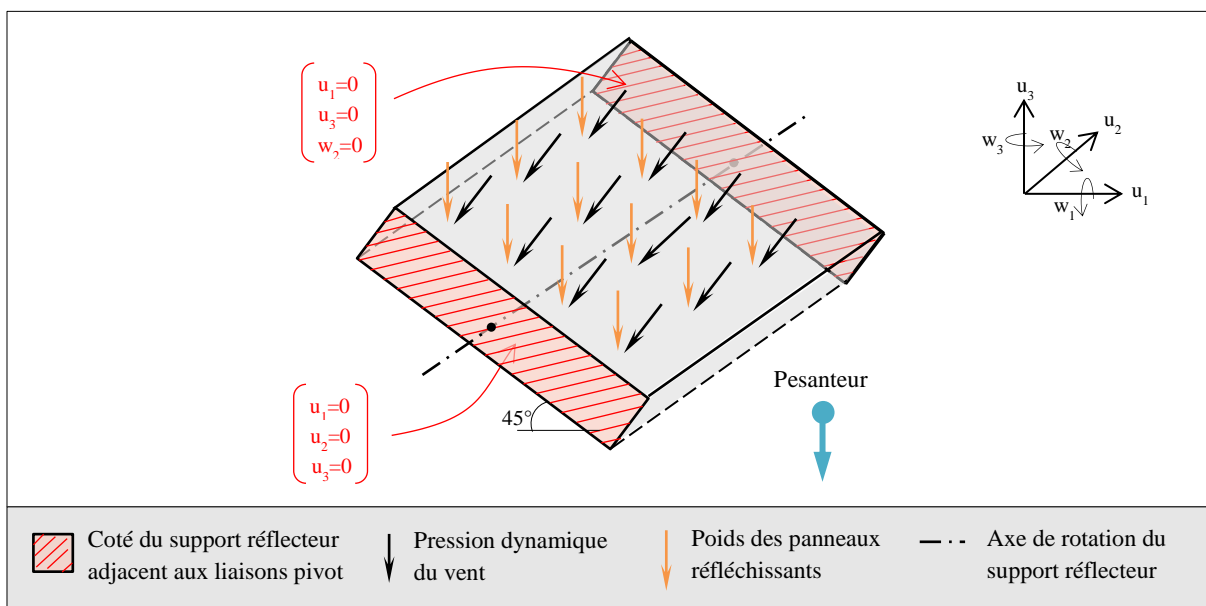


Figure V-10 Conditions aux limites et état de chargement pour le modèle de résistance au vent extrême

V.6.1.3.1 Concept treillis

Dans un premier temps, un modèle de calcul basé la théorie des poutres est utilisé pour déterminer les efforts normaux dans les barres de la structure. La méthode des éléments finis est utilisée pour faire le calcul. Ce modèle est similaire à celui utilisé pour le calcul de la flèche maximale (schématisé dans la Figure V-7). Les seuls points de différence sont (i) l'ajout de la pression dynamique engendrée par le vent (notée Q_p) et (ii) l'utilisation de la position $\alpha = 45^\circ$ (vulnérabilité maximale au vent) au lieu de la position $\alpha = 0^\circ$. Une fois que les efforts normaux dans les barres sont calculés par ce modèle, les critères de défaillance sont vérifiés dans la structure. Les modes de défaillance considérés dans notre étude sont (i) le flambement des barres par compression et (ii) l'arrachement par traction des points de fixation dans les nœuds. Nous supposons que la défaillance d'au moins une barre ou un point de fixation provoque la ruine de la structure. Pour le premier mode de défaillance, la norme Eurocode 3 est utilisée pour calculer la charge critique de flambement en fonction de l'effort normal et des caractéristiques des barres. Les étapes de calcul prescrites par la norme Eurocode 3 sont détaillées dans l'annexe B. Concernant le deuxième mode de défaillance, l'effort de traction appliqué sur un point de fixation (noté F_t) est calculé à l'aide des formules (V.7) et (V.8) et en se basant sur la configuration géométrique donnée dans la Figure V-11. Le calcul est basé sur le principe fondamental de la statique. Une fois que cet effort de traction est calculé, il est comparé avec l'effort de traction critique fourni par les catalogues du fournisseur pour vérifier la tenue du point de fixation.

$$F_t = \frac{b \cdot F_2 \cdot \cos\beta}{2 \cdot PC_2^{tr}} \quad (V.7)$$

$$\cos\beta = \tan^{-1} \left(\frac{L / (2 \cdot PC_5^{tr})}{\sqrt{(PC_3^{tr})^2 + l^2 / 4}} \right) \quad (V.8)$$

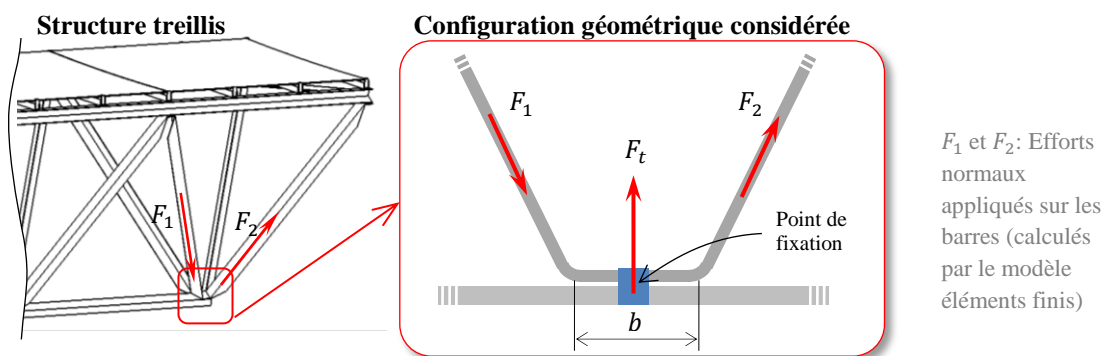


Figure V-11 Configuration géométrique, conditions aux limites et état de chargement considérés pour le calcul de l'effort de traction dans les points de fixation

La Figure V-12 montre la structure de l'algorithme qui permet de trouver la pression dynamique de pointe Q_p^r que peut supporter la structure treillis. Comme le montre cette figure, plusieurs itérations de calcul sont effectuées pour trouver Q_p^r . A chaque itération, le niveau de la pression dynamique Q_p appliquée sur la structure est incrémenté et les deux critères de défaillance sont ensuite vérifiés. Le calcul s'arrête lorsque l'un des deux critères de défaillance est vérifié.

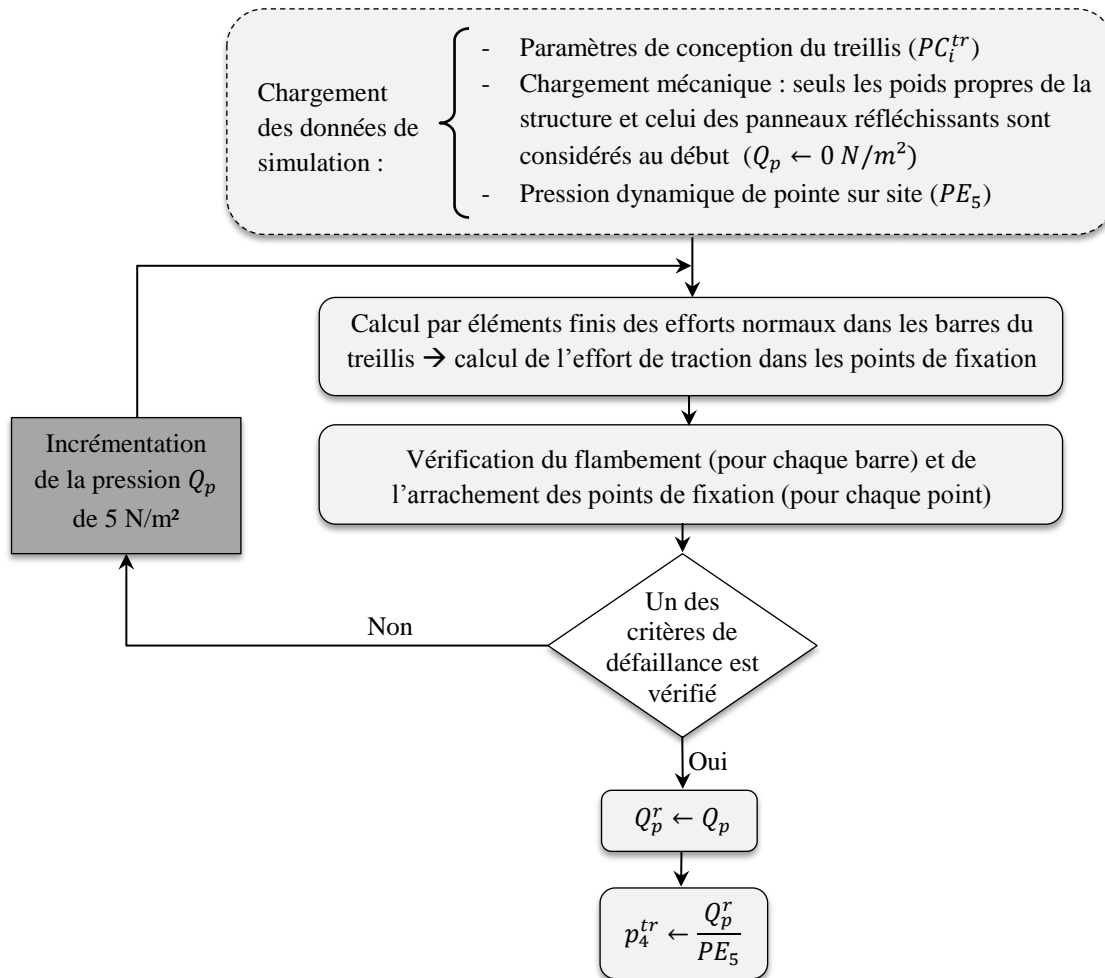


Figure V-12 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe Q_p^r que peut supporter la structure treillis

V.6.1.3.2 Concept Sandwich

Dans le cas de la structure sandwich, nous considérons deux modes de défaillance qui sont (i) la déformation plastique de la peau par contrainte normale due à la flexion de la structure et (ii) la déformation plastique des rivets par cisaillement dû à l'effort rasant. L'effort rasant est l'effort de cisaillement longitudinal que les points de fixation doivent transférer à l'interface entre l'âme et la peau. Cet effort est illustré dans la Figure V-13. La ruine de la structure est

conditionnée par l'apparition d'au moins un de ces modes de défaillance. La non-prise en compte du risque de voilement de la peau est justifiée par l'utilisation de tôles ondulées résistantes à ce phénomène.

Pour le premier mode de défaillance, la méthode consiste à calculer la contrainte normale maximale (notée σ_{xx}^{max}) dans la structure et de la comparer ensuite avec la limite élastique du matériau choisi pour la peau. Nous nous basons sur la théorie des poutres pour calculer la contrainte σ_{xx}^{max} . La structure est soumise à deux sollicitations mécaniques dans deux directions différentes : la pression dynamique du vent dans la direction $\alpha = 45^\circ$ et la sollicitation liée à son poids propre et celui des panneaux réfléchissants dans la direction $\alpha = 0^\circ$ (direction verticale). La structure subit ainsi une flexion déviée (moments de flexion appliqués dans les deux axes principaux). Dans ce cas, la contrainte normale maximale dans la peau est déterminée par la relation suivante :

$$\sigma_{xx}^{max} = -\frac{M_{f_x}^{max}}{I_{G_x}} \times z' + -\frac{M_{f_z}^{max}}{I_{G_z}} \times x' \quad (V.9)$$

Avec z' la distance entre la fibre neutre et la surface de la peau (plan $z = PC_1^{sd}/2$) et x' la distance entre la fibre neutre et le plan $x = l/2$. Dans la section V.6.1.2.2, nous avons expliqué comment nous déterminons le moment quadratique $I_{G_{zx}}$ de la structure. La même méthode est valable pour le calcul du moment I_{G_z} . Les moments de flexion maximale $M_{f_x}^{max}$ et $M_{f_z}^{max}$, par rapport aux axes x et z respectivement, sont calculés en fonction de la pression dynamique de pointe Q_p appliquée sur la structure, de la masse surfacique des panneaux réfléchissants PE_4 , de la masse surfacique de la structure M^{sd} , de la longueur de la structure L , et de sa largeur l par les relations (V.10) et (V.11) respectivement.

$$M_{f_x}^{max} = \frac{(PE_2 \cdot \cos \alpha + Q_p + M^{sd} \cdot \cos \alpha) \cdot L^2}{8 \cdot l} \quad (V.10)$$

$$M_{f_z}^{max} = \frac{(PE_2 \cdot \sin \alpha + M^{sd} \cdot \sin \alpha) \cdot L^2}{8 \cdot l} \quad (V.11)$$

Le deuxième critère de défaillance considéré dans le cas de la structure sandwich est celui de l'endommagement plastique des rivets par cisaillement dû à l'effort rasant. Comme le montre la Figure V-13, les rivets doivent transmettre les efforts rasants (noté R) et empêcher ainsi le glissement entre la peau et les âmes.

L'effort rasant par unité de longueur, noté dR , est calculé par la relation suivante :

$$dR = \frac{(-V^{max}) \cdot S_x}{I_{G_x}} \cdot dx \quad (V.12)$$

Avec V^{max} l'effort tranchant maximal dans la structure et S_x le moment statique de la section de la peau par rapport au centre de gravité. Etant donné que la section de la peau a une densité homogène, son moment statique S_x par rapport à l'axe x est égal au produit de l'aire de cette section par la distance de son centre de gravité à l'axe :

$$S_x = \frac{PC_1^{sd} \cdot PC_2^{sd} \cdot l}{2} \quad (V.13)$$

Une fois que nous avons dR , l'effort maximal appliqué sur les rivets est donné par la relation :

$$R_{rivet}^{max} = \frac{(-V^{max}) \cdot S}{I_{G_x}} \cdot PC_2^{sd} \cdot PC_2^{sd} \quad (V.14)$$

la contrainte de cisaillement maximale dans les rivets (notée σ_{rivet}^{max}) est calculée en fonction de R_{rivet}^{max} et de la section S_{rivet} du rivet par la relation suivante :

$$\sigma_{rivet}^{max} = \frac{R_{rivet}^{max}}{S_{rivet}} \quad (V.15)$$

Avec S_{rivet} la section des rivets. La contrainte maximale de cisaillement σ_{rivet}^{max} est comparée ensuite avec la limite élastique R_e du matériau du rivet pour vérifier la tenue mécanique de ce dernier.

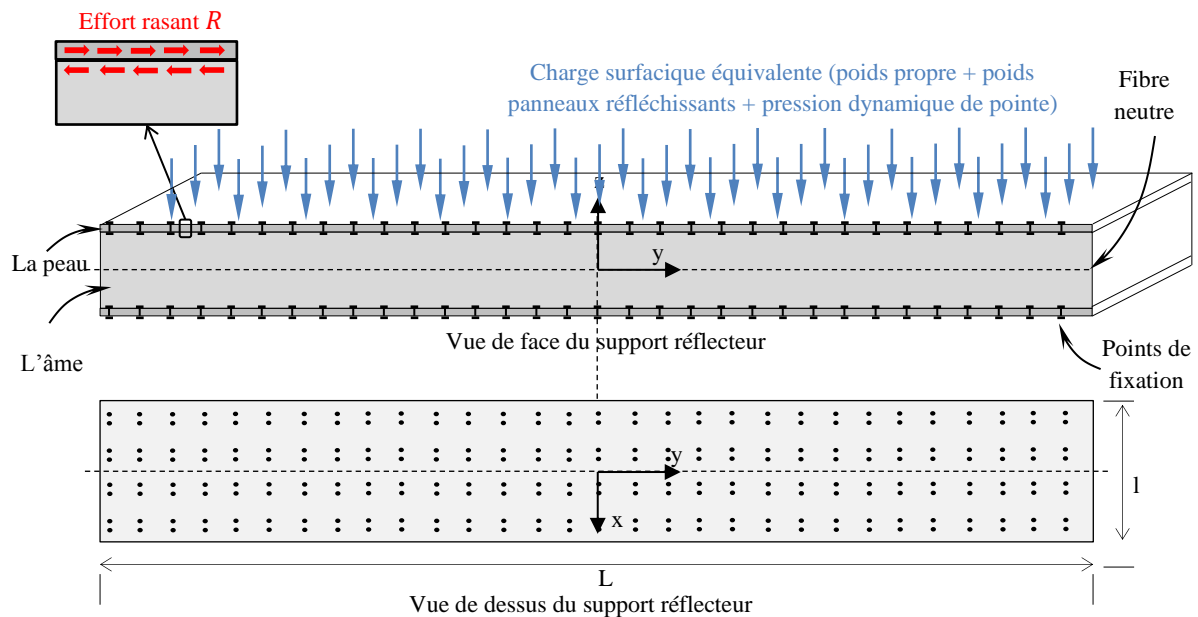


Figure V-13 Illustration de l'effort rasant

La Figure V-14 montre la structure de l'algorithme qui permet de calculer la pression dynamique de pointe maximale Q_p^r que peut supporter la structure sandwich. Comme le montre cette figure, plusieurs itérations sont effectuées pour trouver Q_p^r . A chaque itération, le niveau de pression Q_p appliqué sur la structure est incrémenté et les deux critères de défaillance sont vérifiés. Le calcul s'arrête lorsque l'un des deux critères de défaillance est vérifié.

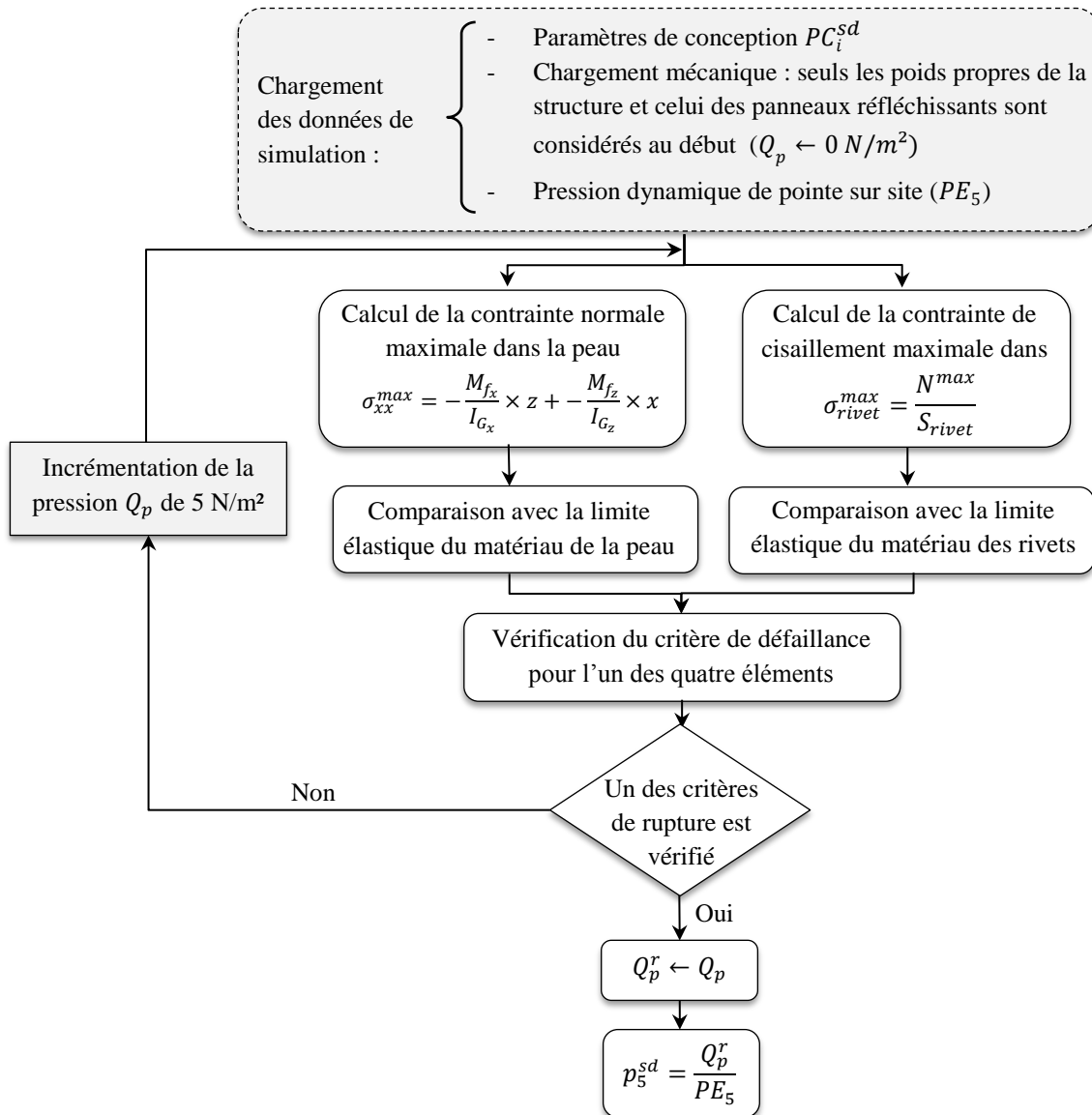


Figure V-14 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe supportée par la structure sandwich

V.6.1.3.3 Concept tube

Dans le cas de la structure tube, nous considérons deux modes de défaillance qui sont (i) la déformation plastique du tube central par contrainte normale due à la flexion et (ii) la déformation plastique des traverses par contrainte normale due à la flexion. Nous considérons que l'apparition d'au moins une de ces défaillances est suffisante pour provoquer la ruine de la structure.

Pour la défaillance du tube central, nous suivons la même démarche utilisée pour le cas de la structure sandwich (rupture de l'âme par déformation plastique). Nous calculons dans un premier temps la contrainte normale maximale σ_{xx}^{max} dans le tube central en se basant sur la théorie des poutres et nous la comparons ensuite avec la limite élastique du matériau choisi pour vérifier la tenue mécanique du tube central. Comme pour le cas pour la structure sandwich, la contrainte maximale due à la flexion est déterminée en utilisant les relations (V.9), (V.10) et (V.11).

Contrairement au tube central, qui doit transmettre l'effort du vent sur toute la longueur de la structure, les traverses ne transmettent que les efforts de vent appliqués localement sur les panneaux réfléchissants. Ainsi, nous raisonnons par la suite à l'échelle d'un panneau réfléchissant seulement. Un panneau réfléchissant est supporté par des traverses dont le nombre est aussi un paramètres de conception (noté PC_3^{tb}) qui doit être fixé. La Figure V-15 montre le modèle simplifié pour calculer la contrainte maximale dans une traverse.

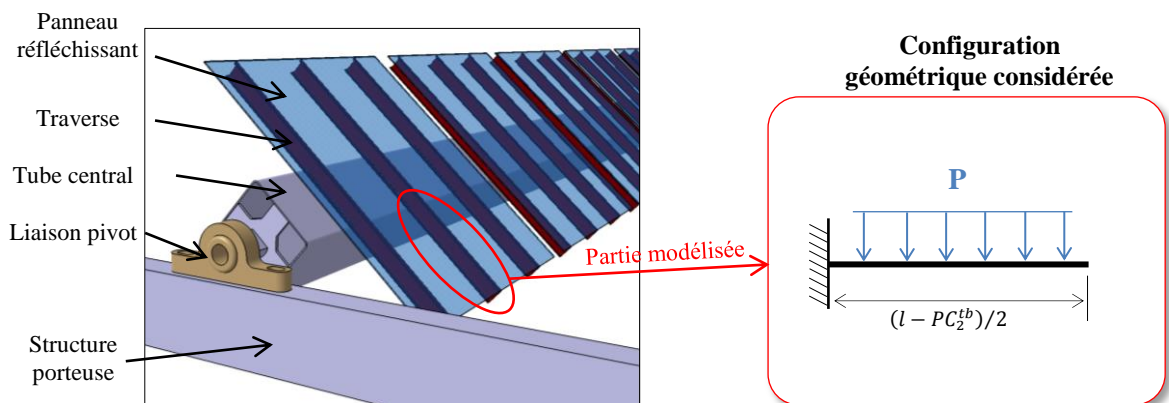


Figure V-15 Configuration simplifiée pour le calculer la contrainte maximale dans les traverses

En considérant cette configuration, le moment maximal dans la traverse est déterminé en se basant sur la théorie des poutres par la relation suivante :

$$\sigma_{xx}^{max} = -\frac{M_{fx}}{I_{G_x}} \times z' \quad (V.16)$$

Avec I_{G_x} le moment quadratique de la traverse, z' la distance entre la fibre neutre de la traverse et le bord supérieur et M_{f_x} le moment de flexion maximale appliqué sur la traverse. En se basant sur la configuration simplifiée de la figure, le moment M_{f_x} est déterminé par la relation suivante :

$$M_{f_x} = -\frac{P \cdot (1 - PC_3^{tb})}{2} \quad (\text{V.17})$$

La charge linéaire P est déterminée en fonction de la pression dynamique de pointe Q_p , du nombre de traverses par panneau réfléchissant PC_2^{tb} , et de la longueur d'un panneau par la relation (V.18). Le poids propre des traverses est négligé.

$$P = -\frac{(PE_2 \cdot \cos \alpha + Q_p) \cdot l_p}{PC_2^{tb}} \quad (\text{V.18})$$

La contrainte maximale de cisaillement σ_{xx}^{max} est comparée ensuite avec la limite élastique R_e du matériau choisi pour les traverses.

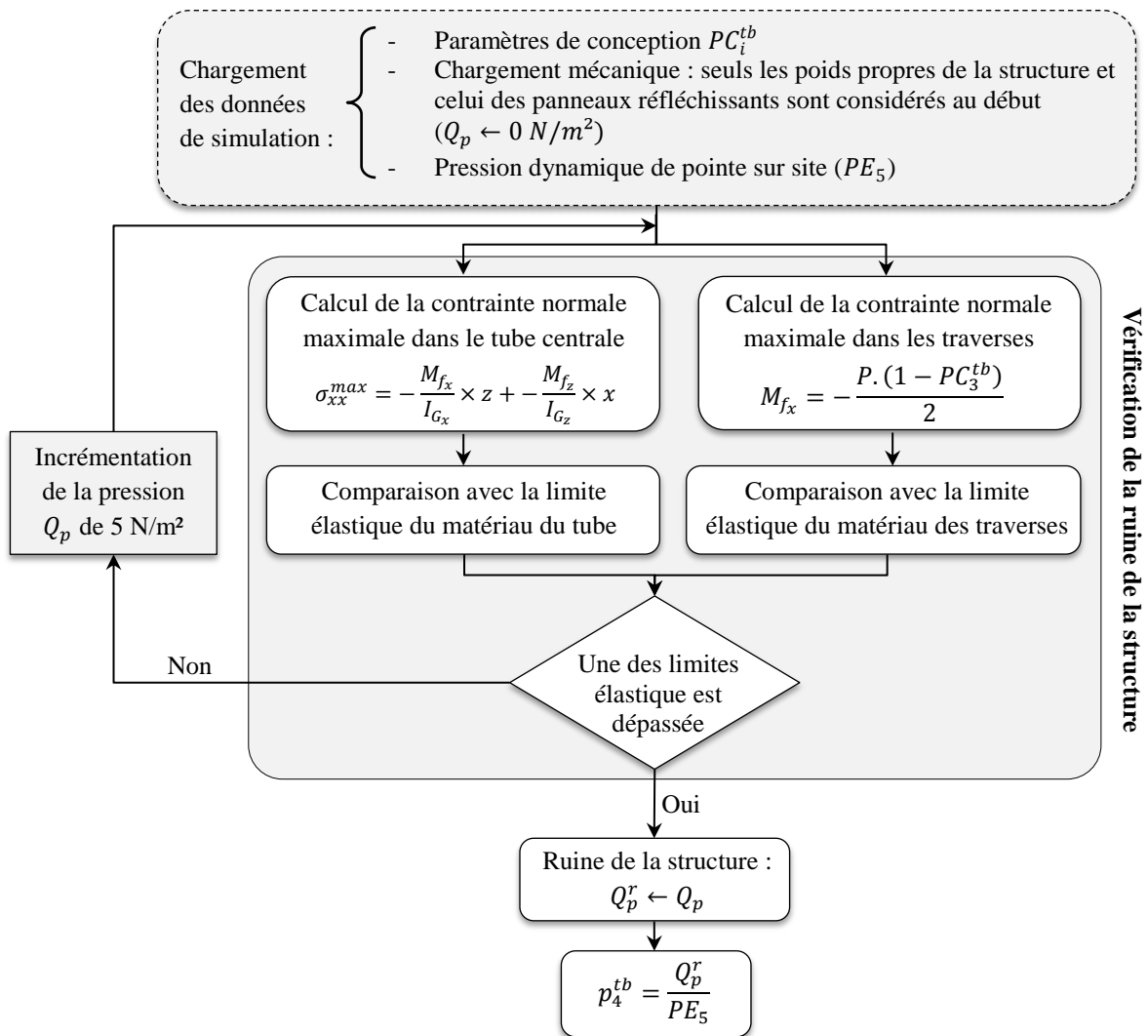


Figure V-16 Structure de l'algorithme utilisé pour le calcul de la pression dynamique de pointe Q_p^r que peut supporter la structure tube

La Figure V-16 montre la structure de l'algorithme qui permet de calculer la pression dynamique de pointe maximale Q_p^r que peut supporter la structure tube. Comme le montre cette figure, plusieurs itérations sont effectuées pour trouver Q_p^r . A chaque itération, le niveau de pression Q_p appliqué sur la structure est incrémenté et les deux critères de défaillance sont vérifiés. Le calcul s'arrête lorsque l'un des deux critères de défaillance est vérifié.

V.6.2. Modèles de comportement avancés : cas du treillis

Dans cette section, nous nous positionnons dans une phase d'étude beaucoup plus avancée que celle considérée dans la section V.6.1. Nous supposons dans cette phase que le concept treillis a été retenu parmi les trois concepts. Nous traitons donc la phase de conception architecturale dont la but est de fixer tous les paramètres de conception de la structure

treillis pour aboutir au produit final. Ces modèles de comportement, bien qu'ils soient différents de ceux présentés dans la section V.6.1, ont les mêmes données d'entrée et de sortie. Le modèle présenté dans la section V.6.1.1 pour l'estimation du coût de la matière première ne change pas et donc il ne sera pas abordé dans la section actuelle.

a. Performance optique

Le prototypage physique et l'expérimentation qui s'ensuit nous ont permis, d'une part, de mettre en évidence des écarts importants entre les performances prédites par les modèles de comportement préliminaires et les performances réelles et, d'autre part, de mettre en évidence les phénomènes physiques pertinents au comportement que nous souhaitons observer (comportement en torsion et en flexion dans notre cas). Ces écarts seront présentés et analysés plus en détail dans la section V.8.2 lorsque nous qualifierons l'exactitude des modèles de comportement utilisés. Les écarts observés sont dus aux hypothèses adoptées dans ces modèles de comportement préliminaires et qui rendent le modèle peu représentatif des phénomènes physiques pertinents. Pour une meilleure prise en compte de ces phénomènes physiques, et donc une prédiction plus exacte du comportement, un nouveau modèle de comportement est proposé pour évaluer l'angle de déformation et la flèche maximale de la structure treillis. Nous modélisons le comportement du matériau par un modèle élastique linéaire isotrope. La structure est modélisée par des éléments surfaciques de type "coque" cette fois-ci, et non pas avec des éléments linéaires (barres). L'utilisation de ce type d'éléments permet de modéliser d'une manière plus fidèle et plus précise les formes de la structure. Il devient alors possible de prendre en compte des phénomènes physiques plus complexes, en particulier les phénomènes de déformation au niveau des nœuds du treillis (*e.g.* les phénomènes de concentration de contraintes). A partir du modèle CAO (modèle volumique) de la structure, un modèle coque (pas encore maillé) est directement extrait dans un premier temps. Ce modèle est ensuite maillé avec des éléments "coque" de type triangle à 6 nœuds. Comme nous pouvons le voir sur la Figure V-17, les régions à fort gradient de contrainte ont été maillées avec des éléments beaucoup plus fins. Ces régions correspondent aux liaisons mécaniques entre barres diagonales et membrures (les nœuds du treillis). Les phénomènes ayant lieu au niveau de ces liaisons sont reproduits d'une manière plus fidèle que l'ancien modèle.

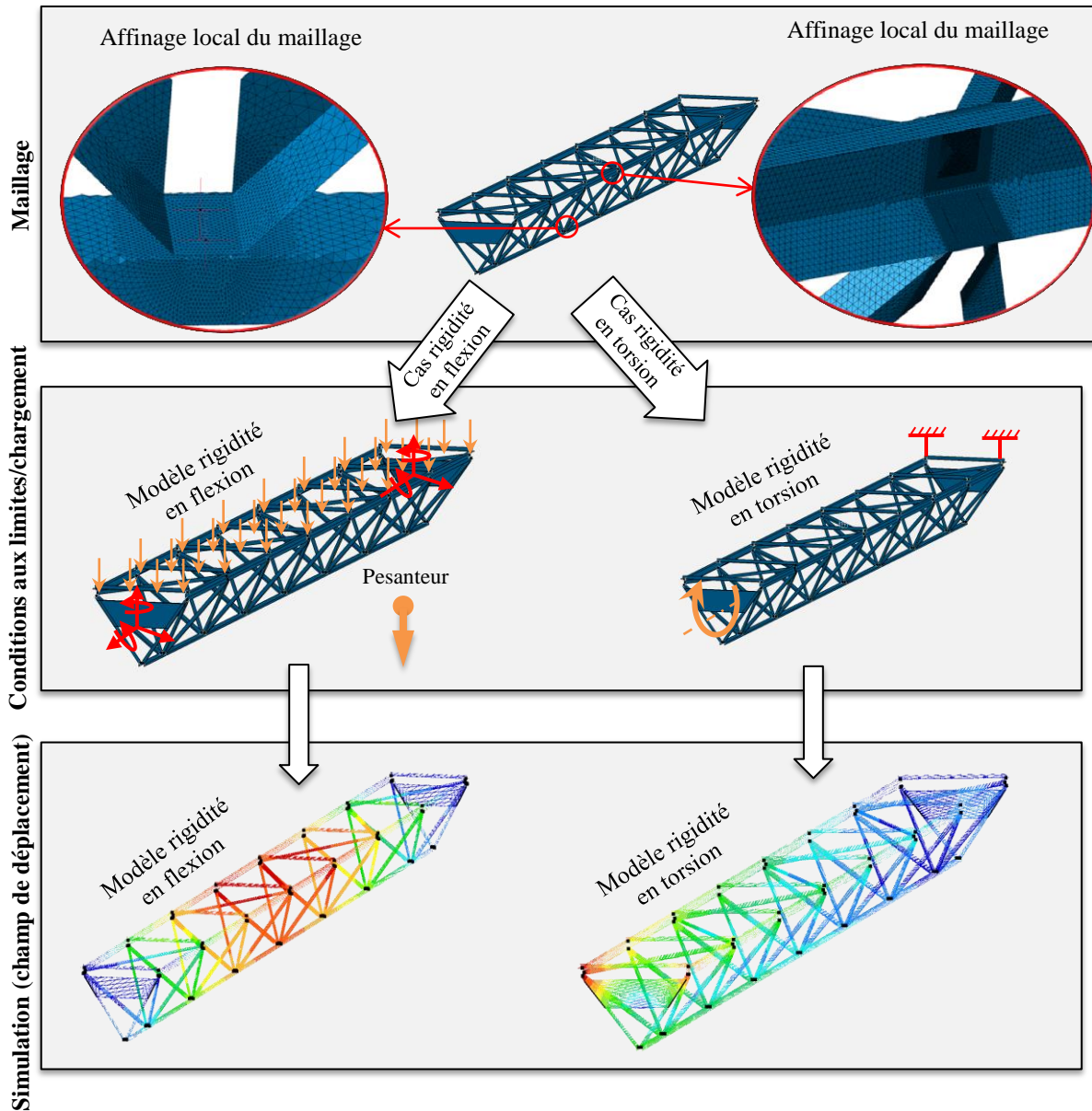


Figure V-17 Etapes de la construction du modèle éléments finis avec des éléments de type “coque”

La Figure V-17 montre la configuration d’étude, les conditions aux limites et l’état de chargement. Elle montre aussi les champs de déplacement obtenus. La déformation angulaire et la flèche maximale sont déterminées à partir du champ de déplacement obtenu après simulation.

b. Résistance au vent extrême

Le modèle préliminaire de calcul de la charge critique de flambement repose sur l’hypothèse que les éléments du treillis sont articulés et, par conséquent, ils sont soumis uniquement à des efforts normaux. Dans la structure réelle, les éléments du treillis ne sont pas articulés. Il en résulte des sollicitations de flexion “parasites” dans ces éléments. Afin prendre en compte

ces phénomènes, nous utilisons des éléments de type “*poutre*” (au lieu des barres) car ils sont plus proches de la réalité et plus adaptés pour prendre en compte les sollicitations de flexion parasites. Ces sollicitations de flexion sont alors intégrées (en plus des efforts de compression) dans le calcul de la charge critique de flambement. Les détails de calcul de la charge critique de flambement en intégrant les flexions parasites sont donnés dans l’annexe B. La charge critique de flambement diminue lorsqu’on prend en compte ces sollicitations parasites. En ce qui concerne le deuxième mode de défaillance pris en compte, qui est l’arrachement des points de fixation par traction dans les nœuds, aucune modification n’a été apportée dans cette phase d’étude avancée.

V.7 Sélection préliminaire de concepts

Dans cette section, l’objectif est de réduire le nombre de concepts proposés initialement en éliminant les concepts les moins pertinents. Les efforts et les ressources de l’entreprise pourront ainsi être concentrés sur les concepts les plus prometteurs. Pour atteindre cet objectif, nous appliquons la démarche proposée dans le chapitre III. Les étapes de formalisation des préférences du décideur et de construction des modèles de comportement δ_i , nécessaires pour appliquer la démarche du chapitre III, ont été présentées dans les sections précédentes. Il nous reste l’étape de caractérisation des données d’entrée qui sera abordée dans la section V.7.1. Dès lors, il sera possible de calculer les deux principaux indicateurs *IGCR* et *IGD* pour aider le décideur à choisir les concepts les plus pertinents. Les résultats concernant ces deux indicateurs seront présentés dans la section V.7.2. En fin, ces résultats seront discutés dans la section V.7.3.

Dans la phase préliminaire du projet, deux difficultés principales sont rencontrées sur notre cas industriel. D’une part, l’espace de conception est assez vaste car nous disposons de plusieurs concepts dont les caractéristiques (paramètres de conception) sont définis d’une manière très incomplète. D’autre part, les modèles de comportement à notre disposition, qui traduisent une connaissance de nature explicite, sont très approximatifs comme nous avons pu le constater dans la section V.6.1. Etant donné les enjeux liés au choix du support réflecteur (coût de la centrale, rendement énergétique, etc.), il est risqué de se baser uniquement sur ces modèles pour faire des choix de concepts. Cela pourrait conduire à l’élimination de concepts potentiellement intéressants. Pour remédier à cette difficulté, nous nous orientons dans notre étude vers la connaissance implicite (ou tacite), obtenue au travers de l’expérience et du

savoir-faire inné des concepteurs. Cette connaissance est formalisée dans la phase de caractérisation des données d'entrée (section V.7.1).

V.7.1. Caractérisation des données d'entrée

Les données d'entrée, qui sont les paramètres de conception et les paramètres du milieu environnant, sont caractérisées dans notre cas d'étude par les fonctions de préférence, les indices de variation et les indices de couplage selon la démarche décrite dans la section III.3. Comme cela a été évoqué auparavant, les fonctions de préférence permettent de formaliser les préférences subjectives des concepteurs vis-à-vis des données d'entrée. Ces fonctions sont établies en se basant sur l'expérience des concepteurs, leur savoir-faire, et la connaissance qu'ils ont pu acquérir durant les activités antérieures de développement (calculs numériques, expérimentation physique, etc.). Ces fonctions de préférence sont présentées à la Figure V-18 pour le cas du concept treillis. Les fonctions correspondantes aux autres données d'entrée sont données dans l'annexe C. Les différents concepteurs peuvent avoir des points de vue différents vis-à-vis des données d'entrée. Les fonctions de préférence sont alors établies dans notre étude en collaboration avec les différents concepteurs participant au projet de développement. Il demeure cependant difficile d'établir ces fonctions de préférence à cause des divergences de certains points de vue. Une fois ces fonctions établies, les indices de couplage peuvent être calculés en utilisant ces fonctions ainsi que les modèles de comportement préliminaires. Le Tableau V-5 présente les indices de variation et les indices de couplage pour le cas des paramètres de conception du concept treillis et le cas des paramètres du milieu environnant. Les résultats concernant les autres paramètres de conception (sandwich et tube) sont donnés en annexe C.

Bien que nous nous focalisions sur les phases préliminaires du projet dans cette partie du chapitre, nous avons présenté à la Figure V-18 les fonctions de préférence pour la phase avancée du projet également. Il est ainsi possible d'observer à la Figure V-18 la convergence dans les préférences des concepteurs vis-à-vis des paramètres de conception du treillis. Cela montre que la description du produit devient de plus en plus complète au fur et à mesure que le projet avance.

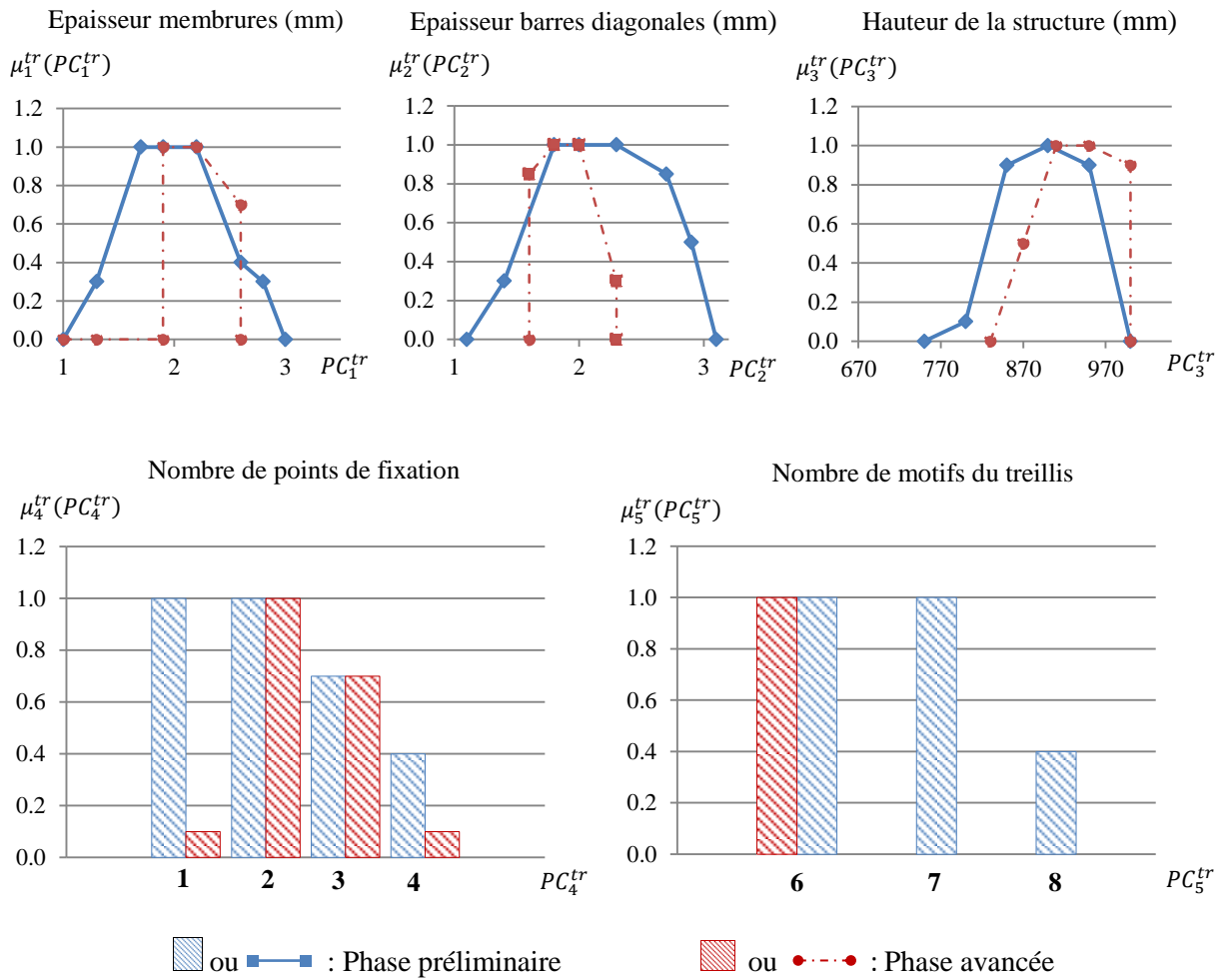


Figure V-18 Fonctions de préférence des paramètres de conception du concept treillis

Les indices de variation permettent d'exprimer le taux avec lequel un paramètre approche sa valeur finale. Ainsi, pour le paramètre PE_5 (pression dynamique de pointe) par exemple, beaucoup d'études sont menées en parallèle au développement du produit pour définir la région exacte où seront installés les champs solaires. Cela explique le taux de variation relativement élevé de ce paramètre (voir Tableau V-5). Par contre, nous remarquons dans le Tableau V-5 un faible taux de variation pour le paramètre PE_1 (prix de la matière première). Ce résultat s'explique par l'instabilité du marché de la matière première utilisée. Il est difficile de donner une estimation précise du prix de la matière première dans les années à venir, mêmes avec des études très poussées.

	Données d'entrée	Indice de variation	Indice de couplage											
			Concept treillis				Concept sandwich				Concept tube			
			p_1^{tr}	p_2^{tr}	p_3^{tr}	p_4^{tr}	p_1^{sd}	p_2^{sd}	p_3^{sd}	p_4^{sd}	p_1^{tb}	p_2^{tb}	p_3^{tb}	p_4^{tb}
Concept treillis	PC_1^{tr}	0.7	0.25	0.2	0.82	0.21	-	-	-	-	-	-	-	-
	PC_2^{tr}	0.7	0.7	0.8	0.4	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-
	PC_3^{tr}	0.85	0.45	0.37	1	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-
	PC_4^{tr}	0.6	0	0.67	0.12	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	PC_5^{tr}	0.67	0.28	0.55	0.23	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-
Milieu environnant	PE_1	0.21	0.15	0	0	0	0.21	0	0	0	0.12	0.00	0.00	0.00
	PE_2	0.3	0.11	0	0	0	0.15	0	0	0	0.07	0.00	0.00	0.00
	PE_3	0.8	0	0.8	0	0	0	0.32	0	0	0.00	0.19	0.00	0.00
	PE_4	0.75	0	0	0.5	0.1	0	0	0.25	0.04	0.00	0.00	0.17	0.01
	PE_5	0.75	0	0	0	0.8	0	0	0	0.29	0.00	0.00	0.00	0.12

Tableau V-5 Indices de variation et indices de couplage pour les paramètres de conception (du treillis) et les paramètres du milieu environnant

La procédure utilisée pour le calcul des indices de couplage permet aussi de fournir les espaces de performance possibles pour chacun des trois concepts. Ces espaces de performance sont présentés sur la Figure V-19. Sur la même figure, nous avons également représenté le seuil d'acceptabilité correspondant à chaque variable de performance. Ainsi, il est possible de comparer l'espace des performances admissibles (délimité par les seuils d'acceptabilité) avec l'espace des performances possibles.

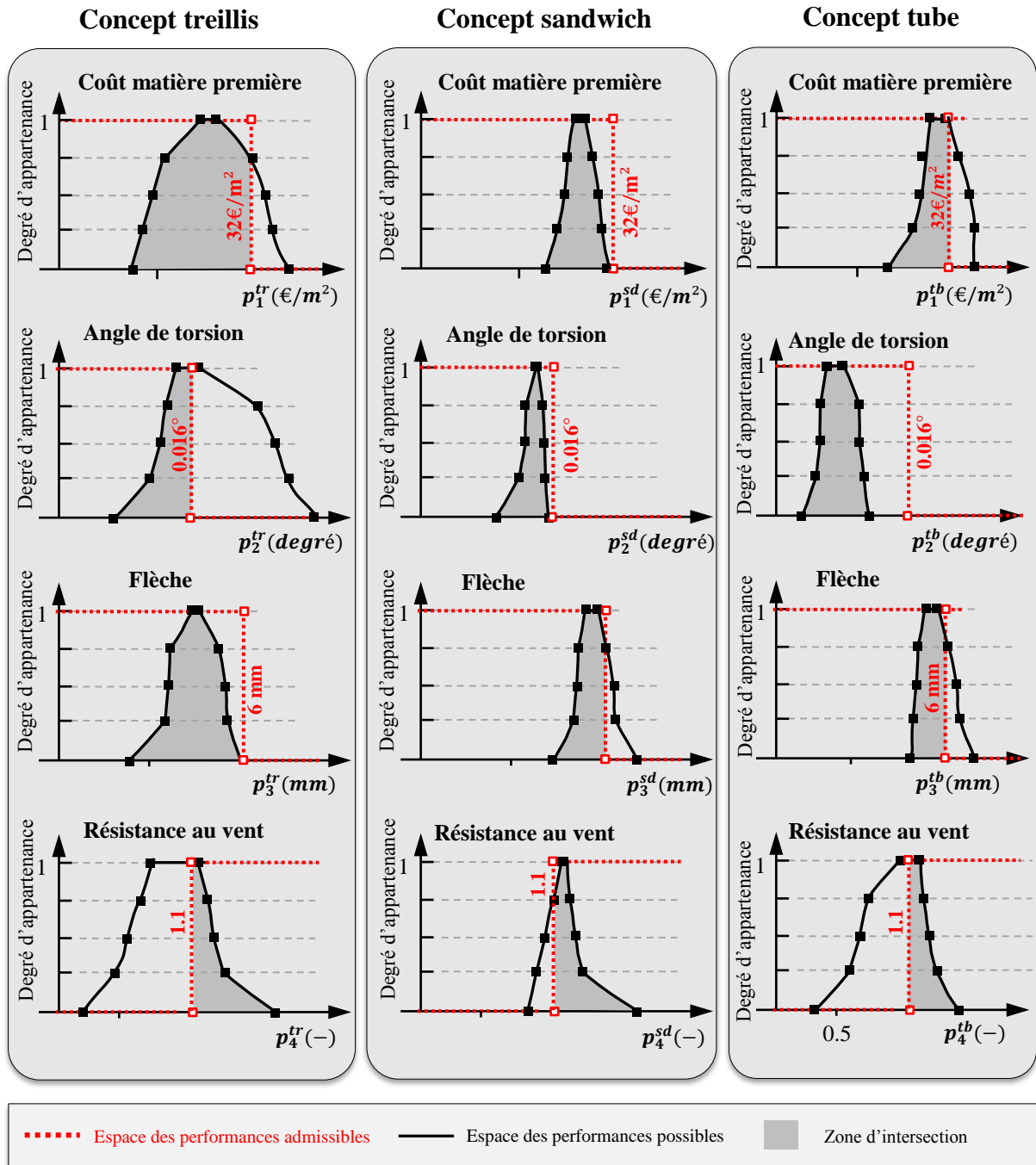


Figure V-19 Espaces des performances possibles pour chacun des trois concepts

V.7.2. Résultats des calculs

A ce stade de notre étude, toutes les informations sont réunies pour déterminer les indicateurs $IGCR$ et IGD pour les trois concepts étudiés. L'indice de criticité de risque ICR_i^X correspondant à une variable de performance p_i^X est, pour rappel, le produit de l'occurrence O_i^X et de la détectabilité D_i^X . L'occurrence est définie en utilisant les résultats présentés sur la

Figure V-19. Les résultats détaillés concernant le calcul des indices ICR_i^X pour les trois concepts sont présentés dans le Tableau V-6.

	p_1^X			p_2^X			p_3^X			p_4^X			$IGCR^X$
	O_1^X	D_1^X	ICR_1^X	O_2^X	D_2^X	ICR_2^X	O_3^X	D_3^X	ICR_3^X	O_4^X	D_4^X	ICR_4^X	
Concept treillis	0.91	0.75	0.68	0.31	0.42	0.13	1.00	0.82	0.82	0.28	0.67	0.19	0.13
Concept tube	0.70	0.78	0.55	1.00	0.62	0.62	0.71	0.59	0.42	0.38	0.61	0.23	0.23
Concept sandwich	1.00	0.69	0.69	1.00	0.70	0.70	0.91	0.69	0.63	0.78	0.71	0.55	0.55

Tableau V-6 Résultats détaillés pour les indices de criticité de risque

Nous avons à ce stade une estimation du risque d'insuccès (traduit par l'indicateur $IGCR$) lié à chacun des trois concepts. C'est une information d'une grande importance pour la prise de décision. Les résultats de l'indicateur $IGCR$ (Tableau V-6) sont différents pour les trois concepts. D'après ces résultats, le concept sandwich est le moins risqué des trois concepts, suivi du concept tube et du concept treillis. Malgré que ces résultats soient largement en faveur du concept sandwich, le jugement global ne se fera qu'après le calcul de l'indice global de désirabilité IGD . A partir des espaces de performance présentés à la Figure V-19, les espaces de désirabilité (IGD) sont obtenus en utilisant le modèle $\varphi \circ \phi$ (association du modèle d'interprétation et d'agrégation). Les résultats des deux indicateurs $IGCR$ et IGD pour chaque concept sont réunis dans la Figure V-20.

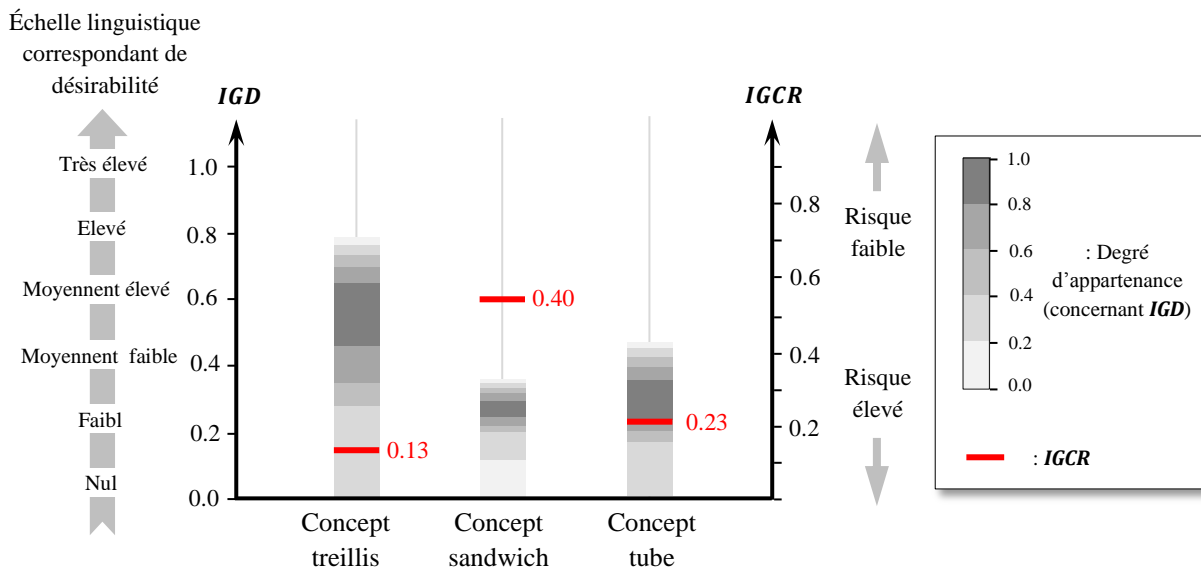


Figure V-20 Résultats des deux indicateurs ICR et IGD pour les trois concepts étudiés

V.7.3. Interprétation des résultats

Dans notre cas industriel, le support réflecteur constitue un composant indispensable du système de centrale solaire à concentration. L'échec du développement du support réflecteur, ou même un important retard dans sa validation, auraient alors des répercussions sévères sur le projet global de développement de la centrale. Par conséquent, la première et principale préoccupation de l'entreprise est d'obtenir un produit qui respecte les exigences minimales de validation (traduites dans notre étude par les seuils d'acceptabilité AC_i) tout en respectant le délai de développement. De ce point de vue, le concept sandwich est particulièrement intéressant car il présente l' $IGCR$ le moins élevé (Figure V-20). Il a le plus de chances d'aboutir à la fin du projet à un produit respectant les exigences minimales de validation. La décision de poursuivre le développement de la structure sandwich jusqu'au bout (définition complète et précise de tous les paramètres de conception) confère donc une sûreté au projet de développement dans sa globalité.

En termes d'indice global de désirabilité, nous remarquons à la Figure V-20 que le concept treillis présente un réel avantage. Son IGD peut atteindre jusqu'à 0.78. Cela peut être expliqué par la masse très faible de la structure treillis et donc son avantage en termes de coût de la matière première, qui reste l'objectif prépondérant pour l'entreprise. Cependant, il peut être remarqué dans le Tableau V-6 qu'il existe encore des variables de performance dont le respect des seuils d'acceptabilité est loin d'être garanti (du fait de leur faible ICR_i^{tr}). En plus du concept sandwich, le concept treillis est également choisi pour être développé dans la suite du projet.

Pour le concept tube, nous remarquons qu'il présente un indice global de criticité de risque proche de celui de la structure en treillis. Cependant, en termes d'indice global de désirabilité, il présente un avantage beaucoup moins important que celui du treillis. Nous considérons donc qu'il y a peu d'intérêt pour l'entreprise de continuer son développement. La décision d'abandonner le développement du concept tube est encouragée aussi par la volonté de l'entreprise de réduire le coût de développement. En permettant d'anticiper la mise à l'écart du concept tube, jugé très peu pertinent, l'utilisation de la démarche permet ainsi un gain de temps et de ressources pour l'entreprise.

Pour récapituler, deux concepts sont jugés pertinents sur la base des résultats des deux indicateurs (présentés à la Figure V-20). Un premier concept (structure sandwich) a été retenu car il présente très peu de risque et apporte donc une sûreté dans le projet de développement.

Un deuxième concept (structure treillis) a été choisi parce qu'il présente un potentiel important en termes d'*IGD*.

V.8 Conception architecturale

Les études faites auparavant nous ont permis de mettre en évidence l'intérêt de développer le concept treillis, notamment grâce à son avantage au niveau du coût de la matière première. Nous nous focalisons dans cette section sur la conception architecturale de ce concept (nous supposons que le choix du concept est figé). A ce stade de développement, l'espace de conception a été réduit car, grâce aux études effectuées auparavant, beaucoup de possibilités ont été éliminées au niveau des paramètres de conception. Cependant, un certain nombre de ces paramètres reste à fixer pour permettre la définition du produit final. Les paramètres du milieu environnant (PE_1, \dots, PE_4) sont, quant à eux, supposés figés à ce stade de développement. Le Tableau V-7 montre les paramètres de conception à fixer et leurs intervalles de valeurs possibles (S_i^{tr}). Nous remarquons que seuls les quatre premiers paramètres restent à fixer.

Paramètre de conception du treillis PC_i^{tr}	Ensemble de valeurs possibles S_i^{tr}	
	Phase préliminaire	Phase avancée
PC_1^{tr} : Epaisseur des membrures (mm)	[2.0, 5.2]	[3, 5.0]
PC_2^{tr} : Epaisseur des barres diagonales (mm)	[2.0, 5.0]	[2.5, 4]
PC_3^{tr} : Hauteur de la structure (mm)	[900.0, 1500.0]	[950.0, 1200.0]
PC_4^{tr} : Nombre de points de fixation dans les liaisons	{3, 4, 5}	{3, 4, 5}
PC_5^{tr} : Nombre de motifs du treillis	{8, 9, 10}	{8}

Tableau V-7 Paramètres de conception à fixer et les intervalles possibles

V.8.1. Solution de référence

Plusieurs prototypes physiques du concept treillis ont été fabriqués le long du projet de développement. Nous considérons dans notre étude le dernier des prototypes fabriqués. Il est désigné dans l'entreprise par "*treillis V3.0*". Le choix de ses paramètres de conception, qui forment notre solution de référence \vec{X}^* , sont présentés dans le Tableau V-8. Le même tableau présente les performances de \vec{X}^* fournies par les modèles de comportement (présentés dans la section V.6.2) et par l'expérimentation physique sur le prototype *treillis V3.0*. Nous

remarquons sur ce tableau que cette solution de référence n'est pas conforme car elle ne respecte pas le seuil d'acceptabilité pour la variable angle de torsion et résistance au vent extrême (résultats marqués en rouge). Elle va cependant nous être utile pour qualifier l'exactitude de nos modèles de comportement.

Solution de référence \vec{X}^*		Performances fournies par expérimentation physique		Performances fournies par modèles de comportement	
PC_1^{tr}	4 mm	\tilde{p}_1^*	2,91 Kg/m ²	p_1^*	2,91 Kg/m ²
PC_2^{tr}	3 mm	\tilde{p}_2^*	0,030 degré	p_2^*	0,0286 degré
PC_3^{tr}	930 mm	\tilde{p}_3^*	2.54 mm	p_3^*	2.34 mm
PC_4^{tr}	3	\tilde{p}_4^*	0.72	p_4^*	0.689

Tableau V-8 Solution de référence et évaluation de ses performances par modèles de comportement et expérimentation physique sur le prototype V3.0

V.8.2. Mesure de l'exactitude des modèles de comportement

La démarche proposée dans la section IV.2 est employée ici pour mesurer l'exactitude de nos modèles de comportement. Cette démarche est, pour rappel, basée sur une mesure objective et sur une mesure subjective de l'exactitude. Concernant la mesure objective, nous présentons les résultats (MOE_i correspondante à chaque p_i^{tr}) pour trois phases différentes du processus de développement : phase préliminaire (modèles présentés dans la section V.6.1), phase intermédiaire et phase avancée (modèles présentés dans la section V.6.2). Bien que nous nous focalisons sur la phase avancée dans cette partie, nous souhaitons observer comment évolue l'exactitude des modèles de comportement utilisés le long du projet de développement. Les MOE_i correspondantes aux trois phases sont données à la Figure V-21. Les $E_{i,s}$ (valeurs seuil de distance) sont mentionnées sur la même figure.

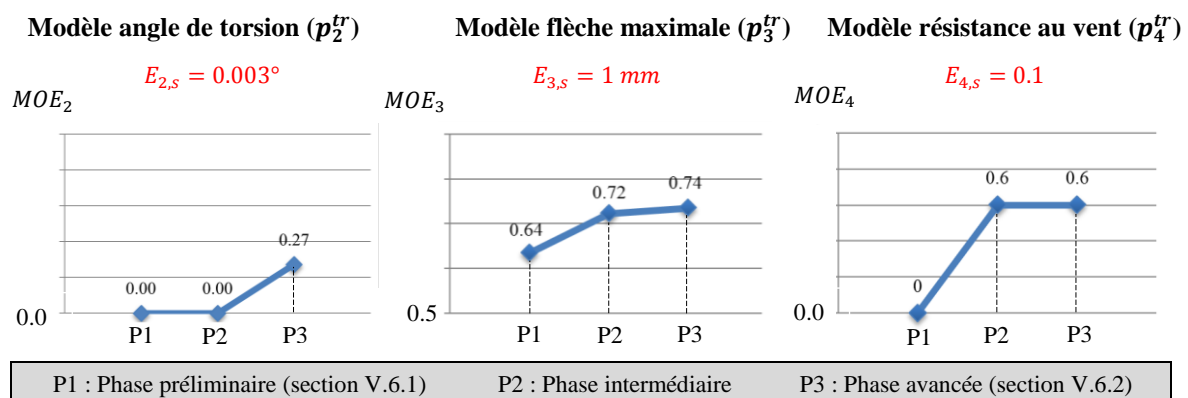


Figure V-21 Exactitude des modèles de comportement utilisés dans différentes phases du projet de développement

A ce stade d'avancement, le modèle géométrique CAO du concept treillis représente la géométrie de la structure dans ses moindres détails. La masse estimée par le logiciel CAO est donc supposée exacte. Ainsi, pour simplifier notre étude, nous ne considérons pas d'indice de maîtrise de risque IMR_1^{tr} pour la variable de performance p_1^{tr} .

La Figure V-21 illustre bien l'évolution du niveau d'exactitude le long des phases du projet. L'obtention d'une valeur nulle d'exactitude dans certains cas est due au dépassement du seuil $E_{i,s}$. L'exactitude MOE_4 du modèle de résistance au vent est constante sur les deux dernières phases car aucune modification n'a été apportée à ce modèle entre ces deux phases.

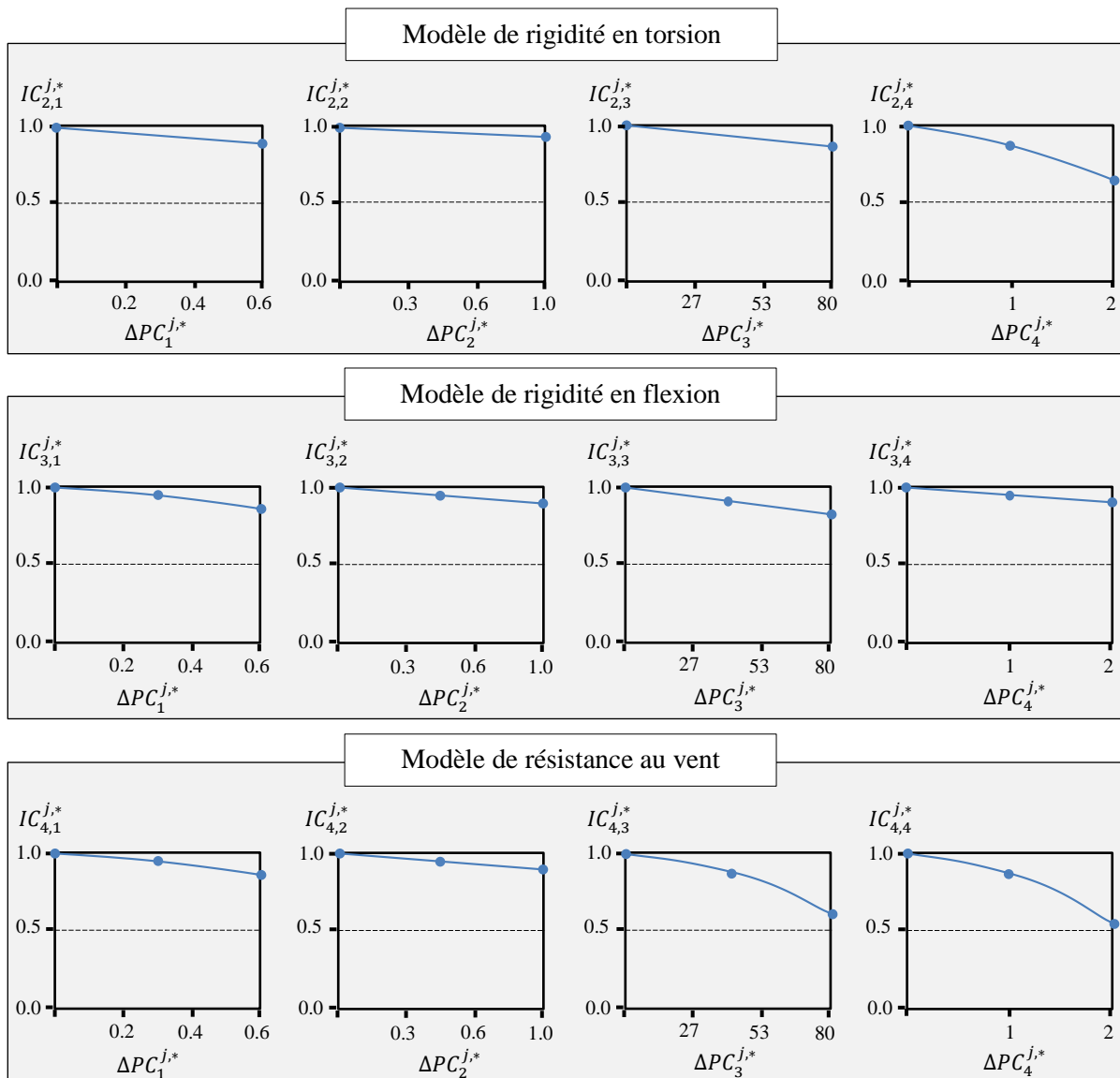


Figure V-22 Fonctions de confiance pour les différents paramètres de conception du treillis

Concernant la mesure subjective de l'exactitude, elle est dépendante de la solution candidate étudiée car elle est fonction des paramètres de conception. Les fonctions de confiance permettant de déterminer cette mesure sont définies par l'équipe des concepteurs du projet. Elles sont présentées à la Figure V-22.

V.8.3. Résultats et interprétation

Un plan d'expérience comportant 240 solutions candidates a été établi pour explorer l'espace de conception. Chacune de ces solutions est une combinaison particulière de paramètres de conception. Chaque solution candidate est évaluée en terme d'indice global de désirabilité *IGD* et d'indice global de maîtrise de risque *IGMR* en se basant sur la démarche décrite dans le chapitre IV. Les résultats sont présentés sur la Figure V-23.

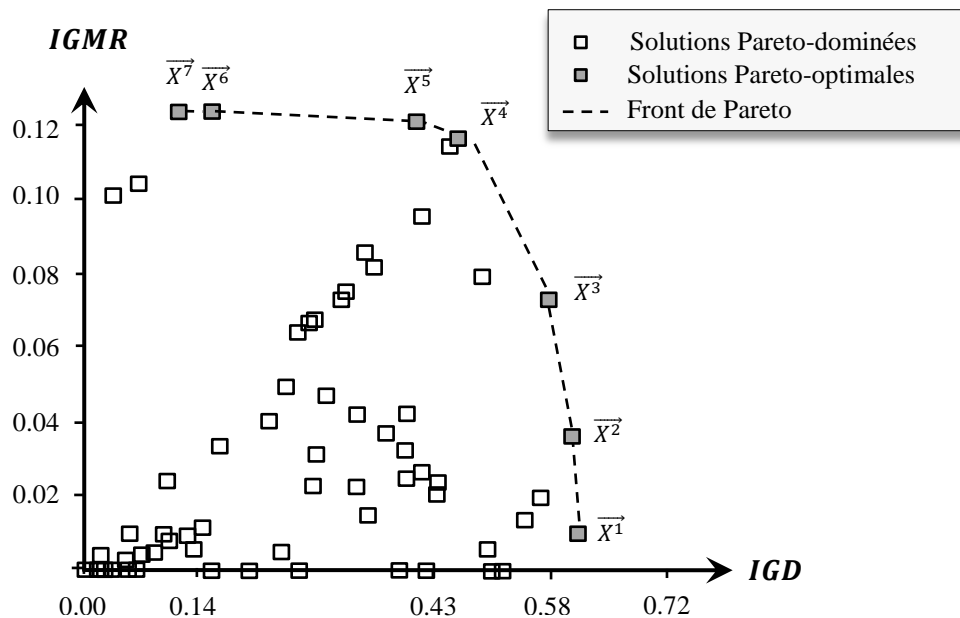


Figure V-23 Résultats pour les indicateurs *IGD* et *IGMR*

Parmi les 240 solutions candidates évaluées, seulement 50 sont conformes aux exigences minimales de validation (respect des seuils d'acceptabilité AC_i). Sur la Figure V-23, nous remarquons que parmi ces 50 solutions candidates, il y a sept solutions Pareto-optimales (solutions non dominées). Dans le reste de cette section, nous nous intéressons de plus près à ces sept solutions formant le front de Pareto. Nous commençons par les plus performantes (*IGD* élevé) pour terminer avec les plus sûres (*IGMR* élevé). Les résultats détaillés concernant ces sept solutions sont donnés dans le Tableau V-9 (pour le calcul de *IGD*) et dans le Tableau V-10 (pour le calcul de *IGMR*).

	Paramètres de conception				Variables de performance				Indices de désirabilité				
	PC_1^{tr} (mm)	PC_2^{tr} (mm)	PC_3^{tr} (mm)	PC_4^{tr} (-)	p_1^{tr} (Kg/m ²)	p_2^{tr} (degré)	p_3^{tr} (mm)	p_4^{tr} (-)	ID_{01}^{tr}	ID_{02}^{tr}	ID_{03}^{tr}	ID_{04}^{tr}	
\overline{X}_1	1.8	1.5	950	3	0.71	0.35	0.73	0.69	0.71	0.35	0.73	0.69	0.61
\overline{X}_2	1.7	1.7	950	3	0.70	0.28	0.78	0.75	0.70	0.28	0.78	0.75	0.59
\overline{X}_3	1.9	1.7	900	3	0.62	0.35	0.66	0.73	0.62	0.35	0.66	0.73	0.58
\overline{X}_4	1.9	1.9	900	3	0.41	0.24	0.53	0.58	0.41	0.24	0.53	0.58	0.41
\overline{X}_5	2.3	1.7	900	2	0.36	0.28	0.70	0.96	0.36	0.28	0.70	0.96	0.47
\overline{X}_6	1.9	2.3	871	1	0.13	0.07	0.17	0.58	0.13	0.07	0.17	0.58	0.17
\overline{X}_7	2.3	2.3	871	1	0.12	0.03	0.13	0.60	0.12	0.03	0.13	0.60	0.12

Tableau V-9 Informations détaillées sur les solutions candidates du front de Pareto : cas de l'indice global de désirabilité

	Une distance au seuil (occurrence)				Rigidité à la torsion					Rigidité à la flexion					Résistance au vent				
	$\Delta PC_1^{j,*}$	$\Delta PC_2^{j,*}$	$\Delta PC_3^{j,*}$	$\Delta PC_4^{j,*}$	MSE_2^j					MSE_3^j					MSE_4^j				
					$IC_{2,i}^{j,*}$	$IC_{2,i}^{j,*}$	$IC_{2,i}^{j,*}$	$IC_{2,i}^{j,*}$	MSE_i^j	$IC_{3,i}^{j,*}$	$IC_{3,i}^{j,*}$	$IC_{3,i}^{j,*}$	$IC_{3,i}^{j,*}$	MSE_i^j	$IC_{4,i}^{j,*}$	$IC_{4,i}^{j,*}$	$IC_{4,i}^{j,*}$	$IC_{4,i}^{j,*}$	MSE_i^j
\overline{X}^1	0.2	0	79	2	0.94	0.98	0.84	0.6	0.46	0.94	0.98	0.84	0.6	0.46	0.94	0.98	0.84	0.6	0.46
\overline{X}^2	0.3	0.2	79	2	0.96	0.98	0.84	0.6	0.47	0.96	0.98	0.84	0.6	0.47	0.96	0.85	0.84	0.6	0.47
\overline{X}^3	0.1	0.2	29	2	0.96	0.96	0.94	0.6	0.52	0.96	0.96	0.94	0.6	0.52	0.96	0.96	0.94	0.6	0.52
\overline{X}^4	0.1	0.4	29	2	0.96	0.98	0.54	0.6	0.53	0.96	0.98	0.24	0.6	0.53	0.96	0.98	0.94	0.6	0.53
\overline{X}^5	0.3	0.2	29	1	0.96	0.93	0.94	0.8	0.65	0.93	0.93	0.94	0.8	0.67	0.96	0.93	0.94	0.8	0.67
\overline{X}^6	0.1	0.8	0	0	0.88	0.97	0.94	0.8	0.64	0.88	0.97	0.94	0.8	0.64	0.85	0.97	0.94	0.8	0.64
\overline{X}^7	0.3	0.8	0	0	0.88	0.93	0.94	0.8	0.62	0.88	0.93	0.94	0.8	0.62	0.85	0.93	0.94	0.8	0.62

Tableau V-10 Informations détaillées sur les solutions candidates du front de Pareto : cas de l'indice global de maîtrise de risque

La solution candidate la plus performante est la solution \overline{X}^1 suivi de très près par la solution \overline{X}^2 . Ces deux solutions candidates ont deux points communs qui sont, d'une part, le nombre élevé de points de fixation et, d'autre part, la hauteur élevée de la structure. Le nombre élevé des points de fixation conduit à une bonne rigidité des liaisons barres/membrures, ce qui confère à la structure une bonne rigidité en torsion. De plus, la répartition des efforts de traction dans les points de fixation est meilleure, ce qui améliore leur tenue mécanique. La hauteur élevée de la structure, quant à elle, permet de diminuer sensiblement les efforts normaux que subissent les barres diagonales et les membrures de la structure, ce qui rend ces dernières plus résistantes aux conditions de vent extrême. Cependant, l'inconvénient des solutions \overline{X}^1 et \overline{X}^2 est leur faible niveau de sureté qui se traduit par des *IGMR* faibles. D'après

les informations données dans le Tableau V-10, ce sont les résultats fournis par le modèle de résistance au vent qui représentent la plus grande source de risque. La raison à cela est l'éloignement des deux solutions \vec{X}^1 et \vec{X}^2 de la solution de référence (donnant lieu à des indices de confiance faibles), en plus d'une marge de sécurité faible par rapport au seuil d'acceptabilité (traduite par l'occurrence de risque).

La solution candidate \vec{X}^4 est moins performante que les solutions \vec{X}^1 et \vec{X}^2 (différence de l'ordre de 16%) mais elle présente une très grande amélioration au niveau de l'indicateur *IGMR* (différence de l'ordre de 550%). Nous rappelons tout d'abord que l'*IGMR* est fonction de la mesure objective d'exactitude, de la mesure subjective d'exactitude, de l'occurrence de risque et de la sévérité du non-respect du seuil d'acceptabilité. Même si les mesures objectives d'exactitude restent les mêmes pour toutes les solutions candidates, les mesures subjectives d'exactitude sont quant à elles très dépendantes des valeurs données aux paramètres de conception et donc de la solution candidate. En analysant les résultats donnés dans le Tableau V-10, nous pouvons déduire que l'amélioration de l'*IGMR* est liée, d'une part, à l'amélioration de la mesure subjective d'exactitude, dû à un écart moins important entre la solution \vec{X}^4 et la solution de référence et, d'autre part, à une amélioration dans l'occurrence de risque (marge de sécurité plus élevée par rapport au seuil d'acceptabilité).

\vec{X}^6 et \vec{X}^7 sont les solutions candidates les plus sûres car elles ont les *IGMR* les plus élevés. Cependant, l'amélioration dans les *IGMR* est peu notable par rapport à la solution candidate \vec{X}_4 . La dégradation de la performance est, quant à elle, très importante. Nous considérons alors que les deux solutions candidates \vec{X}^6 et \vec{X}^7 ont peu d'intérêt dans notre cas.

La solution candidate \vec{X}_4 nous semble être parmi les solutions les plus intéressantes car elle présente un bon compromis performance/sûreté. Cependant, le décideur doit proposer des actions afin d'améliorer la sûreté de cette solution avant de la valider définitivement. Nous avons identifié deux actions possibles. La première serait de réaliser des modèles plus développés pour évaluer la résistance au vent. Il existe aujourd'hui des codes éléments finis capable de simuler les phénomènes d'instabilité (tel que le flambement) d'une manière très fidèle à la réalité. Le faible nombre de solutions candidates à tester fait que le coût de calcul serait relativement faible. Une fois le modèle de comportement modifié, la mesure objective de l'exactitude et les fonctions de confiance correspondant à ce modèle devront être redéfinies. L'autre action possible pour rendre la solution \vec{X}_4 plus sûre consisterait à fabriquer un prototype physique et réaliser les essais mécaniques pour être sûr de la tenue mécanique de

la structure et du respect des exigences en performance optique. Bien que cette action soit la plus efficace, nous estimons qu'elle reste couteuse en temps et en ressources dans notre cas.

V.8.4. Etude de différents scénarios de conception

Dans cette section, nous analysons les résultats obtenus pour différents scénarios de conception. Ces scénarios correspondent à des poids w_i différents, formalisant des importances relatives différentes dans la satisfaction des objectifs de conception. Généralement, il peut être intéressant pour le décideur de connaître l'effet de la mise en avant de certains objectifs de conception par rapport à d'autres. Dans certaines situations industrielles, il est possible que le choix de scénario de conception (répartition des poids) ne soit pas fondé sur des bases assez solides. Cette problématique est assez fréquente dans les premières phases d'un projet de développement ou lorsque plusieurs décideurs ont des points de vue différents sur les priorités des objectifs. Dans ce cas, il peut être utile pour les décideurs de voir les différentes performances (traduites par les *IGD*) qui peuvent être atteintes pour différents scénarios. Par exemple, qu'est-il possible d'obtenir pour une solution moins couteuse et plus résistante au vent ?

Nous supposons que le scénario présenté dans la section V.4 (désigné par "*scénario 1*" dans cette section) est celui qui correspond le mieux à notre cas industriel. En plus de ce scénario, nous imaginons deux autres scénarios. La description détaillée de ces deux scénarios est donnée à Figure V-24. Dans le scénario 2, nous donnons plus d'importance à la l'objectif de réduction du coût de la matière première. Pour le scénario 3, nous donnons plus d'importance à l'objectif d'amélioration de la performance optique.

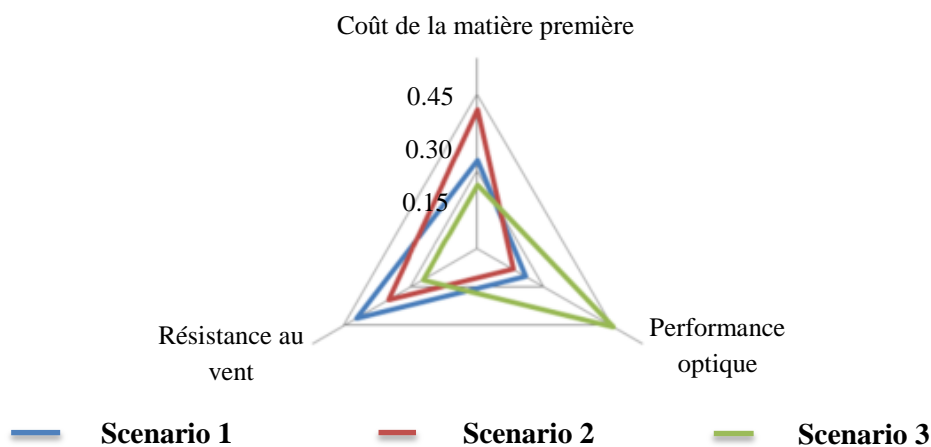


Figure V-24 Répartition des poids pour trois scénarios d'étude

L'évolution des *IGD* liée au changement du scénario de base (scénario 1) est donnée à la Figure V-25. Nous pouvons voir que lorsqu'on donne plus d'importance à l'objectif lié au coût de la matière première, la plupart des solutions candidates voient leur performantes augmenter. Cette augmentation atteint la valeur maximale de 21%.

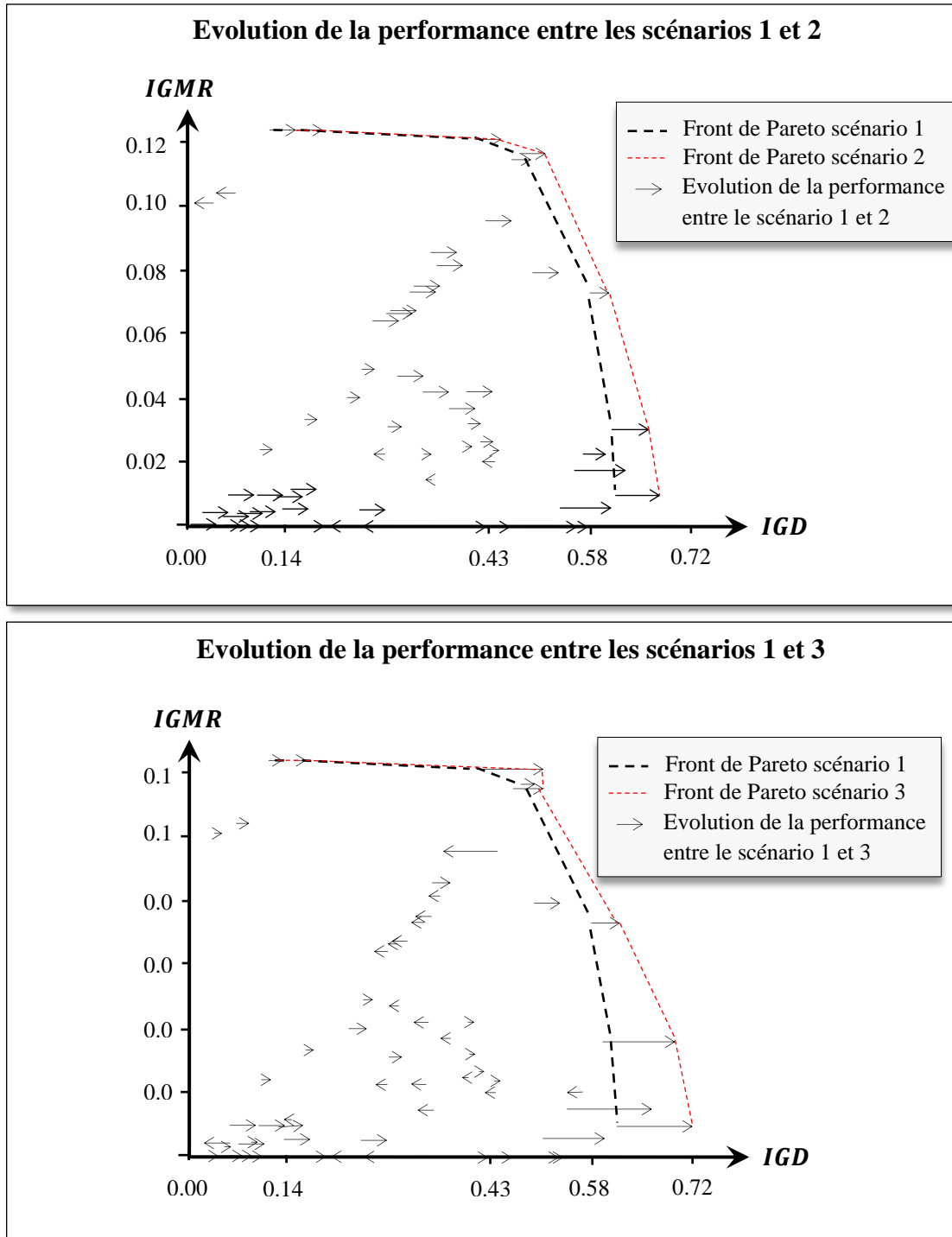


Figure V-25 Evolution de la valeur de l'indicateur *IGD* entre le scénario de base (scénario 1) et les scénarios 2 et 3 imaginés

V.9 Conclusion

Les démarches d'aide à la décision proposées dans ce manuscrit ont été appliquées sur le cas d'un support réflecteur afin de mettre en évidence leurs apports dans un contexte industriel. Les méthodes proposées sont basées sur un modèle qui permet de formaliser les préférences du décideur. Ce modèle de formalisation nous a été d'une grande utilité pour traiter de nombreuses solutions candidates.

Dans les premières phases de développement, nous avons pu mettre en évidence les concepts les plus pertinents par rapport aux objectifs de l'entreprise. Ainsi, il a été possible de mettre en évidence les concepts les plus risqués pour pouvoir apporter plus de sûreté au projet de développement.

Dans la phase de conception architecturale, il nous a été possible d'explorer l'espace de conception en recherchant les solutions candidates les plus performantes et les moins risquées.