

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Département EDIM - EV80 : éco-conception - Semestre d'Automne 2013
Examen final

TOUT DOCUMENT ADMIS SOUS QUELLE QUE FORME QUE CELA SOIT

1. QUESTIONNAIRE (16,5 points)

(0,5 point par bonne réponse, -0,25 point par mauvaise réponse, 0 point en l'absence de réponse)

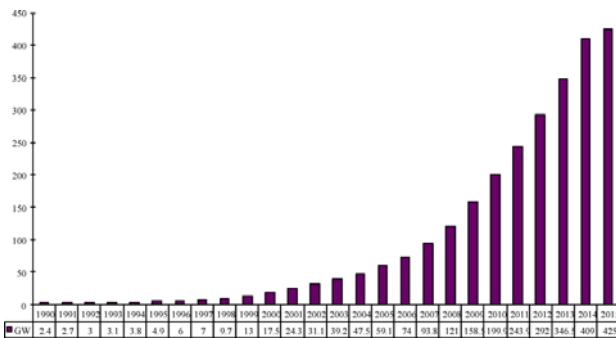
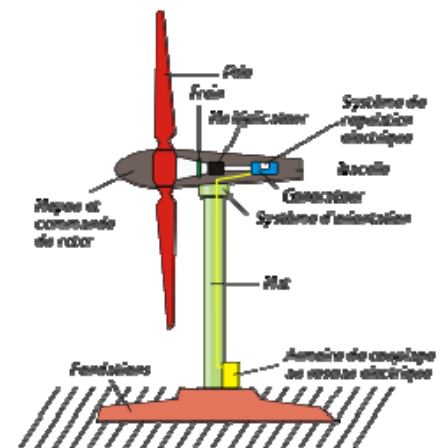
		VRAI	FAUX
1	Calculer les impacts environnementaux, c'est quantifier la pollution générée sur le cycle de vie d'un produit, d'un système ou d'un service.		
2	L'éco-innovation est génératrice de valeurs.		
3	L'éco-innovation peut être assimilée à de l'éco-conception.		
4	L'éco-innovation s'applique aussi bien aux produits, aux processus ou aux <i>business</i> modèles.		
5	La conception pour le recyclage (<i>Design for Recycling</i>) est partie intégrante de l'éco-conception		
6	La démontabilité d'un produit est nécessaire à son recyclage.		
7	La meilleure solution de recyclage, c'est la réutilisation du produit.		
8	La performance d'un produit ou d'un système correspond à trois groupes de fonction : la fonctionnalité du produit ou du système, les propriétés des matériaux et leur coût.		
9	La technique des éco-indicateurs 99 correspond à celle des éco-indicateurs 95, la différence résidant dans la précision des bases de données.		
10	Le bilan carbone découle directement d'une analyse des impacts environnementaux au moyen des éco-indicateurs.		
11	Le cycle de vie d'un produit prend en compte toutes les activités qui entrent en jeu dans la fabrication, l'utilisation, le transport et l'élimination de ce produit.		
12	Le <i>greenwashing</i> est un moyen de communication efficace pour conforter l'argument écologique.		
13	Le potentiel de réchauffement climatique d'un gaz à effet de serre correspond à son effet relatif en termes de changement climatique sur une période considérée.		
14	Le principal inconvénient du recyclage, c'est la collecte initiale des produits à recycler.		
15	Le taux de recyclage d'un produit dépend à la fois de la démontabilité de ses composants et de la recyclabilité des matériaux les constituant.		
16	Le verre peut être recyclé indéfiniment.		
17	L'éco-conception, c'est l'application des normes ISO 14001.		
18	L'éco-efficacité, c'est le rapport de la valeur d'un produit sur les impacts environnementaux générés tout au long du cycle de vie.		
19	L'écologie industrielle correspond au concept d'éco-conception appliqué à l'échelle de plusieurs fabricants de produits / fournisseurs de service sur une grande échelle de temps (celle d'une génération par exemple)		
20	L'empreinte carbone d'un produit ou d'un service correspond à l'émission totale, sur le cycle de vie, de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre		
21	Les auto-déclarations relèvent de la seule responsabilité des fabricants ou du distributeur.		
22	Les déchets industriels sont les déchets les plus nombreux en masse générés par l'activité humaine.		
23	Les écolabels sont des marques officielles de connaissance des avantages environnementaux des produits mis en place par les pouvoirs publics.		
24	Les éco-profilés donnent une information environnementale partielle quantifiée sur le cycle de vie d'un produit.		
25	Les éco-profilés permettent des comparaisons de produits remplissant la même fonction.		
26	L'estimation des impacts environnementaux <i>via</i> l'analyse du cycle de vie ne peut pas être employée dans le cadre d'un <i>benchmarking</i> .		
27	L'éthique de l'ingénieur concepteur est de développer des produits / des services en prenant en compte les facteurs humains, sociaux, et économiques de la société.		
28	L'eutrophisation, c'est la dégradation du milieu aquatique liée aux rejets de métaux lourds.		
29	L'inconvénient principal des éco-indicateurs 95 est de prendre en compte majoritairement les émissions atmosphériques, au détriment des autres.		
30	L'indice de performance d'un matériau permet de définir de façon objective une combinaison de propriétés qui traduise l'adéquation du matériau à remplir les contraintes de conception en maximisant l'objectif fixé.		
31	L'objectif de la conception pour le recyclage (<i>Design for Recycling</i>) est de tendre, à terme, à aucune mise en décharge en fin de vie.		
32	L'unité fonctionnelle permet de normaliser les données dans le cadre d'une analyse de cycle de vie.		
33	Tous les matériaux polymères peuvent être recyclés indéfiniment.		

2. Mise en situation (16,5 points)

2.1. La production d'énergie électrique par éolienne

Une éolienne produit de l'électricité grâce au vent. Sa force actionne les pales d'une hélice, qui met en mouvement un alternateur. Sous l'effet du vent, l'hélice, appelée aussi rotor, se met en marche. Ses pales tournent. Le rotor est situé au bout d'un mât car les vents soufflent plus fort en hauteur. Suivant le type d'éoliennes, le mât varie entre 10 et 100 m de haut. Le rotor comporte généralement 3 pales, mesurant entre 5 et 90 m de diamètre. L'hélice entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre, relié à un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau. Pour pouvoir démarrer, une éolienne nécessite une vitesse de vent minimale d'environ 10 à 15 km/h. Pour des questions de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le vent dépasse 90 km/h. La vitesse optimale est de 50 km/h. On rencontre des éoliennes à terre (*onshore*) et en mer (*offshore*). Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-après.

La première éolienne "industrielle" génératrice d'électricité est développée par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Les recherches les plus intenses actuellement sur l'utilisation du vent portent sur les éoliennes afin d'augmenter leur rendement en prise sur le vent, résistance aux fluctuations, rendement en production électrique et la meilleure détermination des corridors de vent.

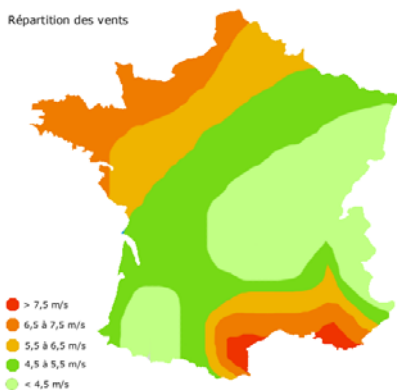


évolution de la puissance installée dans le monde (en GW)

caractéristiques	ONSHORE	OFFSHORE
puissance moyenne par éolienne	2 MW	5 MW
masse totale	200 à 300 tonnes	400 à 500 tonnes
hauteur de mât	70 à 130 mètres	
diamètre du rotor	140 mètres	
nombre de pâles	3	
matériau employé pour les pâles	composite fibres de verre / polymère thermodurcissable (résine époxyde)	
plage de fonctionnement	vitesse de vent comprise entre 3 et 25 m.s ⁻¹	

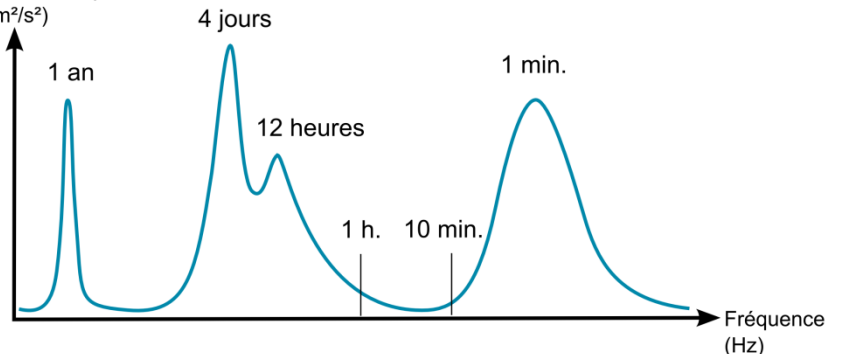
2.2. Le vent

Répartition des vents



vitesse moyenne des vents en France

Densité de puissance (m²/s²)



fréquence de la force des vents en fonction de la période (graphique de Van der Hoven)

L'analyse spectrale (c'est-à-dire que l'abscisse est représentée par la fréquence) de la vitesse du vent permet de mettre en évidence plusieurs échelles temporelles de fluctuation. La partie droite du graphe concerne les conditions locales reliées à des conditions de relief ou autres effets comme la distribution des nuages, le gradient thermique vertical, la vitesse moyenne du vent, la rugosité des sols, etc. Le "trou" entre une heure et dix minutes au milieu correspond à des périodes de grand calme quand les turbulences s'annulent elles-mêmes.

2.3. Le réseau électrique de distribution

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

L'électricité est une des rares énergies non stockable à grande échelle (hormis *via* les batteries, ou les barrages considérés comme des réserves d'énergie électromécanique à faible inertie). En permanence, les opérateurs des réseaux doivent donc s'assurer de l'équilibre entre l'offre et la demande. En cas de déséquilibre, on observe principalement deux phénomènes :

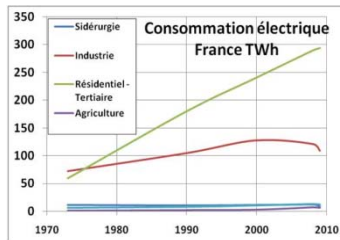
- une consommation supérieure à la production : le risque de black out n'est pas exclu (perte rapide du synchronisme sur les alternateurs);
- une production supérieure à la consommation : il peut y avoir dans ce cas une accélération des machines synchrones qui produisent l'électricité et un emballement pouvant conduire également à un black out. Cette situation est connue des systèmes électriques insulaires due à la surproduction, notamment éolienne.

2.4. L'impact environnemental de la production d'électricité éolienne

Les éoliennes fournissent une électricité propre, ne produisant ni polluant ni gaz à effet de serre. Cependant, il faut prendre en considération l'intégralité du cycle de vie d'une éolienne pour avoir une idée de son impact environnemental. Ici, on considère l'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie en termes d'empreinte carbone. Ainsi, l'éolien *onshore* émet 11 kg CO₂/MWh et l'éolien *offshore* 14 kg CO₂/MWh. Ces valeurs sont à comparer aux 420 kg CO₂/MWh émis par une centrale au gaz par exemple. L'irrégularité de fonctionnement des éoliennes et le recours aux moyens de pointe (hydroélectriques, pétrole, charbon ou gaz naturel) pour équilibrer le réseau entraînent toutefois une hausse supplémentaire des émissions de CO₂.

2.5. La sobriété et l'efficacité énergétique : les deux premières étapes de la transition énergétique

La consommation d'énergie augmente en France, en moyenne, de 0,6% par an. Cette consommation s'élevait à 266,5 mégatonnes équivalent pétrole (MTEP)¹ d'énergie primaire en 2011². Sur cette quantité totale, seules 168,2 MTEP sont effectivement consommés par les usagers sous forme d'énergie finale. Le différentiel (soit 98,3 MTEP, presque 37% du total) correspond aux pertes liées aux processus de transformation de l'énergie primaire en énergie finale³. A titre d'exemple, un cycle classique de transformation pour chauffer un logement consiste à produire de la chaleur, à la transformer en énergie mécanique, à transformer cette énergie mécanique en énergie électrique, à transporter cette énergie électrique sur de grandes distances puis à transformer finalement cette énergie électrique en chaleur.



évolution de la consommation électrique (énergie finale) en France au long des années (1 TWh ~ 86000 TEP)



consommation électrique journalière typique (énergie finale) en France durant un mois d'hiver

Le problème principal ne réside pas tant dans l'augmentation de la quantité d'énergie consommée que dans la manière : il existe de nombreuses pointes de consommation (par exemple en fin de journée et typiquement durant les mois d'hiver à l'échelle de l'heure en soirée). Ces pointes de consommation ne peuvent être satisfaites que par le recours à des centrales à flamme, émettrices de gaz à effet de serre car consommant des énergies fossiles. Ces centrales présentent l'avantage unique d'un temps de démarrage très rapide en regard d'autres techniques mais leur emploi est pénalisé par un coût d'usage très élevé.

Une des solutions pertinente vise donc à réduire ces consommations de pointe par une gestion optimisée (c'est la sobriété énergétique) et à diminuer les pertes liées à la transformation de l'énergie primaire en énergie finale, par exemple en augmentant l'utilisation des chaleurs récupérables à chaque transformation (c'est l'efficacité énergétique).

Ces deux axes, la sobriété énergétique et l'efficacité énergétique, sont ceux à adresser en premier dans le cadre de la transition énergétique.

2.6. Questions

A partir des précédents éléments, répondre de manière synthétique et structurée aux trois questions ci-après. On prendra soin de développer un argumentaire. L'utilisation de schémas, tableaux comparatifs, etc. est encouragée.

Q1) (environ 3,5 points) Pour quelle(s) raison(s) les éoliennes *offshore* présentent-elles un impact environnemental supérieur à celui des éoliennes *onshore* ?

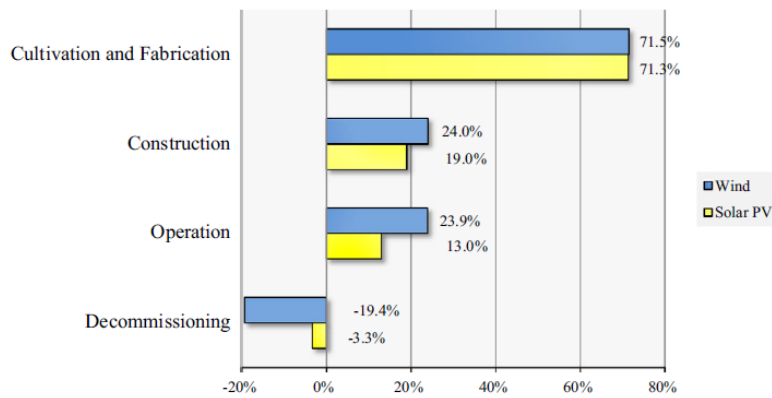
Q2) (environ 5,5 points) Quels sont les impacts environnementaux à prendre en compte pour quantifier l'impact environnemental total d'une éolienne sur l'ensemble de son cycle de vie ? On cherchera ici à structurer ces impacts par principales familles.

Q3) (environ 7,5 points) Comment procéder, dans le cas d'un *benchmarking* (étude comparative) avec les autres modes de production d'énergie (charbon, gaz naturel, nucléaire, etc.), pour quantifier l'impact environnemental total d'une éolienne sur l'ensemble de son cycle de vie. On pourra partir de l'unité fonctionnelle et détailler l'intégralité des éléments à prendre en compte.

¹ C'est une unité d'énergie correspondant au pouvoir calorifique moyen d'une tonne de pétrole : 1 TEP = 42 gigajoules. La TEP remplace la TEC : tonne équivalent charbon précédemment employée.

² Cette même année, la France a produit 139,1 MTEP d'énergie primaire, le reste étant importé.

³ Se répartissant suivant : 37 MTEP dans l'industrie et l'agriculture, 68,6 MTEP dans le résidentiel et le tertiaire, 50 MTEP dans les transports et 12,6 MTEP pour des utilisations diverses.



2.1. Material cultivation and fabrication

In general, the material cultivation and fabrication stage represents the broadest group as it incorporates the full range of resource extraction, processing of materials, and the amalgamation of final products. Although details vary based upon the type of PV module, for instance (thin film, mono, poly, or multi-crystalline, dye-sensitized, quantum dot, and so on), material cultivation encompasses mining, refining and purification of silicon and/or other required metals and minerals for the cells, glass, frame, inverters, and other required electronics. Petroleum extraction for plastics, natural gas extraction used for heating, and effectively any other material extraction and processing needed to create the PV module and finished electronics are also included. Finally, the wiring, encapsulation and any other processes by which the modules and electronics are fabricated and finished (up until the point of transportation to the site of operation) are all included in this part of the stage for PV. Applying essentially the same concept to wind energy means metal and petroleum extraction for steel, plastics, internal wiring, etc., are included. Furthermore, composition and production of the blades, gears (although there are also gearless turbines), rotors, nacelle, turbine, and tower are all part of this stage.

2.2. Construction

A second stage involves the on-site construction of the generator and transportation of materials to the site. For PV, it encompasses transporting the panels, and installing them along with the balance-of-system (BOS), including mounting structures, cabling and interconnection components, and inverter (although the exact BOS assumptions vary by study). GHG emissions for this stage thus include the processing of BOS materials and fossil fuels burned in transporting and assembling the system. For wind power, transportation and BOS includes a significant amount of cement and iron rebar to support structures, as well as cabling and construction of substations, when necessary.

2.3. Operation and maintenance

Operation is the third stage, and perhaps the most straightforward. Operation of solar PV includes maintenance, perhaps some minor replacements when necessary, cleaning of the modules, and any other processes that occur while the panels are in use. Essentially the same applies for wind, including regular maintenance and cleaning, possible replacement parts such as blades and gear components, and required material input such as hydraulic oil and oil filters used to lubricate turbines.

2.4. Decommissioning

Decommissioning is the final stage that essentially involves the deconstruction processes, disposal, recycling and (possibly) land reclamation. Because recycling is effectively a means of mitigating future GHG production, many of the studies were referenced below consider this stage to decrease the total GHGs produced over the lifecycle of the generator. For instance, reclamation is not a standard practice for wind energy (the pads are often left or reused), and a majority of the steel towers, plastics, and fiberglass blades are recyclable. Accordingly, the process carries with some

