

ART & SCIENCE

Alerte à la pollution en rouge et en vert

*Comment connaître les pollutions des siècles passés ?
En examinant les proportions de rouge et de vert des ciels
peints par les grands maîtres, tel le Britannique William Turner.*

Loïc MANGIN

En mars 2014, plusieurs alertes à la pollution, notamment en région parisienne, ont été lancées par l'Agence *Airparif*. En effet, les seuils tolérés de concentration en particules fines (des poussières que l'on distingue selon différentes catégories de diamètre) ont été dépassés à plusieurs reprises. Ces particules fines, ou aérosols, sont d'origine humaine ou naturelle : dans le premier cas, elles sont émises par les installations de chauffage, les transports, l'industrie... ; dans le second, elles émanent de feux de forêts, d'éruptions volcaniques, etc.

Les équipes d'*Airparif* utilisent divers instruments scientifiques pour leurs mesures *in situ*. Mais comment faire pour étudier les pollutions du passé, dont on pourrait tirer des enseignements ? Christos Zerefos, de l'Académie d'Athènes, en Grèce, a récemment proposé d'examiner les toiles des grands maîtres du paysage, au premier rang desquels le Britannique William Turner (1775-1851), surnommé le peintre de la lumière. Sa *Vue du lac de Petworth : rayons de soleil, un cerf buvant* (voir l'illustration) le démontre.

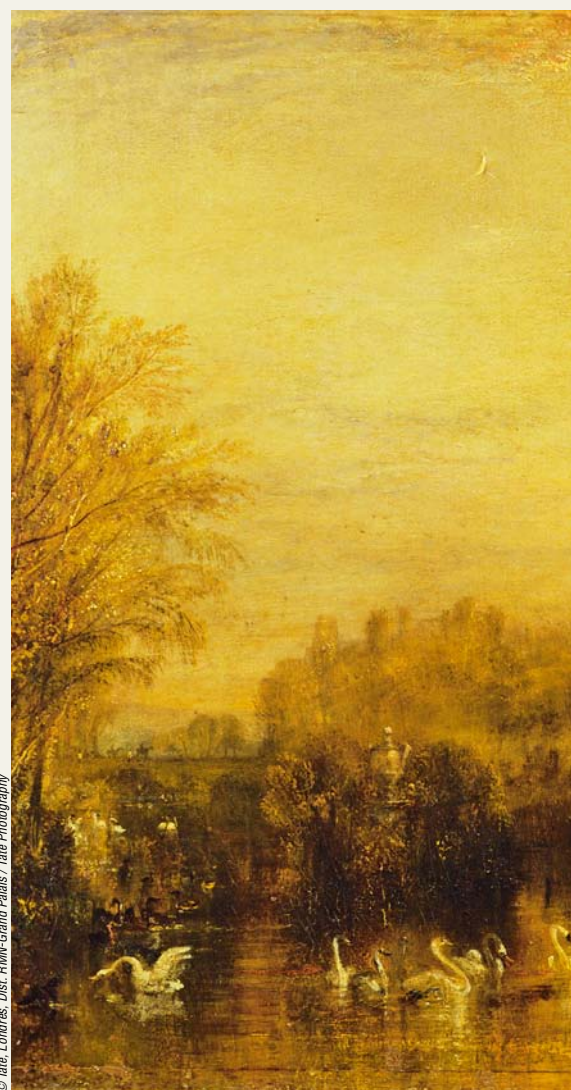
Avec ses collègues, Ch. Zerefos a peaufiné une méthode conçue en 2007 pour déterminer la quantité d'aérosols dans le ciel au moment où les œuvres ont été réalisées. Pour ce faire, les chercheurs ont calculé un indice, le ratio de rouge et de vert dans les représentations du ciel figurant sur

124 toiles conservées à la *Tate Gallery*, à Londres. Ce ratio reflète l'épaisseur optique de l'atmosphère, qui dépend de la quantité d'aérosols. La lumière du Soleil est filtrée par l'atmosphère qui favorise les grandes longueurs d'onde (le rouge) au détriment des courtes (le vert). Cet effet, accentué lorsque l'astre du jour est bas, par exemple au coucher, est d'autant plus important que la quantité d'aérosols est grande. Ainsi, le ratio de rouge et de vert est un indicateur de pollution.

Et c'est bien ce qui a été vérifié. Les toiles de Turner peintes peu de temps après l'éruption du volcan Tambora, en Indonésie, entre le 5 et le 10 avril 1815, sont plus riches en rouge que celles d'autres périodes. Lors de cet événement, des cendres ont été projetées à plus de 44 kilomètres d'altitude, d'où elles sont parties pour faire plusieurs fois le tour de la Terre. Les conséquences furent telles que l'on nomma l'été 1815 l'« été sans soleil », et l'année 1816 l'« année sans été ».

De même, certaines toiles du Français Edgar Degas (1834-1917) témoignent de l'éruption du volcan Krakatoa, lui aussi indonésien, les 26 et 27 août 1883.

La méthode du ratio de rouge et de vert renseigne bien sur le contenu en aérosols de l'atmosphère. Un autre pan de l'étude a consisté à regrouper des tableaux peints entre 1500 et 2000 par intervalles de 50 ans. Les années caractérisées par une éruption volcanique et les trois suivantes étaient écartées. On put alors calculer



© Tate, Londres. Dist. RMN-Grand Palais / Tate Photography

une moyenne des ratios de rouge et de vert pour chaque intervalle et en fin de compte obtenir des mesures continues pour cinq siècles. Les physiciens grecs n'ont pu alors que constater ce que d'autres techniques avaient montré par ailleurs : les émissions de particules n'ont cessé d'augmenter depuis le milieu du XIX^e siècle jusqu'à la fin du XX^e.

Pour vérifier le bien-fondé de la méthode, l'équipe de Ch. Zerefos a eu une idée originale. Elle a sollicité les services du peintre grec Panayiotis Tetsis et lui a demandé de représenter les couchers de soleil de plusieurs jours consécutifs, au mois de juin 2010, sur

l'île d'Hydra, à environ 80 kilomètres au Sud d'Athènes. L'artiste ignorait qu'un nuage de sable du Sahara passait au-dessus de l'île (la trajectoire a été calculée à partir de modèles et d'observations satellitaires).

En mesurant d'une part les ratios de rouge et de vert dans les œuvres obtenues, et d'autre part le contenu de l'atmosphère par des méthodes radiométriques, les chercheurs ont pu corroborer leur hypothèse fondée sur les toiles du XIX^e siècle. Le ciel est bien plus riche en rouge en présence de poussières qu'en leur absence. Certes, le sable n'est pas constitué de cendres volcaniques, mais son effet sur la lumière solaire est similaire.

Le grand nombre de peintures prises en compte, et ce quelle que soit l'école artistique dont pouvait se revendiquer l'artiste, plaide pour la robustesse de la méthode. Elle vient donc s'ajouter à l'arsenal dont les climatologues disposent pour reconstituer les climats du passé. Elle a même un avantage, par exemple, sur l'étude des carottes de glaces : elle est beaucoup plus confortable puisqu'elle consiste à aller au musée ! ■

Ch. Zerefos *et al.*, Further evidence of important environmental information content in red-to-green ratios as depicted in paintings by great masters, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 14, pp. 2987-3015, 2014.



IDÉES DE PHYSIQUE

Les éoliennes verticales

Contrairement aux éoliennes à hélices classiques, celles dotées d'un axe vertical peuvent tourner quelle que soit la direction du vent.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Nous sommes aujourd'hui familiers des gigantesques éoliennes installées à proximité des autoroutes ou sur les crêtes, avec leurs pales en hélice tournant autour d'un axe horizontal. Nous en oublions que des éoliennes d'un autre type, à axe vertical cette fois, offrent une alternative lorsque la direction du vent est incertaine ou perturbée, comme c'est souvent le cas dans un environnement urbain. Examinons ces éoliennes aux noms exotiques, Darrieus ou Savonius, pour comprendre comment elles fonctionnent et pourquoi, malgré des rendements énergétiques bien inférieurs aux éoliennes classiques, elles suscitent un intérêt constant.

En ralentissant le vent, une éolienne transforme l'énergie cinétique de ce der-

nier en énergie électrique. Dans le modèle le plus répandu, le dispositif mécanique qui entraîne le générateur électrique est une hélice fixée sur un rotor horizontal, placé en hauteur pour bénéficier de vents plus forts et plus réguliers qu'au niveau du sol.

Ces dispositifs récupèrent près de 50 pour cent de l'énergie du vent qui les traverse. Une valeur proche de l'optimum théorique de 60 pour cent, qui est le fruit d'un compromis. En effet, pour récupérer un maximum de puissance, il faut ralentir fortement le vent, mais pas trop car le débit d'air et, partant, la puissance disponible diminuent aussi.

Les éoliennes à hélice constituent l'essentiel du parc éolien de production d'électricité, notamment pour les éoliennes de grande puissance, dans la gamme du mégawatt. Leur usage n'est toutefois pas

adapté à toutes les situations. L'entretien de la machinerie, en hauteur, est délicat. Elles doivent être orientées face au vent, à l'aide d'un moteur, et on préfère ne pas changer leur orientation trop souvent ; ainsi, en présence d'un vent de direction variable, on choisit d'orienter selon différentes directions les éoliennes d'un même parc, quitte à stopper les éoliennes mal orientées.

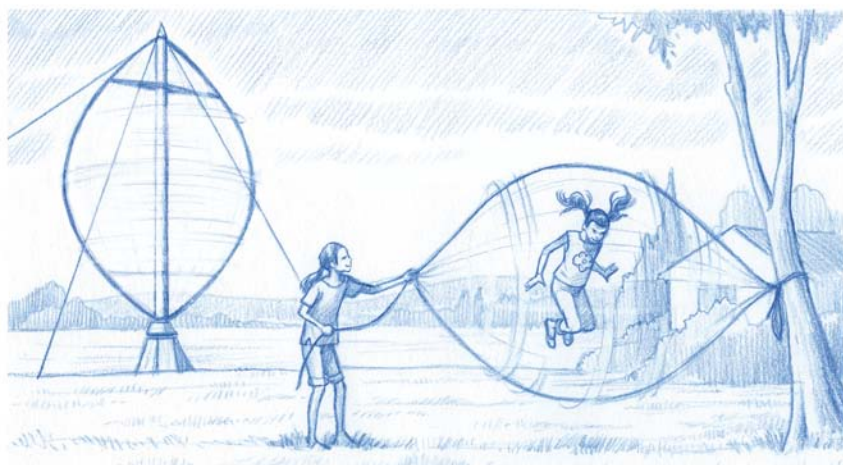
Inventées vers 1930

Les éoliennes à axe vertical, brevetées l'une en 1927 par l'ingénieur et académicien français Georges Darrieus et l'autre en 1929 par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius, ne présentent pas ces inconvénients.

L'éolienne Savonius est la plus simple à comprendre. Le dispositif est formé de deux godets cylindriques légèrement désaxés (voir la figure 3). Le vent pousse au creux du premier godet en s'y engouffrant et poursuit sa course dans le second godet qu'il pousse également avant d'en sortir. Puisque les godets sont décalés, le vent peut toujours s'y engouffrer et provoquer la mise en rotation, quelle que soit l'orientation du dispositif. C'est sur ce principe que fonctionnent les anémomètres ou les ventilateurs Flettner installés sur le toit de certains véhicules.

Jouant exclusivement sur une force de traînée, l'éolienne Savonius a l'avantage d'engendrer un fort couple et de vite démarrer, même avec un vent faible. Le rendement, de l'ordre de dix pour cent, est toutefois très mauvais.

Pour obtenir de meilleurs rendements, mieux vaut faire appel à des forces de portance



1. UNE ÉOLIENNE DARRIEUS utilise des pales dont la section transversale dessine une aile d'avion et qui ont la forme d'une troposkine – la courbe adoptée par une corde souple en rotation rapide. Cette forme réduit au maximum les contraintes mécaniques qui s'exercent sur la pale.

plutôt qu'à une force de traînée. C'est ce que fait l'éolienne Darrieus (voir les figures 1 et 2). L'astuce est de disposer des pales profilées comme des ailes d'avion autour du rotor. Les forces qui s'exercent sur ces pales sont dues au vent apparent qu'elles subissent, et qui est la somme (vectorielle) du vent réel et du vent dû à la rotation du dispositif.

Lors de la rotation du dispositif, l'orientation de la pale varie ; il en est donc de même du vent apparent, en module et en direction. Il en résulte une force aérodynamique périodique. À chaque instant, cette force est la somme d'une force de traînée, dirigée selon le vent apparent (le frottement s'oppose au mouvement), et d'une force de portance, perpendiculaire au vent apparent (force due à la déviation de ce dernier par la pale).

Lorsque le vent est perpendiculaire à la pale, le vent apparent est orienté de biais et il en résulte une force de portance dont le couple accélère la rotation, tandis que la force de traînée la ralentit. Si la rotation est assez rapide, l'angle d'incidence du vent apparent devient assez petit et la force de portance est alors bien supérieure à la force de traînée, d'où un couple total qui accélère la rotation.

Mais quand le vent est face à la pale, le vent apparent l'est aussi et seule subsiste la traînée, qui ralentit la pale. Pour estimer les performances globales, on doit effectuer une moyenne des couples exercés par la portance et la traînée sur toute la circonférence. D'expérience, on constate qu'avec un profil de pale adapté, le couple moyen est effectivement moteur. Un vent rotatif de l'ordre de quatre à six fois le vent réel permet d'atteindre les meilleurs rendements énergétiques (40 pour cent au maximum).

Ces effets disparaissent à faible vitesse de rotation ou à l'arrêt : une éolienne Darrieus à une ou deux pales s'immobilise en position de vent perpendiculaire, sans pouvoir démarrer toute seule. On n'obtient un démarrage autonome et laborieux, quelle que soit la position initiale, qu'avec trois pales écartées de 120 degrés. C'est pourquoi le générateur de l'éolienne est parfois utilisé comme moteur pour la démarrer. Une autre solution est de combiner sur un même axe un dispositif de Savonius, autorisant le démar-

rage autonome, à une éolienne Darrieus, qui prend le relais dès que la rotation est assez rapide et qui offre à l'ensemble un bon rendement (voir la figure 3).

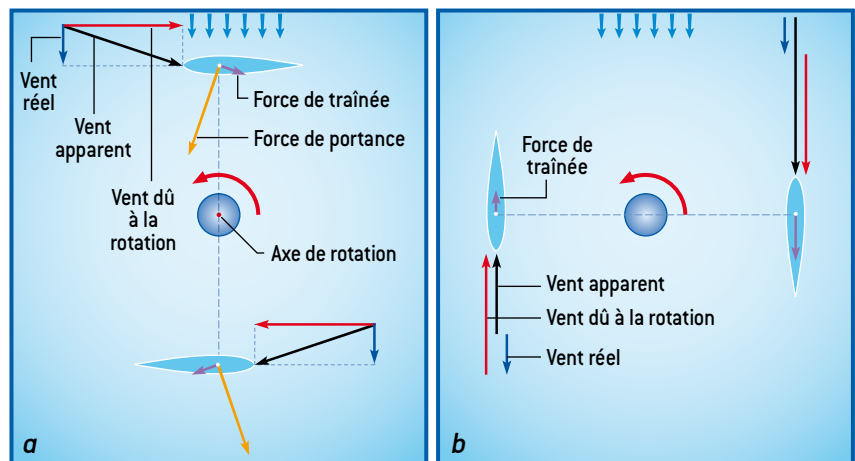
Une forme singulière

La nécessité d'une vitesse de rotation importante pour un bon rendement a une conséquence mécanique inattendue. Imaginons qu'une éolienne Darrieus de 5 mètres de diamètre tourne dans un vent de 10 mètres par seconde. Au meilleur de son rendement, le point extrême de la pale tourne à environ

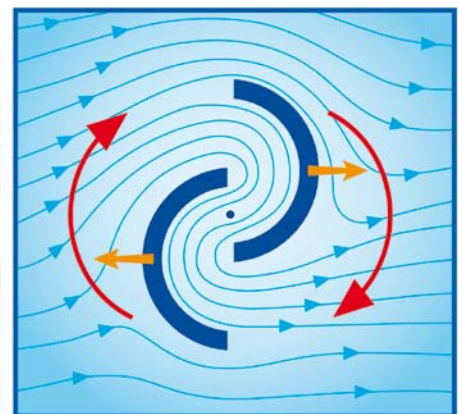
LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



2. SCHÉMA EN SECTION HORIZONTALE D'UNE ÉOLIENNE DARRIEUS. Quand la pale est perpendiculaire au vent [a], la force de portance accélère la rotation, malgré la force de traînée. Lorsque la pale est alignée avec le vent [b], ne subsistent que les forces de traînée.



Dessins de Bruno Vazaro

3. UNE ÉOLIENNE MIXTE DARRIEUS-SAVONIUS. Aux pales de type Darrieus s'ajoutent deux dispositifs formés chacun de deux godets cylindriques décentrés et se faisant face. Le vent, en s'engouffrant entre les deux godets, crée un couple de forces (en orange) qui fait tourner le dispositif autour de son axe. Les deux dispositifs sont orientés à 90 degrés l'un de l'autre pour que le vent agisse quelle que soit sa direction.

■ BIBLIOGRAPHIE

R. Dominy *et al.*, **Self-starting capability of a Darrieus turbine**, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 221(1), pp. 111-120, 2007.

T. D. Ashwill et T. M. Leonard, **Developments in blade shape design for a Darrieus vertical axis wind turbine**, *Sandia Report SAND86-1085*, septembre 1986.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

50 mètres par seconde, ce qui correspond à une accélération centripète de 1 000 mètres par seconde carrée, soit 100 fois l'accélération de la pesanteur !

Si aucune précaution n'est prise lors de sa conception, les forces centrifuges engendrées risquent de fatiguer mécaniquement la pale, voire de la casser. Plutôt que de renforcer la structure, il est plus simple d'utiliser une pale courbe. La forme optimale est la troposkine – celle que prend naturellement une corde souple en rotation constante autour d'un axe où sont attachées ses extrémités.

En effet, si l'accélération de la pesanteur est négligeable par rapport à l'accélération centripète, ce qui est le cas ici, cette forme est indépendante de la vitesse de rotation. Elle garantit que les efforts mécaniques s'exercent le long de la pale uniquement en traction et sont ainsi plus aisément suppor-

tables. Toutefois, le vent relatif dépend de la distance à l'axe et n'est donc pas uniforme le long de la pale. Il en résulte des turbulences aériennes qui peuvent se révéler bruyantes à haute vitesse et abaisser le rendement.

Même avec des dispositifs rigidifiés de pales rectilignes verticales, la variation au cours du temps du couple de portance engendre des vibrations gênantes au sein de la structure dès qu'elle est de grande taille... Pour l'instant, il semble que la technique Darrieus-Savonius ne soit attractive que pour des éoliennes de petite taille, à disposer sur les toits ou le long des routes dans des vents modérés. Dans cette niche plus restreinte, l'espoir est permis. Ainsi, la société chinoise *Timar* commercialise des réverbères hybrides vent/solaire autonomes, qui portent en leur sommet une éolienne du type précité de 400 watts ! ■

Toutes les ARCHIVES

■ Pour la Science

■ Dossier
Pour la Science

depuis

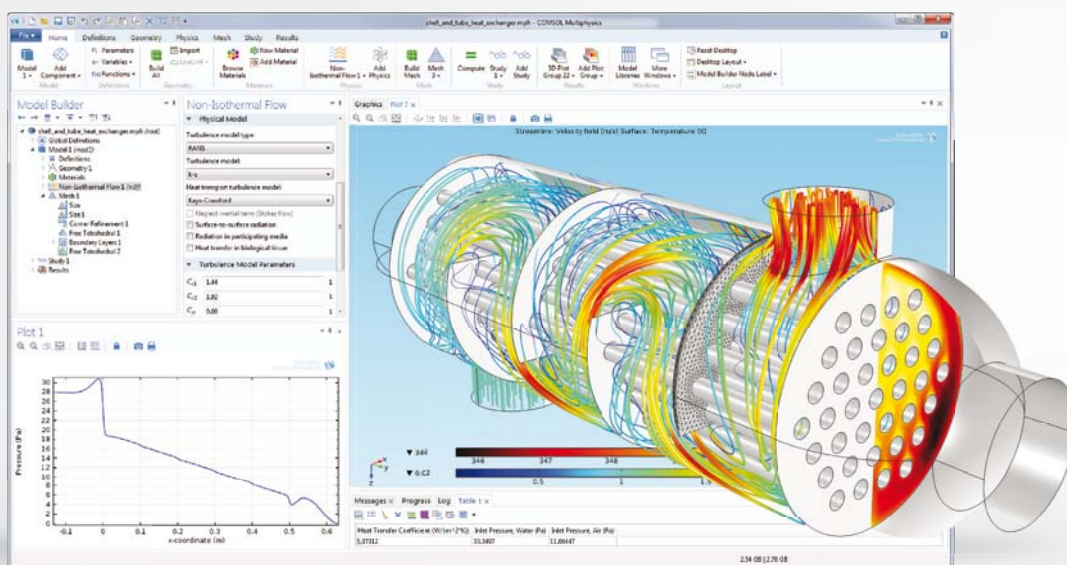
1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr*

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.

ECHANGEUR DE CHALEUR: Modèle d'échangeur tube calandre permettant l'échange de chaleur entre eau (tube) et air (calandre).



TESTEZ ET OPTIMISEZ VOS DESIGNS AVEC **COMSOL MULTIPHYSICS®**

Nos outils de simulation multiphysique intègrent tous les effets physiques du monde réel. De ce fait, ils reproduisent avec précision le comportement de vos designs. Pour en savoir plus sur COMSOL Multiphysics, rendez-vous sur www.comsol.fr/introvideo

Product Suite

COMSOL Multiphysics

ELECTRICAL

AC/DC Module
RF Module
Wave Optics Module
MEMS Module
Plasma Module
Semiconductor Module

MECHANICAL

Heat Transfer Module
Structural Mechanics Module
Nonlinear Structural Materials Module
Geomechanics Module
Fatigue Module
Multibody Dynamics Module
Acoustics Module

FLUID

CFD Module
Mixer Module
Microfluidics Module
Subsurface Flow Module
Pipe Flow Module
Molecular Flow Module

CHEMICAL

Chemical Reaction Engineering Module
Batteries & Fuel Cells Module
Electrodeposition Module
Corrosion Module
Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE

Optimization Module
Material Library
Particle Tracing Module

INTERFACING

LiveLink™ for MATLAB®
LiveLink™ for Excel®
CAD Import Module
ECAD Import Module
LiveLink™ for SolidWorks®
LiveLink™ for SpaceClaim®
LiveLink™ for Inventor®
LiveLink™ for AutoCAD®
LiveLink™ for Creo™ Parametric
LiveLink™ for Pro/ENGINEER®
LiveLink™ for Solid Edge®
File Import for CATIA® V5

