

**Titre du sujet de thèse proposé :****Interactions entre les parcs éoliens et la stratification stable de l'atmosphère : impacts sur la zone d'inversion et la surface****Contexte et objectif :**

L'objectif de cette thèse est de comprendre et quantifier l'impact potentiel du sillage des futures grandes éoliennes sur la météorologie locale.

Depuis 2011, les parcs éoliens terrestres sont soumis à la législation des installations classées pour la protection de l'environnement (loi n°2010-788, dite loi Grenelle 2). Dès lors, les développeurs de projets éoliens s'appuient sur le « Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres » initialement élaboré par le Ministère de l'Ecologie et l'ADEME. Ce document a été mis à jour à plusieurs reprises, en travaillant notamment avec des associations comme France Energie Eolienne (FEE) ou la Ligue de protection des Oiseaux (LPO). Ceci démontre l'intérêt croissant pour la compréhension de l'interaction entre les éoliennes et leur environnement. Néanmoins, pour l'instant, les effets sur la météorologie locale ne sont toujours pas mentionnés (vent, température, humidité, nébulosité).

Pourtant, les parcs éoliens sont de plus en plus conséquents (taille des fermes et/ou diamètres rotors) et donnent déjà lieu à des interactions avec la météorologie locale. Dans des conditions de stratification thermique particulières de la Couche Limite Atmosphérique (CLA), des études récentes ont notamment montré que des ondes de gravité peuvent apparaître au sommet de la CLA (Allaerts & Meyers, 2017) (Joulin, 2019) et qu'un assèchement et un réchauffement des masses d'air ont lieu près du sol (Joulin, et al., 2020) (Porté-Agel, Bastankhah, & Shamsoddin, 2020). Des impacts sur les formations nuageuses ou les surfaces végétales peuvent donc être envisagées.

Dans ce cadre, un partenariat a été initié il y a quelques années entre IFP Energies Nouvelles et le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM – Météo France), afin d'étudier les interactions entre les éoliennes et la Couche Limite Atmosphérique (CLA). Ce partenariat a permis notamment d'enrichir le modèle numérique atmosphérique Meso-NH (Lac, et al., 2018) de modèles aérodynamiques éoliens (Joulin, 2019). Les travaux menés jusqu'à présent ont permis de modéliser une formation nuageuse observée en aval d'un parc (Joulin, et al., 2020) ainsi que l'impact de la stratification thermique de la CLA sur le productible éolien (Jézéquel, Blondel, & Masson, 2022). Par ailleurs, ces travaux suggèrent que les futures grandes éoliennes pourraient modifier la stratification thermique, en particulier là où elle est stable (au sommet de la CLA et proche du sol), engendrant de potentiels changements sur la météorologie locale. Cette thèse propose de les étudier.

**Méthode envisagée :**

Ce sujet de thèse propose de se concentrer sur les interactions entre les parcs éoliens et la stratification thermique de l'atmosphère, en se focalisant sur deux niveaux : au sol et au sommet de la couche limite atmosphérique.

Au sol, la modification des flux de surface sera étudiée. Pour l'instant, si un réchauffement allant jusqu'à 0,5°C est parfois observé en cas stable, il n'y a pas de consensus dans la littérature (Porté-Agel, Bastankhah, & Shamsoddin, 2020). En effet, les conclusions quant à ces interactions sont différentes selon les modèles utilisés. D'après le même article, la prise en compte des effets de la végétation est cruciale pour pouvoir conclure. Cette prise en compte sera réalisée durant cette thèse avec l'outil avancé de surface externalisé SURFEX (Masson, et al., 2013), développé par le CNRM. Cette thèse permettra de réaliser, pour la première fois, des simulations couplées entre un modèle atmosphérique (Meso-NH), un modèle de surface (SURFEX) et un modèle éolien (EOL).

Dans ce but, nous avons introduit dans Meso-NH un nouveau modèle aérodynamique éolien lors d'un stage : l'Actuator Disk Rotatif (Mikkelsen, 2003). Ce dernier semble parfaitement adapté à l'étude envisagée : il permet de générer les phénomènes majeurs liés aux interactions (induction, déficit de vitesse, mise en rotation du sillage), tout en offrant un temps de calcul bien inférieur à celui de l'Actuator Line (rapport entre 100 et 1000) développé récemment (Joulin, et al., 2020). Grâce à ce nouveau modèle, le couplage Meso-NH/SURFEX/EOL permettrait de caractériser les phénomènes en aval d'une éolienne avec une précision jusqu'alors jamais atteinte.

La campagne de mesures VERTEX (Wu & Archer, 2021), qui visait à étudier l'effet d'un sillage sur un couvert végétal sera exploitée pour évaluer le nouveau couplage Meso-NH/SURFEX/EOL. Menée durant l'été 2016, cette campagne propose des données de mesures proches de la surface, comme la vitesse du vent, la température, l'humidité ou encore les flux turbulents. La zone instrumentée en aval de la turbine permet d'avoir des mesures à l'intérieur et à l'extérieur de la surface recouverte par sillage. Des changements de température moyenne de  $+0,2^{\circ}\text{C}$  ont été observés dans des conditions stables, allant jusqu'à  $+0,4^{\circ}\text{C}$  dans des cas particuliers. Cette campagne permettrait de vérifier que le couplage numérique proposé permet bien de reproduire les interactions avec la stratification thermique de l'atmosphère, notamment les impacts sur la température et l'humidité à la surface.

Ensuite, des études de sensibilité pourront être menées, en fonction du type d'éoliennes (notamment leur taille), du type de topographie (surface maritime, surface végétale, relief) et en fonction de la stabilité atmosphérique (couche limite stable, couche limite convective). Cette dernière permettra de documenter, après classification, l'impact potentiel des futures éoliennes. Elle permettra aussi d'identifier et de mettre en évidence les grandeurs clés de ce type d'interactions, pour tenter d'aboutir à un modèle conceptuel simplifié et favoriser l'anticipation des potentiels impacts.

Au sommet de la couche limite atmosphérique, c'est l'excitation d'ondes de gravité qui sera étudiée. Lorsque les éoliennes sont de grande taille (environ 300m), elles peuvent interagir avec la zone d'inversion de la température (située à quelques centaines de mètres de hauteur au-dessus de la mer) et la faire onduler. Ces ondes impactent notamment la production des fermes (Allaerts & Meyers, 2017) mais également la météorologie locale en aval de la ferme. Ces travaux feront suite à une thèse précédente (Joulin, 2019), où une étude préliminaire sur l'excitation des ondes a été menée avec Meso-NH et le modèle Actuator Line. Avec Meso-NH/SURFEX/EOL, les simulations de haute fidélité permettront une analyse avancée pour mieux caractériser l'apparition d'un tel phénomène. A l'heure actuelle, sa finesse fait de lui le seul outil permettant de simuler, en détail, les ondes générées par une seule éolienne (au lieu d'une ferme, à grande échelle) et leurs effets sur la formation nuageuse.

Dans un premier temps, il conviendrait de vérifier si le modèle ADR permet de représenter correctement ce phénomène, afin de limiter les temps de calcul des futures simulations. Ensuite, des études de sensibilité pourront être menées, sur une simulation à une seule éolienne, en fonction du type d'éoliennes (notamment leur taille) et en fonction du type d'atmosphère (notamment la taille de la couche limite atmosphérique ainsi que l'intensité de l'inversion de température à son sommet). Enfin, des simulations de parcs éoliens pourront être effectuées pour étudier l'interaction des ondes générées par chaque turbine. Il sera aussi possible d'étudier leurs effets sur les formations nuageuses grâce aux schémas microphysique de Meso-NH (Vié, Pinty, Berthet, & Leriche, 2016), ou même d'anticiper la fatigue subie par les pales d'éoliennes à l'aide du logiciel DeepLines Wind™.

## **Organisation :**

Les premiers mois de la thèse seront consacrés à la familiarisation avec le sujet et à la prise en main des outils (étude bibliographique, formation au modèle Meso-NH, utilisation des modèles éolien). Le planning s'articulerait en deux parties d'un an chacune : l'étude des interactions avec la surface, puis l'étude des interactions avec la zone d'inversion. Les derniers mois seront consacrés à la rédaction du manuscrit.

La·le doctorant·e bénéficiera de l'expertise du CNRM sur les aspects météorologiques et d'IFPEN sur les aspects éoliens. Il sera intégré aux projets IFPEN, nationaux et internationaux en cours (ANR, IEA Wind...), ce qui lui permettra de confronter ses travaux à ceux de la communauté internationale.

Encadrement	Directeur	NOM Prénom	MASSON Valéry
		e-mail	valery.masson@meteo.fr
		Section	DESR/CNRM/GMME/VILLE
	Co-directeur	NOM Prénom	JOULIN Pierre-Antoine
		e-mail	pierre-antoine.joulin@ifpen.fr
		Section	IFPEN / R174
	Co-encadrant	NOM Prénom	RODIER Quentin
		e-mail	quentin.rodier@meteo.fr
		Section	DESR/CNRM/GMME/PHYNH
	Ecole doctorale	Etablissement	Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)
Spécialité		Océan, Atmosphère, Climat	
Profil recherché	Diplôme	Master 2 ou qualification équivalente en physique de l'atmosphère ou en mécanique des fluides	
	Compétences	Physique de l'atmosphère (Météorologie, dynamique atmosphérique, thermodynamique)	
		Mécanique des fluides (Aérodynamique)	
		Modélisation numérique (Simulation LES parallèle et multi-échelle)	
Maîtrise du Français. Bonne pratique de l'anglais (écrit et oral)			
Localisations	Toulouse (Météo France) et Rueil-Malmaison (IFP Energies nouvelles)		

### **Candidatures**

Les candidats devront envoyer, avant la date limite, une lettre de motivation avec un CV en français. Il est aussi demandé d'envoyer une copie de leurs diplômes avec le relevé de notes correspondantes, ainsi que le résumé du sujet de leur Master. Enfin, deux personnes de référence devront être proposées, incluant leur adresse e-mail et leur numéro de téléphone.

La date limite pour postuler est le 20 mars 2023.

### **Références**

Allaerts, D., & Meyers, J. (2017). Boundary-layer development and gravity waves in conventionally neutral wind farms. *Journal of Fluid Mechanics*, 814, 95-130.

- Jézéquel, E., Blondel, F., & Masson, V. (2022). Breakdown of the velocity and turbulence in the wake of a wind turbine—Part 1: large eddy simulations study. *Wind Energy Science Discussions*, 1-24.
- Joulin, P. A. (2019). Modélisation à fine échelle des interactions entre parcs éoliens et météorologie locale. Doctoral dissertation.
- Joulin, P. A., Mayol, M. L., Masson, V., Blondel, F., Rodier, Q., Cathelain, M., & Lac, C. (2020). The Actuator Line Method in the meteorological LES model Meso-NH to analyze the Horns Rev 1 wind farm photo case. *Frontiers in Earth Science*, 7, 350.
- Lac, C., Chaboureau, J. P., Masson, V., Pinty, J. P., Tulet, P., Escobar, J., . . . Wautelet, P. (2018). Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, 11(5), 1929-1969.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., . . . Voldoire, A. (2013). The SURFEXv7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6(4), 929-960.
- Mikkelsen, R. (2003). Mikkelsen, R. (2003). Actuator disc methods applied to wind turbines. *Doctoral dissertation, PhD thesis, Technical University*.
- Porté-Agel, F., Bastankhah, M., & Shamsoddin, S. (2020). Wind-turbine and wind-farm flows: a review. *Boundary-Layer Meteorology*, 174(1), 1-59.
- Vié, B., Pinty, J. P., Berthet, S., & Leriche, M. (2016). LIMA (v1. 0): A quasi two-moment microphysical scheme driven by a multimodal population of cloud condensation and ice freezing nuclei. *Geoscientific Model Development*, 567-586.
- Wu, S., & Archer, C. L. (2021). Near-ground effects of wind turbines: Observations and physical mechanisms. *Monthly Weather Review*, 149(3), 879-898.