



Analyse aérodynamique et structurale d'une centrale photovoltaïque

# Analyse aérodynamique et structurelle d'une centrale photovoltaïque

Josué AGBEKODO, Pierre BEAULIEU, Tom BERTHEAS, Vermeer BONHOMME, Pierre-Yves DOIREAU, Yassir FAKRI, Max FRESSONNET, Alexandre GRENIER, Rémy MARTINEZ, Marius MOULLE, Colombe NOTHELFER, Xavier SECHERESSE, Thomas SERIEYS, Jeremy TRAMEÇON, Michaël VINCENDON, Chloé VOGEL

## Résumé

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire connaît un développement fulgurant. La construction d'une centrale photovoltaïque est particulièrement rapide et en permet un déploiement en masse. Cependant les problématiques d'intermittence représentent un frein à ce développement. Pour y faire face, de nouveaux systèmes de suivi du soleil permettant d'augmenter le rendement et rendre la production plus constante ont vu le jour. Mais ces structures, nommées "trackers solaires", sont particulièrement imposantes (jusqu'à cinquante mètres de long par 4.5m de large pour le tracker sur 1 axe) et sont soumises à des vents importants. Elles présentent des défis de dimensionnement aérodynamique et de structure majeurs que nous étudierons dans le cadre de ce projet.

## Keywords

Photovoltaïque — Tracker — Aérodynamique — Résistance des matériaux

## Remerciements

Nous tenions à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé dans ce projet.

De nombreux intervenants nous ont permis d'avoir les connaissances nécessaires afin de pouvoir réaliser nos différents projets, en nous introduisant au monde du photovoltaïque et en particulier d'Optimum Tracker, ou en nous donnant les bases scientifiques indispensables en étude des matériaux ou aérodynamique. Pour cela nous voulons remercier Romain Carriou et Romain Couderc de CEA LITEN, Nicolas Clausset du Ministère de la Transition Ecologique, Yacin De Welle PDG de Optimum Tracker, Rodolphe Chaix et Denis Lebleu de THALES ALENIA SPACE, et enfin Alain Janet de SOLAR CLOTH SYSTEM.

Nous n'aurions jamais pu obtenir tous nos résultats sans l'aide précieuse de nos encadrants : merci donc à Philippe Blanc, Jean-Luc Bouvard, Daniel Pino Munoz, Ramy Nemer, Sacha El Aouad et Christophe Pradille.

Nous tenons à remercier spécialement Thibaut Barbier, ingénieur chez Optimum Tracker, pour sa présence tout au long du MIG, nous donnant notamment des informations précieuses sur le fonctionnement des trackers et des centrales gérées par Optimum Tracker.

Enfin, nous voulons remercier tout particulièrement Pierre-Olivier et Elie Hachem, sans qui tout ceci n'aurait pas été possible. Nous les remercions en particulier pour l'énergie qu'ils ont déployée afin de nous permettre de réaliser ce MIG en présentiel, malgré le contexte défavorable.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Mise en contexte</b>	<b>3</b>	
1.1	Situation Énergétique en France . . . . .	3	
1.2	Le solaire, solution de la transition énergétique ?	4	
1.3	Nouvelle génération de panneaux . . . . .	5	
1.4	Verrous scientifiques . . . . .	6	
<b>2</b>	<b>Méthodes numériques pour la prévision locale de rafales</b>	<b>7</b>	
2.1	Pré-traitement et organisation des données . . . . .	7	
2.2	Approche à échelle de l'heure : prédiction des rafales à l'aide des données locales . . . . .	8	
2.3	Approche à échelle de la journée : prédiction des rafales à l'aide des données météo . . . . .	9	
2.4	Amélioration des deux modèles à l'aide d'un réseau de neurones . . . . .	10	
<b>3</b>	<b>Simulation numérique des écoulements complexes autour des trackers solaires</b>	<b>12</b>	
3.1	Mise en place du problème . . . . .	12	
3.2	Résultats . . . . .	14	
<b>4</b>	<b>Analyse dynamique et amortissement des trackers solaires</b>	<b>17</b>	
4.1	Établissement du modèle . . . . .	17	
4.2	Étude en forçage de vent . . . . .	18	
4.3	Étude en conditions réelles . . . . .	19	
<b>5</b>	<b>Simulation numérique du comportement des longérons</b>	<b>21</b>	
5.1	Modélisation . . . . .	21	
5.2	Résultats et Interprétation . . . . .	23	
5.3	Confrontations des résultats avec la pratique et avec un modèle théorique . . . . .	24	
<b>6</b>	<b>Analyse mécanique de différentes solutions d'entraînement</b>	<b>25</b>	
6.1	La théorie des poutres . . . . .	25	
6.2	Mise en donnée des calculs Abaqus . . . . .	26	
6.3	Simulations et résultats . . . . .	27	
<b>7</b>	<b>Analyse des contraintes en service dans une cellule PV</b>	<b>30</b>	
7.1	Mise en place du modèle de la cellule PV . . . . .	31	
7.2	Démarche expérimentale pour caractériser les propriétés des matériaux . . . . .	32	
7.3	Analyse des résultats de la simulation numérique et conclusions . . . . .	33	
<b>8</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>35</b>	
	<b>Références</b>	<b>36</b>	
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>37</b>	
A.1	Les différents types de cellules PV . . . . .	37	
A.2	Fabricants et exploitants de modules solaires . . . . .	37	
A.3	Marché du tracker simple . . . . .	37	
A.4	Quelques résultats graphiques concernant l'étude de la prévision de rafales sur la centrale (Partie 2)	38	
A.5	Précisions sur les différents essais expérimentaux	39	

## 1. Mise en contexte

### Participants

(à cette section, et à la gestion globale du projet)

Alexandre GRENIER, Colombe NOTHHELFER

### Introduction

L'urgence d'un besoin croissant de décarboner notre énergie saisit aujourd'hui de plus en plus les populations et les gouvernements. La COP 21 notamment, conférence réunissant 195 états à Paris en 2015, a abouti sur l'Accord de Paris, où les signataires se sont engagés à faire leur possible pour maintenir l'élévation de température en-dessous de 1,5°C d'ici 2100, et à atteindre le plus rapidement la neutralité carbone [1]. De son côté, la France s'est posée ses propres objectifs : atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, et baisser de 40% sa consommation d'énergie fossile d'ici 2030 par rapport à 2012 [2].

A travers cette étude nous proposons de nous intéresser à l'optimisation du rendement des centrales photovoltaïques via les technologies de trackers solaires et en particulier aux contraintes qu'apporte l'installation de ce type de solutions techniques. Pour cela nous commencerons par présenter la situation actuelle des énergies renouvelables et solaires en France et à l'international. Ensuite, nous nous demanderons, à travers l'étude de l'impact des différentes énergies sur l'environnement, si le solaire peut vraiment être considéré comme une solution pour la transition énergétique. Puis nous nous intéresserons au marché du tracker solaire avant de nous concentrer sur un exemple de centrale afin de mettre en évidence les problématiques d'ingénieries sur lesquelles nous avons travaillé.

## 1.1 Situation Énergétique en France

### 1.1.1 Mix énergétique français et mondial

**Mix énergétique français** Il s'agit d'un héritage de la politique énergétique mise en place à partir de l'après guerre. Le CEA est créé en 1945 et le premier réacteur nucléaire est mis en service en 1955. C'est ensuite près de 60 réacteurs qui seront mis en service jusqu'à 1999. Cela permet à la France d'avoir une production électrique à partir d'énergies fossiles négligeable. Cependant, fort de ce parc nucléaire, le pays se repose désormais dessus et n'a que peu investi dans d'autres formes d'énergie. Cela commence à poser problème face au vieillissement des réacteurs nucléaires qui ne sont pas remplacés à ce jour. Ainsi le gouvernement en est réduit à mettre en garde contre de possibles coupures de courant pendant l'hiver. Il devient nécessaire de renouveler le parc nucléaire ou de proposer de nouvelles formes d'énergie.

**Retard sur les énergies renouvelables (EnR)** La France est donc l'un des pays du monde dont l'électricité est la plus "propre" au sens où elle ne repose pas sur des centrales thermiques à fioul ou à charbon. Néanmoins elle n'a pas cette avance sur les EnR qui ne représentent que 21.5% de sa production d'électricité. L'Allemagne en revanche, malgré

la forte présence de charbon dans son mix, présente 46.1% d'EnR avec près de 9% de production solaire contre 2.2% en France. La part d'EnR française est même semblable à celles de pays réputés pollueurs tels que la Chine (25.2%) ou les USA (18.1%) mais ces pays présentant très peu de nucléaire, le reste de leur production est très carbonée (**figure 1**).

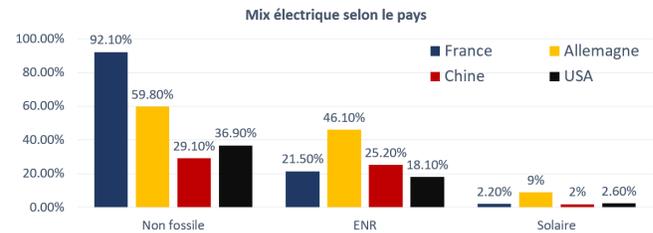


FIGURE 1. Comparaison des mix électriques [3, 4, 5, 6]

### 1.1.2 Développement des EnR et du solaire en France

Sur le marché du renouvelable, plusieurs sources d'énergies sont actuellement exploitées : le vent, le soleil, l'eau, la chaleur terrestre... Parmi celles-ci le solaire, bien qu'assez faiblement représenté sur le marché pour l'instant -il représentait 2,2% de la production électrique française en 2019-, est en pleine expansion, avec une augmentation de la production solaire française de 7,8 % entre 2018 et 2019. Cette dynamique dans le secteur solaire est notamment permise par les aides financières proposées par l'état, avec 1,5 milliards d'euros déjà investis pour soutenir les producteurs de panneaux photovoltaïques. La **figure 2** illustre cette volonté d'augmenter la part des EnR dans le mix énergétique français [3].

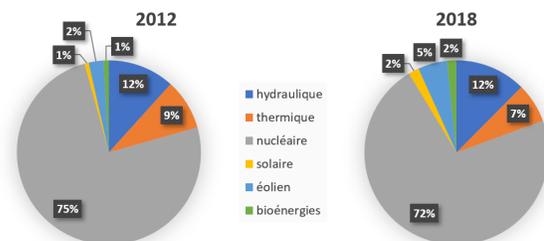


FIGURE 2. Evolution du mix énergétique français

### 1.1.3 Marché du solaire dans le monde

**Principaux fabricants de cellules PV** Le secteur de la production de cellules photovoltaïques est très largement dominé par la Chine aujourd'hui (**table 9** en annexe). Le pays investit très massivement dans ce secteur, avec même un prêt de main d'oeuvre de l'armée à certaines entreprises. Elles sont alors en mesure de baisser drastiquement leur prix ce qui explique ce quasi-monopole sur ce secteur mais qui empêche aussi les champions chinois de dégager une trop grosse marge. Quelques autres industriels nord-américains et asiatiques réussissent timidement à se hisser dans le top 10 des producteurs.

**Principaux producteurs d'électricité solaire** En tant que premier producteur de panneaux solaires, la Chine est aussi le premier producteur d'énergie solaire (**table 9**), motivée par la volonté d'écouler une partie de la production de cellules sur le marché local mais aussi de dépolluer ses métropoles. On note aussi une forte représentation des pays européens dans les principaux producteurs d'électricité solaire. L'Europe fût le berceau historique du solaire avant de se faire dépasser par la Chine par manque d'investissement à long terme. Les places restantes sont occupées par des pays à forte superficie comme les USA et l'Australie mais aussi par le Japon dont la deuxième place est surprenante. Comment un pays qui manque cruellement de terrain peut-il se hisser aussi haut ? Cela s'explique à la fois par le fait que ce fut historiquement l'un des pays de tête dans la production de cellules, mais aussi par une réaction à la catastrophe de Fukushima après laquelle le gouvernement met en place une politique de transition énergétique qui rend le solaire particulièrement attractif dans le pays.

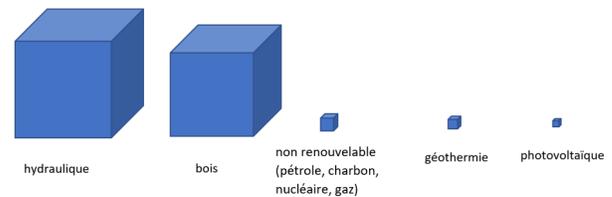
## 1.2 Le solaire, solution de la transition énergétique ?

### 1.2.1 L'impact des énergies sur l'environnement

**Limiter les émissions carbonées** Toute production d'énergie a un impact sur l'environnement. La principale priorité à l'heure actuelle est de limiter les émissions de gaz à effet de serre, et notamment de CO<sub>2</sub>, et c'est pour cela que nous nous sommes tournés vers les énergies décarbonées. Il ne faut cependant pas oublier la part des émissions indirectes dans la production d'énergie, c'est-à-dire les émissions produites par la fabrication de la centrale et du réseau électrique, ce qui fait que même les énergies vertes n'ont pas un bilan totalement neutre en carbone. Néanmoins ces émissions sont négligeables face aux émissions directes des centrales à charbon par exemple. Si les émissions indirectes des énergies éoliennes, photovoltaïques, marémotrices sont de l'ordre de 130g de CO<sub>2</sub> par kWh produit, les émissions globales s'élèvent à 650 pour le pétrole et 1000 pour le charbon [7].

**Les besoins en eau** Toutefois l'impact écologique d'une source d'énergie ne peut se limiter aux émissions carboniques. Un autre facteur à prendre en compte est le besoin en eau de chaque forme d'énergie, l'eau étant une ressource vitale et précieuse, et l'utilisation d'eau, même non potable, nécessite son passage ensuite par des centrales d'épuration pour éviter de polluer les cours d'eau alentour. Dans la **figure 3** ci-dessous, nous avons représenté les besoins relatifs en eau de différentes formes d'énergie. Nous pouvons ainsi remarquer que l'énergie photovoltaïque est de loin la moins consommatrice d'eau parmi les énergies considérées : il faut 104 m<sup>3</sup>d'eau en moyenne pour produire 1 TJ avec de l'énergie photovoltaïque [7].

**Besoin en ressources minières** Enfin, se pose la question des ressources premières nécessaires pour la construction des infrastructures capables de produire de l'énergie à partir de sources naturelles. Le problème des ressources minières doit



**FIGURE 3.** Représentation relative, sous forme de cubes, du volume nécessaire pour produire la même quantité d'électricité

notamment mobiliser notre attention : aujourd'hui, 8 à 10% de la consommation mondiale d'énergie est utilisée pour l'extraction et le raffinage des ressources minières. La question des ressources est capitale dans l'éolien, car la majorité des éoliennes fonctionnent grâce à des aimants de terres rares, dont l'extraction pose de grands problèmes sociaux, environnementaux, géopolitiques, et des problèmes de disponibilités sur le long terme. Au niveau des panneaux photovoltaïques, ce problème se pose uniquement si on considère des panneaux à couche mince, et notamment la technologie CIGS, qui utilisent des métaux rares. Cependant, les panneaux que nous allons étudier dans notre projet sont exclusivement des panneaux dont l'unique principe actif est le Silicium, qui représente 28% de la croûte terrestre, et donc qui ne pose pas de problème de disponibilité, ni de pollution. En revanche, les processus de purification du silicium sont très énergivores et peuvent s'avérer polluants. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches afin de trouver des solutions permettant de limiter l'impact écologique de toutes les étapes de vie des panneaux solaires.

### 1.2.2 Les défis à relever pour une transition énergétique efficace

**La contrainte de l'intermittence** La plupart des EnR sont intermittentes, c'est à dire qu'elles ne peuvent pas à tout instant produire de l'énergie. Il y a des variations de production à l'échelle de la journée, et de l'année. Or il y a des variations dans la consommation, celles-ci à l'échelle de la journée, de la semaine, de l'année. Malheureusement, ces variations sont souvent inversées, c'est-à-dire que les instants où nous pouvons le plus produire de l'énergie sont rarement ceux où nous l'utilisons le plus. Ainsi, le manque de contrôle sur la production d'énergie pose alternativement deux problèmes opposés :

- surproduction, donc nécessité de moyens de stockage ;
- sous-production, donc besoin de sources alternatives pour le combler.

*Les problèmes de stockage* La majorité des batteries ont un processus de fabrication très peu écologique, et très énergivore : une batterie d'une durée de vie de 3 ans a une durée de retour énergétique compris entre 2 et 4 ans. D'autre part, l'ajout d'une batterie est un souci pour la rentabilité. En effet, produire un kWh avec des panneaux photovoltaïques Si coûte

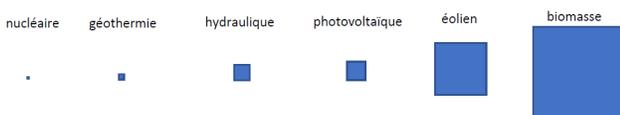
approximativement 0,4€ si on est directement branché sur le réseau, mais ce prix s'élève à 1,3€ si on ajoute une batterie [8]. De plus, les processus de fabrication des batteries sont très peu respectueux de l'environnement, avec notamment l'utilisation de métaux rares et de processus chimiques dangereux pour les écosystèmes alentours. Ainsi, d'importants progrès relativement au stockage de l'énergie sont encore nécessaires.

**Contraintes pour assurer la relève des sources intermittentes** Des capacités de stockage accrues ne permettraient pas de couvrir toute la demande énergétique, car le surplus d'énergie lors des pics de production n'équivaut pas au manque de production à combler des périodes de sous-production. Il faut donc avoir recours à des sources alternatives. Ces dernières doivent être particulièrement réactives, et doivent pouvoir être mises en et hors tension assez facilement, et sans trop de perte d'énergie au démarrage. En effet, au moins une fois par jour nous passons de surproduction à sous-production et inversement, nous ne pouvons donc pas nous permettre d'avoir une source alternative qui mettrait du temps et nécessiterait trop d'énergie pour se mettre en fonction. De plus, même une fois en fonction, il faut une source qui soit capable de fournir une puissance qui varie assez rapidement, en effet en France nous pouvons avoir des variations de la puissance fournie par les éoliennes et fermes solaires qui peut varier jusqu'à 40GW en 6 heures. Or à l'heure actuelle seules les énergies fossiles nous permettent une telle flexibilité [9].

L'intermittence impose la nécessité de diversifier nos sources d'énergie et limite la part du solaire dans la production d'énergie. Une étude de Wagner sur l'intermittence des EnR a d'ailleurs montré que si la France produisait 100% de son énergie avec des EnR intermittentes, la part du solaire ne pourrait pas excéder les 17,5%.

Il faut donc continuer les recherches pour trouver des solutions de stockage et de sources alternatives qui soient le plus vertes possibles, afin que le bienfait du solaire sur l'environnement ne soit pas qu'illusoire.

**L'aménagement du territoire** Une des caractéristiques des EnR est leur diffusivité, c'est à dire leur besoin d'espace. Dans la **figure 4**, nous avons représenté des carrés dont la surface est proportionnelle à celle nécessaire pour produire 1 GW, grâce à différentes sources d'énergie.



**FIGURE 4.** Représentation relative, sous forme de carrés, de la surface nécessaire pour produire la même quantité d'électricité [7]

La surface occupée est en enjeu économique, mais aussi sociologique car production d'énergie et agriculture rentrent en compétition pour l'occupation des sols. Un concept se développe de plus en plus pour concilier ces deux besoins : l'agrivoltaïsme. L'idée est de mettre des panneaux solaires

à 4m au-dessus des cultures. Cette pratique limite l'ensoleillement et l'eau de pluie reçus par les cultures, ce qui peut avoir alternativement des conséquences bénéfiques ou délétères sur les cultures. Effectivement, les panneaux solaires peuvent éviter aux cultures des coups de chaleur, mais en certaines périodes peu ensoleillées, ils ne laissent plus passer assez de soleil pour permettre le bon développement des cultures. L'agrivoltaïsme est encore dans ses premières phases de développement, il existe actuellement quelques projets de cultures où sur un même terrain des passerelles sont couvertes par des panneaux et d'autres non, afin de mesurer l'impact de ces derniers sur les rendements agricoles [10].

### 1.3 Nouvelle génération de panneaux

#### 1.3.1 Vers un meilleur rendement

**Tracker Solaire** Afin de remédier à certains défauts présentés précédemment, il est intéressant d'augmenter le rendement des centrales photovoltaïques. C'est l'idée qui a poussé la société française Optimum Tracker à développer une technologie de suivi héliotrope mono-axe du soleil aussi appelée "Tracker Solaire". En équipant les supports des panneaux d'un asservissement pour suivre la position du soleil on peut augmenter significativement son rendement (entre 10% et 30%, source : Optimum Tracker). Il convient cependant de souligner que les trackers prennent plus de place que des supports fixes, ainsi ce n'est pas toujours plus rentable d'en installer dans des endroits où les terrains sont chers. Il faut aussi noter l'existence de tracker solaire double axe ou à suivi par azimut qui augmentent encore le rendement, mais chaque panneau doit être équipé d'un support différent, ce qui augmente considérablement le coût d'installation et la surface nécessaire. Ainsi le tracker solaire mono-axe reste souvent le meilleur compromis.

**Héliotrope simple** Dans le cadre de notre étude nous nous concentrons sur les trackers à axe simple. Ces trackers sont installés sur des rangées d'une quarantaine de mètres de panneaux solaires et sont alimentés par un petit panneau annexe. Leur consommation d'énergie est négligeable par rapport à la production de la rangée de panneau car elle n'en représente que quelques dixièmes. Ce système permet d'augmenter le rendement en moyenne, mais il permet aussi d'avoir une production presque constante durant la journée contrairement aux panneaux fixes qui ont leur pic à midi. Cependant lorsque le soleil est proche de son équinoxe d'hiver le rendement à midi peut baisser par rapport à des panneaux fixes.

#### 1.3.2 Optimum Tracker

**Marché du tracker simple** De nombreuses sociétés à travers le monde ont développé leur version du Tracker solaire, nous invitons le lecteur à se rediriger vers l'annexe pour un panorama d'ensemble du marché du tracker solaire (voir annexe A.3).

**Présentation de la société** Fondée en 2009 par les frères Yacin et Madyan De Welle, tous deux ingénieurs des Arts et Métiers, la société Optimum Tracker est une entreprise

française basée à Meyreuil spécialisée dans le développement de trackers solaires mono-axes. Optimum Tracker a pour objectif de rendre les centrales solaires plus compétitives grâce à l'augmentation de leur rendement.

**Développement commercial** Le marché initial d'Optimum Tracker est le territoire français, plus précisément dans le sud qui présente de meilleures conditions pour l'installation de centrales solaires. La société s'est ensuite étendue en Afrique, en Asie du Sud et au Moyen Orient. Actuellement elle cherche à se développer dans le reste du sud de l'Europe, en Océanie et en Amérique du Sud et Centrale. Les centrales équipées par Optimum Tracker sont de tailles moyennes avec des puissances de l'ordre de quelques dizaines de mégawatts.

**Stratégie** Optimum Tracker a choisi de miser sur l'excellence technologique plutôt que sur le volume de production pour se démarquer, le marché étant déjà inondé par les géants du secteur. À cet égard, la technologie phare d'Optimum Tracker est l'Opti-SkyControl qui permet une meilleure captation de la lumière diffuse par temps nuageux. Ces particularités lui permettent de ne pas se placer en concurrence des géants mais au contraire de travailler avec eux. Ainsi Optimum Tracker et l'américain NEXTracker ont signé en 2018 un partenariat. Il a permis à la startup française, à travers la vente de certains brevets, de retrouver un bon équilibre financier, celui-ci ayant été mis en difficulté suite à plusieurs complications dans des exploitations liées à des conditions climatiques extrêmes. Ainsi pour tenir sa stratégie de développement, Optimum Tracker se doit de rester à la pointe de la technologie.

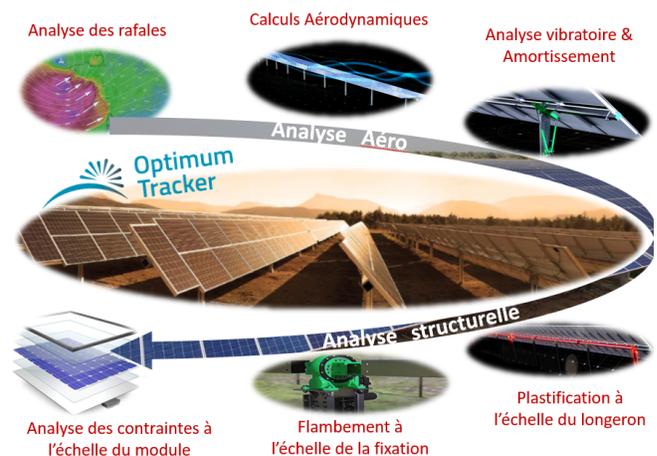
#### 1.4 Verrous scientifiques

**Contraintes climatiques** L'installation de trackers sur les panneaux solaires ajoute de nombreux composants électroniques et complexifie le système. Cela amène en particulier une sensibilité accrue aux conditions climatiques. Par exemple le tracker est alimenté par un petit panneau photovoltaïque qui stocke son énergie dans une batterie, mais celle-ci devient quasiment inutilisable si les températures deviennent trop basses. Ainsi si l'hiver est particulièrement rude, le tracker peut tomber en panne. Il est alors nécessaire de prévoir des dispositions particulières pour palier à cette éventualité.

**Rafales de vent** De même, le tracker est bien plus soumis au vent qu'un panneau fixe. Ce dernier peut provoquer des oscillations très dangereuses voir même déformer les longerons de manière irréversible. Les champs de panneaux photovoltaïques équipés de tracker encourent donc le risque d'être dévastés par les rafales de vent. Actuellement, pour éviter cela Optimum Tracker a équipé ses trackers d'amortisseurs et met ses panneaux en position horizontale de sécurité dès que la vitesse du vent dépasse un certain seuil, mesuré grâce à des anémomètres.

**Étude** Ces mesures provisoires manquent peut être d'efficacité. Comme nous l'avons déjà dit, pour rester compétitive Optimum Tracker doit maintenir une avance technologique

sur ces concurrents. Ainsi nous chercherons dans cette étude à proposer une optimisation de ces contre mesures. Nous proposerons d'abord un modèle prédictif des rafales ainsi qu'une meilleure position de sécurité. Nous avons également étudié les oscillations du panneaux afin d'éviter toute résonance. Pour optimiser cette position de sécurité, nous avons réalisé une étude aérodynamique du champ de panneaux solaires qui nous permet également de déterminer les contraintes exercées sur le longeron par les champs de pression appliqués sur les panneaux en fonction de leur inclinaison. Nous avons alors pu vérifier les risques de déformation irréversible selon le système d'entraînement (asservissement des longerons par le moteur central du tracker). Enfin, afin de descendre à une échelle encore plus basse, nous nous avons mis en place un modèle permettant d'analyser les contraintes générées dans un module solaire PV en service. Le modèle est appliqué pour un cycle thermique mais pourra être étendu, à terme, pour des chargements mécaniques. Cette dernière étude a également pour but de montrer l'importance de la caractérisation des matériaux pour analyser les niveaux de contraintes à l'échelle des composants, et optimiser ainsi leur rendement et leur durée de vie. Dans la suite de ce rapport, vous trouverez ainsi des chapitres dédiés à chacune de ces études, dont le thème de chacun est présentée dans la **figure 5**.



**FIGURE 5.** Présentation des thèmes de chaque mini-projets

## 2. Méthodes numériques pour la prévision locale de rafales

### Participants

Josué AGBEKODO, Rémy MARTINEZ, Chloé VOGEL

### Abstract

Notre travail porte sur la prévision des rafales, au sens de vents dépassant un certain seuil de sécurité. Les données dont nous disposons sont la base de données anémométriques mesurées in-situ, fournies par Optimum Tracker, ainsi que les prévisions météo aux environs de la centrale. Ce mini projet consiste donc dans un premier temps à pré-traiter les données brutes du capteur, et ensuite à lui appliquer différents modèles de manière à prédire la présence de rafales au niveau des panneaux solaires ; le but final étant de pouvoir mettre les trackers en position de sécurité avant qu'ils ne soient abîmés par le vent grâce aux dites prévisions.

### Introduction

"Quel temps fait il aujourd'hui ?". Ce geste de langage très commun pour ouvrir une conversation n'est possible que grâce à des prévisions météorologiques toujours plus précises. Mais le rôle du climat est bien plus vaste : il conditionne l'agriculture, le trafic routier, et même le mode de vie d'un pays et s'étend ainsi jusqu'à l'intérêt national. Les prévisions météo peuvent, elles, simplement permettre à une société de mieux s'organiser quotidiennement ou aller jusqu'à prévenir les lourdes pertes engendrées par un raz-de-marée ou un ouragan. En particulier, la prévision du vent et surtout des rafales - dépassements de la vitesse moyenne du vent de plus de 18km/h [11] - est un outil essentiel pour la protection des infrastructures fragiles qu'on peut trouver dans l'industrie ou chez les particuliers. C'est par exemple un enjeu majeur pour prévenir le déraillement des trains [12].

Les panneaux photovoltaïques, installés en extérieur, ne font pas exception. Lorsque celui-ci est trop fort, il vient exercer une pression sur la surface plane des panneaux, ce qui peut mener à un endommagement de la structure. Pour contrer ce problème, il faut pouvoir sécuriser la centrale à l'approche de forts vents, et donc avoir des informations concernant la présence de futures rafales. Le travail effectué ici consiste donc à prédire grâce à des algorithmes la présence de rafales à l'échelle de la journée puis de l'heure.

La prédiction se base sur une approche analytique des données antérieures. En trouvant des lois statistiques et mathématiques qui s'appliquent dans le passé, on peut simuler le futur en supposant qu'elles s'y appliqueront de même. Plusieurs modèles de prévision sont proposés : une première approche a été celle de chercher à corrélérer les données de prévision des 48 dernières heures avec les mesures réelles de vent sur la centrale, afin de pouvoir prédire à l'avenir la présence de rafales à partir des prévisions météo ; une seconde approche a été de chercher à prévoir la vitesse du vent de

l'heure suivante à partir des mesures réalisées in-situ à l'heure courante.

Pour comparer les modèles, nous avons fait le choix d'estimer leurs performances sur deux critères : le Recall défini comme :

$$\text{Recall} = \frac{\text{Vrais Positifs}}{\text{Vrais Positifs} + \text{Faux Négatifs}}$$

qui quantifie la part de rafales qui sont détectées, et la Précision valant :

$$\text{Précision} = \frac{\text{Vrais Positifs}}{\text{Vrais Positifs} + \text{Faux Positifs}}$$

qui donne la proportions de vrais alertes parmi les alertes. Un modèle idéal a donc un recall et une précision de 100%. On peut donc placer tout modèle dans ce diagramme, donc les comparer entre eux. De plus, pour un même modèle, on peut voir l'évolution des performances en fonction des variables d'entrée.

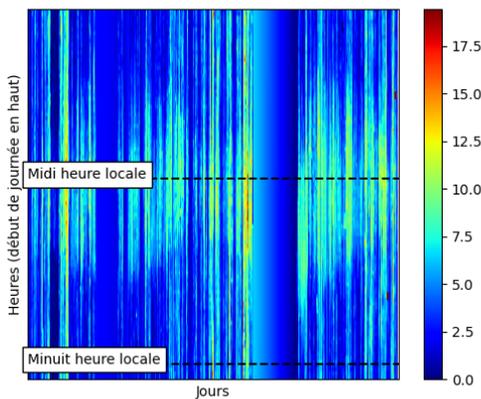
### 2.1 Pré-traitement et organisation des données

Nous disposons de deux jeux de données : des données issues des prévisions météo (données globales) et des données anémométriques mesurées sur le site (données locales). Les premières ont déjà été mises en forme alors que les secondes sont des données brutes issues d'un capteur. Ces données anémométriques utilisées nous ont été fournies par Optimum Tracker. Elles correspondent aux enregistrements effectués par les quatre anémomètres de la centrale du Plateau, située sur la commune de Colombelles, sur les années 2019-2020, avec une période d'échantillonnage de 3 secondes, et représentent 1 à 2 Go de données brutes. La solution actuelle de la société consiste à mettre ses panneaux en position de sécurité dès qu'un vent de vitesse supérieure à 70 km/h est perçu par les anémomètres. Nous considérerons donc cette vitesse comme vitesse critique seuil, de telle sorte que tout vent de vitesse supérieure soit considéré comme dangereux.

Les données anémométriques mises à disposition étant sous forme brute, nous les avons d'abord traitées. Il s'agit d'un travail d'approche afin de comprendre comment les analyser. Dans un premier temps, il a fallu définir la plage de valeurs sur laquelle s'étalent nos données. Les vitesses mesurées par les anémomètres varient entre 0 et 90 km/h, mais n'ont pas la même répartition en terme d'occurrence dans le temps : les vitesses les plus hautes, qui sont celles qui nous intéressent, sont beaucoup plus rares que les basses (Figure A.4 en annexe). Peu de vents dépassent la vitesse critique fixée à 70 km/h ce qui rend le travail de corrélation plus difficile et moins pertinent. Nous avons donc décidé de baisser ce seuil critique à 50 km/h -voire à 30 km/h selon les modèles- afin de minimiser les approximations en augmentant le nombre d'événements à analyser. Cet abaissement de vitesse critique introduit cependant une source d'erreur dont il adviendra de discuter en seconde partie de rapport.

Il nous a ensuite paru intéressant de chercher des motifs temporels, pour cibler les périodes de l'année ou de la journée

les plus exposées au vent : nous avons donc tracé un graphe qui évolue horizontalement en jours et verticalement en heures, en représentant les vitesses aux différents instants par des points colorés selon une échelle graduée (Figure 6). Les données utilisées ici sont les données de vitesse de vent, mesurée sur le capteur 4 de la centrale sur l'ensemble de la période dont nous disposons, et qui ont été interpolées. En effet le capteur n'enregistre pas nécessairement toutes les valeurs pour diverses raisons (maintenance de la centrale notamment) et il y a donc des valeurs manquantes dans les données, que l'interpolation vient combler. Un jour est représenté par une fine colonne dont les heures évoluent de haut en bas. On voit une bande horizontale plus claire centrée autour de "midi heure locale", cela montre donc qu'il y a habituellement plus de vent le jour que la nuit, sans pour autant que celui-ci ne soit un danger pour les panneaux dans la majorité des cas.



**FIGURE 6.** Vitesse du vent (m/s) codée par la couleur en fonction du jour (abscisse) et de l'heure (ordonnée)

Après avoir traité ces données de manière globale, nous sommes ensuite passés à l'analyse plus précise de celles-ci, selon les deux méthodes présentées précédemment : nous verrons donc dans une première partie l'approche à l'échelle de la journée consistant à corrélérer les prévisions météo avec les mesures anémométriques réelles, et dans une seconde celle à l'échelle horaire cherchant à prévoir la vitesse du vent de l'heure suivante à partir des mesures réalisées à l'heure courante.

## 2.2 Approche à échelle de l'heure : prédiction des rafales à l'aide des données locales

Une première approche consiste à prédire les rafales d'heure en heure. Ce type de prévisions serait utile sur un système qui détecte les rafales à court terme et met automatiquement la station en position de sécurité à partir des données anémométriques mesurées sur la centrale. Le temps est ici discrétisé en heures et le but de ces modèles est de prévoir à partir des données issues de l'heure  $n$  qui vient de s'écouler la présence de vents dépassant le seuil  $V_{lim}$  à l'heure  $n + 1$ .

Cette approche se base essentiellement sur un apprentissage à partir des données passées, auxquelles on applique différents modèles que l'on compare.

### 2.2.1 Bases des modèles statistiques

Les différents modèles statistiques développés dans cette partie se basent sur une hypothèse de persistance des valeurs caractérisant la série telles que la moyenne ou la variance de la vitesse du vent. Cette hypothèse est motivée par le fait que les phénomènes climatiques ont une dynamique plutôt lente, avec une échelle de temps caractéristique supérieure à l'heure, ce qui lui donne un fondement physique.

### 2.2.2 Les Modèles

Les modèles statistiques sont tous inspirés de la régression quantile, voire sont des régressions quantiles pour la majorité d'entre eux.

**Modèle général : régression quantile sur la moyenne** Le modèle initial consiste en une régression quantile [13] sur la moyenne. Comme les modèles qui vont suivre en sont des améliorations, nous allons en détailler le fonctionnement. La régression quantile consiste à chercher une régression linéaire entre la moyenne de vent sur une heure  $n$ , notée  $\bar{V}^n$  et la vitesse du quantile  $q$  (paramètre d'entrée fixé par l'utilisateur),  $V_q$ . Cette régression nous permet donc de trouver  $\alpha$  et  $\beta$  pour faire l'approximation :  $V_q^n = \alpha \bar{V}^n + \beta$ . La recherche d'une régression linéaire est motivée par la forme rectiligne et allongée du nuage de points représentant la vitesse  $V_q$  en fonction de  $\bar{V}$  (la même raison motive la recherche d'une interpolation linéaire dans les autres modèles de cette partie). En utilisant ensuite l'hypothèse de persistance de la moyenne :  $\bar{V}^{n+1} \approx \bar{V}^n$ , on aboutit à la relation de prédiction  $\hat{V}_q^{n+1} = \alpha \bar{V}^n + \beta$ . Ainsi à la fin de l'heure  $n$  on est à même de calculer la valeur de  $\bar{V}^n$  à partir des données que l'on vient de mesurer, et donc d'émettre une prédiction de la valeur de  $\hat{V}_q$ . on vient ensuite comparer cette valeur avec  $V_{lim}$  pour dire si on prévoit des vents qui dépassent le seuil d'alerte à l'heure  $n + 1$ .

Pour évaluer les performances de ce modèle, il faut bien séparer les données d'apprentissage (celles pour créer la régression) des données de test (celles utilisées pour tester la performance). Le fait que le temps soit discrétisé en heure nous inviterait à les mélanger, cependant ici ceci impliquerait que les heures test se retrouveraient piégées entre des heures d'apprentissage. On comprend bien que les données test et apprentissage ne sont alors pas indépendantes, ce qui introduit un très grand biais dans le test. Un moyen de limiter les influences entre les données apprentissage et test est de forcer le mélange pour que les heures test et apprentissage soient regroupées. Ainsi les jeux test et apprentissage ont été créés en prenant au hasard 80% des semaines pour l'apprentissage, le reste étant réservé au test. Ce n'est qu'ensuite que chaque semaine a été découpée pour créer les échantillons. Les données sont ainsi regroupées en blocs de 7 jours, ce qui limite les relations entre les deux jeux de données.

**Les améliorations** Nous avons ensuite tenté d'affiner ce modèle en agissant sur divers paramètres. Donner uniquement la moyenne en donnée d'entrée à notre modèle est très restrictif : en effet cette valeur ne représente que très mal la série statistique des données de vent à l'heure  $n$ . Un vent constant et un vent sinusoïdal seront représentés par la même valeur. Ainsi on peut donc donner en valeurs d'entrée  $\bar{V}^n$  et  $\mathbb{V}(V)$  pour un modèle prédictif en  $\hat{V}_q^{n+1} = \alpha \bar{V}^n + \beta \mathbb{V}(V)^n + \gamma$ . Voire même on peut affiner d'avantage en donnant aussi la vitesse d'un certain quantile à l'heure  $n$ , pour une relation en  $\hat{V}_q^{n+1} = \alpha \bar{V}^n + \beta \mathbb{V}(V) + \gamma V_q^n + \delta$ . Ces variations amènent un très léger gain qui se traduit par un léger décalage vers le haut-droite des nuages de points de la figure 7.

Nous avons comparé directement à  $V_{lim}$  mais on pourrait aussi choisir d'altérer  $V_{lim}$  pour rendre compte du fait que  $V_q$  est la vitesse d'un quantile et non pas la vitesse maximale. Cette altération peut se traduire par un coefficient lorsque l'on compare  $V_q$  à  $V_{lim}$  pour savoir si  $V_{max} > V_{lim}$ . On peut ainsi regarder par exemple ( $V_q > 0.85V_{lim}$ ). Ceci à pour effet d'augmenter la "sensibilité" du modèle, on a donc avec cette technique à la fois une augmentation du recall et une baisse en précision.

La régression quantile nous donnant une pente et un offset, l'idée nous est venue de tester toutes les pentes et les offsets des mêmes ordres de grandeur que ceux de la régression. Ceci correspond à un modèle généralisé. Il convient à chaque fois de vérifier la stabilité des points de fonctionnement en prenant différents jeux de données. C'est à dire en séparant au préalable la base de données en une partie "Apprentissage" et une partie "Test", puis en regardant l'écart de performance entre ces deux jeux de données.

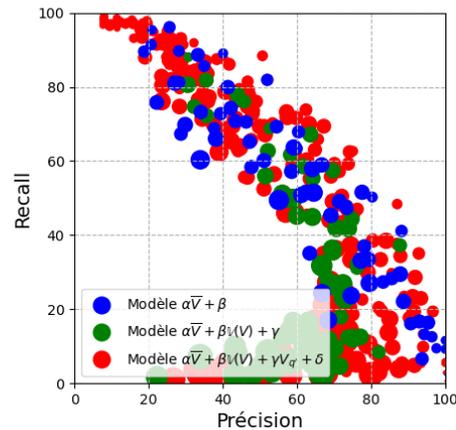
### 2.2.3 Résultats

On peut ainsi tirer un ordre de grandeurs des performances maximales de ce type de méthode. Elles dépassent les 90% en recall pour une précision de 30% et ont une précision d'environ 90% pour un recall à 35% (Figure 7). La taille des points représente de façon qualitative la sensibilité aux données d'apprentissage. Pour chaque point l'apprentissage/test a été effectué 5 fois avec une partition différente des données et les mêmes réglages, l'aire des disques traduit l'écart type de cet ensemble de résultats et la position la moyenne des résultats.

## 2.3 Approche à échelle de la journée : prédiction des rafales à l'aide des données météo

### 2.3.1 Les prévisions météo

Le modèle précédent apporte des résultats satisfaisants sur le court terme mais rencontre des limites quant à la prévision à moyen terme. Pour étendre le modèle, et proposer une autre stratégie à Optimum Tracker, une deuxième approche a été de se baser sur des données météo établies par un organisme de prévision national, dont les prévisions s'étalent sur les 48 prochaines heures. Nous avons donc collecté les prévisions météo de la zone effectuées par Météo France, qui fournit des données fiables [14] dont les caractéristiques sont recensées dans le Tableau 1.



**FIGURE 7.** Comparaison des trois modèles de régression développés dans la partie 2.2.3

**TABLE 1.** Caractéristiques des données météo

Taille	1 Go
Plage temporelle	Janvier à septembre 2019
Type de prévision	Prévision à 48h
Pas de temps	1h
Taille du maillage	6 km

Les données météo s'étalant sur une plage temporelle plus restreinte que les données anémométriques, nous n'avons considéré que les données anémométriques comprises entre janvier et septembre 2019.

Il s'agit de trouver une loi de corrélation entre les prévisions météo et les mesures réelles qui puisse être réappliquée pour prédire la présence de rafales dans un intervalle d'une heure au jour même, à un jour ou à deux jours en fonction du vent annoncé. Dans la suite de l'approche, on considérera uniquement les prévisions au jour J pour simplifier les explications, mais on peut réappliquer la méthode en utilisant les prévisions à J-1 ou J-2 (dont on présentera aussi les résultats en fin de partie). Tout dépend de l'utilisation que l'on veut en faire : veut-on prévoir la présence de rafales dans la journée, ou sur les deux prochains jours ?

### 2.3.2 Étude du modèle affine basique

Une première approche a été de rechercher une corrélation simple entre les données météo et anémométriques sur chaque heure. Pour chaque heure, nous avons comparé la moyenne des vitesses anémométriques mesurées à la prévision météo annoncée au jour J. Nous avons donc tracé le nuage de points correspondant pour chaque prévision, et nous l'avons interpolé de façon affine (Figure A.4 en annexe). Le coefficient de corrélation observé étant faible (0.56 pour le jour J, 0.54 et 0.46 pour respectivement les prévisions à J-1 et J-2) nous en avons conclu que le modèle n'était pas satisfaisant. Il a donc

fallu proposer une amélioration.

### 2.3.3 Étude du modèle statistique basé sur la régression quantile

L'amélioration du modèle passe par une approche basée sur la régression quantile : on cherche à corrélérer la prévision météo non plus avec la moyenne mesurée mais avec un quantile donné de la vitesse mesurée sur une heure.

Tout d'abord, on sépare données de test et d'apprentissage : les données de janvier à mars compris constituent le test, et celles d'avril à septembre l'apprentissage. Pour chaque heure des données d'apprentissage, on calcule donc un quantile fixé  $q$  des vitesses, et on compare ce quantile à la prévision de l'heure donnée. On obtient un nouveau nuage de points qu'on interpole de nouveau de façon affine, et on relève le coefficient directeur de la droite, noté  $a$  ainsi que son ordonnée à l'origine notée  $b$ .

Il va s'agir maintenant de tester ce modèle affine sur les données test : on fixera ici le seuil de danger à 30 km/h afin d'avoir suffisamment d'événements à analyser (on ne recense des rafales à plus de 50 km/h que 53 fois sur la plage de données considérée, et aucune rafale dépassant 70 km/h). On récupère la vitesse prévue par l'organisme de météo à l'heure  $H$ , on la multiplie par  $a$  et on lui ajoute  $b$  pour retrouver la droite précédente, et on teste si cette nouvelle valeur est supérieure à 30 km/h, ie. si ce modèle prévoit une rafale à l'heure  $H$ . Afin de définir la présence réelle ou non de rafale à l'heure  $H$ , on s'intéresse au maximum effectivement mesuré par les anémomètres pendant cette heure : si ce maximum dépasse 30 km/h, c'est qu'il y avait réellement une rafale, sinon non. Ainsi, en comparant les deux valeurs booléennes, on peut définir s'il s'agissait d'une vraie alerte, d'une fausse alerte, ou d'une alerte manquée, ce qui nous permet de tracer le graphe de performances, testé pour différents quartiles  $q$  (Figure A.4 en annexe). Les points trouvés se placent dans le coin supérieur droit, ce qui est plutôt satisfaisant, mais le graphe gagnerait à être amélioré. On voit que les points s'alignent, ce qui laisse imaginer qu'on puisse tracer une courbe. On décide alors de jouer sur les coefficients  $a$  et  $b$ .

### 2.3.4 Amélioration des résultats par choix arbitraires de $a$ et $b$

Une fois les ordres de grandeur des différents coefficients trouvés grâce à la méthode précédente, nous nous sommes intéressés à la possible amélioration de ceux-ci en modifiant légèrement leurs valeurs de façon arbitraire. Il en résulte un graphe assez similaire au précédent (Figure A.4 en annexe), mais plus étendu, de façon à ce que le client ait davantage de choix selon s'il préfère privilégier le Recall ou la Précision.

Quant à la comparaison des prévisions à J, J-1 et J-2 (Figure 8), on observe de meilleurs résultats sur la prévision au jour J qu'à J-2; la prévision avec ce modèle pour le sur-lendemain permet d'avoir un oeil général sur la météo, mais la meilleure solution reste donc de réactualiser le programme tous les matins avec les prévisions météo du jour.

Les résultats obtenus sont cependant à nuancer, dû au fait

que le seuil ici considéré était de 30 km/h et non 70 km/h, et que l'on manquait de données prévisionnelles pour tester les modèles sur davantage de valeurs.

Il conviendra de plus de noter que pour les mêmes raisons, nous n'avons pas représenté sur la figure 8 les points en fonction de leur sensibilité aux données d'apprentissage comme dans la partie précédente, puisque cela n'aurait pas été représentatif au vu de la taille réduite des plages de valeurs.

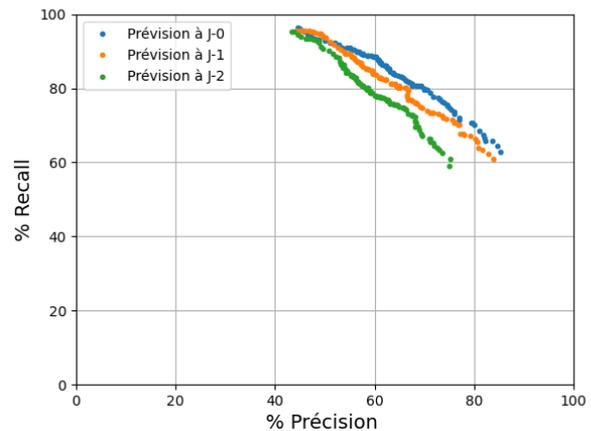


FIGURE 8. Graphe de performance des modèles journaliers pour les prévisions à J, J-1 et J-2

## 2.4 Amélioration des deux modèles à l'aide d'un réseau de neurones

La présence ou non de rafales à un instant donné obéit à des lois physiques prenant un nombre de paramètres beaucoup trop important pour pouvoir être résolues avec une faible incertitude. Les méthodes statistiques expliquées ci-dessus s'affranchissent de ces lois en observant simplement des tendances générales pour en déduire le maximum de la vitesse du vent. Une méthode de machine-learning, le réseau de neurones, va à l'opposé en se confrontant à un grand nombre de paramètres pour trouver des lois entre ceux-ci. Ces lois nous restent inconnues, car elles s'expriment par un jeu de coefficients entre les neurones des différentes couches du réseau, comme pour pondérer l'importance d'un paramètre d'une couche de neurones à une autre (Figure 9). L'optimisation de cette structure de neurones se communiquant par coefficients est encore en voie de développement par le monde scientifique [15].

Pour apporter une comparaison au modèle statistique de prévision, le réseau de neurones s'entraîne à partir de données d'apprentissages, qui dépendent du modèle utilisé (Tableau 2). Au terme de l'entraînement, ceux-ci se sont adaptés pour trouver une corrélation entre les données d'apprentissage et la présence ou non de rafales à l'instant considéré. On a ensuite testé cette configuration sur la période de test et confronté les résultats aux autres méthodes de prédiction.

Il faut optimiser notre réseau en trouvant le bon nombre de

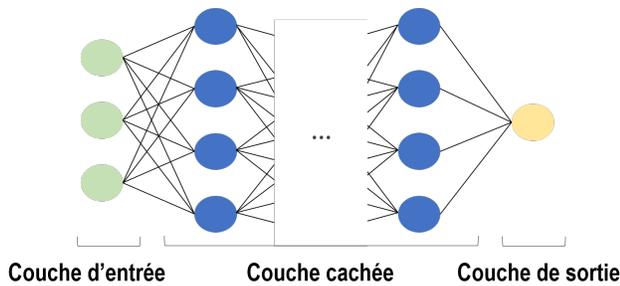


FIGURE 9. Schéma simplifié d'un réseau de neurones

couches et de neurones par couche qui constituent notre réseau. En effet, l'augmentation de ces deux paramètres allongent grandement le temps de calcul, mais peuvent améliorer tous les deux fortement le recall. Attention, car un réseau avec trop de couches n'extrapole pas bien les données et perd en précision et recall.

TABLE 2. Paramètres en entrée des deux réseaux de neurones

Type de modèle	Horaire	Journalier
Données utilisées	Mesures in situ	Prévisions météo
Type de prévision	Prévision à 1h	Prévision à 48h
Pas de temps des données d'apprentissage	30s	1h
Période d'apprentissage	Janvier 2019- Juillet 2020	Janvier 2019- Août 2019
Période de test	Août 2020 - Nov. 2020	Sept. 2019

#### 2.4.1 Amélioration du modèle horaire

Nous avons retenu la valeur de 16 couches à 500 neurones chacune, qui offre un bon compromis entre la précision, le recall, et le temps de calcul (Figure A.4 en annexe). Nous avons pour ce jeu de données d'entraînement une précision de 0,48 et un recall de 0,99 ! Nous ne pouvons néanmoins pas affirmer que 99% des rafales seront détectées dans le cas général, car le modèle n'est testé que sur 4 mois, soit 39 rafales. En réutilisant le même modèle sur d'autres anémomètres sur la même centrale (dont les mesures de vitesse du vent sont proches mais pas exactement identiques), on observe une variabilité des résultats (Figure A.4 en annexe). On tombe à 0,88 de recall pour le 2ème anémomètre, soit 1 rafale sur 10 non détectée. Ce réseau de neurones reste cependant performant.

#### 2.4.2 Amélioration du modèle journalier

Le réseau est de nouveau optimal avec 16 couches de 500 neurones, on obtient, pour ces valeurs, des précisions et recall satisfaisants mais inférieurs aux précédents (Tableau 3). Les performances de ce modèle sont même en dessous de celles définies en partie 2.3. Cette "amélioration" n'est donc pas

forcément à retenir, ou du moins reste à améliorer.

TABLE 3. Comparaison des deux modèles à partir de la précision et du recall (moyenne sur les 4 anémomètres)

Résultat	Précision	Recall
Prévisions faites à J-2	0.47	0.86
Prévisions faites à J-1	0.52	0.84
Prévisions faites le jour J	0.45	0.82
Mesures in situ	0.51	0.95

## Conclusions

Avec les différentes méthodes proposées dans ce chapitre, à échelles horaire et journalière, on obtient des résultats qui répondent à différents besoins, illustrés en Figure 10. Si Optimum Tracker décide de privilégier le Recall, la société peut préférer le modèle horaire amélioré par le machine-learning, au Recall très élevé mais qui peine en précision. Cependant, celui-ci les force à être très réactifs pour mettre leurs panneaux en sécurité. L'entreprise pourra par exemple adopter le modèle journalier fait le jour J et le modèle horaire simultanément, pour prévoir la majorité des rafales de la journée à partir des prévisions faites à minuit ou la veille, et en déceler d'autres in extremis, une heure avant. Cette configuration n'est qu'une possibilité parmi d'autres que l'entreprise pourra adopter en fonction de la puissance de ses calculateurs et de ses besoins précis.

De plus, cette étude est plus l'introduction d'un concept que le développement complet d'une solution industrielle. Celle-ci mériterait d'être améliorée en se penchant davantage sur les différentes approches.

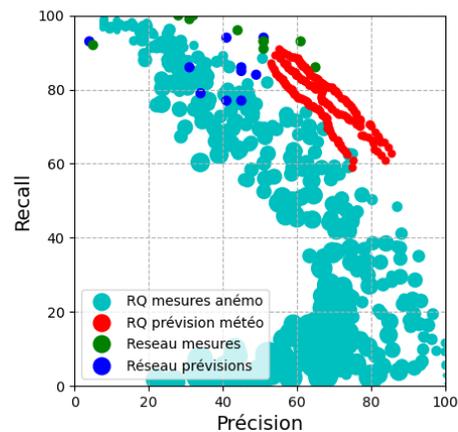


FIGURE 10. Comparaison des différentes approches

### 3. Simulation numérique des écoulements complexes autour des trackers solaires

#### Participants

Tom BERTHEAS, Yassir FAKRI, Jérémy TRAMEÇON

#### Abstract

Pour étudier la tenue des trackers lors de conditions de vent extrêmes, nous devons connaître les efforts qu'ils subissent. Des études expérimentales en soufflerie étant trop coûteuses pour analyser différentes configurations, il nous faut passer par une simulation numérique. Nous utilisons donc la CFD (pour Computational Fluid Dynamics) pour étudier l'écoulement d'air autour d'un tracker pour différentes inclinaisons, avec et sans mur, en vue de conseiller Optimum Tracker (OT) sur la stratégie à adopter pour protéger leurs centrales solaires. Nos résultats serviront également aux autres parties du projet s'intéressant à l'analyse dynamique des trackers et aux solutions d'amortissement des oscillations, au comportement des longerons, à l'analyse mécanique des solutions d'entraînement, etc...

#### Introduction

L'étude d'un écoulement fluide doit pouvoir bénéficier de données expérimentales en soufflerie réelle, et de simulations numériques de mécanique des fluides (CFD), à la manière de l'étude menée par [16] (les premières servant, entre autres, à valider les secondes). Cependant, mener des expériences en soufflerie a un coût élevé et demande des moyens importants, temporels aussi bien que matériels. Or nous ne disposons que de 2 semaines de travail. Aussi, la validation du modèle numérique par des expériences en soufflerie ayant déjà été réalisée par OT avec les équipes du CEMEF, notre travail se limite à une étude purement numérique. L'objectif de cette section est d'analyser l'influence de l'angle d'inclinaison d'un tracker et de l'ajout d'un mur en amont sur les contraintes (traînée, couple, etc. . .) que le tracker subit, afin de conseiller OT sur la stratégie à adopter pour protéger au mieux ses centrales photovoltaïques face à des vents violents.

Le développement de la technologie et l'explosion des performances des ordinateurs durant les dernières décennies a permis à la CFD d'occuper une place importante dans l'étude et la compréhension des écoulements fluides.

Il y a pourtant eu relativement peu de simulations et expérimentations réalisées sur des parties complètes de centrales solaires car cela demande beaucoup de temps de calcul. En considérant la grande extension spatiale du tracker, donc l'influence restreinte des effets de bord sur des modèles fixes, il est possible, pour alléger le coût en calcul, de se restreindre à des simulations sur des modèles périodiques ou à des simulations 2D comme le font [17]. Même là, à l'aide d'outils de base (ordinateur classique, 2 cœurs à 2,2 GHz), les simulations peuvent durer jusqu'à une douzaine d'heures. La plupart

des études menées, telles celle de [17] ou celle de l'équipe de [18] se font à petite échelle : respectivement un seul tracker monoaxial à seulement 4 inclinaisons différentes, et un seul tracker parabolique à une quinzaine d'orientations différentes mais exposé à des vents ne dépassant pas 22 m/s (alors que nous considérons, dans notre cas, des trackers exposés à des bourrasques de plus de 40 m/s, ce qui contribue à complexifier l'écoulement).

Comme nous le développerons par la suite, l'écoulement que nous voulons étudier possède un nombre de Reynolds  $R_e$  très élevé, et est donc très turbulent, ce qui nous contraint à utiliser un maillage très fin pour capturer avec assez de précision toute sa complexité. Une puissance de calcul importante à notre disposition (cluster de calcul du CEMEF) et l'utilisation de méthodes de maillage adaptatifs nous offrent la possibilité de réaliser des simulations assez conséquentes (en terme de taille, de complexité de l'écoulement...) tout conservant des temps de calcul raisonnables.

Ainsi, dans l'optique de déterminer avec précision, entre autres, la dépendance angulaire des contraintes subies par les trackers solaires, nous avons réalisé 13 simulations sur un seul tracker, à 13 inclinaisons différentes. Le système de soufflerie numérique adaptative et évolutive que nous avons mis en place nous permet de réaliser ces 13 simulations efficacement. Nous pouvons également en réaliser quelques autres très simplement en rajoutant un modèle 3D de mur au sein du domaine des simulations, qui est le même pour toutes, pour étudier l'impact d'une telle structure et de sa position sur la tenue des trackers. De plus, toutes ces simulations sont réalisées en 3D. En effet, un autre objectif de notre étude est de mettre en perspective des simulations de l'écoulement sur un tracker avec une simulation de plus grande envergure à l'échelle de la centrale photovoltaïque complète, stratégie qui s'inscrit dans une volonté d'initier un modèle réutilisable par OT pour appréhender au mieux la mise en service de leurs centrales solaires.

#### 3.1 Mise en place du problème

##### 3.1.1 Physique de l'écoulement, résolution

Il faut tout d'abord appréhender l'écoulement complexe de l'air par des concepts physiques de dynamique des fluides. Le mouvement est régi par les équations de Navier-Stokes :

$$\begin{cases} \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot (2\mu \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})) - \nabla P + \rho \mathbf{g} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

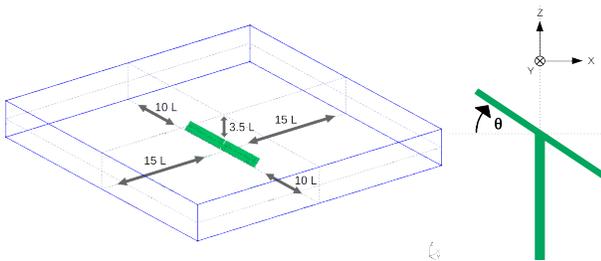
où  $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$  désigne le taux de déformation du champ de vitesse,  $\rho$  la masse volumique du fluide,  $\mathbf{u}$  sa vitesse,  $\mu$  sa viscosité dynamique,  $P$  sa pression et  $\mathbf{g}$  l'accélération gravitationnelle.

Leur résolution analytique dans notre cas est impossible étant donné la complexité de l'écoulement, il faut donc procéder à une résolution numérique par la méthode des éléments finis, qui passe par la discrétisation du milieu fluide lors d'une étape de maillage. La solution est approchée numériquement

au niveau des nœuds du maillage puis est interpolée dans le reste du domaine. Afin de choisir la modélisation la plus adaptée parmi celles présentées en introduction, il faut calculer le nombre de Reynolds de notre système, qui permet de quantifier le caractère turbulent et donc complexe à simuler de notre écoulement.

Ici, avec  $V_{ref} = 44 \text{ m.s}^{-1}$  la vitesse caractéristique de l'écoulement,  $L = 4 \text{ m}$  la longueur de la corde du panneau et  $\nu = 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  la viscosité cinématique de l'air on obtient  $Re = \frac{V_{ref}L}{\nu} \simeq 2 \times 10^7$ . L'écoulement est fortement turbulent (car  $Re > 2000$ ) donc nécessite un pas de temps très petit et une grande finesse du maillage. La restitution fidèle de la complexité de l'écoulement requiert théoriquement un nombre d'éléments de l'ordre de  $(Re)^{9/4} \simeq 10^{16}$ , ce qui est simplement impensable. La première solution apportée à ce problème était de générer un maillage adaptatif, de taille variable dans le domaine. Ainsi, au niveau des parois, là où l'écoulement varie peu, le maillage est grossier, et celui-ci est fortement raffiné à mesure que l'on se rapproche du panneau. Cependant, le caractère chaotique de l'écoulement rend celui-ci extrêmement sensible aux évolutions locales du fluide, nous obligeant donc à produire un maillage suffisamment précis pour simuler les divers tourbillons qui se forment pour espérer avoir un résultat global fiable. Un tel maillage est inenvisageable dans le cadre de notre MIG dû aux temps de calcul astronomiques qu'il engendrerait. Nous sommes donc passé par une méthode de résolution multi-échelle [19] qui permet d'apporter au niveau des nœuds des corrections qui rendent compte de l'influence des turbulences à des échelles plus fines. Ainsi, les champs de pression et de vitesse sont séparés en deux termes, un terme représentant le résultat des équations de Navier-Stokes au niveau des nœuds et un terme supplémentaire correctif. Sous certaines conditions sur la dépendance temporelle et la non-linéarité des systèmes d'équations obtenus avec ces deux nouvelles composantes, il est possible de se ramener à un système linéaire suite à la résolution duquel on peut connaître les termes correctifs. Cette méthode nous permet donc d'éviter de longs calculs de simulation fastidieux tout en améliorant la vraisemblance des calculs numériques.

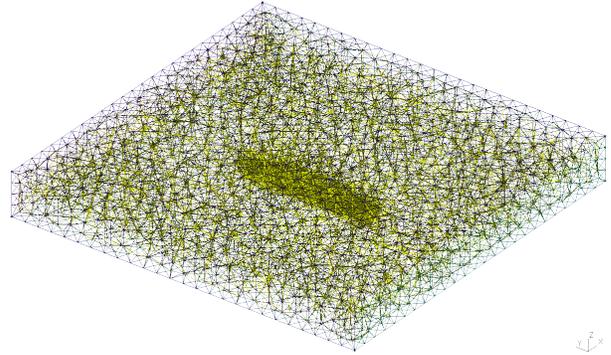
### 3.1.2 Dimensionnement du domaine, maillage



**FIGURE 11.** Dimensions caractéristiques du domaine de simulation, définition de l'angle d'inclinaison ( $L$ 'écoulement se fait selon  $+\vec{u}_x$ ,  $\theta$  est positif sur la figure)

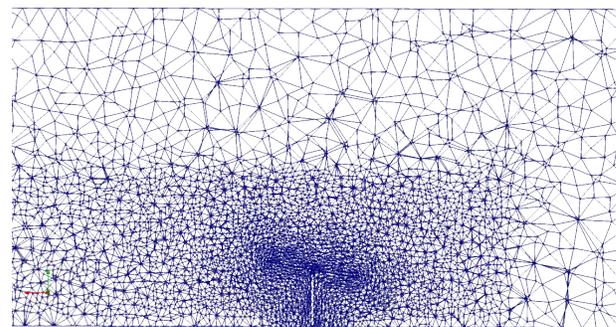
Une fois cette décision prise, nous avons pu commencer la création du maillage. Les premières simulations que nous

avons réalisées s'intéressaient à l'étude de différentes inclinaisons d'un tracker seul. Il a tout d'abord fallu délimiter le domaine de simulation (figure 11), qui, pour prendre en compte les effets de bord et laisser la place à un mur en amont du tracker, mesure environ  $30L \times 30L \times 4L$  (dimensionnement caractéristique utilisé par [17];  $L$  ayant été défini en 3.1.1)



**FIGURE 12.** Maillage V1 grossier

La considération première régissant notre dimensionnement du maillage était la puissance de calcul mise à notre disposition, qui nous imposait donc un ordre de grandeur du nombre maximal d'éléments composant notre domaine. Nous avons appris à utiliser le logiciel *GMSH* grâce auquel nous avons généré deux premières versions V1 du maillage volumique du fluide dans cette boîte (figure 12), en faisant varier la taille de maille limite au niveau des frontières du domaine. En réduisant d'un facteur 5 la taille caractéristique du maillage, le nombre d'éléments est multiplié par plus de 10. Un tel maillage est déjà considérablement long à simuler tout en présentant une finesse au niveau des panneaux encore trop insuffisante.



**FIGURE 13.** Vue en coupe du maillage V2 optimisé

Pour la version finale V2 du maillage utilisée pour les simulations (figure 13), produite à l'aide du mailleur développé par le CEMEF, nous avons donc dû prendre pour matrice le plus grossier des deux à partir duquel nous avons effectué un raffinement dans une zone restreinte autour du tracker, de dimensions  $10L \times 15L \times 2L$ . Le mailleur du CEMEF fonctionne de manière itérative, en produisant à chaque itération un maillage plus fin que le précédent. Nous avons ainsi généré

une trentaine de maillages consécutifs, et nous avons choisi pour nos simulations un maillage intermédiaire, afin de pouvoir les réaliser les plus précises possibles dans le temps dont nous disposons. Cette méthode nous a permis de répartir nos ressources de manière optimisée (voir la tab. 4 pour les caractéristiques numériques des différents maillages).

**TABLE 4.** Caractéristiques des maillages

Version	taille de maille	# d'éléments
V1 grossier	$\simeq 5 \text{ m}$	$1,2 \times 10^5$
V1 raffiné	$\simeq 1 \text{ m}$	$1,5 \times 10^6$
V2 utilisé	$\simeq 5 \text{ m}$	$1,9 \times 10^6$

Nous avons alors lancé sur le cluster de calcul les 13 simulations du tracker seul à des inclinaisons différentes, chaque simulation tournant sur 96 cœurs (le cluster de calcul du CEMEF compte 2000 cœurs). Le temps de calcul a été de 12 heures par simulation.

Nous avons ainsi priorisé les simulations sur un seul tracker dans notre temps de travail. La simulation sur 206 trackers d'une centrale a été réalisée à titre indicatif, en utilisant comme maillage la première itération produite par le mailleur, qui comporte déjà plusieurs dizaines de millions d'éléments et a mis plus d'une journée à être généré. Gardons à l'esprit que les autres itérations de maillages ont également été générées mais que nous n'avons pas pu les exploiter au cours des 3 semaines du MIG. Elles sont toutefois prêtes à être utilisées pour réaliser des simulations bien plus précises que celle à laquelle nous nous sommes limités.

### 3.1.3 Conditions aux limites

Pour initialiser la simulation, nous avons besoin de définir des conditions aux limites afin de contrôler le comportement du fluide au niveau de différentes interfaces fluide-solide et aux limites du domaine. En plus des surfaces d'entrée et de sortie du fluide (plans normaux à l'axe ( $Ox$ )), on peut alors définir deux types de surfaces à l'intérieur du domaine :

- Les *free-slip walls*, qui modélisent l'absence de surface physique tangente à l'écoulement. C'est le cas des faces latérales et du plafond du domaine. Sur ces surfaces, on impose une vitesse normale nulle à tout instant, et aucune condition sur la vitesse tangentielle.
- Les *No-slip walls*, qui modélisent la présence de surface physique, au niveau de laquelle la théorie de la mécanique des fluides prévoit une vitesse nulle pour un fluide de viscosité non nulle (ce qui est le cas de l'air que l'on modélise). Les surfaces dans ce cas là sont le sol du domaine et le tracker en lui-même. Sur ces surfaces-là, on impose une vitesse (normale et tangentielle) du fluide nulle à tout instant.

Nous avons ensuite défini et implémenté le profil de vitesse à imposer au niveau de la face d'entrée du fluide. Nous avons utilisé le modèle logarithmique suivant, proposé par

[17] :

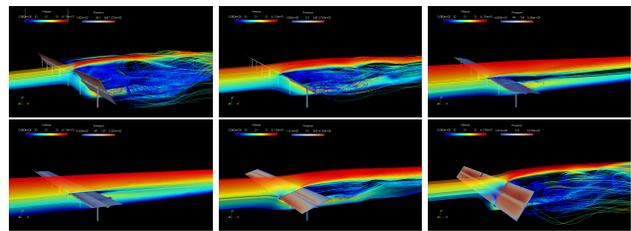
$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( 1 + \frac{z}{z_0} \right) \quad (2)$$

avec  $\kappa = 0.41$  la constante de Von Kármán,  $z_0 = 0.03 \text{ m}$  la rugosité aérodynamique propre au sol qui entoure généralement les trackers (proportionnelle à la taille typique des irrégularités de la surface réelle considérée),  $z$  la hauteur par rapport au bas du domaine et  $u^* = 2.91 \text{ m/s}$  une valeur de vitesse normalisée pour avoir  $u(z_{max}) = V_{ref}$  en haut du domaine.

## 3.2 Résultats

Rappelons que l'un des objectifs de cette section 3 est de déterminer la position optimale des panneaux, celle qui assure la plus grande sécurité; chose qui nécessite de déterminer les efforts exercés sur le tracker, ainsi que son moment par rapport à son axe de rotation. Nous avons ainsi appris à utiliser le logiciel *paraview* qui nous a permis de réaliser le post-traitement qui suit.

### 3.2.1 Influence de l'inclinaison du tracker



**FIGURE 14.** Aperçu de l'écoulement pour différentes inclinaisons du tracker

En figure 14, un aperçu de l'écoulement pour une partie des simulations réalisées. Pour alléger la lecture, nous n'en affichons que 6 ( $+55^\circ$ ,  $+30^\circ$ ,  $+10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-20^\circ$ , et  $-55^\circ$ ) qui donnent déjà une idée assez précise de l'influence de l'inclinaison sur les efforts subis par le tracker.

Ces figures montrent qu'au fur et à mesure que le panneau s'incline, l'écoulement devient plus chaotique derrière. À  $0^\circ$ , l'asymétrie verticale de l'écoulement due à la présence du longeron en dessous induit un couple non nul. Le champ de pression en revanche relativement symétrique sur le tracker de part et d'autre de l'axe du longeron à  $-55^\circ$  explique un couple très faible à cette inclinaison, cependant la pression élevée induit une très grande force de traînée.

### 3.2.2 Coefficients aérodynamiques

L'algorithme du CEMEF nous fournit également les forces de traînée et de portance moyennes que subit le tracker au cours d'une simulation (figure 15).

A partir des champs de pression fournis par le logiciel de calcul, nous avons estimé le moment du tracker par rapport à son axe de rotation (dans nos calculs, l'axe ( $Oy$ )) en fonction de son inclinaison (figure 16). On peut alors en tirer des informations intéressantes : la position horizontale à  $0^\circ$  n'est effectivement pas stable (couple positif, qui tend à faire

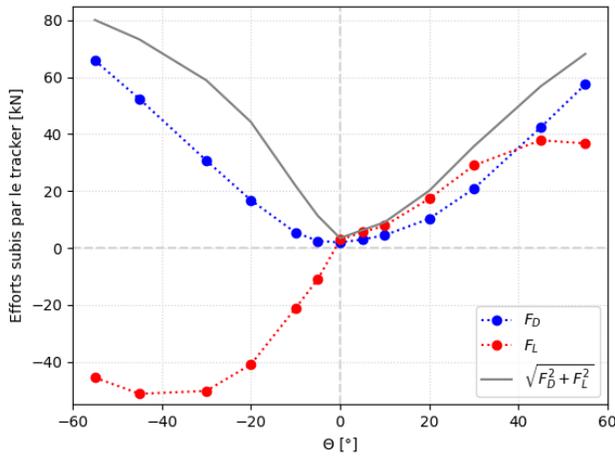


FIGURE 15. Efforts subis par le tracker seul

augmenter  $\theta$ ), la position à  $+55^\circ$  est dangereuse (maximum du couple et de la force de traînée), alors que la position à  $-55^\circ$  semble être avantageuse (certes le panneau y subit une force de traînée importante, mais un couple quasi nul).

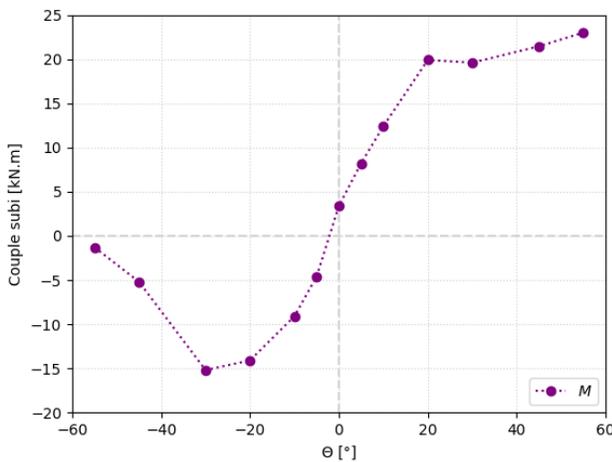


FIGURE 16. Couple subi par le tracker en fonction de son inclinaison, par rapport à son axe de rotation

A partir des efforts calculés, nous pouvons estimer les valeurs des coefficients aérodynamiques  $C_D$  et  $C_L$  via les relations suivantes :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2 S}, \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2 S}, \quad (3)$$

où  $F_D$  est la force de traînée (drag),  $F_L$  est la force de portance (lift),  $\rho$  la masse volumique de l'air que nous avons prise égale à  $1 \text{ kg/m}^3$ ,  $V_{ref} = 44,4 \text{ m/s}$  la vitesse limite du vent,  $S$  la surface de référence qui peut être typiquement toute la surface du tracker, ou la surface apparente (i.e. projetée dans un plan normal à l'écoulement). Ce choix de surface dépend des conventions choisies pour l'étude.

Les figures 17 et 18 montrent les graphes de  $C_D(\theta)$  et  $C_L(\theta)$ . En bleu (figure 17) et en rouge (figure 18) apparaissent

nos résultats (calculés avec  $S = S_{tot}$  et  $S = S_{app}$ ). En vert (figure 17) et en jaune (figure 18) ont été tracés les coefficients obtenus dans la littérature. Les valeurs de [18], par exemple, ont une allure plus proche des nôtres calculées pour  $S = S_{tot}$ . Si l'on se réfère à celles-ci, on retrouve les conclusions apportées également par la figure 15 à savoir : le tracker subit des efforts minimaux en norme autour de la position de couple minimal, une force de traînée importante aux fortes inclinaisons, et une force de portance du même signe que l'angle d'inclinaison (le tracker agit à la manière d'une aile d'avion, en fait, il est donc globalement tiré vers le haut pour  $\theta > 0$  et poussé vers le sol pour  $\theta < 0$ ).

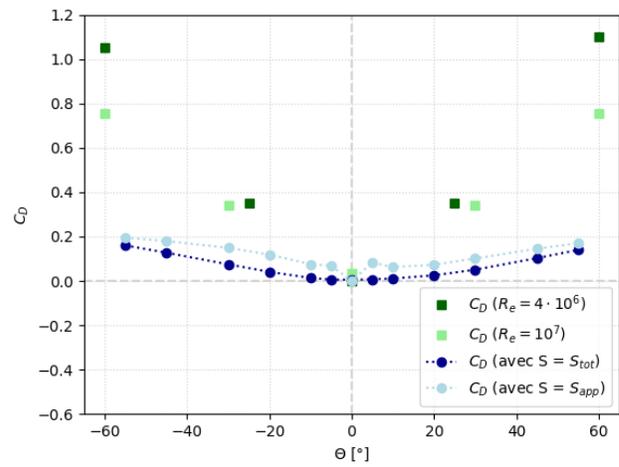


FIGURE 17. Coefficient de traînée

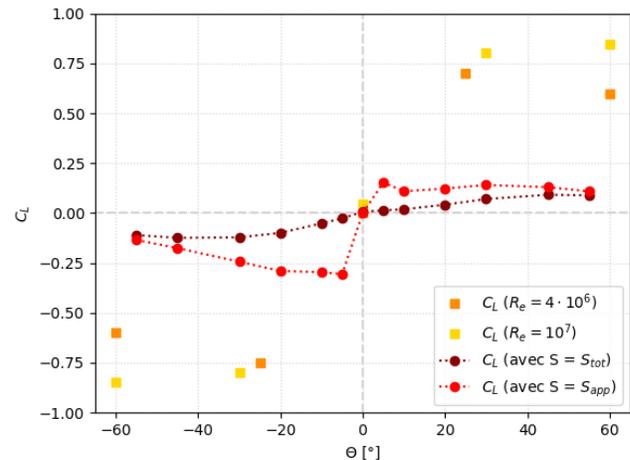
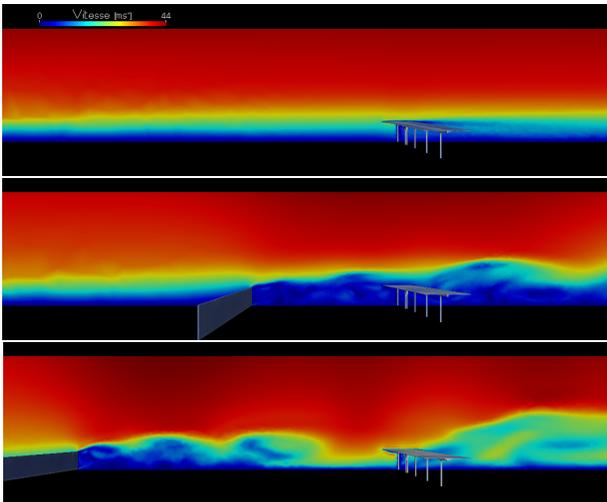


FIGURE 18. Coefficient de portance

### 3.2.3 Influence d'un mur en amont du tracker

Nous avons ensuite simulé l'écoulement d'air à l'angle  $0^\circ$  pour un seul tracker avec et sans mur. L'ajout d'un mur, aussi bien à  $20\text{m}$  qu'à  $40\text{m}$  du tracker, engendre des fluctuations importantes de la force de portance. Ceci est dû aux turbulences chaotiques générées par le mur auxquelles les trackers font face, visibles sur la figure 19.



**FIGURE 19.** Profil de l'écoulement, sans mur, avec mur à 20m, avec mur à 40m

**TABLE 5.** Influence d'un mur sur les contraintes

Configuration	Force (N)	Moment (N.m)
Panneau seul	3,450	3,380
Mur à 20m	950	2,500
Mur à 40m	5,150	-2050

Comme le montre la table 5, pour un mur à 20 m la force de traînée moyenne est très faible par rapport à celle calculée pour un écoulement sans mur, et le moment est également moins important. Cependant, à une distance de 40 m le panneau n'est plus protégé de manière efficace par le mur et subit la chaoticité de l'écoulement.

## Conclusion

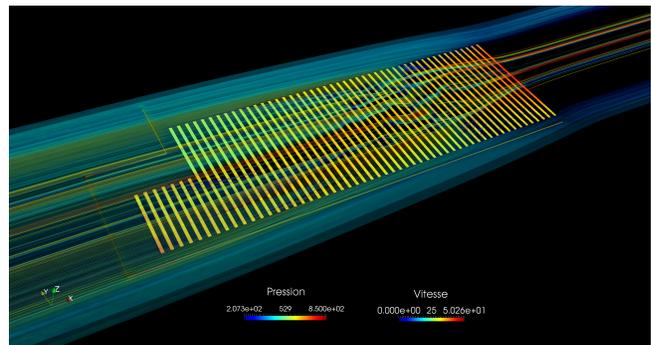
### Validation des résultats

Après avoir fait notre post-traitement, il faut analyser nos résultats et vérifier leur cohérence, typiquement leur ordre de grandeur. Nous avons comparé les coefficients aérodynamiques que nous avons obtenu avec ceux calculés dans la littérature. Les figures 17 et 18 montrent que nous obtenons des résultats proches à ceux de [20] et [17] en termes d'allure et d'ordre de grandeur (facteur  $\simeq 5$  entre nos résultats et les leurs), ce qui motive d'autant plus la validation de nos résultats. Les écarts sont dus essentiellement aux différences entre les valeurs des paramètres caractéristiques du modèle que nous avons utilisés et ceux de la littérature, notamment le nombre de Reynolds de l'écoulement et la convention de surface choisie.

### Analyse et recommandations

L'analyse de la courbe du moment nous a permis de trouver l'angle pour lequel les contraintes appliquées sur le panneau sont minimales, il se situe entre  $-5^\circ$  et  $0^\circ$ . Toutefois, cette position d'équilibre reste instable. Nos résultats nous amènent alors à plusieurs conclusions techniques :

- À l'échelle de la centrale, nous recommandons de disposer les panneaux de la première rangée face au vent (donc à  $-55^\circ$ ) afin de minimiser le couple qu'ils subissent vers une position relativement stable, une solution pour résister à la force de traînée alors très importante pouvant être d'installer des renforts sur les pieux. Les rangées suivantes peuvent être inclinées à  $-3^\circ$ , puisque nos calculs indiquent que cette position est la plus stable.
- Au vu de la figure 20, le vent rapide cassé par la première rangée de panneaux retombe sur les trackers après un certain nombre de rangées. Il semble judicieux d'incliner également cette rangée face au vent, et de répéter ce motif périodiquement tout le long de la centrale. Des études complémentaires peuvent être réalisées pour déterminer les rangées particulières à relever, par exemple en fonction de la vitesse du vent.
- Comme système de protection additionnel, il semble que l'utilisation d'un mur soit judicieuse, mais à condition qu'il soit placé assez proche de la première rangée de trackers (notre étude montre qu'un mur de 2m de haut ne protège plus les trackers dès qu'il est à une distance supérieure à 40 m en amont).



**FIGURE 20.** Aperçu de l'écoulement sur une partie complète de centrale (206 trackers), avec le mur réel

Ce projet a ainsi été l'occasion de mettre en place un framework adaptatif et réutilisable. Certaines parties du processus étant invariées d'une simulation à une autre, notre méthode ne s'y attelle qu'une fois (définir le domaine, ses dimensions, les conditions aux limites...). Ce schéma nous a permis d'initier un modèle avec lequel OT pourra réaliser efficacement des analyses complémentaires.

## 4. Analyse dynamique et amortissement des trackers solaires

### Participants

Max FRESSONNET, Michaël VINCENDON

### Abstract

Ce mini-projet teste le modèle dynamique des trackers solaires de la société Optimum tracker. La réponse du tracker à l'effort du vent est caractérisée par une équation différentielle (donnée) sur l'angle de torsion du longeron, que nous résolvons numériquement grâce aux données de l'étude aérodynamique effectuée dans la partie 3. Nous évaluons les valeurs des paramètres qui régissent cette équation, et qui caractérisent plusieurs propriétés physiques du tracker. Nous comparons ces résultats aux mesures données par les inclinomètres installés sur les trackers pour valider le modèle et discuter de l'intérêt de la solution d'amortissement employée par la société. Cette étude permet de définir l'effet du système d'amortissement employé par Optimum tracker sur l'amplitude des oscillations des trackers, leurs modes propres, et leur vitesse d'amortissement.

### Introduction

Pour exploiter au maximum le potentiel énergétique du rayonnement solaire, la technologie du tracker modifie l'inclinaison des panneaux photovoltaïques pour suivre la progression du soleil dans la journée. Toutefois, cela rend la structure plus sensible au vent qu'un panneau solaire fixe, comme le montrent les exemples de *galloping effect* observés dans certaines centrales de trackers. Cela peut conduire à des dommages catastrophiques de diverses sortes, dont un flambement du longeron qui le rend inutilisable<sup>1</sup> ou un arrachement des panneaux. De tels phénomènes sont des enjeux importants en dynamique des structures, représentés dans l'opinion publique par le célèbre exemple de la destruction du Tacoma Narrows Bridge [21].

Pour éviter cela, des systèmes d'amortissement sont mis en place afin de limiter préventivement le nombre et l'amplitude des oscillations. Cela permet non seulement de mieux protéger les installations, mais aussi de rassurer les clients et l'opinion publique ; cela s'accompagne par contre d'une hausse des coûts d'entretien et de production et n'assure pas nécessairement une immunité complète contre ces phénomènes. Pour ces raisons, la société Optimum Tracker s'interroge sur le degré de pertinence des valeurs d'amortissement actuellement en place dans ses centrales, et aimerait les optimiser.

Dans cette optique, parmi les méthodes de modélisation et de résolution utilisées en dynamique des structures [22] nous avons choisi d'utiliser une équation de type ODE (Ordinary Differential Equation) et de la résoudre par intégration directe. D'une part, c'est une technique que nous maîtrisons ; d'autre part, Optimum Tracker nous a fourni des données

d'études préalables sur leurs trackers solaires, ce qui facilite la détermination des paramètres de l'équation.

Nous mettrons donc en place le modèle dynamique en torsion du tracker étudié en déterminant ses paramètres physiques par différentes études. Nous résoudrons cette ODE numériquement, dans différentes conditions, par la méthode proposée par Python qui utilise un schéma de Runge-Kutta d'ordre 4. Les premiers résultats de cette intégration et l'utilisation des données mesurées par Optimum Tracker nous permettront d'affiner et valider ce modèle dans des scénarii simplifiés. Enfin, nous nous placerons en conditions réelles pour examiner l'impact de l'amortissement sur la réponse du tracker aux sollicitations réelles du vent.

### 4.1 Établissement du modèle

L'évolution de l'angle de torsion  $\alpha_L$  du longeron en bout de tracker est caractérisée par l'équation suivante :

$$J_{\Delta} \frac{d^2 \alpha_L}{dt^2} = M_v(\alpha_0, \alpha_L) + k_{\theta}(\alpha_L - \alpha_0) - v \frac{d\alpha_L}{dt} - f \times \text{sign}\left(\frac{d\alpha_L}{dt}\right) \quad (1)$$

Où :

$J_{\Delta}$  est le moment d'inertie du système sur l'axe de rotation

$M_v$  est le moment du vent

$k_{\theta}$  est la raideur du longeron

$v$  est le coefficient d'amortissement, lié au système d'amortissement du tracker.

$f$  est la norme des frottements secs.

$\alpha_0$  est l'angle de torsion du tracker au repos

Pour étudier la réponse du système aux rafales de vent, l'influence des solutions d'amortissement, et les valeurs des paramètres entrant en jeu dans l'équation (1) nous nous sommes appuyés sur les données suivantes :

- Les mesures des anémomètres et des girouettes d'une centrale solaire Optimum Tracker au Pakistan
- Les mesures de 4 inclinomètres fixés sur un des trackers ouest de cette même centrale
- La valeur du moment exercé par le vent sur les panneaux en fonction de l'angle de torsion du longeron et de la vitesse du vent, calculée par une étude aérodynamique (cf 4.1.4).

#### 4.1.1 Valeurs de $J_{\Delta}$ , de $k_{\theta}$ et de $\alpha_0$

$J_{\Delta}$  est le moment d'inertie du système sur l'axe de rotation, il caractérise la répartition de la masse autour de cet axe. La valeur du moment d'inertie d'un tracker a été mesurée à  $1414 \text{kg.m}^2$ . Or, le longeron est fixé d'un côté et libre de l'autre, et on étudie seulement un demi tracker, on a :

$$J_{\Delta} = 707 \text{kg.m}^2$$

Le couple de torsion est  $k_{\theta}(\alpha_L - \alpha_0)$ . Les angles de torsion et les couples associés sont mesurés, le rapport, constant, est

1. cf. les parties 5 et 6 sur le comportement mécanique du longeron

$0.007^\circ.N^{-1}.m^{-1}$ . Il s'agit de l'inverse de  $k_\theta$ . Donc

$$k_\theta = 1428N.m/^\circ = 81818N.m/rad$$

Au repos, si le longeron n'est pas déformé, son angle de torsion est nul. Pour toute l'étude, on considère que le longeron n'est pas durablement tordu, donc

$$\alpha_0 = 0$$

#### 4.1.2 Mesure de $v$

L'amortissement est représenté par un terme de frottements visqueux [23]  $v$ . Ce dernier est estimé en calculant pour 2 situation angulaires différentes voisine, l'écart angulaire de la position du tracker, et l'écart de la longueur de l'amortisseur. On interpole ces valeurs par une fonction quadratique en  $\alpha_L$ , avec un  $R^2 = 0.9976$ . On obtient :

$$v(\alpha_L) = -260,43\alpha_L^2 + 1562,6\alpha_L + 2091,6$$

#### 4.1.3 Évaluation de $f$ et validation du modèle sans le vent

Dans le cas où le vent ne souffle pas,  $M_v = 0$ . On résout alors l'équation (1) en tenant compte de cette condition, puis on compare le résultat avec le comportement réel de  $\alpha_L$ , mesuré avec un logiciel de pointage. Les conditions initiales sont  $\alpha_L(0) = 6^\circ$  et  $\dot{\alpha}_L(0) = 0$ .

La résolution numérique est effectuée pour plusieurs valeurs de  $f$ . On constate qu'avec  $f = 900N.m$ , le comportement de l'angle de torsion modélisé est bien similaire à celui mesuré. On en déduit :

$$f = 900N.m$$

Les résultats, avec et sans prise en compte du terme d'amortissement, ainsi que le pointage des angles de panneaux filmés par Optimum Tracker, avec et sans amortissement, sont tracés dans la figure 21. On remarque que le comportement modélisé est conforme à celui mesuré, ce qui valide notre première implémentation et résolution.

#### 4.1.4 Détermination de $M_v$

$M_v$  est estimé via la résolution de l'équation de Navier-Stokes pour 13 valeurs d'angles différentes, allant de  $-55^\circ$  à  $55^\circ$ , et pour un vent de  $118km/h$  (travail réalisé par le miniprojet 4). Comme la dépendance de  $M_v$  en l'angle de torsion n'est qu'en  $\alpha_L$  et pas en ses dérivées successives [24], on la détermine en interpolant avec une fonction polynomiale de degré 3 la fonction  $\alpha_L \rightarrow M_v(\alpha_L)$ . La proportionnalité entre  $M_v$  et le carré de la vitesse du vent assure que  $M_v(\alpha_L) = (\frac{v}{118})^2 M_{118}(\alpha_L)$ .

Pour résoudre numériquement l'équation différentielle, on souhaite faire de  $M_v$  une fonction de l'angle - c'est déjà le cas et du temps. Nous aboutirons en faisant de la vitesse du vent une fonction du temps, par une interpolation. Il s'agit d'une interpolation aléatoire que nous allons construire par la suite.

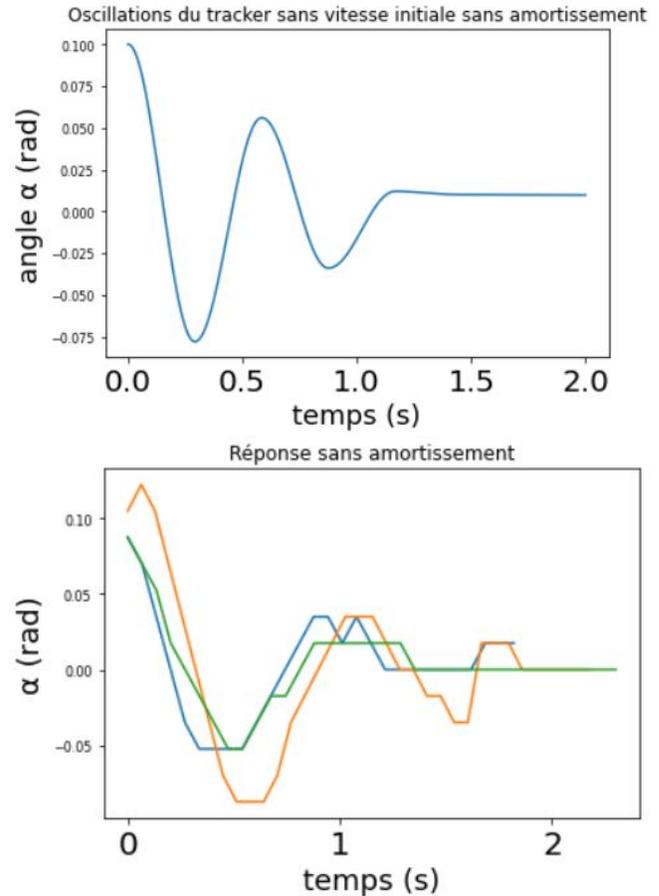


FIGURE 21. Modèle et observation sans vent, et sans amortissement

## 4.2 Etude en forçage de vent

### 4.2.1 Exploitation des données brutes

Les mesures du vent et des angles sont données sous forme de fichiers csv. On utilise les bibliothèques Pandas [25], Matplotlib [26] et Scikit-learn [27] de Python pour les importer, les traiter et afficher les résultats.

### Importation et nettoyage des données inclinométriques

Les données des inclinomètres étant bruitées, on élimine les valeurs trop éloignées de la moyenne. On calcule ensuite la différence entre l'angle donné par l'inclinomètre de chaque demi-tracker et celui du centre du tracker, pour s'affranchir de la poursuite du soleil et obtenir la torsion du longeron (notée  $\alpha_L - \alpha_0$  dans l'équation).

Dans la section 3, nous chercherons à exploiter ces données dans un but de validation du modèle; pour le moment nous cherchons à les utiliser pour obtenir les moments exercés par le vent.

**Traitement des données du vent** Les données de vitesse du vent utilisées pour calculer le moment présentent un pas de temps beaucoup trop élevé pour les utiliser telles quelles, dans la comparaison entre vent et oscillations comme dans la résolution de l'équation différentielle. Il est nécessaire de

les suréchantillonner. Nous avons donc interpolé ce jeu de données, pour passer d'un pas de temps irrégulier de l'ordre de 10 secondes à un pas de temps fixe de 0.1 seconde, avec une fonction aléatoire dont l'amplitude est celle de la variation de la vitesse du vent à valeur moyenne connue.

#### 4.2.2 Relation entre les oscillations de la torsion et la vitesse du vent

On met ensuite en parallèle les oscillations de la torsion ainsi observées avec la donnée de la vitesse du vent, et l'on constate une possible corrélation (figure 22). La calculer permettra d'analyser leur dépendance et d'en tirer une statistique sur l'amplitude caractéristique des oscillations à une vitesse donnée du vent.

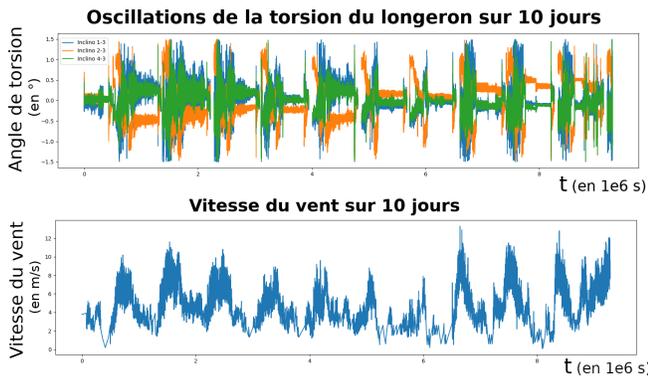


FIGURE 22. Superposition des oscillations de la torsion du longeron et de la vitesse du vent, sur la même période.

En faisant des régressions linéaires des angles de torsion en fonction de la vitesse du vent (ou de sa projection sur l'axe Est-Ouest), on observe une corrélation entre les maxima des angles et de la vitesse du vent sur des échelles de 10 minutes à plusieurs heures (figure 23).

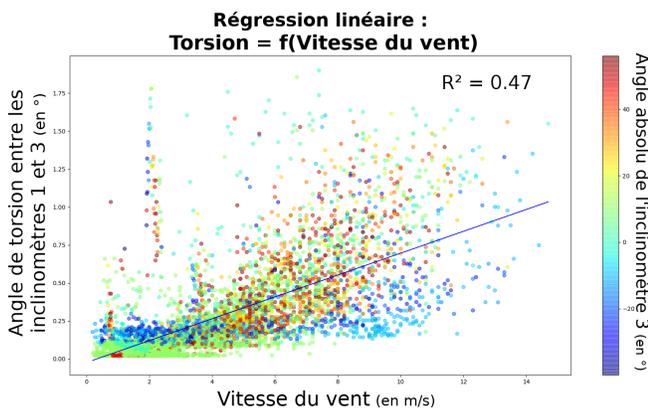


FIGURE 23. Torsion du demi-tracker Nord en fonction de la vitesse du vent, en prenant en compte l'angle absolu du tracker

#### 4.2.3 Interpolation de $M_V$

On considère un vent dont la vitesse dessine un trapèze, c'est à dire un vent de vitesse nulle avant un temps  $t = 1s$ ,

puis avec une accélération constante entre  $t = 1s$  et  $t = 2s$ , puis de vitesse constante à  $70km/h$  entre  $t = 2s$  et  $t = 8s$ , puis qui décélère jusqu'à une vitesse nulle. On peut alors calculer le moment exercé par le vent sur les panneaux solaires, puis résoudre (1) avec un terme  $M_V$  non nul.

Pour une vitesse moyenne du vent de  $10m.s^{-1}$ , on observe (Figure 23) une oscillation du panneau de  $0.4^\circ$  autour de sa valeur d'équilibre, et notre modèle montre qu'une telle oscillation se traduit par une rampe de vitesse de  $4.4m.s^{-1}$  en 0.1 seconde. De plus, on observe une linéarité entre ses oscillations et la vitesse moyenne du vent. L'interpolation sera alors avec une fonction oscillante dont l'amplitude maximale est  $0.44v$ , où  $v$  est la vitesse du vent dans la direction du panneau.

#### 4.2.4 Rôle de l'amortissement

Désormais, chaque terme de l'équation (1) est connu, et la confiance en le modèle est accrue par les résultats en l'absence de vent. Nous résolvons alors numériquement (1) dans les conditions d'un vent en 'trapèze', dont la vitesse est une rampe qui débute à 1.0s et s'arrête à 2.0s, afin d'estimer le rôle de l'amortissement.

Le comportement de l'angle ainsi que le moment sont représentés sur la figure 24. On en déduit plusieurs informations sur l'influence du vent et de l'amortissement sur le comportement du système :

- L'angle de torsion du longeron se comporte de la même façon que le moment exercé par le vent, donc ce qui provoquera les oscillations des panneaux solaires n'est pas un vent fort et constant, mais un vent dont la vitesse évolue rapidement.
- Il y a un latence de quelques dixièmes de seconde avant que le comportement du système ne se calque sur celui du moment exercé par le vent. Il faudra donc être particulièrement attentif à l'évolution de l'effort du vent sur des temps de cet ordre de grandeur. Or, les vitesses de vent dont nous disposons ne sont pas échantillonnées avec autant de précision : le pas de temps est de l'ordre de la dizaine de secondes.
- Le système d'amortissement ralentit là aussi la stabilisation, et engendre un dépassement. Alors que l'effort exercé par le vent est devenu constant, le panneau solaire continue de tanguer quelques dixièmes de secondes sans amortissement.

### 4.3 Étude en conditions réelles

L'étude pour un vent dont nous imposons la vitesse montre des différences entre le comportement d'un tracker avec et sans amortissement de l'ordre du dixième de seconde. Nous soumettons alors notre modèle à des données de vent réellement mesurées, avec un pas de 0.1s, pour estimer le rôle de l'amortissement en conditions réelles.

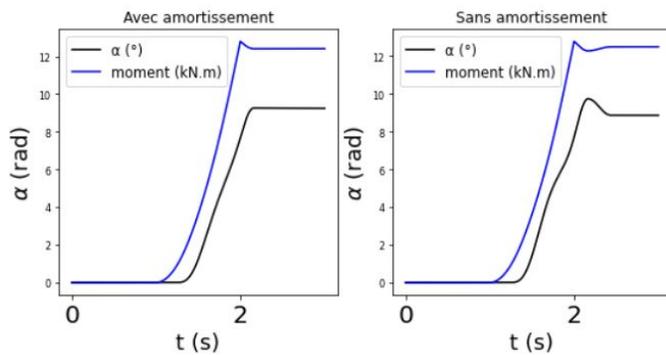


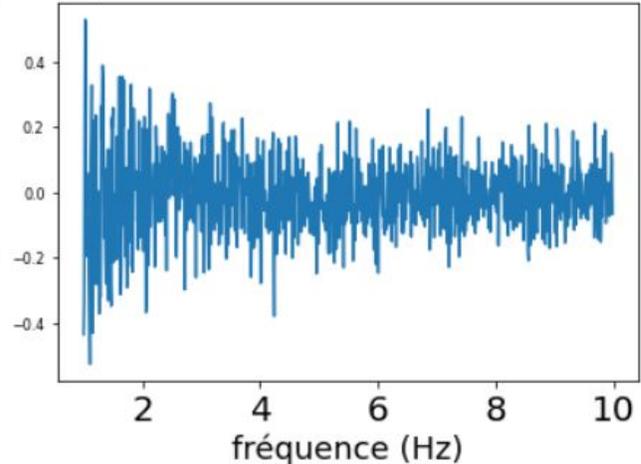
FIGURE 24. Moment du vent et l'angle de torsion pour un vent en trapèze

#### 4.3.1 Exécution du modèle dans les conditions réelles

L'équation différentielle est résolue numériquement dans les conditions mesurées le 4 octobre 2020 par Optimum Tracker, avec et sans la solution d'amortissement, sur une période de 1 000 secondes. Deux observations sont faites :

- En valeur absolue, l'angle maximum atteint est plus élevé s'il n'y a pas d'amortissement. En effet, il vaut  $0.757^\circ$ , alors que sans amortissement, l'angle extrême est  $0.699^\circ$ . On constate un écart de 8% entre les deux valeurs. L'amortissement réduit donc l'amplitude maximale des oscillations.
- Une transformation de Fourier du signal montre que les basses fréquences sont communes aux deux comportements, mais on remarque plus de hautes fréquences dans le signal sans amortissement (Figure 25). Cela se traduit par le fait que la tendance générale de l'oscillation est conservée par l'ajout d'un système d'amortissement, mais que cet ajout aura pour effet de supprimer des petites oscillations de haute fréquence.

Décomposition de fourier avec amortissement entre 1 et 10 Hz



Décomposition de fourier sans amortissement entre 1 et 10 Hz

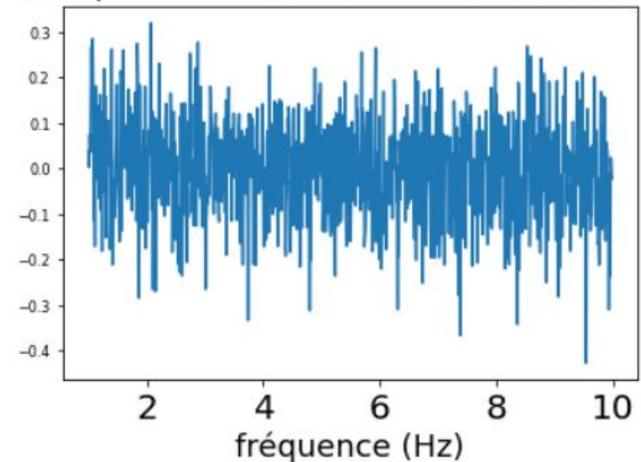


FIGURE 25. Moyennes fréquences de l'oscillation du signal

## Conclusion

Nous avons effectué une analyse dynamique du comportement des trackers solaires à l'aide d'un modèle physique, validé par une étude en l'absence de vent. Nous avons ensuite étudié le rôle de l'amortissement avec une étude dans deux cas : un cas parfait dans lequel la vitesse du vent est imposée, et un cas en conditions réelles. Ainsi, nous avons montré que l'amortissement réduit l'amplitude des oscillations et supprime des oscillations de basse fréquences

Toutefois, la précision des valeurs numériques des paramètres peut être améliorée. En effet, nous avons considéré que le moment d'inertie d'un demi-longeron fixe d'un côté est la moitié du moment d'inertie d'un longeron entier, et la dépendance angulaire du coefficient d'amortissement et du moment du vent a été interpolé sur 13 mesures d'angles entre  $-55^\circ$  et  $+55^\circ$  : une estimation plus précise pourrait être faite si plus de données étaient accessibles.

## 5. Simulation numérique du comportement des longerons

### Participants

Vermeer BONHOMME, Thomas SERIEYS

### Abstract

Dans les centrales solaires, les panneaux photovoltaïques (PV) sont soumis à des vents puissants qui exercent des efforts sur le longeron (tube creux en acier S390 de section carrée soutenant la structure). Dans notre étude, les rangées de panneaux sont équipées d'un moteur central entraînant les longerons. Cet article décrit la réponse du longeron face à ces chargements, et plus particulièrement détermine si la pièce est capable de les supporter sans déformation plastique irréversible. On restreint notre travail à des longerons de 2.5 mm et 4 mm d'épaisseur.

Pour ce faire nous avons réalisé une simulation numérique de la pièce modélisée par des éléments coques sur Abaqus.

Nous avons d'abord constaté que les plus fortes contraintes mécaniques étaient principalement situées à liaison de type encastrement avec le moteur. Un autre groupe réalisera une étude plus complexe de cette partie avec des éléments volumiques, et nos simulations permettront de leur fournir des paramètres géométriques nécessaires à leurs travaux.

Nous remarquons ensuite qu'avec une épaisseur de 2.5 mm, le longeron plastifie à de multiples endroits, alors qu'il ne plastifie pas avec une épaisseur de 4 mm. De plus, le longeron subit des torsions, si bien que les panneaux à l'extrémité de la rangée peuvent être désaxés de  $16.1^\circ$  avec la solution de 2.5 mm, et  $10.2^\circ$  avec 4 mm.

Enfin, ces résultats nous permettent de choisir la solution de 4 mm et d'identifier les zones critiques.

### Introduction

Optimum Tracker est une entreprise qui a pour projet d'installer des centrales photovoltaïques dans des régions sujettes à des vents pouvant atteindre 160 km/h.

Le vent exerce des efforts sur les panneaux photovoltaïques qui sont transmis à un longeron (voir figure 26A). Cette pièce en acier S390 de 21 m de long est donc soumise à des chargements de flexion et de torsion. Le longeron est essentiel car il soutient tous les panneaux solaires. Il est nécessaire de réaliser une étude mécanique sur ce dernier car sa détérioration pourrait représenter des coûts pour l'entreprise, notamment en cas de ruine de la structure. Nous réaliserons des simulations numériques sur le logiciel éléments finis Abaqus. Ces simulations sont plus complètes que des études théoriques à cause de la complexité du problème (beaucoup de conditions aux limites différentes), mais également plus rapides et moins chères que des expériences réelles.

Le longeron étant de grande taille par rapport à sa section, une modélisation simplifiée est nécessaire pour alléger

les calculs. Cela nous permettra d'identifier les zones critiques (Contraintes/Angle de torsion élevé), qui pourront être modélisées plus en détail par un autre groupe.

Pour nos simulations, nous avons besoin de connaître les valeurs des forces et moments transmis au longeron. Elles seront calculées par le groupe "simulation numérique des écoulements complexes autour des trackers solaires" à partir de calculs aérodynamiques. Ces valeurs nous seront données pour différentes conditions de vent et différents angles des panneaux. Au cours de l'étude, il apparaîtra que la zone à proximité du moteur est sujette aux plus fortes contraintes. Le groupe "analyse mécanique de différentes solutions d'entraînement" mènera une étude détaillée sur une portion du longeron autour du moteur, nous devons donc leur transmettre des données : la flèche et l'angle de torsion du longeron à un mètre de la liaison avec le moteur.

Nous commencerons par décrire la modélisation réalisée dans la section 5.1, puis nous présenterons les résultats obtenus (Section 6.3), enfin nous les interpréterons et comparerons à un modèle théorique et au comportement réel de la structure.

### 5.1 Modélisation

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de résolution d'équations différentielles. Dans notre cas, les équations différentielles résolues sont les équations de la mécanique de manière à simuler le comportement d'une structure.

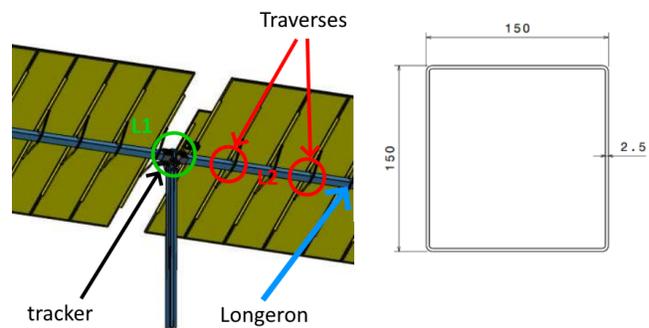


Figure A.

Figure B.

#### FIGURE 26.

**Figure 26.A.** Panneaux PV vus d'en dessous.

L1 : liaison encastrement

L2 : couplage cinématique

**Figure 26.B.** Dimensions de la section du longeron (mm)

La structure est constituée de deux longerons en acier S390 chacun soutenu par trois pieux et liés à un moteur (Figure 26). Ce moteur est piloté pour suivre le mouvement du soleil. Un longeron soutien 21 panneaux photovoltaïques grâce à 22 traverses (Figure 26.A.).

Le longeron est un tube creux de section carrée et d'épaisseur 4 mm pour les premières rangées de panneaux de la centrale (soumises aux plus fortes contraintes) et 2.5 mm pour le reste (voir Figure 26.B.).

Les calculs par éléments finis vont nous permettre d'estimer les forces et moments auxquels le longeron peut résister sans déformation plastique.

Maintenant que nous avons présenté la structure et le problème à modéliser, il nous faut traduire ces conditions réelles dans des conditions aux limites qui peuvent être étudiées avec la méthode des éléments finis dans le cadre de ce projet.

### 5.1.1 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont les efforts mécanique qui s'appliquent sur le longeron et les contraintes de mouvement de certaines portions (encastrement au niveau du moteur par exemple).

Les contacts entre le longeron et les poteaux sont assurés par des liaisons pivots, et nous conserverons cette modélisation pour notre simulation. Nous avons fait l'hypothèse d'un moteur suffisamment robuste pour garder sa position même lors de chargement fort. On peut donc assimiler la liaison entre le moteur et le longeron à un encastrement.

Les interactions entre les panneaux et le longeron seront considérées comme ponctuelles car la surface de contact entre une traverse et le longeron ( $7.5 \times 10^3 \text{ mm}^2$ ) est faible devant la surface du longeron ( $30 \times 10^6 \text{ mm}^2$ ). Chacune des 22 traverses est couplée au longeron par une liaison cinématique qui n'autorise aucun mouvement relatif entre les deux pièces (en négligeant le jeu). Les conditions aux limites sont appliquées à un point de référence en liaison cinématique avec une portion de longeron de longueur faible devant la distance entre les points d'application des forces. De plus, pour chaque portion liée à un point d'application d'une force, nous avons dû réaliser deux zones tampon : ce sont des zones de part et d'autre de la portion indispensables pour éviter que des points se retrouvent en liaison cinématique avec le point d'application de la force et doivent également vérifier des équations dues aux efforts internes (voir Figure 27).

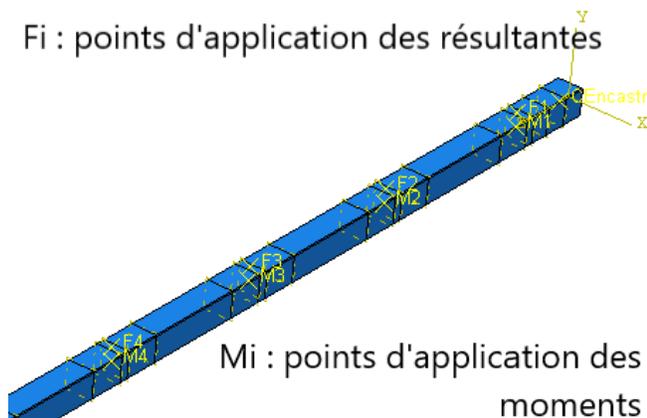


FIGURE 27. Découpage à l'aide de plans du longeron

Le groupe "simulation numérique des écoulements complexes autour des trackers solaires" nous fournira le champ de pression sur les panneaux que nous intégrerons sur 22 tranches pour obtenir 22 résultantes. Pour les efforts tangentiels, il nous

TABLE 6. Analyse de convergence

Choix maillage		
Taille de maille (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	Temps de calcul
32	223.8	4 mn 25 s
24	240.4	6 mn 14 s
17	265	27 mn 11 s
12	265	53 mn 28 s
8	265	2 h 5 mn 14 s

fournira une résultante globale que l'on répartira de manière homogène sur les 22 tranches. Nous prenons également en compte le poids des panneaux.

### 5.1.2 Réalisation du modèle sur Abaqus

Notre modélisation se fera sur Abaqus, un logiciel industriel de simulation par éléments finis développé par Dassault System.

**Modélisation du longeron** Pour modéliser le longeron, nous avons utilisé des éléments coque ([28]) : pour modéliser l'épaisseur du longeron, on modélise les surfaces en 2D avec des éléments coque. Cela permet de réduire considérablement les temps de calculs.

Cette modélisation est permise car l'épaisseur du longeron (2.5 mm) est constante et très petite devant sa longueur (21 000 mm) et sa largeur (150 mm). De plus une modélisation 3D aurait demandé beaucoup trop de temps de calcul. Nous avons d'abord effectué nos simulations avec des éléments coques proposés par défaut dans Abaqus : coque épaisse doublement courbée, intégration réduite, puis, pour plus de précision, nous avons choisi d'utiliser 8 noeuds. [29].

Les résultats que nous obtenons sont issus de simulations, il faut donc s'assurer de leur validité. Pour ce faire, nous allons réaliser une étude de convergence.

**Etude de convergence** Avec la méthode des éléments finis, les résultats obtenus se rapprochent de la réalité lorsque l'on diminue la taille de maille. Mais utiliser un maillage trop fin mène à un temps de calcul trop long. Il faut donc trouver un maillage qui donne un temps de calcul raisonnable, mais qui reste réaliste. En fixant les conditions aux limites et en faisant varier la taille de maille, nous avons étudié les grandeurs physiques qui nous intéressent pour vérifier leur convergence.

Nous avons remarqué que le maillage n'a un réel impact que sur la valeur de la contrainte maximale. Il est important de s'assurer de la convergence de cette grandeur avec un raffinement du maillage car elle est très importante pour notre étude.

Au début de notre étude, nous avons établi le tableau 6 avec un maillage linéaire, c'est à dire avec une interpolation affine des variables dans les calculs (4 noeuds). Il nous permet de choisir une taille de maille de 17 mm, meilleur compromis entre exactitude des grandeurs physiques (inférieure à 5% d'erreur relative) et temps de calcul.

Par la suite, nous avons remarqué des incohérences dans les résultats (contraintes maximales hors des arrêtes par exemple), et ces incohérences ont été résolues en passant à un maillage quadratique (8 noeuds) tout en conservant une taille de maille moyenne de 17 mm. Pour nous assurer de la validité du maillage quadratique, nous avons réalisé des simulations en affinant de maillage pour vérifier la convergence des grandeurs qui nous intéressent.

**Maillage adaptatif** Nous avons réalisé un maillage adaptatif : notre maillage est fin dans les zones de fortes contraintes (sur les arrêtes et à proximité du moteur), et plus grossier ailleurs (voir Figure 28). Cela permet de garder un temps de calcul raisonnable et d'obtenir des résultats précis dans les zones où les non linéarités sont importantes. Les données transmises au groupe "analyse mécanique de différentes solutions d'entraînement" seront donc plus précises.

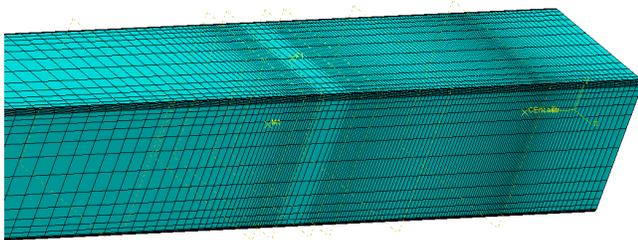


FIGURE 28. Maillage du longeron à proximité du moteur

## 5.2 Résultats et Interprétation

Observons les zones critiques du longeron vis-à-vis des grandeurs physiques considérées.

### 5.2.1 Conditions extrêmes

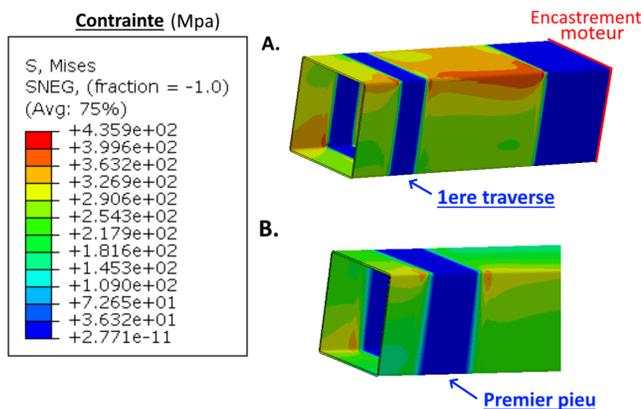


FIGURE 29. Longeron de 2.5 mm d'épaisseur.  
A : Longeron à l'encastrement  
B : Longeron au premier pieu

Pour simuler les cas de vents extrêmes, le groupe "simulation numérique des écoulements complexes autour des trackers solaires" nous a donné une majoration des forces et moments exercés sur chaque panneau : une force normale

TABLE 7. Contrainte max et torsion du longeron en fonction de son épaisseur

Choix maillage		
Épaisseur	$\sigma_{max}$ (MPa)	Angle de torsion max
2	435.9	16.1 °
4	326.1	10.2 °

transmise au longeron de 3000 N, tangentielle de 2000 N, et un moment de 1000 Nm par traverse.

Les résultats obtenus sont présentés par la suite.

**Angle de torsion** Dans les deux cas, l'angle de torsion est important (voir Tableau 7). Ce résultat est à prendre en compte par l'entreprise car en cas de forts vents, les panneaux aux extrémités du longeron seront désaxés par rapport au soleil, réduisant ainsi les performances de ces derniers.

**Contrainte (cf figure 29)** Pour les deux épaisseurs, les contraintes sont principalement localisées autour de l'encastrement. Ainsi, il est nécessaire de faire une analyse plus précise de cette partie de la pièce, réalisée par le groupe "analyse mécanique de différentes solutions d'entraînement". On note également une concentration de contraintes autour du contact avec le premier pieu.

De plus, on remarque sur la figure 29 que le longeron de 2.5 mm d'épaisseur plastifie ( $\sigma > 390$ ) alors que la simulation avec 4 mm ne montre aucune plastification.

Ce résultat est surprenant au premier abord, car en pratique le longeron de 4 mm plastifie également. Cependant nous avons réalisé des hypothèses simplificatrices implicites. En effet, nous ne prenons pas en compte le jeu entre les traverses, les panneaux et le longeron. De plus, nous avons également négligé l'aspect vibratoire de la structure. Enfin, les incertitudes sur les données fournies par le groupe "simulation numérique des écoulements complexes autour des trackers solaires" s'ajoutent aux nôtres. Il conviendrait donc de faire une analyse plus poussée en levant certaines de ces hypothèses les plus fortes.

**Données à transmettre au groupe "analyse mécanique de différentes solutions d'entraînement"** Comme nous avons vu précédemment, le groupe "analyse mécanique de différentes solutions d'entraînement" (partie suivante) réalise une modélisation locale et complexe du longeron autour de l'encastrement à l'aide d'éléments volumiques. Nous leur fournirons la flèche et l'angle de torsion à 1 m de l'encastrement, données qu'ils utiliseront comme conditions aux limites (voir fig 30).

### 5.2.2 Zones critiques

Comme notre simulation n'a pas rendu compte des déformations plastiques observées dans la pratique, nous n'avons pas accès à la totalité des zones critiques de la pièce. Ainsi, nous avons appliqué des chargements plus élevés pour étudier la réponse de la structure.

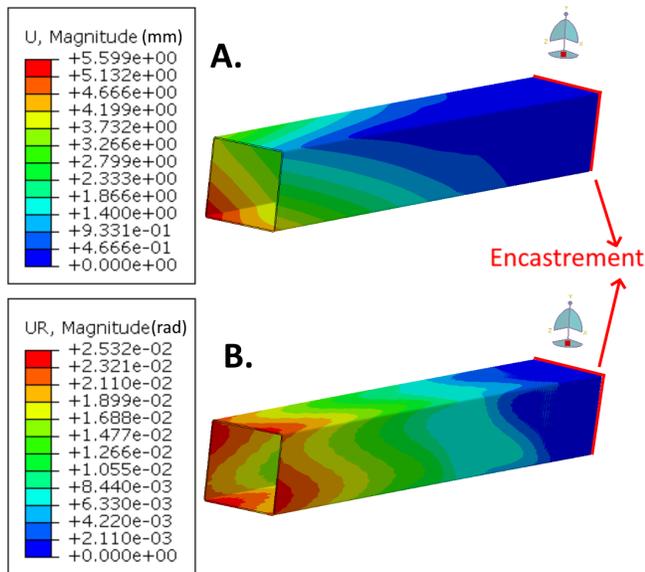


FIGURE 30. Paramètres géométriques à 1 mètre - Épaisseur 2 mm.

A : Flèche.

B : Angle de torsion.

On remarque d'abord qu'avec les chargements choisis, on est à la limite de la plastification car au-delà d'un couple exercé de 1200 Nm, la simulation ne converge pas car il y a beaucoup de plastification.

De plus, la structure plastifie aux encastremets avec les 3 premières traverses. Lors de flexions importantes, la poutre plastifie.

### 5.3 Confrontations des résultats avec la pratique et avec un modèle théorique

#### 5.3.1 Confrontation à la théorie des poutres

Pour vérifier la cohérence de nos résultats, nous avons d'abord comparé l'angle de torsion obtenu à l'extrémité avec l'équation fournie par la théorie des poutres :

$\phi^1 = \frac{M_t L}{G I_G}$  Ainsi en appliquant cette formule sur chaque tranche de longeron on obtient la nouvelle expression :

$\phi = \sum_{i=1}^{22} \Delta\phi_i = \sum_{i=1}^{22} \frac{M_i(22-i)}{22} \frac{L}{22} \frac{1}{I_G G} = \frac{21}{44} \cdot \frac{M_t L}{G I_G}$  On peut comparer ce modèle aux résultats trouvés par la modélisation du longeron (Figure 31).

La modélisation nous donne une relation linéaire entre le moment et l'angle de torsion, tout comme la théorie des poutres, avec une différence relative de 9% entre les deux pentes. La cohérence entre notre simulation et la théorie des poutre consolide nos résultats.

Angle de torsion en fonction du moment exercé

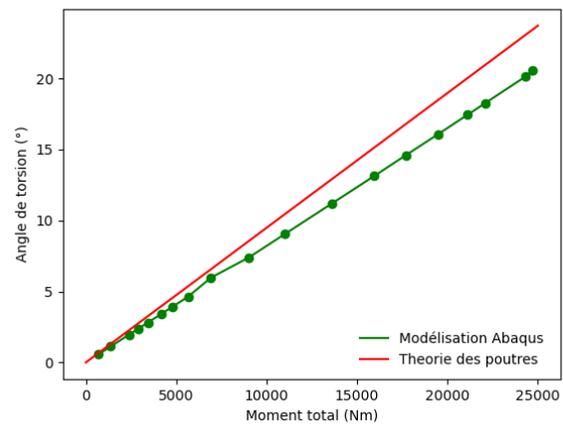


FIGURE 31. Comparaison modélisation et modèle théorique

#### 5.3.2 Confrontation avec les observations d'Optimum Tracker

Maintenant que la cohérence entre le modèle théorique et la simulation est établie, il faut vérifier la cohérence avec les résultats obtenus en pratique. Optimum tracker a pu nous fournir les résultats suivants : Pour un moment exercé de 20000 kNm, l'angle de torsion à l'extrémité du longeron est 15°. Notre modélisation nous donne un angle de 16,1°, mais pour un moment exercé de 2200 kNm, notre résultat est donc très réaliste.

## Conclusion et Critiques

Cette étude nous a permis de montrer que dans certaines conditions de vents extrêmes, les longerons sont soumis à des efforts qui les font plastifier. L'étude met donc en lumière la nécessité de renforcer les longerons, notamment ceux aux endroits de la structure où les vents sont les plus forts. En parallèle nous avons montré que les longerons avec une épaisseur de 4mm résistent mieux aux efforts que ceux d'épaisseur 2.5mm, mais ils sont toutefois plus chers.

Les nombreux processus de vérification effectués donnent de la valeur aux résultats obtenus.

Ce projet pourrait par la suite laisser place à des études pour renforcer la structure, par exemple en ajoutant des pièces de renforcement ou encore en changeant la géométrie du longeron.

1.  $\phi$  : Angle de Torsion

L : Longueur du Longeron

$M_t$  : Le moment exercé à l'extrémité du longeron

G : Le module de cisaillement

$I_G$  : Le moment quadratique de la section

## 6. Analyse mécanique de différentes solutions d'entraînement

### Participants

Pierre-Yves DOIREAU, Xavier SECHERESSE

### Abstract

Soumis à de grosses rafales de vent, les panneaux photovoltaïques sont soumis à une force engendrant une torsion du longeron (pièce qui les supporte). Notre étude porte sur l'analyse numérique de la déformation de ce longeron. Nous avons d'abord pour deux systèmes d'attache au moteur différents, comparé les courbes du moment résultant en fonction de l'angle de torsion obtenues avec le logiciel de simulation Abaqus. Puis nous avons cherché à affiner la solution d'entraînement en ajoutant dans la simulation un renfort intérieur venant s'encaster dans le longeron. Les résultats obtenus démontrent d'une part l'intérêt flagrant du renfort intérieur et de l'autre que le choix de l'un ou l'autre système d'attache ne change pas le comportement du longeron. Devant ces résultats, nous avons donc simulé une configuration sans système d'attache, simplement avec le renfort intérieur encastré dans le longeron et fixé par ailleurs ; le même comportement est observé à nouveau. Cette étude nous permet donc de montrer la pertinence de la solution d'entraînement comportant uniquement le renfort intérieur. Par ailleurs, nous pouvons conclure que pour de grosses rafales de vent et donc un angle de torsion limite donné (par le groupe 5), le risque de plastification (et donc de flambement) est faible.

### Introduction

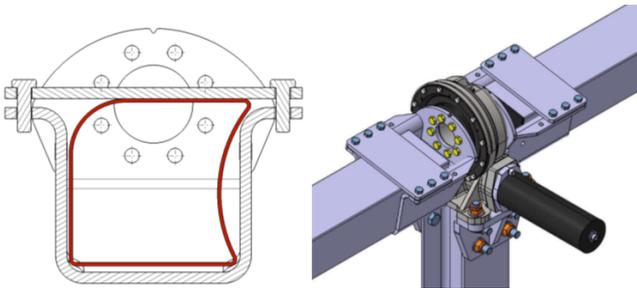


FIGURE 32. Attache A

L'objet de notre étude concerne le système de fixation du longeron supportant les panneaux photovoltaïques (PV) au moteur du tracker situé en partie centrale de l'assemblage et considéré fixe. Soumis à des rafales de vent, les panneaux PV sont soumis à une force hétérogène créant ainsi un couple qui déforme l'ensemble de la structure. On observe alors une rotation de l'extrémité du longeron et donc une déformation importante au niveau de l'attache longeron/moteur, zone identifiée comme étant critique par le groupe 5.

Notre premier objectif est de déterminer le meilleur système d'attache au moteur (solution d'entraînement). Pour cela, nous

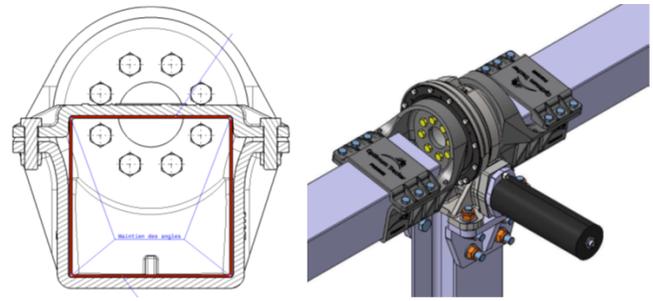


FIGURE 33. Attache B

analyserons, par simulation numérique, cette déformation en fonction de l'angle de rotation de l'extrémité du longeron pour les deux types d'attache (Attache A en Figure 32 et Attache B en Figure 33). On pourra alors, pour chaque type d'attache, calculer l'angle limite au-dessus duquel une déformation plastique irréversible apparaît ainsi que celui qui entraînerait la ruine de la structure par flambement.

Notre deuxième objectif est d'affiner la solution d'entraînement, en analysant l'intérêt d'une pièce supplémentaire fixée au moteur et insérée à l'intérieur de la structure creuse du longeron.

Une fois la solution d'entraînement adoptée, nous pourrions interpréter la courbe moment/rotation de celle-ci avec les valeurs d'angle communiquées par le groupe 5, afin d'évaluer le risque de plastification du longeron ou de ruine de la structure par flambement.

Nous commencerons par une analyse simplifiée de la relation entre le couple et l'angle de rotation en nous appuyant sur la théorie des poutres dans la Section 6.1. Puis, afin d'étudier plus précisément la déformation du longeron, nous procéderons à une modélisation par éléments finis à l'aide du logiciel Abaqus (Section 6.2). Enfin dans la Section 6.3, nous discuterons les résultats pour proposer la solution d'entraînement optimale pour éviter les déformations irréversibles.

### 6.1 La théorie des poutres

Dans le cas bien précis où l'on omet le système d'attache et néglige les rayons de congé au niveau des coins du longeron, la théorie des poutres permet d'estimer une relation entre le moment résultant et l'angle de torsion appliqué à l'extrémité d'une poutre de géométrie donnée (l'autre extrémité étant encastree). A noter que la formule suivante est valable uniquement dans le domaine élastique et dans le cadre des petites perturbations [30] :

$$\Gamma = \Phi \cdot \frac{GJ}{L} \quad (4)$$

avec  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ , où  $\Gamma$  est le moment résultant à l'endroit où on applique la torsion,  $\Phi$  l'angle de torsion,  $E$  le module d'Young,  $\nu$  le coefficient de Poisson,  $L$  la longueur de la poutre,  $J$  le moment d'inertie quadratique.

Dans notre cas (poutre creuse carrée à paroi mince),  $J = t(a-t)^3$  avec  $t$  l'épaisseur et  $a$  la largeur du longeron [31].

Cette formule nous permettra de vérifier par la suite que les valeurs trouvées lors des simulations sont cohérentes avec la théorie dans ce domaine.

Afin d'analyser localement la plastification potentielle du longeron, nous allons maintenant proposer une analyse plus précise par éléments finis.

## 6.2 Mise en donnée des calculs Abaqus

Dans cette partie, nous allons décrire le protocole mis en oeuvre pour mener à bien les simulations sur Abaqus (qui est un logiciel de simulation numérique par éléments finis).

### 6.2.1 Définition des géométries des pièces

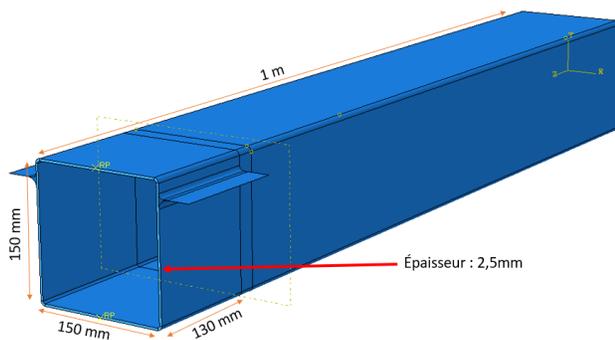


FIGURE 34. Longeron et attache B

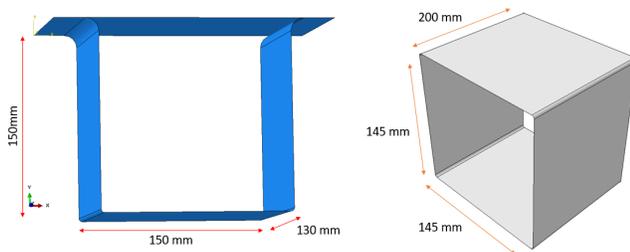


FIGURE 35. Attache A et renfort intérieur

Nous avons dans un premier temps réalisé les pièces nécessaires aux simulations dans Abaqus en utilisant les données d'Optimum Tracker pour les dimensions.

- Longeron : nous avons choisi une longueur d'un mètre, ce qui est suffisamment long pour observer toutes les déformations et flambements et suffisamment court pour limiter les temps de calcul.
- Outil : il permet d'appliquer la condition de rotation au longeron en le fixant à celui-ci.
- Attache A : surface composée de deux pièces nommées 'Asup' et 'Ainf'.
- Attache B : surface composée de deux pièces nommées 'Bsup' et 'Binf'.
- Renfort intérieur encastré dans le longeron et le moteur. Épouse parfaitement les contours du longeron et interaction 'sans frottement' utilisé (décollement autorisé).

A noter que les attaches, la pièce intérieure et l'outil ont été réalisées en 'Analytic Rigid' car les formes géométriques sont suffisamment simples, cela permet d'avoir des courbures parfaites et non discrétisées et de les considérer infiniment rigides.

### 6.2.2 Comportement du matériau

Le matériau utilisé pour le longeron par optimum tracker est l'acier S390G.

Ce matériau présente les caractéristiques suivantes [32] :

TABLE 8. Caractéristiques mécaniques de l'acier S390G

E (MPa)	$\nu$	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_m$ (MPa)	A%
200000	0.3	390	460	0.16

Avec E le module d'Young,  $\nu$  le coefficient de poisson,  $\sigma_0$  la limite d'élasticité,  $\sigma_m$  la résistance à la traction et A% l'allongement à la rupture.

Pour la partie plastique, nous avons choisi une loi puissance du type  $\sigma = \kappa \varepsilon^n$  avec  $\sigma$  la contrainte équivalente, et  $\varepsilon$  la déformation équivalente du matériau. Connaissant deux points du Tableau 1, nous en avons alors déduit les paramètres  $\kappa$  et  $n$ . Nous avons ainsi entré 9 couples de valeurs et le logiciel relie ensuite les points par des droites

Cela nous donne ainsi la loi donnée par la figure 36.

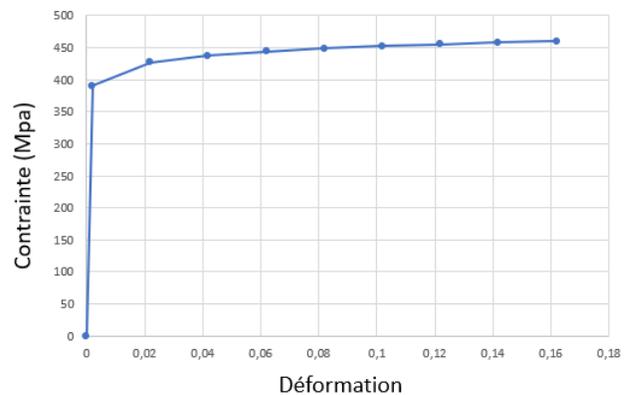


FIGURE 36. Loi de comportement de l'acier S390G

Nous allons maintenant décrire les différentes interactions que nous avons modélisé entre les pièces.

### 6.2.3 Conditions aux limites

Pour modéliser les différents contacts entre les pièces, nous avons défini deux types d'interactions :

- L'interaction 'sans frottements', qui laisse les pièces glisser les unes par rapport aux autres, est utilisée pour le contact pièces d'attache/longeron et intérieur/longeron.
- L'interaction 'collage' qui fixe deux pièces entre elles, est utilisée pour le contact outil/longeron.

De plus, deux types de conditions limites ont été définies :

- Toutes les pièces d'attache et le renfort intérieur ont été considérées comme encastrées.
- L'outil est piloté en rotation jusqu'à un angle limite, ce qui permettra d'entraîner la rotation du longeron, et nous analyserons le moment de réaction résultant.

### 6.2.4 Maillage utilisé

Pour observer la déformation du longeron nous avons réalisé une analyse de sensibilité sur la finesse du maillage.

Il fallait que le maillage soit :

- Ni trop grossier pour avoir des résultats précis.
- Ni trop fin pour pouvoir converger vers la solution en un temps raisonnable.
- Adaptatif, pour optimiser le temps de calcul : cela nous permet d'avoir plus de détails aux endroits où les contraintes seront les plus fortes (coins du longeron), tout en gagnant du temps de calcul sur les endroits moins sensibles.

Nous avons donc réalisé une étude de convergence en augmentant progressivement le nombre d'éléments dans l'épaisseur pour vérifier que la solution numérique correspondante au maillage choisis est raisonnablement proche d'une solution théorique.

A noter que le maillage que nous avons sélectionné utilise des hexaèdres linéaires à intégration réduite visibles sur la figure 37.

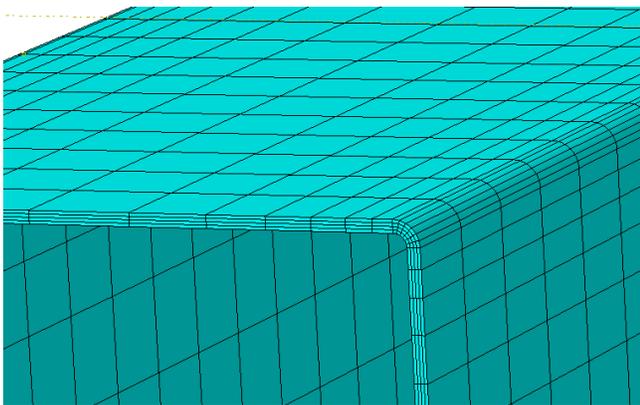


FIGURE 37. Maillage choisi pour les simulations

## 6.3 Simulations et résultats

L'objectif de cette étude est de fournir à Optimum Tracker des données leur permettant de choisir la meilleure solution d'entraînement pour éviter :

- Le flambement, c'est à dire la ruine de la structure, qui pourrait engendrer une détérioration des panneaux.
- la plastification, c'est à dire la déformation irréversible de la structure, dans une moindre mesure car elle n'engendre pas de destruction du longeron mais nécessite tout de même une maintenance.

### 6.3.1 Choix de la solution d'attache sans renfort intérieur

La première double simulation a pour but de comparer la résistance du longeron pour les deux systèmes d'attache A et B sans renfort intérieur.

Nous avons donc simulé une torsion du longeron de 0,15 radian (environ 8.6 degrés) à l'extrémité de la pièce (1 mètre, suffisant pour couvrir les angles atteignables en cas de forte tempête) et extrait les valeurs du moment résultant en fonction de l'angle de torsion pour chaque système d'attache.

On obtient donc les champs de contraintes correspondant à un angle de 8,6° sur les figures 38 et 39 ainsi que les courbes sur la figure 40.

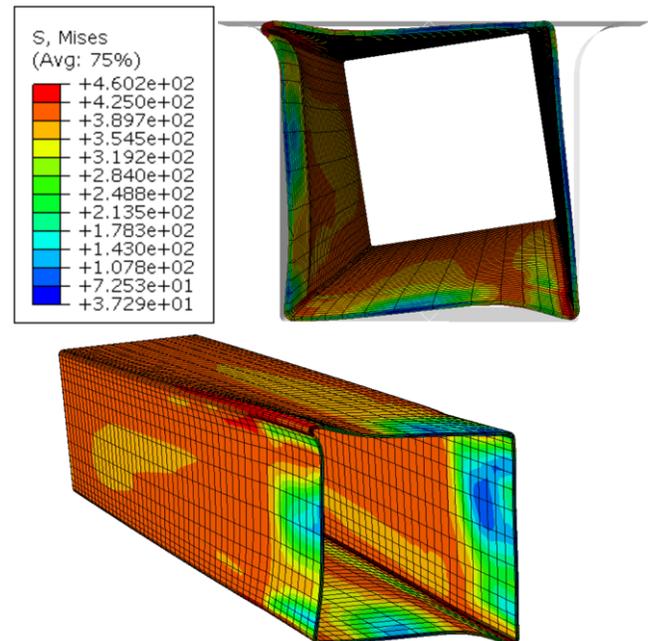


FIGURE 38. Attache A : champ de contraintes de von Mises pour un angle de 8,6°

La théorie des poutres donne une relation Couple-Angle linéaire (figure 40). Les simulations numériques avec les attaches A et B montrent toutes les deux une perte de linéarité de cette courbe due à la fois aux non-linéarités du matériau (plastification) et à la gestion du contact. Pour l'attache A, la perte de linéarité est très précoce (0.3°). La matière du longeron n'est pas assez maintenue sur la partie supérieure et s'engouffre dans la cavité supérieure Gauche de l'attache A (Figure 38) entraînant par la même occasion une plastification du matériau. L'attache B offre un meilleur maintien du longeron et la perte de linéarité plus tardive (1.7°) est essentiellement due à la plastification du matériau. La chute du moment observée par la suite à 4,9° et 5,9° respectivement pour les attaches A et B est due à un phénomène de flambement des parois du longeron qui peuvent conduire à la ruine de la structure. Le système d'attache A est donc moins pertinent que le système d'attache B.

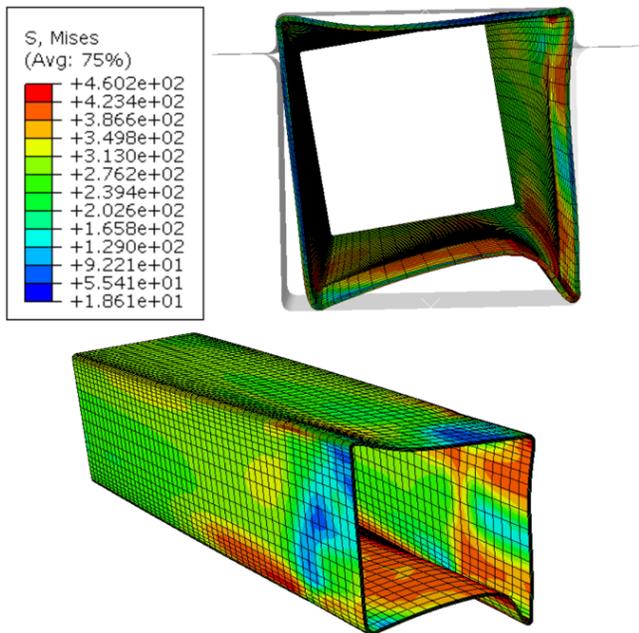


FIGURE 39. Attache B : champ de contraintes de von Mises pour un angle de  $8,6^\circ$

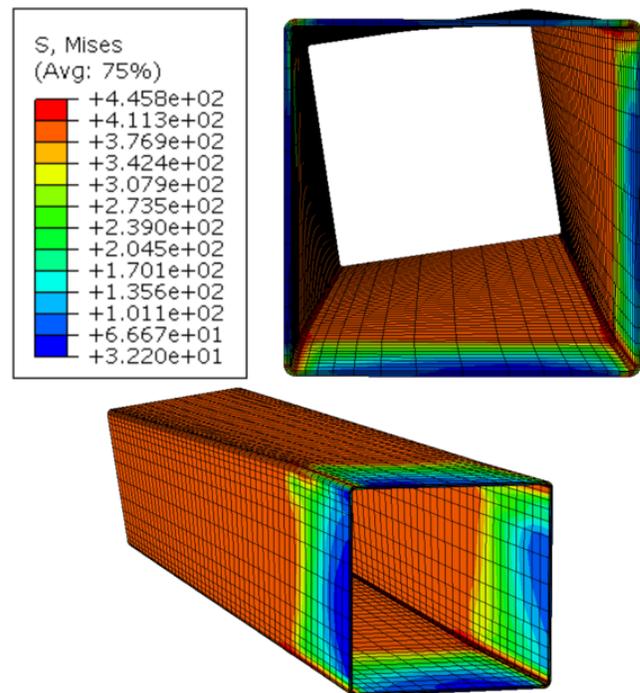


FIGURE 41. Champ de contraintes de von Mises du longeron pour un angle de  $8,6^\circ$  avec renfort intérieur

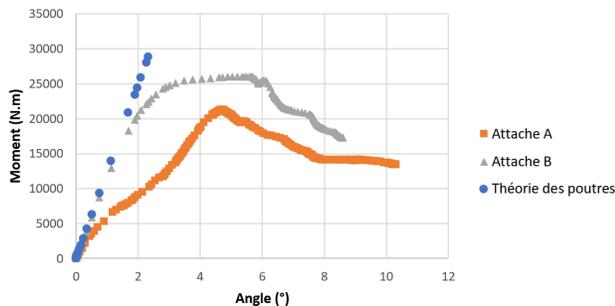


FIGURE 40. Résultats et comparaison sans renfort intérieur

### 6.3.2 Renfort de la solution d'attache avec la pièce intérieure

La deuxième double simulation a pour but de voir dans quelle mesure un renfort intérieur permet de renforcer le comportement de la structure toujours avec les deux systèmes d'attache.

On se place donc dans les mêmes conditions que la double simulation précédente en ajoutant simplement le renfort intérieur.

On obtient donc les champs de contraintes correspondant à un angle de  $8,6^\circ$  sur les figures 41 ainsi que les courbes sur la figure 42.

On observe différents résultats :

- Pour les deux systèmes d'attache avec renfort intérieur, le longeron se comporte de la même manière. Nous avons donc réalisé une troisième simulation en enlevant le système d'attache mais en gardant uniquement le renfort intérieur. Et on obtient encore la même courbe.

- Il y a plastification pour un angle limite supérieur à celui obtenu sans renfort.

- On n'observe pas de flambement de la structure, avec

une courbe moment/angle toujours croissante.

## Interprétation et conclusion

Les différentes configurations étudiées dans ce projet nous permettent de conclure sur l'intérêt du renfort intérieur pour renforcer la structure. Ce renfort retarde l'instant de la déformation irréversible (plastification) et permet d'éviter tout flambement des parois du longeron. On peut par ailleurs se poser la question de l'utilité du système d'attache externe, puisqu'il ne change pas le comportement global de la structure et représente un coût supplémentaire.

Nous avons réalisé une estimation de ce coût pour une centrale solaire de taille moyenne (1500 trackers) : en supposant qu'une attache coûte environ 25 euros (prix de la fonte, du traitement de surface, de la main d'oeuvre, des boulons tout en considérant le prix du moule de chaque pièce amorti par le nombre d'attaches), on peut compter sur une économie d'environ 40 000 euros par centrale solaire. On peut cependant noter qu'il faudrait prendre en compte le prix de la main d'oeuvre pour attacher le renfort intérieur au moteur pour avoir une solution et donc une estimation viable de l'économie totale réalisée.

Ainsi, une solution possible serait alors d'attacher simplement le renfort intérieur au moteur en oubliant les systèmes d'attache A et B.

Le groupe 5 a pu nous communiquer la valeur d'angle limite de torsion du longeron à 1m correspondant aux rafales de vents les plus violentes que la structure peut subir. Pour la valeur récupérée de  $1,4^\circ$ , les courbes précédentes nous

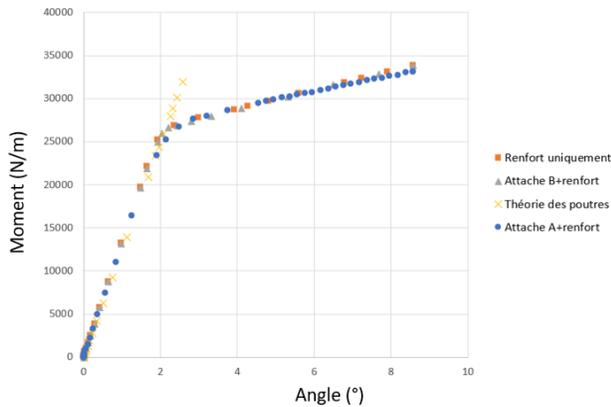


FIGURE 42. Résultats et comparaison avec renfort intérieur

permettent de dire que les risques de flambement et de plastification sont faibles (alors que sans le renfort on observe une plastification pour les deux systèmes d'attache), ces problèmes intervenant plutôt vers 2,2 degrés.

Cela conforte donc la pertinence de la solution d'entraînement comprenant uniquement le renfort intérieur attaché au moteur.

A noter que nous avons également réalisé toutes les simulations précédentes en rajoutant un jeu de 4mm entre la pièce intérieure et le longeron, et un jeu latéral de 2mm entre la pièce d'attache et le longeron (ce qui est sans doute plus proche de la réalité). Cela ne change pas l'allure générale des courbes, on observe simplement un départ plat en plus correspondant à l'avant-contact (comme on le voit sur la figure 43).

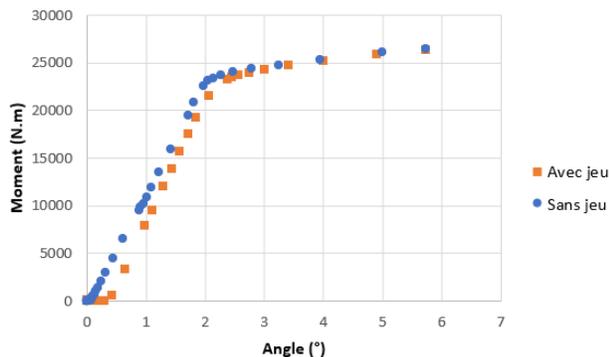


FIGURE 43. Résultat et comparaison avec et sans jeu

De plus, nous avons vérifié la convergence de la solution expérimentale vers la solution théorique en raffinant le maillage (5 éléments dans l'épaisseur au lieu de 4), et cela modifie que très légèrement les champs de contraintes. Par contre en utilisant 6 éléments quadratiques dans l'épaisseur, la forme du champ de déformation est modifiée et le flambement intervient plus tôt pour la configuration avec attache sans renfort intérieur. Cela ne modifie cependant pas les conclusions car la solution privilégiée (renfort intérieur uniquement) n'est pas impactée par ce phénomène. A noter que l'utilisa-

tion d'éléments quadratiques pose beaucoup de problèmes de convergence pour ce genre de configuration où la gestion du contact est importante.

Le résultat obtenu est rassurant, mais doit être nuancé par plusieurs hypothèses dont l'impact n'a pas forcément été étudié par manque de temps ou de moyens à disposition. Nous pouvons citer par exemple l'impact du traitement thermique du matériau sur la loi de comportement, les pièces d'attaches qui ont été modélisées avec des formes géométriques simples et en infiniement rigide, l'absence de prise en compte des phénomènes dynamiques d'oscillations et bien sûr les erreurs dues à la discrétisation.

Malgré cela, les résultats obtenus proposent à Optimum Tracker une solution d'attache à la fois plus résistante et moins coûteuse.

Nous nous sommes donc intéressés aux déformations possibles du longeron sous l'effet du vent, le groupe suivant s'intéressera lui, aux détériorations des cellules photovoltaïques elles-mêmes.

## 7. Analyse des contraintes en service dans une cellule PV

### Participants

Pierre BEAULIEU, Marius MOULLE

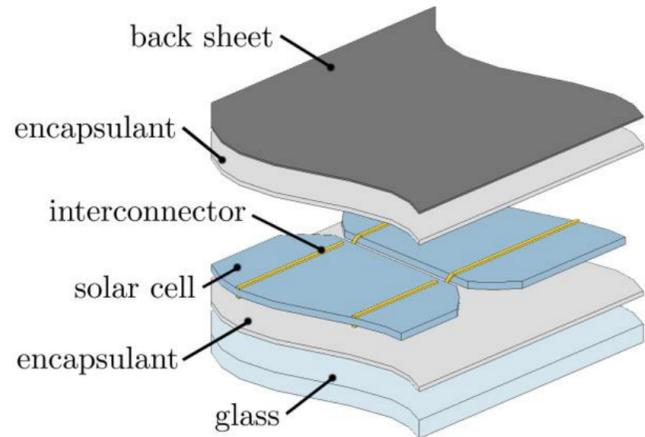
### Abstract

Nous proposons ici d'aborder la résistance et la performance des modules PV à une échelle inférieure de celle des travaux précédents. Un module PV est une structure multimatériaux complexe dans laquelle le comportement thermomécanique de chacun des matériaux peut avoir un impact sur l'apparition de défaillances (micro-fissures) lors de la mise en forme (lamination) ou de la tenue en service (cycles mécaniques ou thermiques) des panneaux PV. Dans cette étude nous proposons un modèle capable d'évaluer les niveaux de contraintes au sein d'un module PV soumis à un cycle thermique caractéristique de son utilisation en service. Cela nécessite au préalable des essais expérimentaux sur les différents matériaux de la cellule, en particulier le backsheet et l'encapsulant, pour en déterminer les propriétés thermomécaniques. Les essais expérimentaux révèlent d'une part une très forte sensibilité à la température et une très faible sensibilité à la vitesse de déformation du module de Young de ces deux éléments, d'autre part une forte sensibilité du coefficient de dilatation thermique à la géométrie du modèle expérimental et aux conditions limites. Les montages expérimentaux doivent donc limiter les contraintes limites pour avoir des résultats applicables à un grand nombre d'études. La simulation révèle qu'il faut se rapprocher au mieux du vrai comportement des matériaux pour obtenir des résultats fiables, notamment en prenant en compte la viscoélasticité. Les contraintes sont localisées au niveau des fils de cuivre. Le silicium peut se fissurer dans cette zone. Le modèle établi peut être utilisé pour étudier un cycle thermomécanique comme lors de la lamination.

### Introduction

Un panneau solaire utilisant la technologie du silicium cristallin construit en 2020 a une durée de vie d'environ 30 ans et une ferme solaire devient rentable économiquement au bout de 5 ans environ. Une ferme solaire est soumise à de fortes perturbations comme des tempêtes, des pluies, de fortes variations de température ... Le panneau solaire est alors sollicité mécaniquement et thermiquement de manière cyclique ce qui requiert l'étude d'un agencement optimal dans la ferme solaire et le bon dimensionnement de la structure mécanique d'un panneau solaire. Il devient alors aussi nécessaire d'étudier l'impact de ces contraintes au niveau de la cellule photovoltaïque qui détermine directement le rendement et la durée de vie d'un panneau solaire. Les cellules photovoltaïques (PV) à base de silicium cristallin sont les briques élémentaires du module PV. Ces unités de conversion d'énergie sont connectées en série avec des rubans en cuivre étamé pour former des chaînes. Elles sont ensuite encapsulées

lors de la lamination avec des couches protectrices en verre et en polymère pour résister aux dégradations environnementales (voir **figure 44**).



**FIGURE 44.** Structure d'une cellule PV

La cellule PV est mise en forme par le procédé de lamination : on vient compresser et chauffer de manière uniforme les différentes couches de matériaux. La cellule solaire en silicium est ainsi enchâssée au sein d'une couche d'encapsulant puis de verre en face avant et d'un backsheet en face arrière (Rahmoun, s. d.). Un des facteurs limitant la durée de vie est la dégradation de la couche mince de silicium. Ces dégradations sont étudiées via des cyclages thermiques. C'est l'effet de ce cyclage sur la cellule PV que nous étudierons.

La cellule PV étant composée de plusieurs matériaux de comportement thermomécanique et de coefficients de dilatation différents, des contraintes vont apparaître localement aux interfaces de la plaque de silicium, d'une épaisseur de l'ordre de 100 microns, lors des différents cycles thermiques (lamination ou cycle thermique en service). Elle sera ainsi soumise à des contraintes localisées pouvant provoquer des microfissures.

Cet article présente une manière de mettre en place un modèle et une résolution numérique pour identifier ces zones de fortes contraintes lors d'un cycle thermique comme l'alternance jour/nuit. Pour cela, il est primordial de caractériser les propriétés des matériaux pour alimenter le modèle puis modéliser numériquement la géométrie et les conditions aux limites. Afin de mettre en évidence l'importance de ces propriétés thermomécaniques, nous proposons dans ce projet de comparer deux configurations : la première avec des propriétés thermoélastiques uniquement (configuration la plus largement considérée dans la littérature) et la seconde tenant compte du caractère viscoélastique de l'encapsulant et du backsheet. Ce projet comporte également un volet expérimental qui a consisté à caractériser les propriétés thermomécaniques des constituants de la cellule PV, notamment celles de l'encapsulant et du backsheet, les autres étant fournies par la littérature (Rahmoun, s. d.).

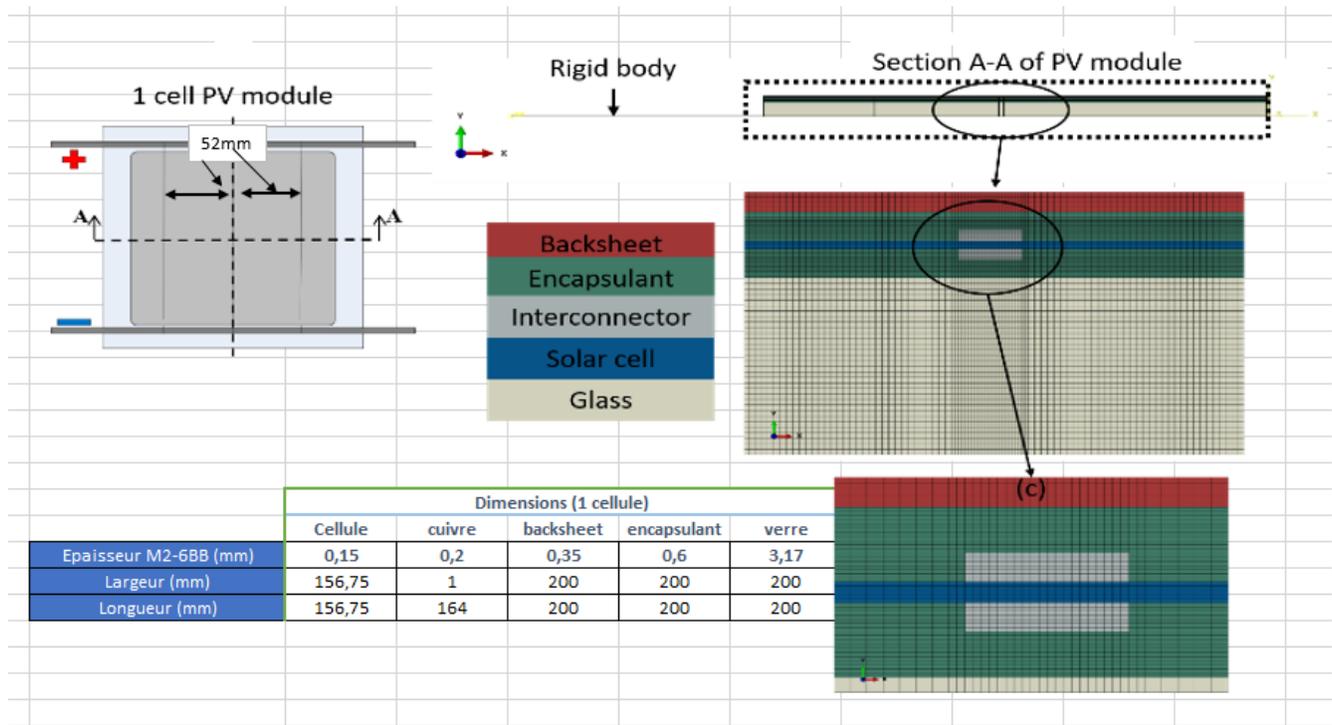


FIGURE 45. Géométrie du modèle 2D

### 7.1 Mise en place du modèle de la cellule PV

Nous avons considéré le modèle éléments finis 2D de la cellule PV qui représente une tranche de demi-cellule **figure 45**. Ce modèle est une approximation en déformations planes visant à analyser l'évolution de la déformée du module PV et des contraintes internes induites à toutes les étapes de la vie des modules PV notamment lors d'un cycle thermique. Nous avons travaillé sur une cellule du marché aux dimensions données **figure 45**. Les épaisseurs de chacune des couches de matière sont indiquées en mm.

Les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel éléments finis Abaqus, développé par Dassault System.

Nous avons d'abord eu besoin de connaître les propriétés des différents matériaux pour alimenter le modèle. Ces propriétés peuvent être trouvées dans la littérature ou grâce aux données d'une doctorante travaillant sur ce sujet.

Nous avons eu besoins des propriétés suivantes des matériaux à différentes températures :

1. du module d'Young ;
2. du coefficient de Poisson ;
3. du coefficient de dilatation thermique ;
4. de la conductivité thermique ;
5. de la densité ;
6. de la capacité thermique massique.

La plupart de ces propriétés nécessitant la mise en place d'essais de caractérisation assez lourds, nous nous sommes focalisés dans ce projet sur la détermination du module de Young et du coefficient de dilatation thermique (CTE) pour le

backsheet et l'encapsulant. Les autres propriétés sont issues de la littérature ou des essais de caractérisation menés par la doctorante travaillant sur ce projet (Rahmoun, s. d.).

#### 7.1.1 Géométrie considérée

L'aspect multi-matériaux complexe de la cellule PV impose de réaliser un maillage avec des éléments quadrangles en les raffinant au niveau des interfaces entre les différents matériaux pour optimiser la précision et le temps de calcul **figure 45**.

Ce modèle 2D simplifié s'affranchit donc des éventuels effets de bord tridimensionnels qui nécessiteraient un modèle 3D bien trop coûteux compte tenu des hétérogénéités d'épaisseurs par rapport à la taille du module. Cette hypothèse est acceptable car nous voulons analyser les concentrations de contraintes proches du centre de la cellule. Nous prévoyons une concentration de contraintes à l'interface cuivre / encapsulant / silicium au sein de la cellule. Les modules de Young de ces matériaux sont différents et la déformation est une fonction continue dans l'espace donc, d'après la loi de Hook, nous nous attendons à des sauts de contraintes aux interfaces entre des matériaux différents. La géométrie choisie est donc pertinente pour l'étude.

### 7.1.2 Le comportement des matériaux

Les matériaux du module sont supposés isotropes avec des propriétés élastiques linéaires mais variables en fonction de la température dans un premier temps.

Pour se rapprocher de la réalité, nous avons par la suite considéré que l'encapsulant et le backsheet étaient isotropes avec des propriétés viscoélastiques linéaires. Les données de la littérature associées à la base de donnée du CEMEF ont permis d'alimenter le modèle en terme de propriétés viscoélastiques et de valeurs de coefficients de dilatation. Le silicium est considéré comme anisotrope.

### 7.1.3 Chargement et conditions aux limites

De par la symétrie de la structure et du chargement, nous ne modélisons que la moitié du module en appliquant une symétrie à l'extrémité gauche du module. La cellule repose sur un outil rigide et est soumise à la gravité. On applique en surface du module un cycle thermique **figure 46**.

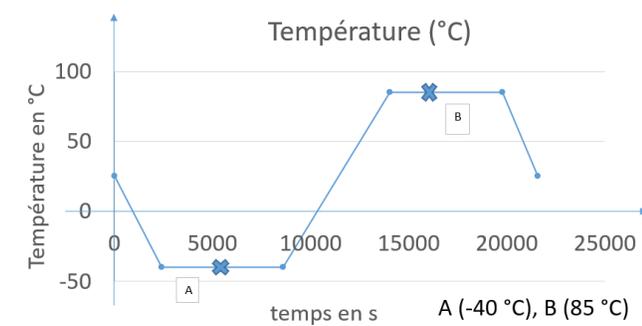


FIGURE 46. Cycle thermique

### 7.1.4 Résolution numérique et données de sortie

Nous avons renseigné la géométrie de la cellule, les caractéristiques des matériaux et les conditions aux limites dans le logiciel ABAQUS développé par Dassault System. Nous avons réalisé un maillage de quadrangles quadratiques en raffinant au niveau des fils de cuivre. L'objectif de cette étude est d'étudier la répartition des contraintes dans la cellule et la déformation de la cellule lors d'un cycle thermique. Nous avons donc demandé en sortie les champs de déplacement U pour obtenir la déformée, le champ de contraintes dans la direction x (S11), la première composante du tenseur des contraintes, pour localiser les contraintes en traction / compression.

## 7.2 Démarche expérimentale pour caractériser les propriétés des matériaux

La cause principale de déformation des modules PV est l'assemblage de couches de matériaux caractérisés par des propriétés thermique et mécanique différentes. Cet assemblage va principalement subir des dilatations thermiques hétérogènes dans l'épaisseur lors des phases de lamination, et de cycles thermiques en fonctionnement. Les lois utilisées dans le modèle seront donc des lois de thermoélasticité ou de thermo-viscoélasticité. Pour identifier au mieux ces lois dans le logi-

ciel de calcul par éléments finis, nous avons dû réaliser des essais mécaniques et thermiques sur le backsheet et l'encapsulant (EVA). Avec ces essais, nous avons déduit le module de Young et le coefficient de dilatation thermique de ces deux matériaux. La viscoélasticité avait été étudiée par une doctorante du CEMEF avec des essais DMA que nous n'avons pas eu le temps de refaire. Les essais de dilatation thermique sont complexes car les matériaux étudiés sont des films extrudés de PVF/PET/PVF qui peuvent être caractérisés par une forte anisotropie. Ces derniers vont se contracter et se dilater avec la température. Par conséquent, nous avons étudié un nouveau dispositif de dilatation « en croix » avec des ressorts dont le rôle est d'empêcher le matériau de trop se déformer pendant la dilatation, ce qui permet d'avoir des résultats exploitables par corrélation d'images sur une large gamme de température.

### 7.2.1 Essais de traction et résultats

**Protocole** Pour réaliser des essais de traction, il faut en premier lieu découper des éprouvettes normalisées dans les plaques de backsheet et d'encapsulant (EVA), et réaliser un motif aléatoire, appelé mouchetis (voir Annexe 1.5), de peinture noire sur fond blanc afin de suivre la déformation de l'éprouvette en surface par corrélation d'image. Nous aurions pu utiliser les capteurs de déplacement de la machine, mais nous avons remarqué *a posteriori* qu'ils n'étaient pas fiables, dans le sens où la complaisance de la machine induit un déplacement supplémentaire indépendant de celui du matériau. Le post-traitement des images des caméras nous permet d'obtenir le gradient de déformation en surface d'éprouvette, la machine nous donne la force résultante qui nous permet ensuite de calculer la contrainte. Les résultats obtenus en utilisant l'hypothèse de conservation du volume et celle d'isotropie transverse étant identiques, le choix a été fait de déterminer la contrainte vraie avec l'hypothèse de conservation du volume dans les courbes proposées (voir Annexe 1.5, Figure 56). Les essais ont été réalisés à différentes températures et à différentes vitesses de déformation pour étudier l'impact de ces facteurs sur le comportement matériau.

**Résultats de l'essai de traction** La **figure 47** présente le comportement mécanique du backsheet et de l'encapsulant en traction pour différentes vitesses de déformation et températures. On observe une forte sensibilité à la température pour les deux matériaux et une sensibilité moindre à la vitesse de déformation pour l'encapsulant. Les modules de Young ont pu être estimés à partir de ces essais.

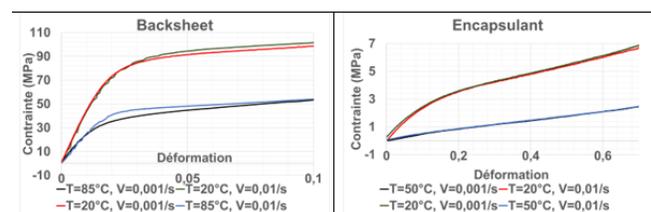


FIGURE 47. Essai de traction

### 7.2.2 Essais de dilatation et résultats

**Protocole** L'objectif de cette partie est de comparer deux méthodes de caractérisation du coefficient de dilatation thermique dans le cas du backsheet. Les différents dispositifs expérimentaux utilisés sont décrits en Annexe 1.5, Figure 55. Le premier, assez classique, utilise la machine de traction en imposant une force nulle sur le mors supérieur afin de laisser le matériau se dilater librement. Il correspond aux essais 1 et 7. L'essai 1 prend une éprouvette usinée dans le sens du laminage, l'essai 7 dans le sens orthogonal, ce qui permet de déterminer si le matériau est isotrope ou non. Dans la seconde campagne d'essais, un nouveau dispositif expérimental est utilisé. Ce dernier utilise des ressorts pour empêcher les films étudiés de se recroqueviller lors du chauffage. L'essai 2 a été réalisé à ressorts tendus. Comme les résultats obtenus étaient très différents de l'essai 1, nous avons essayé d'utiliser le dispositif sans les ressorts dans l'essai 5. Le dispositif servait alors simplement à maintenir l'éprouvette dans un plan orthogonal aux caméras. Tous ces essais ont été réalisés dans un four avec une rampe de température.

**Résultats de l'essai de dilatation** La figure 48 présente les courbes déformation-température normalisées en prenant comme référence  $T_0=53^\circ\text{C}$  et la déformation à cette température, afin de pouvoir comparer les essais entre eux.

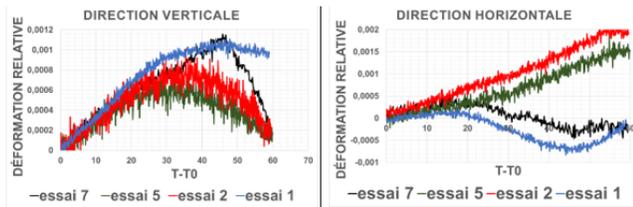


FIGURE 48. courbes déformation-température du backsheet pour les différents essais

Nous remarquons que le matériau présente des coefficients de dilatation thermique différents avant et après la température de transition vitreuse  $T_\alpha$ , située autour de  $75^\circ\text{C}$ . Avant cette température, les évolutions de déformation sont assez identiques pour tous les essais. Après  $T_\alpha$ , nous voyons sur la Figure 48 que la relaxation des contraintes résiduelles dues au laminage du backsheet lors de sa fabrication (orientation des chaînes dans une direction privilégiée) est différente dans les deux directions étudiées (essais 1 et 7). Ce résultat montre une anisotropie du matériau lorsque cette température de transition est dépassée. Ce résultat va permettre d'enrichir le modèle du CEMEF qui ne tenait pas compte de cette anisotropie au delà de la température de transition vitreuse  $T_\alpha$ . D'autre part, les conditions limites de maintien de l'éprouvette ont une très grande influence et l'impact des ressorts n'est pas négligeable puisque les résultats sont très différents selon qu'on est en dilatation libre (essais 1, 5 et 7) ou contraint via les ressorts (essai 2). Les coefficients de dilatation thermique pour les différents essais sont présentés en annexe A.3. Nous n'avons pas réussi à comprendre pourquoi l'essai libre sur le dispositif (essai 5)

ne donnait pas le même résultat que les essais sur la machine de traction (essais 1 et 7). Une première hypothèse envisagée est que la machine de traction impose en réalité une force non nulle (inférieure à 3 Newtons), alors que l'expérience libre sur le dispositif n'impose pas de contrainte aux bords. Une autre hypothèse est que la géométrie de l'éprouvette pourrait avoir un impact important sur sa courbe de dilatation surtout pour la composante horizontale dans le cas de l'éprouvette rectangulaire. Une étude complémentaire sera menée dans le futur afin de mieux appréhender la dilatation de ces films multicouches surtout pour la composante horizontale.

### 7.3 Analyse des résultats de la simulation numérique et conclusions

Nous avons réalisé deux simulations : une avec des matériaux aux propriétés thermoélastiques uniquement et l'autre avec l'encapsulant et le backsheet en considérant des propriétés thermoviscoélastiques. Dans les deux simulations, le silicium est anisotrope et les autres matériaux sont considérés comme isotropes.

#### 7.3.1 Comparaison entre les deux simulation

**Répartitions des contraintes** La figure 49 présente la répartition des contraintes S11 au coeur du module, i.e. centrée sur la plaque de silicium.

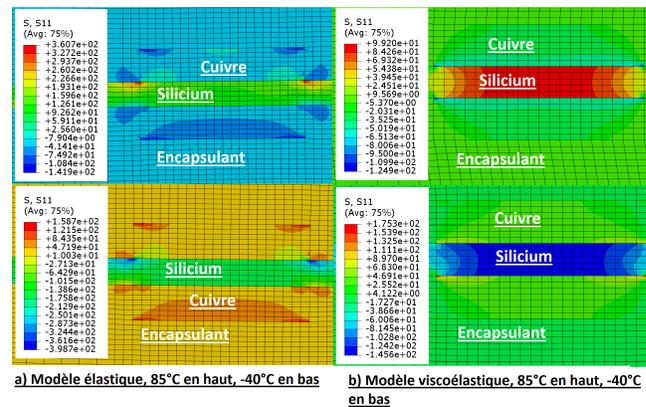
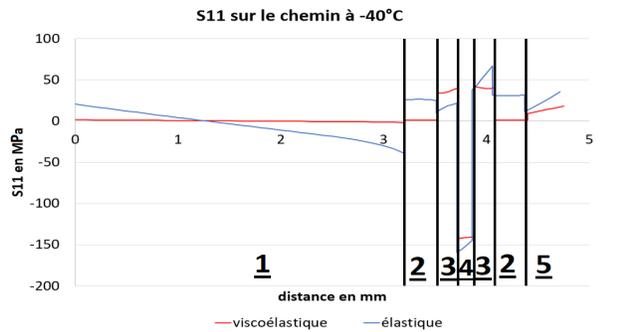


FIGURE 49. Champs S11 au niveau des fils de cuivre

Nous observons que les contraintes sont hétérogènes et localisées au niveau de l'interface cuivre/encapsulant/silicium. La répartition reste la même dans les deux simulations. La différence entre les deux simulations réside dans l'intensité des contraintes. Sur le palier à  $-40^\circ\text{C}$ , le cuivre et l'encapsulant sont en traction tandis que le silicium est en compression.

L'encapsulant n'encaisse pas de fortes contraintes de par sa capacité à se déformer facilement. Sur le palier à  $85^\circ\text{C}$ , le silicium est en traction tandis que le cuivre et l'encapsulant sont en compression. Le silicium subit les plus fortes contraintes. Si des microfissures doivent apparaître, ce sera entre les fils de cuivre notamment à l'interface cuivre/encapsulant /silicium où les contraintes sont très hétérogènes et localisées.



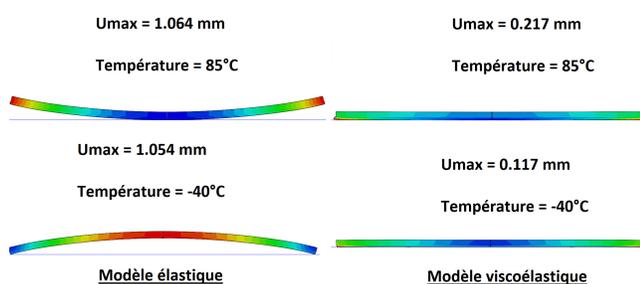
**1:** Verre, **2:** Encapsulant, **3:** cuivre, **4:** silicium, **5:** Backsheet

**FIGURE 50.** S11 sur le chemin vertical aux fils de cuivre

**Intensité des contraintes** Nous avons défini un chemin vertical passant par le milieu des fils de cuivre et traversant complètement la tranche de la cellule. Nous avons tracé en Figure 7 la contrainte S11 sur ce chemin sur les paliers de température à 85°C et -40°C. Nous n'analyserons que la courbe à -40°C.

L'évolution des contraintes est très hétérogène **figure 50**. On observe des sauts de contrainte aux interfaces entre les différents matériaux ce qui est en accord avec les prédictions faites.

L'écart entre les deux modèles est visible sur la différence d'intensité des contraintes. Cet écart est dû à la prise en compte de la relaxation des matériaux due à la viscoélasticité. On remarque notamment que le modèle thermoélastique simple a tendance à surestimer les contraintes dans le verre et l'encapsulant. Les contraintes dans le cuivre sont également altérées mais de manière distincte de part et d'autre de la couche de silicium. Cela dépend également de la courbure de la cellule qui peut être assez importante comme nous le verrons dans la section suivante. Quoi qu'il en soit, ces calculs démontrent l'importance de tenir compte de la viscoélasticité dans le comportement de l'encapsulant et le backsheet.



**FIGURE 51.** Comparaison des déformées

**Déformée de la cellule** La viscoélasticité joue un rôle important sur la déformée de la structure **figure 51**. La flèche est divisée par 10 dans le cas du modèle viscoélastique.

## Conclusion

Cette étude a permis de montrer que les contraintes lors d'un cycle thermique sont localisées au niveau des fils de cuivre, là où plusieurs matériaux de propriétés différentes sont en contact. Si des microfissures doivent apparaître, c'est dans ces zones. Il serait intéressant d'utiliser ce modèle pour calculer les contraintes résiduelles après le procédé de lamination, durant lequel la température monte bien au-delà de 85°C, température maximale lors des cycles thermiques étudiés. Le modèle établi pourra alors être étendu à des cycles mécaniques pour étudier les effets thermomécanique du vent et du soleil sur le panneau entier puis sur la ferme solaire dans sa globalité.

Cette étude a aussi montré qu'il faut essayer de se rapprocher au mieux du comportement réel des matériaux, en prenant en compte la viscoélasticité notamment, pour obtenir des résultats plus précis vis-à-vis du type de chargement appliqué à notre module PV.

## 8. Conclusion générale

La durée de vie des panneaux solaires garantie par les constructeurs est de l'ordre de vingt ans. On peut même espérer pouvoir pousser cette durée de vie bien au-delà, c'est pourquoi les trackers doivent pouvoir eux aussi être le plus durables possible. Pour cela, ils doivent endurer toutes sortes de conditions environnementales dont il faut étudier l'impact en amont, car les champs photovoltaïques sont si immenses qu'il est la plupart du temps inenvisageable financièrement de faire des modifications lourdes sur l'ensemble des trackers une fois installés.

Afin d'étudier les dégradations liées aux rafales de vent nous avons réalisé une étude multiphysique et multiéchelle. Nous avons d'abord proposé une stratégie d'adaptation à l'échelle de la centrale entière ; à l'aide de modèles prédictifs nous sommes en mesure d'anticiper plus efficacement les potentielles rafales de vent et déclencher la mise en sûreté de la centrale. Pour préserver au mieux les panneaux solaires pendant ces rafales nous nous sommes servis d'une étude aérodynamique pour déterminer la meilleure position de sécurité pour les rangées de tracker et pour fournir à Optimum Tracker des outils pour effectuer des études complémentaires.

Cela nous a aussi permis de déterminer les contraintes à l'échelle d'un unique panneau solaire. Nous nous sommes alors posé la question de l'élasticité des trackers et de l'efficacité des systèmes d'amortissements implémentés par Optimum Tracker afin d'éviter une résonance dévastatrice. Nous avons ensuite voulu vérifier que ces contraintes ne risquent pas de menacer l'intégrité des longerons en réalisant une étude structurelle globale et locale qui nous a permis de mettre en évidence que des renforts peuvent être nécessaires dans certaines conditions et de proposer des solutions techniques pour ces renforts. Enfin nous nous sommes penchés sur la structure des modules photovoltaïques et nous avons proposé un modèle permettant d'analyser les contraintes locales dans les différents matériaux du module en fonction d'un cycle de chargement thermique. Ce type de modèle peut être généralisé pour tenir compte des contraintes induites par le procédé de fabrication des modules ou encore pour étudier les contraintes induites par un chargement mécanique complémentaire. Ce type d'analyse local peut s'avérer essentielle pour améliorer le rendement et la durée de vie des modules PV.

Ainsi, à l'aide de l'ensemble de notre étude, nous sommes en mesure de proposer un certain nombre de solutions techniques mais aussi de pistes de travaux complémentaires pour assurer la pérennité des centrales photovoltaïques dans un objectif de viabilité économique et environnementale de l'énergie solaire sans laquelle la transition énergétique ne saurait être faite.

## Références

- [1] La cop 21. *Gouvernement.fr*, 2015.
- [2] Objectif zéro émission nette de co2 d'ici 2050. *Ministère de la Transition écologique*, 2019.
- [3] Bilan Électrique 2019. *RTE France*, 2020.
- [4] Germany 2020 Energy Policy Review. *IEA*, 2020.
- [5] Rapport annuel 2018 - Observatoire mondial de l'action climatique non-étatique. *Climate Chance*, 2018.
- [6] Electricity Net Generation. *EIA*, 2020.
- [7] Christian Ngô. Impacts de l'énergie sur l'environnement - illustration sur quelques exemples. *Techniques de l'Ingénieur*, 2017.
- [8] Abdelilah Slaoui. Électricité photovoltaïque - principes. *Techniques de l'Ingénieur*, 2013.
- [9] Dominique Grand, Christian Le Brun, and Vidil Roland. Intermittence des énergies renouvelables et mix électrique. *Techniques de l'Ingénieur*, 2015.
- [10] Le photovoltaïque s'invite dans le monde agricole. *Techniques de l'Ingénieur*, 2019.
- [11] Olivier Brasseur. Development and application of a physical approach to estimating wind gusts. *Monthly Weather Review*, 130(7), 2002.
- [12] Hao Wang. A probabilistic approach for short-term prediction of wind gust speed using ensemble learning. *Achievements in the Life Sciences*, 202(1), 2020.
- [13] Roger Koenker and Kevin F. Hallock. Quantile regression. *Journal of Economic Perspectives*, 15(4), 2001.
- [14] Roberto Chávez-Arroyo. Quality assurance of near-surface wind velocity measurements in mexico. *Meteorological Applications*, 22(2), 2015.
- [15] Mohamed Mohandes. A neural network approach for wind speed prediction. *Renewable Energy*, 13(3), 1998.
- [16] Mark Osborne, Bernd Zwingmann, Matthew Browne, and Zachary Taylor. Eliminating catastrophic pv tracker system damage due to extreme wind conditions, 2020. Webinar.
- [17] Giovanni Paolo Reina and Giuliano De Stephano. Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel arrays. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 170 :283–293, November 2017. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.002>.
- [18] Oliver Huerta Chavez, Jorge Díaz Salgado, Christian Ortiz Cil, Jose Carlos Jimenez Escalona, Sergio Guillermo Torres Cedillo, and Ruben Cuamatzi. 3D CFD wind flow analysis technique applied to a parabolic solar tracker for two extreme weather conditions with experimental results and a controller proposition. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, March 2019. DOI : 10.1063/1.5054004.
- [19] Aurèle Goetz and Elie Hachem. Anisotropic boundary layer mesh generation for reliable 3d unsteady rans simulations. *Finite Elements in Analysis and Design*, 170 :2–3, 2020. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.finel.2019.103345>.
- [20] Leonardo Gutiérrez Castillo. *Aerodynamic study of a photovoltaic solar tracker*. PhD thesis, Universitat polytècnica de catalunya, 2016.
- [21] Gandhi. The failure of the tacoma narrows bridge. In *Risk-based Bridge Engineering - 10th NewYork City Bridge Conference*, 2019.
- [22] Girard. Dynamique des structures - techniques d'analyse et d'essai. *Techniques de l'Ingénieur*, 1997.
- [23] Ali Basrah Pulungan. Semi active control of solar tracker using variable position of added mass control. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2019.
- [24] Zachary Taylor. Hybrid pressure integration and buffeting analysis for multi-row wind loading in an array of single-axis trackers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019.
- [25] Wes McKinney et al. Data structures for statistical computing in python. In *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, volume 445, pages 51–56. Austin, TX, 2010.
- [26] John D Hunter. Matplotlib : A 2d graphics environment. *Computing in science & engineering*, 9(3) :90–95, 2007.
- [27] Fabian Pedregosa, Gaël Varoquaux, Alexandre Gramfort, Vincent Michel, Bertrand Thirion, Olivier Grisel, Mathieu Blondel, Peter Prettenhofer, Ron Weiss, Vincent Dubourg, et al. Scikit-learn : Machine learning in python. *Journal of machine learning research*, 12(Oct) :2825–2830, 2011.
- [28] MIT. Abaqus : about shell elements, 2016.
- [29] MIT. Abaqus : eight-node shell element, 2016.
- [30] E. J. Hearn. *Mechanics of materials 2 : An introduction to the mechanics of an elastic and plastic deformation of solids and structural materials*. 1997.
- [31] JPE. *Beam theory : torsion*.
- [32] VOESTALPINE. *Structural steels*.
- [33] Ezhilmathi Krishnasamy. CFD for solar trackers, August 2013. University of Ljubljana, SoHPC.
- [34] Best Research-Cell Efficiencies. *NREL*, 2020.
- [35] Solar Cell Market Analysis By Product And Segment Forecasts To 2022. *Grand View Research*, 2016.
- [36] Global solar photovoltaic module shipments ranking 2019. *Global Data - Power Intelligence Center*, 2019.
- [37] Key World Energy Statistics 2020. *IEA*, 2020.
- [38] Global PV Tracker Market. *IHS Markit*, 2019.

## A. Annexes

### A.1 Les différents types de cellules PV

[34, 35]

**Silicium mono-cristallin** Ces cellules sont formées à partir d'un unique cristal de silicium ce qui leur permet de présenter le meilleur rendement du marché conventionnel. La formation de ce cristal est néanmoins onéreuse ce qui se répercute sur le coût de ce type de capteurs. Ils représentent tout de même une part conséquente du marché avec environ 31% en 2015.

**Silicium poly-cristallin** Ces capteurs sont les plus répandus du marché (64% en 2015), car ils ont un bon rapport qualité-prix. En effet, leur production à partir de plusieurs cristaux de silicium les rend plus abordables. Le rendement<sup>2</sup> s'en trouve diminué mais demeure raisonnable.

**Silicium amorphe** Les cellules silicium amorphe sont conçues avec de très fines couches de silicium non cristallisé. Leur prix est très bas mais le rendement est particulièrement faible ce qui les confine à une utilisation sur des appareils type calculatrice (moins d'1% du marché).

**CdTe** Ces cellules sont formées à l'aide d'une couche de quelques microns de tellure de cadmium. Leur rendement est comparable à celui du silicium poly-cristallin, cependant le tellure est un élément rare et le cadmium présente une toxicité. Elles représentaient en 2015 2% du marché.

**CIGS** Les cellules CIGS sont formées avec de l'indium et du gallium. Il s'agit également de couches minces mais elles ne présentent pas les inconvénients de toxicité des cellules CdTe. Leur rendement dépasse celui du silicium poly-cristallin, elles ont donc un rapport rendement/poids très important. C'est encore une filière en développement mais elle occupait déjà 2.5% du marché en 2015.

### A.2 Fabricants et exploitants de modules solaires

Rang	Fabricant	Nationalité
1	Jinko Solar	Chine
2	JA Solar	Chine
3	Trina Solar	Chine
4	LONGI Solar Technology	Chine
5	Canadian Solar	Canada
6	Hanwha Q Cells	Corée du Sud
7	Risen Energy	Chine
8	First Solar	USA
9	GCL System Integration Technology	Chine
10	Shunfeng Photovoltaic International	Chine

TABLE 9. Principaux fabricants par expédition (2019) [36]

2. Rendement d'une cellule photo-voltaïque : puissance crête produite sur puissance lumineuse reçue.

Rang	Pays	Part du solaire mondial
1	Chine	22.94%
2	Japon	15.53%
3	USA	14.21%
4	Allemagne	11.61%
5	Italie	6.74%
6	Inde	4.31%
7	Royaume-Uni	3.18%
8	France	2.49%
9	Espagne	2.46%
10	Australie	1.89%

TABLE 10. Pays producteurs d'électricité solaire (2016) [37]

### A.3 Marché du tracker simple

**Marché du tracker simple [38]** Le sur-coût occasionné par l'installation d'un tracker par rapport à des supports fixes est de l'ordre de 5% à 7% mais le gain financier sur une exploitation avec tracker varie selon la zone géographique : 0.4% en France, 1.5% en Italie du Nord, 2.9% en Allemagne mais -0.2% en Espagne. Il n'est pas judicieux d'installer ce type de système n'importe où. Ainsi en 2019, 43% des trackers étaient installés aux USA, 26% en Asie et 31% sur l'ensemble de l'Europe, du Moyen-Orient et de l'Afrique.

La commercialisation des trackers se fait par différents types de sociétés. Parmi les leaders du marché il y a plusieurs grands groupes américains qui vendent beaucoup sur leur propre territoire. On peut citer :

- **NEXTracker**, racheté par Flextronics en 2015 pour 330 millions de dollars, 29% du marché en 2018.
- **Array Technologies**, ancien leader, 11% du marché.
- **PV Hardware**, 10 % du marché.

Plusieurs fournisseurs de modules PV proposent désormais leur propre système héliotrope afin d'équiper leurs modules. Plusieurs apparaissent dans le top 10 des producteurs de trackers :

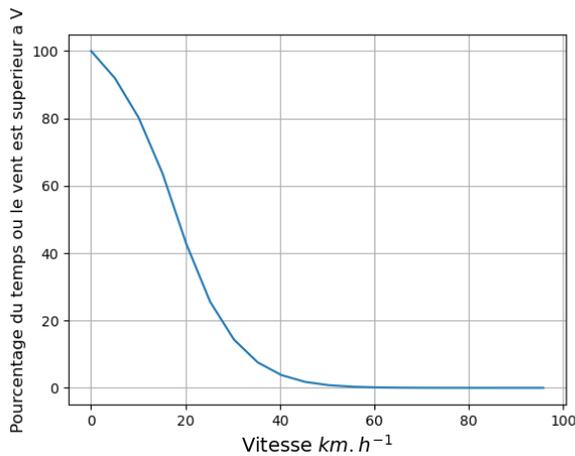
- **Trina Solar**, groupe chinois leader mondial de cellules photo-voltaïques, occupe 6% du marché avec sa filiale NCLAVE.
- **SunPower**, entreprise américaine dont le capital est détenu en majorité par Total, 15e fournisseur de modules, en représente 2%

En France, des entreprises de tailles différentes se sont lancées à la conquête de ce secteur :

- **Soitec**, industriel français producteur de matériaux semi-conducteurs, il représentait 8% du marché du tracker en 2018.
- **Exosun**, entreprise rachetée par le géant ArcelorMittal en 2018 suite à sa liquidation et dont les activités ont été transférées dans la branche projet du groupe.
- **Optimum Tracker**, startup sur laquelle nous concentrerons notre étude.

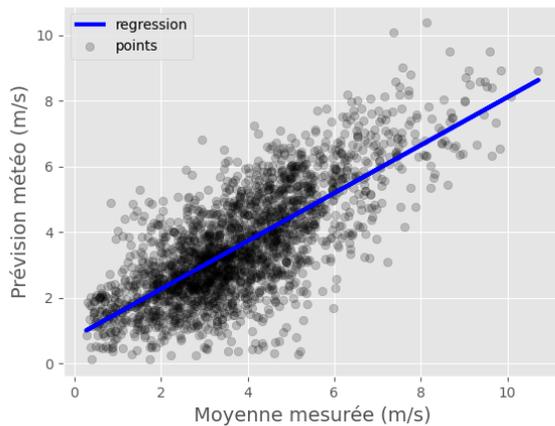
### A.4 Quelques résultats graphiques concernant l'étude de la prévision de rafales sur la centrale (Partie 2)

Cette figure illustre l'**inégaie répartition des vitesses** mentionnée en partie 2.1 (page 7).



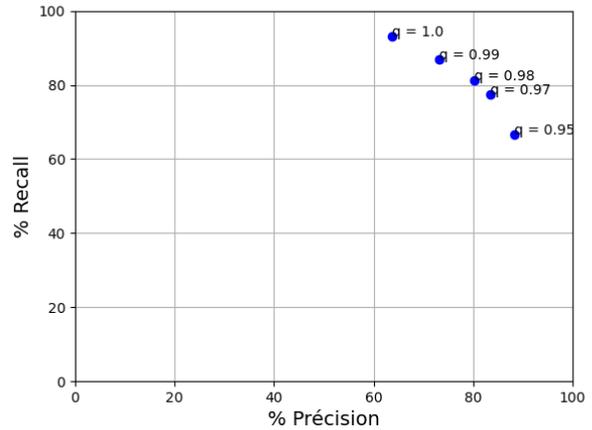
Pourcentage de vitesses supérieures à V en fonction de V

Ce nuage de points représente le **premier modèle affine** corrélant les prévisions météo aux mesures anémométriques moyennes par heure, évoquée en partie 2.3.2 (page 9).

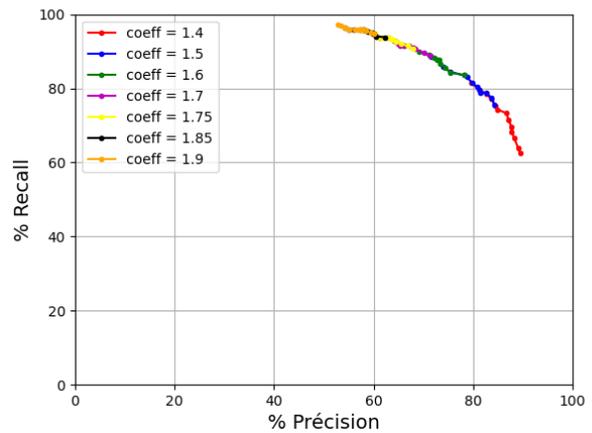


Prévision météo à J-0 en fonction de la moyenne réelle

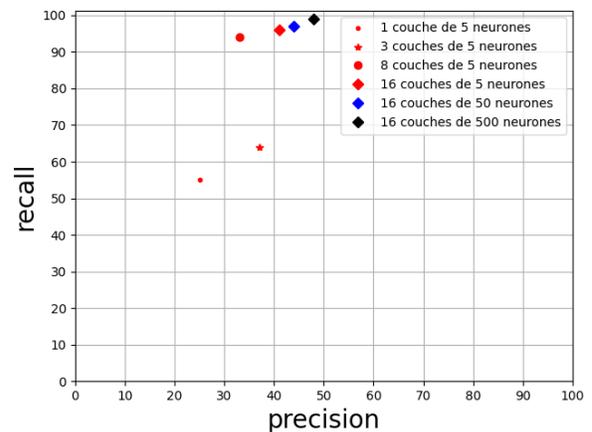
Ce graphique représente les résultats obtenus après application du modèle journalier basé sur la **régression quantile** détaillé en partie 2.3.3 (page 10).



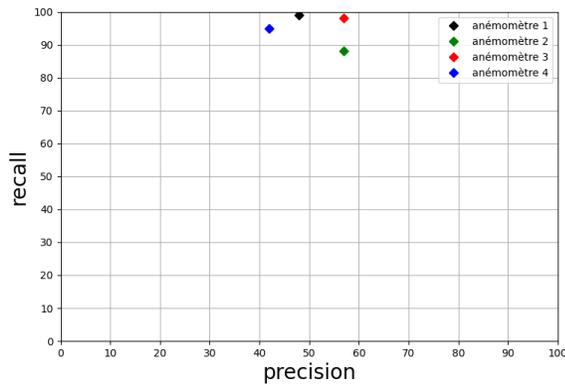
Ce graphe représente les résultats obtenus en faisant **varier les coefficients a et b** trouvés grâce à la régression quantile en partie 2.3.4 (page 10).



Ce graphique justifie le choix d'un **réseau à 16 couches de 500 neurones** en partie 2.4.1 (page 11).



Ce graphe illustre la **variabilité des résultats** du réseau de neurones **selon l'anémomètre** utilisé, évoqué en partie 2.4.1 (page 11).



### A.5 Précisions sur les différents essais expérimentaux

**le mouchetis** Le mouchetis est réalisé en prenant une bombe de peinture noire et en laissant tomber de fines gouttes de peinture sur l'éprouvette. Il permet au logiciel de corrélation d'image de suivre les nuances de gris lors de l'essai et de calculer un champ de déplacement, duquel on déduit le champ de déformation.

**Résultats obtenus** Nous n'avons réuni que les modules d'Young dans le tableau des résultats car les panneaux solaires ne subissent que des petites déformations, suffisamment bien caractérisées par le module d'Young dans les simulations dans un premier temps. Pour le modèle viscoélastique, plus complexe, nous avons récupéré les données de la doctorante du CEMEF, en particulier les paramètres des séries de Prony des matériaux.

Les essais de traction ont en fait principalement été réalisés dans le but d'appréhender le comportement thermomécanique des matériaux, et dans un second temps pour comparer les résultats obtenus à ceux de la doctorante. Nous obtenons des résultats identiques en terme de viscoélasticité.

	Essai 1	Essai 2	Essai 5	Essai 7
$\alpha$ longitudinal (/K)	$-9.10^{-9}(T - T_0)^2$	$-2.10^{-6}(T - T_0)^2$	$3.10^{-9}(T - T_0)^2$	$-6.10^{-8}(T - T_0)^2$
Fonction polynômiale de la température	$-6.10^{-7}(T - T_0) + 4.10^{-5}$	$-2.10^{-7}(T - T_0) + 4.10^{-5}$	$-10^{-7}(T - T_0) + 4.10^{-5}$	$+2.10^{-6}(T - T_0) + 10^{-4}$
$\alpha$ transversal (/K)	$10^{-7}(T - T_0)^2$	$3.10^{-5}$	$3.10^{-5}$	$6.10^{-8}(T - T_0)^2$
Fonction polynômiale de la température	$-8.10^{-6}(T - T_0) + 7.10^{-5}$			$-4.10^{-6}(T - T_0) + 5.10^{-5}$

**FIGURE 52.** coefficients de dilatation thermique pour les différents essais, dans les deux directions

#### Coefficients de dilatation thermique pour $T > T_0$ , $T_0=53^\circ\text{C}$

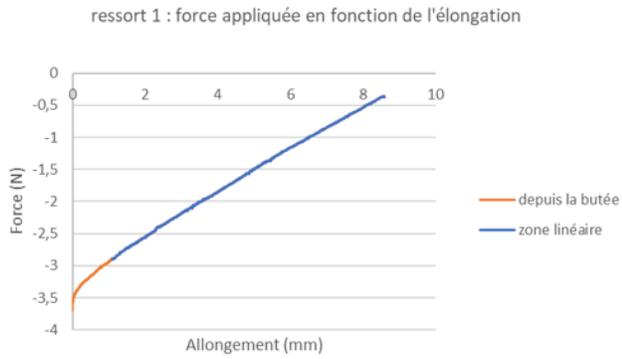
Les résultats de la Figure 52 sont obtenus par interpolation sur les courbes de la Figure 48, puis par dérivation. On observe que la déformation est quasi-linéaire jusqu'à  $75^\circ\text{C}$ , qui est la température de transition vitreuse du backsheet.

Au-delà de cette température, le réseau de chaînes du polymère se réarrangent différemment en fonction des directions considérées et des conditions limites imposées, ce qui explique les différences dans les courbes obtenues sur la Figure 48.

**linéarité des ressorts du dispositif "en croix"** On doit vérifier que les forces exercées par les ressorts sont bien linéaires dans la zone utile (pas en butée) : cela permet de dire qu'il n'y a pas de frottements ou d'arc-boutement, et de calculer les constantes de raideur des ressorts. Nous avons fait 2 essais sur chaque ressort avec une machine électromécanique en traction (pour un ressort en butée minimale) qui nous a permis de déterminer la force résultante en fonction du déplacement imposé. Les résultats étaient identiques, ce qui montre que l'expérience est répétable. On obtient dans tous les cas une courbe force-allongement similaire à celle de la Figure 54, qui nous permet de calculer les constantes de raideur des ressorts dans la zone linéaire. Ces constantes sont rassemblées dans le tableau de la Figure

53.

Ressort	1	2	3	4
k (N/mm)	0.34	0.32	0.33	0.34

**FIGURE 53.** raideur des différents ressorts du dispositif**FIGURE 54.** graphe force-élongation du ressort 1

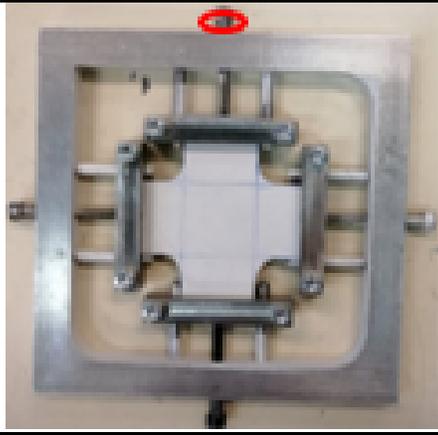
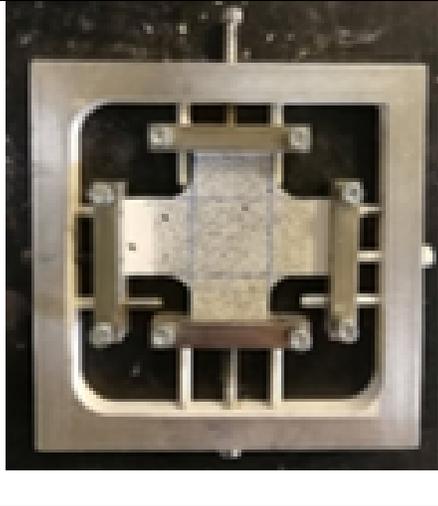
<b>Essai 1</b>		Dans cet essai, on découpe une éprouvette dans le sens de laminage du backsheet (direction principale d'étrépage), sur laquelle on fait un mouchetis et qu'on positionne dans un four auquel on impose une rampe de température (protocole commun aux essais suivants). On impose une force nulle sur le mors du haut afin de laisser le matériau se dilater librement. Les résultats de déformation sont obtenus, comme pour les essais de traction, par corrélation d'image. Cet essai est relativement classique, c'est celui qui se rapproche le plus d'un essai de dilatation libre
<b>Essai 2</b>		Dans cet essai, on utilise le dispositif en croix sur le backsheet avec les ressorts (en rouge sur la photo) : ces derniers viennent tirer sur les mors qui tiennent les bords de l'éprouvette, ajoutant lors de l'essai une déformation mécanique à la déformation thermique due à la dilatation. Sur la photo, le mouchetis n'a pas encore été réalisé. Ce dispositif est utilisé pour empêcher la distorsion du film testé, problème récurrent rencontré sur ce type de matériaux. Les rigidités des ressorts ont été déterminées dans le cadre de cette étude.
<b>Essai 5</b>		Dans cet essai, on utilise le dispositif en croix, mais en laissant cette fois le matériau libre au niveau des mors du bas et des côtés. Lors de la dilatation, le backsheet coulisse librement dans ces mors, dont l'utilité est simplement de maintenir le dispositif à la verticale (pour éviter des mouvements de va-et-vient dus au ventilateur du four, par exemple). Cet essai a été pensé suite aux résultats de l'essai 2, qui ne correspondaient pas à ceux de l'essai 1. Nous avons émis l'hypothèse que les ressorts modifiaient le comportement du matériau de manière trop conséquente. Cet essai consiste donc uniquement, comme l'essai 1, à une dilatation libre du backsheet.
<b>Essai 7</b>		Cet essai est identique à l'essai 1, à cela près que la direction de l'éprouvette découpée dans le backsheet a été tournée de 90°C. Dans les essais précédents, nous avons remarqué que la dilatation donnait des champs de déformation différents dans la longueur et la largeur, signe d'une potentielle anisotropie du backsheet. Cet essai doit permettre de confirmer cette anisotropie, qui n'avait pas été prise en compte dans la thèse que le CEMEF a mise à notre disposition.

FIGURE 55. récapitulatif des différents essais de dilatation thermique

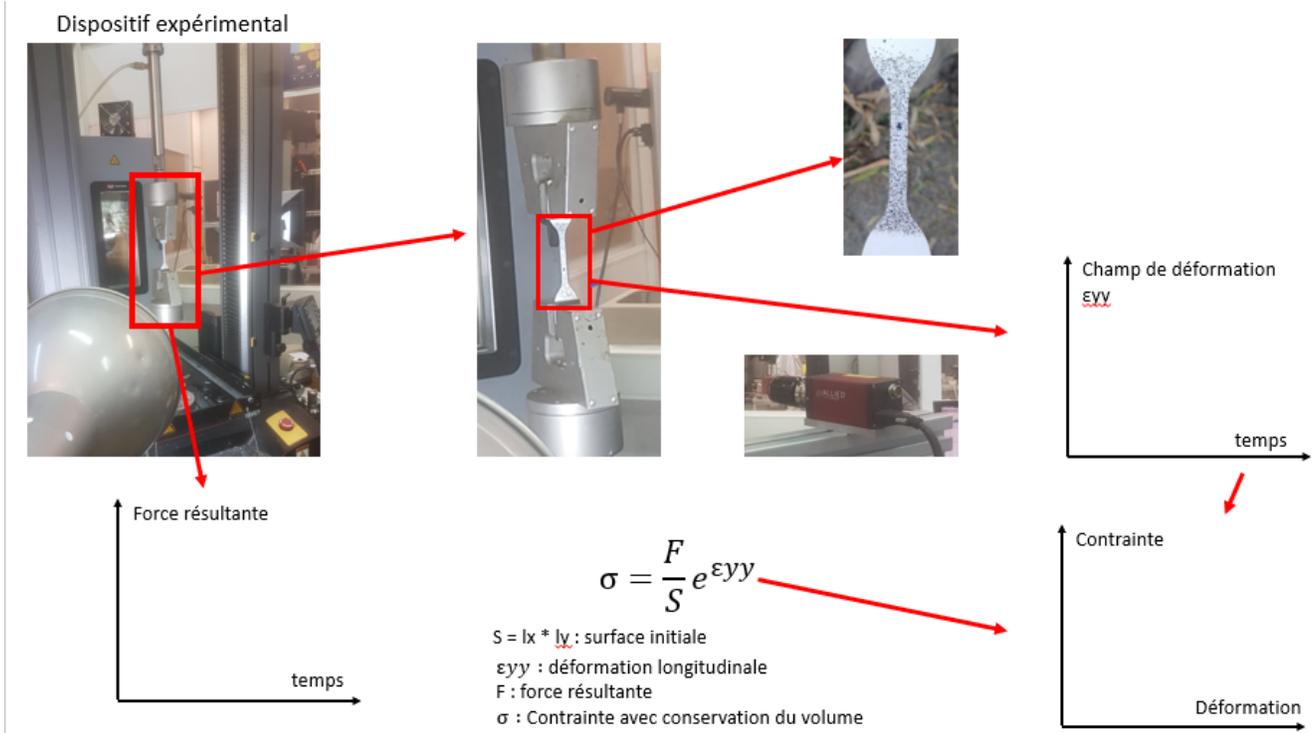


FIGURE 56. le dispositif expérimental des essais de traction