

LES OUTILS MATHÉMATIQUES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Jean-Louis LEGRAND jldlegrand@gmail.com

Ce texte accompagne et complète la présentation qui est l'objet d'un autre fichier.

Slide 2

« Faire des mathématiques, c'est souvent se perdre dans une jungle et essayer d'utiliser toutes les informations que l'on peut rassembler pour trouver de nouvelles pistes. Avec un peu de chance, on s'en sort. »

Maryam Mirzakhani, mathématicienne iranienne, professeure à l'université de Stanford, connue pour ses travaux en topologie et en géométrie (surfaces de Riemann), seule femme récipiendaire de la médaille Fields (2014), décédée peu après l'anniversaire de ses 40 ans (2017).

Cette citation peu académique a un double sens.

D'une part, les mathématiques sont elles-mêmes une jungle de plusieurs dizaines d'outils. De plus, certains outils dépendent les uns des autres.

Illustration : Dominic Walliman, Domain of science, The map of mathematics : <https://www.youtube.com/channel/UCxqAWLTK1CmBvZFPzeZMd9A>

D'autre part, pour s'orienter et progresser dans la jungle, il convient d'utiliser un processus qui s'apparente à la méthode scientifique. À chaque étape, chaque outil mathématique fournit l'opportunité de raisonner par déduction.

Slide 3 Sommaire

Le processus d'une démarche scientifique part de l'observation puis continue avec l'induction (on généralise ce que l'on a observé), l'abduction (on émet des hypothèses), la modélisation, la prévision.

L'objectif premier d'une science est de prévoir.

Si l'expérimentation n'est pas conforme, alors on réitère, on cherche où l'on a pu se tromper, ce qu'il faut modifier dans les étapes précédentes.

La bosse des maths, c'est l'agilité avec laquelle on va du concret (en bas du slide) à l'abstrait (en haut du slide), et vice versa.

Slide 4 Observation

Slide 5 Une brève histoire des énergies

L'histoire des énergies n'est pas linéaire.

Colonne du milieu. On simplifie trop en listant des dates et des inventions marquantes, des personnalités qui se marchent sur les pieds.

Colonne de droite. Certaines énergies « nouvelles » remontent en fait à l'antiquité. Solaire chez les grecs et eau chez les romains. Siège de Syracuse par Marcellus et mort d'Aristote (miroirs ardents). Aux USA, avant 1900, les énergies renouvelables étaient utilisées massivement. L'automobile a démarré moitié électricité moitié gaz.

Colonne de gauche. A contrario, la révolution industrielle a attendu plus d'un siècle avant de diffuser dans les transports : cheval (pas vapeur) aux USA, voile dans la marine marchande britannique. La notion de « peak wood » ou de « holznot » (pic bois) s'applique sur un périmètre temporel et géographique. Déforestation par l'empire romain (1^{ère} guerre d'Irak sous Trajan, les troncs d'arbre sciés étant transportés sur le Tigre à l'Ouest et sur l'Euphrate à l'Est). Colbert, ancien officier de marine, effrayé par la consommation de bois (1 navire brûlé / coulé = 1 cathédrale = plusieurs centaines d'arbres centenaires).

Slide 6 - L'addition successive de nouvelles sources

Dans l'histoire de l'humanité, il n'y a jamais eu de transition énergétique.

Aujourd'hui encore, le charbon (de terre, pas de bois) est la première source d'énergie. Les énergies fossiles pèsent plus de 85% du total. Ce ratio ne bouge pas depuis un siècle.

Les énergies de la biomasse, de l'eau, sont difficiles à évaluer lorsqu'on remonte le temps.

Illustration : le Monde du 16 novembre 2018, Carbone 4.

Maths : l'agrégation des énergies est une courbe de Malthus, correspondant à la fonction exponentielle, aussi dite de démographie.

Maths : chaque énergie prise séparément est une courbe de Verhulst, correspondant à la fonction sigmoïde, aussi dite logistique (calcul).

Nous sommes déjà sur le plateau du pétrole et nous abordons celui du charbon.

Maths : enfin, les pics (pas seulement le pétrole) correspondent aux fonctions caractéristiques du chaos.

Des précisions seront apportées plus loin (slide 31).

Les ressources prouvées résultent d'estimations moyennes.

Des analyses complémentaires, professionnelles, peuvent être trouvées ici :

<http://www.carbone4.com>

Raisonnement : la notion de ressource recourt à différentes définitions, en général technico-économiques, avec différents stades de confiance. Il convient d'observer que le rayon de la Terre mesure 6400 km, mais que l'on ne fore ou creuse qu'à 4 km de profondeur et sur une superficie très partielle, essentiellement en dehors des océans et du relief. Mais, pour la suite, aucune hypothèse robuste (gaz, voire plasmas dans l'asthénosphère sous la lithosphère) ne nous permettrait de poursuivre.

Slides 7 8 9 10 transport en commun / tramway / pétrole / électromobilité

Les mutations énergétiques sont permises par les innovations technologiques, mais elles sont déclenchées par des facteurs sociétaux / sociaux et par des aléas.

Assassinat d'Henri IV par Ravailiac. Les rues de Paris étaient déjà très embouteillées. Blaise Pascal invente le transport en commun : carrosse à 5 sols, finalement mis en œuvre en 1662, l'année de sa mort.

La voie du rail plat naît suite à l'insalubrité (urine stagnante et excréments, épidémies de diphtérie), puis à la mort du cheval (des dizaines de milliers de bêtes auront agonisé) qui glissait dans les rues, pavées à la va-vite, des grandes villes du nord-est des USA autour de 1880. Le tramway naît pour transporter des chevaux morts, pas des passagers, et il est tiré par des chevaux (hippomobile), pas mu par l'électricité. En 1902, aux USA, 5 milliards de trajets passagers sur 35000 km de lignes électrifiées.

Cartes postales des Champs-Élysées. En moins de 15 ans, à Paris, on est passé du tout calèche au tout automobile. Illustration : LEK.

Les élites américaines ont promu le pétrole pour lutter contre le communisme (habitat individuel, étalement urbain, voiture) et contre les syndicats ouvriers du charbon (par exemple, ce sont eux, et non des organisations politiques, qui ont obtenu le suffrage universel tel qu'on le connaît aujourd'hui) car il était facile de bloquer les flux avec des grèves.

Au début de l'automobile, les véhicules électriques dominaient le marché. Winter estates à Fort Myers : Edison commence par « inventer » le démarreur électrique avec Henry Ford afin d'éviter la manivelle. La Poste des grandes villes américaines fonctionnait avec des trottinettes électriques. Le bus à impériale de Londres est né électrique. Le journal « L'illustration », le premier magazine français, publiait régulièrement la carte des infrastructures de recharge accessibles au public.

Slide 11 La terminologie

Étymologie. L'oxymore « développement durable » disparaît du vocabulaire.

L'écologie n'est pas une science : « éco » fait référence à un domaine (celui d'Ulysse à Ithaque, des athlètes à Élis à côté d'Olympie), « logie » à l'un des piliers de la rhétorique, celui du discours raisonnable et structuré (ethos – logos – pathos). C'est le zoologiste et biologiste allemand Ernst Haeckel (1866) qui a inventé « Ökologie ».

Énergie = force en mouvement, qui travaille (voir le slide 44). Travail = « tripolium » = échaffaudage du maçon ou pied de l'enclume du forgeron au Moyen-Âge (mais pas le trépied ancêtre de la croix).

La notion de transition écologique est politique. Hopkins, un enseignant britannique en permaculture (bio/éco mimétisme), initiateur du mouvement international des villes en transition. Un ensemble de principes et de pratiques. Problématiques de résilience locale et d'économie circulaire qui percolent très rapidement dans la société, allant des écoquartiers aux Zones À Défendre (ZAD). Notion très récente : « The Transition handbook » (2008).

Grenelle de l'Environnement : pratiquement pas évoquée. 10 ans plus tard, grand débat national : l'un des quatre input, cité dix fois par page du document introductif.

La notion de transition énergétique a deux origines : le premier choc pétrolier (Jimmy Carter, la Trilatérale) et l'« energiewende » allemande (Öko-Institut), essentiellement antinucléaire. Deux dernières campagnes présidentielles en France : les candidats ne parlent que d'électricité et d'où placer le curseur entre nucléaire et renouvelable.

Climat vient du grec angle = inclinaison = latitude. Canicule vient du latin canicula = constellation de la chienne = étoile Sirius lorsqu'il fait très chaud une nuit d'été. Le vocabulaire des climatologues provient de l'observation de la nature. La transition énergétique n'a aucun rapport avec le réchauffement climatique, sauf ces toutes dernières années. L'explication suit.

Slide 12 Le refroidissement climatique des années 1970

Nous avons la mémoire courte. Le GIEC a été créé en 1988, mais le lobbying pour sa création a commencé plus de dix ans avant. Claude Allègre, alors directeur de l'institut de physique du globe de Paris (IPGP), explique volontiers que des personnalités politiques et scientifiques encore très médiatisées aujourd'hui utilisaient à l'époque, entre autres, l'argument du refroidissement climatique.

Maths : un tel changement de doxa, ce retournement de situation cache ou une fonction périodique (plus éventuellement des variations d'amplitude) ou une fonction caractéristique du chaos (voir slide 30).

Slide 13 Des échelles et des cycles

Selon les paléoclimatologues, la composition atmosphérique du CO₂ a été divisée par 1000 depuis l'Ère primaire. Et la température a baissé de 15°C depuis la fin du Jurassique.

Selon certains spécialistes de la tectonique des plaques, leur discipline, à elle seule, pourrait expliquer la fonte des glaciers alpins et la disparition de la neige annoncée sous 2500 mètres. La plaque Africaine appuie de plus en plus sur la plaque Eurasiatique au nord de la Méditerranée, d'où une baisse de l'altitude du massif sur le géoïde (surface équipotentielle de référence du champ de pesanteur terrestre).

L'évolution de l'orbite terrestre obéit aux nombreux cycles de Milanković : précession des équinoxes, obliquité de l'axe des pôles, excentricité. Depuis 250000 ans, l'homme a connu deux périodes glaciaires fortes.

L'homo sapiens (que nous sommes tous, aux dernières nouvelles) est apparu lors d'un réchauffement de 5°C avant la première (Riss). L'homme de Java (le dernier homo erectus) et l'homme de Neandertal ont disparu lors d'un refroidissement de 10°C à la fin de la seconde (Würm).

Raisonnement : pour la suite, aucune hypothèse robuste ne nous permettrait de poursuivre.

Slide 14 L'écosystème

Gaz carbonique (CO₂) - Variation des stocks depuis 1750 - Flux annuels 2002 – 2011
Source : <https://www.notre-planete.info>

Raisonnement : ce slide est centré sur le gaz carbonique. D'autres GES ou polluants pourraient être évoqués, mais ils sont secondaires par rapport à la problématique énergétique.

Le problème clair est la dé-fossilisation : nous aurons consommé en 3 siècles des stocks (voir slide 6) qui ont mis des millions d'années à se constituer.

Selon certains, la France devrait dépenser 2% de son PIB, soit 45 milliards d'euros annuels, pendant 30 ans. Or son champ d'intervention annuel pèse 2 millièmes de la quantité mondiale de CO₂.

Maths : en dehors de toute considération sur le poids relatif des différents acteurs mondiaux (Cf. climato-sceptiques), ces ordres de grandeur montrent qu'il faut une grande sélectivité, puis une grande précision dans les plans d'actions donc dans les outils mathématiques utilisés. Dans cette situation, les probabilités sont également utiles (voir slides 39 et 40).

Slide 15 Induction

Slides 16 17 La poule de Bertrand Russell

Philosophe et logicien britannique, également lauréat du prix Nobel de littérature.

L'inné est une expérimentation enregistrée. Si la baguette de pain est présentée dans le sens de la longueur, c'est un vers de terre et la poule picore. Si la même baguette de pain est présentée dans le sens de la largeur, c'est un rapace, un prédateur, la poule fuit.

« L'homme qui a nourri le poulet tous les jours de sa vie finit par lui tordre le cou. »
La poule induit à tort jusqu'au jour où elle finit en poule au pot. Une induction se doit d'être prudente. L'homme raisonne-t-il mieux que la poule. Pas si sûr.

Le soleil semble éternel, mais qu'en est-il exactement ?

Slide 18 Le soleil

En dehors de toute considération sur la longévité du soleil, la température d'une planète est proportionnelle à celle de son soleil. Le rapport de la formule est celui de la surface du disque présenté par la sphère planétaire à la surface de la sphère de propagation du rayonnement. Les autres termes sont ceux des rayonnements des deux astres.

$$4\pi R_p^2 \sigma T_p^4 = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 \frac{\pi R_p^2}{4\pi D^2}$$

Qui se simplifie en :

$$T_p = \frac{T_s}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_s}{D}}$$

Avant albédo et effet de serre (voir slide 28), la température de la Terre est proportionnelle à celle du Soleil, la distance entre les deux astres évoluant très lentement.

L'intensité solaire obéit au cycle de Schwabe, environ 11,2 ans. Puis un mathématicien, Wolf, a fourni une méthode topologique de calcul partant de l'organisation des taches solaires entre elles. Il en résulte une fonction affine qui est corrélée avec différentes mesures dans le bois ou ailleurs, car les vents solaires influent sur les isotopes, en particulier le carbone 14. L'enregistrement des observations du soleil par des cartes représentatives remonte à Galilée.

Maths : ces outils mathématiques permettent de corrélérer, mais pas de prévoir. On peut toujours extrapoler les courbes tracées, qui présentent des hauts et des bas. Toute courbe peut être approchée par une fonction polynomiale. Grosso modo, le degré du polynôme est celui du nombre d'extremums moins 1. Un extremum correspond à une parabole, une quadratique, un polynôme du second degré. Deux extremums à une cubique, un polynôme de degré trois, etc. Dans le cas de l'intensité solaire, certains scientifiques concluent ainsi qu'un nouveau minimum, à mi chemin entre celui de Maunder et celui de Dalton, interviendrait à partir de 2030.

Raisonnement : certains réseaux de neurones artificiels prévoient la pluviométrie sans utiliser aucune loi physique (Abbot, avec un point d'application célèbre en Australie). Pour autant, en toute rigueur, on ne peut pas en tirer une déduction scientifique.

Raisonnement : pour la suite, aucune hypothèse robuste ne nous permettrait de poursuivre. En dehors des réactions nucléaires, nous sommes loin de comprendre le fonctionnement du Soleil. Étant une boule de gaz et de plasma, sa rotation n'est pas contrainte comme celle d'un solide : sa surface tourne à une vitesse différente autour de son axe en fonction de la latitude. Différents effets magnétohydrodynamiques régissent cette rotation différentielle. Il n'y a pas de consensus parmi les scientifiques pour en expliquer la cause. Le champ magnétique du Soleil, contrairement à la forme familière de celui d'un aimant, est vrillé par le vent solaire selon une spirale, dite de Parker. En 2017, on a même découvert une deuxième dynamo gigantesque (la première oriente du centre vers l'extérieur).

Raisonnement : il convient d'être prudent quant à l'énergie solaire stricto sensu. L'alimentation exclusive, par elle, d'un système énergétique, même largement doté de batteries, non plongé dans un réseau électrique le connectant à d'autres sources, est risquée à moyen terme. Sauf à prévoir une flexibilité de l'ordre du tiers sur une quinzaine d'années si l'on extrapole les minimums précités.

Slide 19 La mesure de la température

La température est nécessaire et utile pour aborder le réchauffement climatique, mais également et surtout pour de nombreuses énergies. C'est un paramètre important pour le solaire, la géothermie, le refroidissement du nucléaire, la chaleur, le pilotage du chauffage et de la climatisation en général, etc.

Le degré Celsius ou Fahrenheit n'est qu'une échelle. L'unité de mesure qui apparaît dans les lois physiques est le Kelvin, la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Si la température de la Terre est 15°C et si elle augmente de $1,5^{\circ}\text{C}$, la variation n'est pas de 10%, mais de 3 millièmes sur 30 ans (2050) soit de un dix millième par an.

Raisonnement : de très nombreuses hypothèses rentrent dans le calcul des moyennes. À partir des mêmes données communiquées par les États (30 stations en France), European Climate Assessment & Dataset établit 16 registres différents. De même en passant au niveau mondial. Plus les océans. La plage de référence française n'est pas la plage de référence mondiale.

Maths : le fait que 2018 ait été l'année la plus chaude depuis « toujours » n'empêche pas que la moyenne décennale baisse (2010).

Slide 20 Les moyennes

Le diable se cache derrière les moyennes.

Maths : en probabilités, le même jeu de données réelles permet le tirage aléatoire de 20 températures, selon la loi uniforme, qui donne plus d'une fois sur deux un pronostic inquiétant ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) sur 100 ans. Autrement dit, un nouvel âge glaciaire aussi bien qu'un réchauffement climatique sont toujours « probables ».

Source : Bernard Beauzamy, 24ème anniversaire de la Société de Calcul Mathématique SA <http://www.scmsa.com/accueil.htm>

Maths : en arithmétique, le cardinal des données détermine le résultat. $f(x, y) = x + y - 1 - \text{PGCD}(x, y)$. Par exemple, lorsque $x = 5$ et $y = 9$, on peut construire un jeu de 12 données tel que toute moyenne sur 5 données consécutives baisse ($-0,04$) et toute moyenne sur 9 données consécutives augmente ($+0,18$) : $-0,26 -0,26 -0,26 +1 -0,26 -0,26 -0,26$.

Maths : on calcule l'âge moyen des habitants dans deux rues d'une ville. Des habitants d'une rue déménagent et s'installent dans l'autre rue. Est-il possible de faire "rajeunir" les deux rues? Oui. L'âge moyen dans chacune des deux rues diminue tant qu'une personne d'une rue déménage dans l'autre rue avec un âge compris entre les âges moyens des deux rues.

Source : Philippe Fondanaiche, Le chocolat engendre-t-il des tueurs en série ?, 22 janvier 2019, Cercle Pierre de Jumièges.

Slide 21

Citations d'Alain Supiot, juriste, Collège de France, sur le « gouvernement par les nombres », de Winston Churchill et de Michel Audiard.

Slide 22 Les pièges de la statistique

Le paradoxe de Simpson résulte d'une erreur d'inférence, d'échantillonnage.

Maths : la raison profonde réside dans le calcul vectoriel. Le vecteur somme de deux vecteurs de pente inférieure peut avoir une pente plus forte que le vecteur somme de deux vecteurs de pente supérieure.

Un cas d'école célèbre est celui de l'étude médicale d'un millier de femmes sur plusieurs dizaines d'années. Conclusion : fumer diminue le risque d'avoir un cancer du poumon. Explication : dans la population suivie, les non fumeuses étaient un peu plus âgées que les fumeuses.

Un exemple lié au climat, cité dans les manuels scolaires et par de nombreux media. L'ours polaire appartient à l'espèce des ours blancs, qui n'est pas en voie de disparition. Sur la banquise de l'Arctique, on ne sait pas combien il y en a, mais il y en a sans doute très peu (250 à 300, soit 1% de la population mondiale). L'espèce est menacée dans trois zones dont surtout la baie d'Hudson, à peu près grande comme la France, à cause d'une pêche outrancière donc de l'homme.
Source : WWF et gouvernement canadiens.

Maths : exemple donné. Une entreprise du bâtiment RGE étudie 2 solutions de rénovation énergétique, A et B. Dans l'immeuble N°1, A améliorerait 60% des logements diagnostiqués et B, 90%. Dans l'immeuble N°2, respectivement 10% et 30%. Pourtant, sur la résidence, A serait plus performante que B.

	Immeuble N°1	Immeuble N°2	Résidence
A	$60/100 = 60\%$	$1/10 = 10\%$	$61/110 = 55,45\%$
B	$9/10 = 90\%$	$30/100 = 30\%$	$39/110 = 35,45\%$

Probabilités conditionnelles. Fréquentistes et bayésiens.

Notre cerveau (sauf celui des joueurs d'échecs) n'est pas capable de raisonner / calculer à deux niveaux dans un graphe.

Un cas d'école célèbre est celui des débuts de l'aviation de combat lors de la première guerre mondiale. Conclusion d'une réunion de debriefing au sommet : il faut renforcer le blindage à l'arrière des avions. Peu après, un mathématicien anglais observe que les avions étudiés sont ceux qui étaient revenus du combat. Quid des autres ? Ils étaient criblés de balles du côté du compartiment moteur à l'avant.

Un exemple lié au climat. Depuis 1930, la catégorie des ouragans aux USA baisse en intensité mais les dommages augmentent. En 2012, Sandy, le quatrième au hit parade des assurances, était presque dé-classable (au-dessous du niveau 1), mais il a frappé le New Jersey. Ceci est dû à l'urbanisation et au comportement urbain. De même en France dans le Sud-Est. Cf. 20 décès les 3 et 4 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes.

Exemple donné : un problème d'origine domotique rare affecte 100 millions de compteurs électriques dans une proportion estimée à 1/10000. Il existe un test fiable dans 999 cas sur 1000 (bandes de fréquences). Le résultat du test appliqué à une certaine installation (choisie au hasard) est positif : quelle est la probabilité qu'elle soit réellement affecté par le problème (i.e. que le remplacement de la technologie CPL par une solution radio soit justifié) ? La réponse, guère intuitive, est environ 9 %.

Maths : le calcul exact est $0,999 \times 0,0001$ divisé par $0,999 \times 0,0001$ (le compteur est affecté et le test l'indique) + $0,001 \times 0,9999$ (le compteur n'est pas affecté mais le test indique qu'il l'est).

Corrélation et causalité. Variable cachée, de confusion.

Un cas d'école célèbre est celui de la relation entre les prix Nobel et la consommation de chocolat dans un pays. Dr F. Messerli, New England Journal of Medicine. Variable : le PIB. Tourné en dérision : tueurs en série, etc.

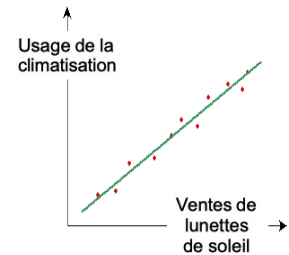
Un exemple parlant. La relation entre la peinture des chaussures et les fautes d'orthographe à une dictée. Variable : l'âge, en particulier des enfants.

Des exemples liés au climat. Le niveau des océans, abondamment cité dans les media. Il convient de distinguer la banquise et la calotte glaciaire. La banquise, elle, contribue peu à l'eustatisme (variation du niveau des mers). Selon le principe d'Archimède, tout corps plongé dans un fluide « au repos », entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume de fluide déplacé. La partie immergée d'un iceberg équivaut déjà au volume qu'il occupera lorsqu'il aura complètement fondu (au détail près que l'eau salée est légèrement plus dense que l'eau douce).

C'est plutôt l'effet stérique (dilatation thermique) qui menace, mais il est n'estimé qu'à 13 cm par °C sur une couche de 500 m de profondeur. La température est la variable de confusion.

Lorsque la calotte fond, la pression sur la lithosphère (croûte et manteau supérieur) puis sur l'asthénosphère (ductile, à 1300 °C) diminue, avec des conséquences à distance dont l'évaluation est délicate. Les déformations isostatiques font que beaucoup de points de repères doivent être relativisés. Exemple de la largeur des plages : augmentation de la superficie de la Belgique de 160 km² début 2019. Les mesures les plus fiables résultent de l'altimétrie satellitale. Le niveau des océans autour de la Terre peut ainsi varier de 200 m d'un endroit (quelque part dans le Pacifique) à un autre (quelque part dans l'Atlantique). Un navire qui traverse les 70 kilomètres du canal de Panama d'Est en Ouest « monte » de 20 centimètres.

Exemple donné : le soleil agit séparément sur la chaleur (climatisation) et la lumière (lunettes de soleil). On peut remplacer la climatisation par la vente de crèmes glacées. La variable de confusion est le soleil, qui chauffe et qui illumine en Ultra Violet.



Slides 22 23 24 La tangente

Maths : avant d'en arriver aux fonctions, aux chiffres, une courbe fournit des indications toujours utiles si on sait l'interpréter. Il faut dériver (pente) ou intégrer (aire).

Maths : exemple donné : un problème célèbre posé par la centenaire Mathematical Association of America en 1977. Pour rechercher une synergie, il faut identifier un antagonisme. Ici, la roue AR n'est pas orientable, mais la roue AV l'est via le guidon. Ensuite, pour établir un pont entre les deux courbes, il faut trouver un invariant. Ici, les axes des roues sont séparés par un empattement constant. La tangente à la courbe AR, une fois orientée, intersecte la courbe AV toujours à la même distance. Eureka.

Slide 25 Courbe en U inversé (Kuznets) ou en N ?

Maths : la courbe de Kuznets est un U inversé. Elle traduit une vision optimiste, courante après la seconde guerre mondiale. L'idée est qu'une population ou qu'un pays qui se développe, qui s'enrichit, pollue (air, eau, tri et traitement des déchets) et déforeste de plus en plus, puis de moins en moins.

Mais elle suppose que les gains de productivité sont suffisants et que l'évolution est réversible. Malheureusement, ce n'est absolument pas le cas des énergies fossiles.

La courbe des émissions de CO₂ (ou plus généralement de GES) en fonction du PIB par habitant (GDP per capita) est très débattue au niveau international. L'exemple donné est celui de la Belgique. Étude sur les années 1946 à 2008. Sources universitaires à Bruxelles et à Saint-Quentin-en-Yvelines.

Maths : un nuage de points ne fait pas une courbe. En approximation quadratique, la courbe de Kuznets. Plus précisément, en approximation cubique, une courbe en N. Du coup, l'inquiétude surgit. L'augmentation du niveau de vie n'est pas synonyme d'une plus grande attention à l'environnement, en particulier dans le système énergétique.

Slide 26 Le calcul

Maths : l'aller-retour des nombres entre les formats décimal et hexadécimal puis l'anticipation, par le développement du logiciel, des imprécisions commises par les macros doivent inciter à la prudence. Si l'on cherche la précision, tout est faux.

Exemple donné avec Microsoft Excel, faciles à tester soi-même : 0,1 moins 0,1 résultant d'une soustraction ne donne pas 0. Dans ce même logiciel, quasiment toute série de quatre opérations avec deux décimales donne un résultat faux.

Voir plus loin le « hiatus » du GIEC sur les années 1998 à 2012.

Bug du réseau électrique européen du 10 janvier 2019 (écart de fréquence de 190 mHz à 21h) : dysfonction numérique aux frontières allemande et autrichienne.

Premier vol d'Ariane 5 en 1996 : un dépassement de capacité mémoire non prévu. Résultat : une auto-destruction préventive de la fusée.

Anti-missile Patriot lors de la première guerre du Golfe en 1991 : à chaque tic de l'horloge, 10 fois par seconde, la valeur 1/10 était ajoutée à un compteur. Mais 1/10 n'est pas exact pour un ordinateur et c'est donc la valeur 0.100000014901... qui était ajoutée à chaque fois. Résultat : des dizaines de morts chez les GIs avant que l'on ne s'en rende compte.

Maths : lorsque l'on mélange différents ordres de grandeur, des outils mathématiques spécifiques peuvent être utilisés : dichotomie des calculs (on sépare les ordres de grandeur et les dernières décimales), copules statistiques (on sépare les variables aléatoires, jeu favori des hedge funds). En informatique, une solution à ces problèmes est l'utilisation d'autres programmes (rang 2) pour vérifier des programmes (rang 1) et des preuves.

Slide 27 L'abduction

La déduction repose sur des causes et des effets certains. Elle aboutit à des énoncés certains. Chaque outil mathématique procède ainsi. Mais la déduction part d'hypothèses formulées.

L'induction propose des causes certaines à des effets probables. Elle aboutit à des énoncés probables. Exemple : le rythme de consommation des énergies fossiles est une menace sur l'homme, il nous faut une alternative.

L'abduction, elle, recherche des causes probables à des effets certains. Elle aboutit à des énoncés plausibles. Exemple : toutes les énergies qui produisent de l'électricité sont dignes d'intérêt.

Slide 28 La température de la Terre et le CO₂

Pour une planète sans atmosphère, la température est proportionnelle à celle de son étoile (voir le slide 18).

Le nombre de couches « homogènes » N au sens chimique est 6 pour la Terre : tropo, strato, méso, thermo, iono et exo. Le visible solaire passe au travers, l'infrarouge terrestre est arrêté à cause des vibrations des molécules simples (H₂O, CO₂, etc.) découvertes par Arrhénius en 1896.

Maths : pour chaque couche, les entrée-sortie de ces rayonnements introduisent un facteur multiplicatif, résultat de la conservation de l'énergie. Entrée S = sortie E du côté du Soleil et entrée T = sortie S + E du côté de la Terre donnent $T = 2S$. Cela donne une bonne approximation de l'effet de serre. Aujourd'hui $(6+1)^{1/4} = 1,63$ pour la Terre.

L'albédo introduit une nouvelle variable a , aujourd'hui 0,34, qui varie de 0,14 à 0,84 (âge glaciaire), mais pratiquement pas à l'échelle de nos prévisions.

Maths : $a(T) = 0,495 - 0,205 \tanh \{0,133 (T - 275)\}$.

Pour exprimer la température en fonction de la concentration de CO_2 , on revient au sol (environ 3000 stations) et on utilise la courbe empirique de Keeling, découverte à Mauna Loa en Hawaï.

Maths : F flux thermique. C concentration de CO_2 . La sensibilité climatique (indice o pour origine) est calculée avec $C/C_0 = 2$. $\Delta T = T/4 \times \Delta F/F$ (dérivation de la loi thermodynamique). Lorsque corrigée des variations saisonnières (oscillations sinusoïdales), la courbe, légèrement convexe, s'approche par une formule du type $\Delta F = 5,35 \ln(C/C_0)$.

$$T_p = \sqrt[4]{1 - a} \sqrt[4]{N(C) + 1} \frac{T_s}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_s}{D}}$$

La température est importante pour le réchauffement climatique, mais elle l'est également pour le pilotage de la plupart des énergies : tout moyen de chauffage et de climatisation, réseau de chaleur, solaire, géothermie, réacteur nucléaire, etc.

Slide 29 La convection

La chaleur se transmet de trois façons : rayonnement, conduction et convection. Les deux premières sont assez faciles à modéliser parce qu'elles sont directionnelles. Par contre, la dernière est multidirectionnelle et, dans la nature (pas dans une casserole où l'on fait bouillir de l'eau), elle se situe dans un espace immense.

Curieusement, météorologie, océanographie et géologie suivent des lois analogues. Malheureusement, elles sont de convection. Or on ne sait pas bien modéliser ces phénomènes.

Maths : le point de départ est connu : un gradient de température ou de concentration (masses volumiques) induit un mouvement dans un fluide. Par exemple, l'eau froide est plus dense que l'eau chaude. Seuil critique du nombre de Rayleigh dans les équations de Navier-Stokes (mécanique des fluides). Voici les équations de base d'un modèle de prévision météo (chaque variable est un vecteur, par exemple f à elle seule est le mouvement de la Terre) :

$$\frac{Du}{Dt} + 2f \times u + \frac{1}{\rho} \nabla p + g = \nu \nabla^2 u,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0,$$

$$C \frac{DT}{Dt} - \frac{RT}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = \kappa_h \nabla^2 T + S_h + LP,$$

$$\frac{Dq}{Dt} = \kappa_q \nabla^2 q + S_q - P,$$

$$p = \rho RT.$$

Motion

Density

Temperature

Moisture

Pressure

Source : Chris Bud OBE, Gresham College, University of Bath, The mathematics of climate change

<https://www.gresham.ac.uk/lectures-and-events/mathematics-climate-change>

« Indépendamment » des phénomènes naturels, beaucoup d'installations énergétiques font appel à la convection. L'impact de cette dernière est souvent ignoré. Exemple de la circulation de l'air et de l'hygrométrie à l'intérieur d'un bâtiment.

Slide 30 Le chaos

Maths : une différence de conditions initiales induit une différence d'effet, par exemple tourner dans un sens ou dans l'autre (cela se produit moins souvent dans un espace confiné). Le système devient chaotique. La catastrophe arrive lorsque deux points très proches initialement divergent (bifurcation de Hopf) dans le temps avec une trajectoire exponentielle.

Maths : la différence de conditions initiales due à un battement d'ailes du papillon « induit » une différence d'effet qui est la tornade. Ici, une série de films d'animation remarquables qui illustrent l'intervention du chaos, au sens mathématique, dans chaque source d'énergie :

<http://www.chaos-math.org/fr>

Maths : le nombre d'or $\Phi = 1,618...$ Ce nombre est omniprésent dans la nature. La « divine proportion » de la Renaissance, comme une harmonie universelle. On peut aussi le voir autrement, comme le résultat de la plus simple des catastrophes : $\Phi^2 = \Phi + 1$ ou bien $-1 = \Phi (1 - \Phi)$?

Slide 31 Les fonctions

L'histoire de l'analyse peut se résumer à trois fonctions de base.

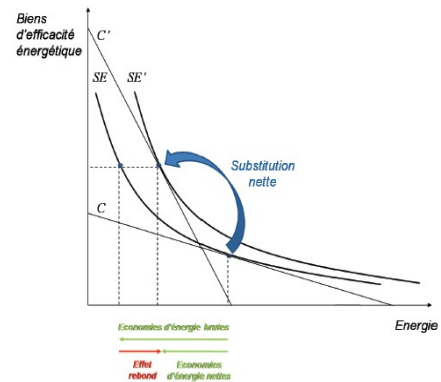
Maths : la première est l'exponentielle, qui correspond à la courbe de Malthus (ne pas confondre avec le malthusianisme qui, en tant que doctrine politique, s'y oppose). Outil de base de la démographie. Corrélée notamment aux émissions de CO_2 . Lorsque le taux d'accroissement d'une population est r , cette fonction est la solution de l'équation différentielle $dN = r N dt$ (t pour temps, d pour dérivation, variation).

Maths : ensuite, lorsque l'on introduit un frein environnemental, une capacité d'accueil k , l'équation différentielle devient $dN = k N (1-N) dt$. La solution est la fonction sigmoïde, qui correspond à la courbe de Verhulst. C'est l'outil de base pour étudier la consommation d'une source d'énergie jusqu'à ce qu'elle atteigne un plateau (asymptote), le développement du parc roulant automobile, l'offre de logement, l'autocatalyse, etc.

L'image par une transformation affine de la sigmoïde donne la fonction logistique (au sens calcul) proportionnelle à l'inverse de $1 + ae^{-rt}$ où $a > 0$.

Maths : enfin, lorsque l'on développe le calcul pratique, on rencontre les suites de la forme $x_{i+1} = \alpha (1 - x_i)$ où x_0 est compris entre 0 et 1 (i pour indice). Ces suites ont trois types de comportement. Soit elles convergent. Soit elles oscillent (effet rebond, dit de Jevons). Soit c'est le chaos. On rentre alors dans la théorie des bifurcations, des catastrophes.

La problématique des économies d'énergie peut osciller, devenir chaotique. Lorsque la consommation d'énergie pour satisfaire un besoin donné baisse, s'il n'y a pas de signal prix dans l'autre sens (par exemple si l'on a investi à un moment donné et si les dépenses courantes baissent nettement ensuite), alors le comportement peut évoluer et la consommation d'énergie peut remonter.



Slide 32 La courbe de Hubbert

Hubbert est un géophysicien américain.

Cette courbe en cloche, datant de 1956, est parfois dite pustule (pimple).

Son point d'application initial, que l'on vérifie aujourd'hui, est le pic du pétrole conventionnel.

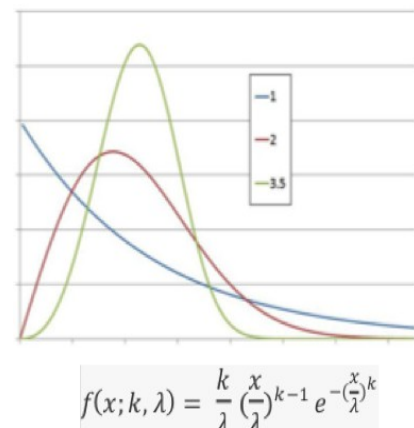
Maths : les réserves d'une ressource non ou très lentement renouvelable sur Terre sont exprimées, dans une certaine unité, par un nombre fini. L'aire de la courbe de consommation est finie. La fonction tend vers 0 à l'infini. Elle atteint un maximum si elle est continue.

Slide 33 Les lois de Weibull

On les trouve dans l'industrie pour la fiabilité, la résistance à la fatigue et à la rupture.

On les trouve également dans la nature pour les mesures physiques telles que la vitesse du vent ou le rendement d'un panneau photovoltaïque, les vagues de la mer, etc.

Maths : il s'agit d'une distribution qui a toujours la même allure. Il est souvent possible de trouver dans la famille une loi ne s'éloignant pas des données disponibles en calculant k (paramètre de forme) et λ (paramètre d'échelle, d'aplatissement) à partir de la moyenne et de la variance observées. On retrouve lorsque $k = 1$ la loi exponentielle, lorsque $k = 3,5$ une loi proche de la loi normale, lorsque $k = 2$ la loi de Rayleigh (processus stochastique). Le cas échéant, il est possible d'ajouter un paramètre de position (on translate l'axe des abscisses).



Cette dernière loi est utilisée pour l'énergie éolienne. Elle pose des difficultés d'exploitation car elle monte vite en très peu de temps et descend lentement pendant longtemps.

Slide 34 L'éolien

Le facteur de capacité est environ 25%.

Maths : puissance du vent = cube de la vitesse (énergie x longueur).

Maths : facteur de Betz $16/27$ r 59%. Solution d'une équation du second degré, traversée d'un capteur de surface donnée par un fluide. Cette limite traduit la compétition entre deux phénomènes opposés : l'éolienne récupère d'autant plus d'énergie qu'elle freine plus le vent, mais elle en récupère d'autant moins que le débit est plus faible. Or le ralentissement réduit le débit.

Rendement du dispositif 70%.

Puissance délivrée par unité de surface indépendante de la taille. Le besoin de superficie est souvent sous-estimé : si l'éolien devait fournir toute l'électricité en France, la superficie équivaldrait à toutes les zones habitées plus tout le réseau routier.

Foisonnement difficile, les régimes des vents ne sont guère différents d'une région à une autre de notre continent.

Besoin de nouvelles lignes Haute Tension à partir des régions les plus ventées.

Selon VGB Power Tech, en 2016, 150 GW d'éoliennes installées dans 18 pays européens ont délivré en moyenne 33 GW soit 22%.

Elles ont garanti seulement (au minimum) 6,5 GW soit 4,3 % de la puissance.

En Allemagne, huit réacteurs nucléaires ont été arrêtés, plus ceux hérités de la RDA. Le charbon est supposé être un relai avant l'essor des énergies renouvelables, mais l'État fédéral vient d'annoncer que les centrales au charbon seront prolongées de 20 ans au-delà de la butée prévue, ce qui fait 2070. Des efforts gigantesques d'investissement ont été consentis, le prix de l'électricité pour les particuliers est deux fois plus élevé qu'en France (EEG Umlage = 50 % de l'Impôt sur le Revenu français). L'éolien et le solaire procurent plus de 20 % de l'électricité allemande, contre 5 % en France, mais les émissions de GES / kWh sont 10 fois supérieures.

Raisonnement : lorsque l'on compare les sources d'énergie entre elles, on ne peut pas toujours raisonner en marginal par rapport à un réseau « bon samaritain » en toile de fond.

La France n'est pas exempte de reproches. En 2016 et 2017, le réseau électrique (RTE) a augmenté ses émissions à cause du « bridage » du nucléaire (centrales au gaz en pointe). 2018 a permis une pose à cause de la température plus élevée en période de chauffage. Un grand merci au réchauffement climatique...

Toutes les énergies intermittentes ont besoin d'une capacité « énorme » de systèmes de secours. Les moyens de production plus souples sont essentiellement fossiles. Sauf à associer un parc de barrages permettant le pompage massif en heures creuses, mais tous les sites viables sont déjà sollicités pour passer les pointes. Le stockage de l'électricité à grande échelle est sans solution aujourd'hui : bancs de batteries (services systèmes), Station TE Pompage. Enfin, on fait appel à des automatismes de régulation du réseau. À l'extrême, le dispositif d'interruptibilité cache une insatisfaction de la demande.

Slide 35 La loi (a) normale

La production d'électricité est modélisée par une monotone de charge qui distingue la pointe (puissance), la valeur moyenne (énergie) et l'amplitude des fluctuations $\sqrt{3}\sigma$ (σ écart type de la demande convertie en loi uniforme). Sur un jour de semaine, la demande d'électricité varie de la même ampleur (20 GW) qu'entre les saisons d'hiver et d'été. Elle est divisée par 2 le week-end.

Maths : on voit à l'oeil qu'aucune courbe ne correspond à une loi normale. On reconnaît une sigmoïde et des lois de Weibull.

Maths : il faut éliminer par principe toute méthode statistique qui repose sur une hypothèse a priori. La mise à l'écart des centiles 5% et 95%, la médiane des écarts absolus à la médiane, la boîte à moustaches (boxplot) de Tukey (seuils de 25% et 75%) sont des concepts qualitatifs. Ils ne peuvent devenir quantitatifs que si l'on fait l'hypothèse supplémentaire d'une loi particulière, par exemple la loi normale. Mais cette hypothèse peut trop déformer la réalité.

Exemple récent du BRGM qui a sollicité la SCM pour la définition des seuils de contamination du sol. Newsletter de mars 2019 :

<http://scmsa.eu/archives/lettre85.pdf>

Slide 36 Modélisation

Slide 37 La granulométrie des modèles climatiques

Une maille est un parallélépipède de 100 à 200 kilomètres sur deux côtés, mais d'épaisseur de plus en plus fine lorsque l'on se rapproche de la surface du globe. Autrement dit, la région parisienne compte pour une donnée à la verticale (la France, une trentaine).

Les divergences sont dues aux phénomènes dits « sous maille » : échanges radiatifs, végétation, turbulences de l'air, nuages, aérosols et vapeur d'eau, courants maritimes, etc.

Le « satellite dataset » américain Remote Sensing Systems (RSS) et University of Alabama in Huntsville (UAH) prévoit une hausse deux fois moins forte que celle du GIEC.

Dans les océans, le réseau des balises Argos (3500 aujourd'hui) est très difficile à exploiter.

Slide 38 Les océans et les aérosols des volcans

Le faux plat, le « Hiatus » des années 1998 – 2012 du GIEC s'explique par des erreurs de méthodologie, les éruptions volcaniques post-Pinatubo (1991) non intégrées et l'oscillateur du Pacifique équatorial Est (8 % de la surface terrestre).

El Nino & La Nina ont des fréquences différentes, ils ne semblent pas nécessairement induits l'un par l'autre. Ce sont les pêcheurs péruviens qui ont attribué à El Niño son nom qui veut dire « le petit garçon » en espagnol. Il fait référence à Jésus car il atteint son apogée à l'époque de Noël. En temps normal, dans l'océan Pacifique et autour de l'équateur, les alizés soufflent d'est (Amérique) en ouest (Australie et Asie). Mais, lorsque la Terre est frappée par El Niño, ils ont tendance à s'inverser.

Un bon modèle doit être couplé atmosphère-océan, la circulation thermohaline étant très difficile à modéliser.

Le GIEC a intégré récemment l'impact des aérosols des volcans (effet temporaire de $-0,4^{\circ}\text{C}$ pour une très grosse éruption).

Maths : c'est tout l'intérêt de raisonner sur des probabilités. Contrairement aux idées reçues, il vaut mieux, il est plus précis de procéder ainsi que d'émettre des hypothèses déterministes, puis de définir des scénarios fourchettes bas / haut (comme le font malheureusement beaucoup de grands consultants et d'institutions).

Slides 39 et 40 Le problème de Fermi

Prix Nobel 1938, connu par ailleurs pour le paradoxe des civilisations extraterrestres.

Maths : le choix des litres d'air passés par le cor de Roland à Roncevaux en 778 dans l'atmosphère et le tirage des molécules dans le litre d'air inspiré se combinent en une loi binomiale que l'on peut approximer par une loi de Poisson. La probabilité est une quasi-certitude.

Maths : 5 litres d'air passés par le cor de Roland. 4×10^{21} litres d'air dans l'atmosphère terrestre. 1 litre d'air par inspiration. $2,7 \times 10^{22}$ molécules par litre d'air. Loi binomiale de paramètres $1,25 \times 10^{-21}$ et $2,7 \times 10^{22}$. Espérance de 33,75. Loi de Poisson. Probabilité $1 - e^{-33,75} \approx 99,9999999999998$ %.

Petits et grands nombres.
Intemporalité de l'écosystème de la Terre.

Slide 41 Les éléments

Le tableau du slide est scolaire, simplifié, pas le tableau utilisé par les chimistes (valences) ou d'autres plus sophistiqués.

En haut à droite, la vie, la chimie organique, les énergies fossiles.
En bas, l'énergie de fission nucléaire.
En haut à gauche, le stockage de l'électricité.

Raisonnement : au centre, les énergies dites renouvelables (EnR), pour être mises en œuvre, doivent consommer abondamment certains éléments, en particulier les terres rares (raes parce qu'il faut les extraire d'une grande quantité de terre). Même pour les énergies dites natives, il n'y a pas de miracle.

Voir le rapport commun (initialement sur la transition énergétique) des Académies des Sciences et des Technologies de juillet 2018 :

<https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/utilisation-des-ressources-du-sous-sol-pour-la-transition-energetique.html>

Raisonnement : l'électricité a besoin du cuivre. Global Energy Perspective 2019 Reference Case 2050 McKinsey : doublement de la demande électrique, énergie nécessaire x 5 x 2 et ressources estimées (600 millions de tonnes) de 20 ans pour le cuivre (y.c. le recyclage, déjà supérieur à 50% dans les pays développés).

Raisonnement : les énergies renouvelables sont diffuses, elles ont besoin de superficie (pour bien faire, elle devrait être valorisée sous la forme d'un coût immobilisé). Richard Lavergne, CGE mars 2019 : en acceptant 20% de stockage saisonnier (1 m³ de pétrole), il faut 200 m² de panneaux photovoltaïques par personne.

Slide 42

La limite de Shockley-Queisser de l'efficacité d'une cellule solaire mono-jonction est une réalité. L'historique sur 45 ans de plusieurs centaines de technologies par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) montre que le seuil de 33,7% est un plafond de verre en laboratoire (le pourcent est moitié moins dans la mise en œuvre).

La baisse des prix dans le photovoltaïque (sans prendre en compte les aides publiques) est industrielle, systémique (au sens : plusieurs composants ou modules), elle n'est plus vraiment technologique.

Slide 43 Les unités de base du système international depuis le 20 mai 2019

L'évolution, d'actualité récente, du Système International oriente les quatre unités principales vers l'énergie :

- température / constante de Boltzmann / entropie (thermodynamique) ;
- temps / fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé (nucléaire) ;
- mètre / vitesse de la lumière dans le vide / équivalence masse-énergie (gravité) ;
- kilo / constante de Planck / énergie d'un photon (quantique).

Le Kelvin est la seule unité indépendante des autres.

L'entropie n'est pas homogène à une énergie, il faut la multiplier par une température.

Slide 44 L'énergie

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail.

Le travail est l'énergie fournie par l'action d'une force sur une distance.

Exemple pas évident : une force de frottement n'est pas conservative. Son travail n'est pas indépendant du chemin suivi par son point d'action. Elle ne dérive pas d'une énergie potentielle. La chaleur, elle, se trouve dans l'agitation microscopique.

$$\text{Énergie} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

De ce point de vue, l'énergie est un flux de déstockage. Nous avons tendance à l'interrompre. Exemple des véhicules électriques : le problème de départ n'est pas d'embarquer des grosses batteries, mais de transmettre de l'électricité, ce qui peut se faire par d'autres moyens notamment sur les grands axes routiers.

La reconstitution du stock nécessite du temps, de la surface, de l'énergie, etc.

Exemple.

Barrage hydraulique (énergie potentielle de gravitation).

Conduite forcée vers la vallée (énergie cinétique).

Turbine et alternateur (énergie mécanique).

Électricité (énergie électromagnétique).

Au bout du bout, c'est le cycle de l'eau qui ferme le flux circulaire, qui boucle.

Slide 45 L'entropie

Consommer de l'énergie, ce n'est pas la faire disparaître, c'est créer de l'entropie.

Exemple.

La station de ski investit dans différents moyens mécaniques (tire-fesses, télésiège, télécabine, etc.) pour donner de l'énergie potentielle au skieur.

Lorsque le skieur dévale la pente, il transforme cette énergie en énergie cinétique (prise de vitesse).

Quand le skieur freine, les frottements avec la neige produisent de la chaleur, la température des skis et de la neige s'élève.

C'est de l'énergie inutile (entropie x température).

Projections du projet de PPE -17% de consommation d'énergie finale d'ici 2030 en retrait par rapport à l'objectif législatif de -20% et au projet de loi énergie.

Comment éviter des efforts supplémentaires d'économie d'énergie sur les énergies les plus vertueuses ?

Suite de l'exemple. Si on lui donne cette contrainte, la station de ski n'a guère le choix. Elle va réduire le flux des remontées mécaniques. Sur une semaine de ski, le skieur fera 3% de descentes en moins.

Slide 46 La loi de Moore

1956 : 2 Mo nécessitaient un conteneur IBM de 4 m³. 2016 : 2 To tiennent dans un disque dur Toshiba ou autre dans le creux de la main.
Facteur de l'ordre du million en 60 ans.

Mais il faut toujours le même temps pour regarder un film qui dure 2 heures.
Et quelle est l'utilité profonde de 100 téléphones portables qui photographient un seul manifestant dans la rue ?
Tout ceci n'est qu'entropie, au sens de la théorie de l'information.

Mais où est donc l'énergie inutile ? Les centres de données totalisent 40 Zo (10²¹) en 2018. Ils consomment 700 Twh par an, soit 3% de l'électricité produite mondialement (1 fois et demi la France).
Google, un bloc d'un quartier périphérique de San Francisco, consomme autant d'électricité que la commune centrale elle-même (900000 habitants).

Raisonnement : la croissance prévue par les spécialistes des centres de données est de 10% par an jusqu'en 2040 (elle est davantage aujourd'hui). Cela représente 40% de la croissance de la production d'électricité, elle-même renouvelable à 60%.
Autrement dit, les deux tiers de nos investissements dans les énergies renouvelables vont au numérique, essentiellement à de l'entropie.

Sachant que, selon une récente étude Ademe - Capgemini, la partie vertueuse du numérique, celle des smart grids, consommera finalement peu d'électricité (1% en France, y compris Linky).

Slide 47 Prévision

Slide 48 Les pétroles et les marchés

Les champs de pétrole conventionnel existants, à développer ou à découvrir ont commencé leur décroissance vers 2011.

Le gaz naturel liquéfié, les extra lourd et sables bitumineux, l'huile de schiste complètent les pétroles liquides de sorte qu'un plateau est atteint.

Le facteur clef est la quantité d'énergie nécessaire pour en extraire une autre (exemple du baril nécessaire pour en extraire deux dans les situations difficiles).

Si l'on nette (si l'on soustrait les barils consommés en amont de la production aux barils produits), sans faire de prospective optimiste, le plateau lui-même va amorcer une décroissance.

Source : IEA world energy outlook 2018, Antonio Turiel, blog The oil crash
<http://crashoil.blogspot.com>

Ne pas confondre avec le pic de la demande (nouveaux usages de l'électricité) et le pic du prix (la spéculation pèse 35 fois la production).

En aval, au niveau de la consommation finale de produits pétroliers raffinés par secteur, la situation des transports est hors de contrôle. La consommation totale évolue peu depuis 40 ans. Mais la part des transports est passée de 20% à 60%.
Source : Service de la donnée et des études statistiques (SDES).

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

La politique des transports collectifs se limite aux métropoles, lesquelles ne pèsent que 25% de la population.

La route est ultra dominante (85%, chiffre immuable).

Effets d'annonce politiques : voiture à 2 litres aux 100 km, zéro voiture thermique en 2040. En réalité, l'efficacité énergétique est faible. Aujourd'hui, 6,5 litres d'essence ou de gazole aux 100 km pour un véhicule médian du parc roulant.

L'âge médian du parc roulant se rapproche de 10 ans, il y a une grande inertie. Le marché d'aujourd'hui (par exemple en France, moins de 2 % de véhicules électriques, moins de 10 % d'hybrides full ou mild, 40% de SUV) est pratiquement le parc de 2030.

L'usage augmente plus vite que la démographie (distance entre domicile et travail, éclatement familial).

Même si le prix à la pompe est un sujet sensible, l'énergie pèse finalement peu (entre 10 et 15%) dans le coût total de possession.

Etc.

Slide 49 Fuelling Europe's future

Nos projections dans l'avenir sont fantaisistes.

En 2013, une trentaine d'entreprises et d'organismes prestigieux ont prévu le marché européen des véhicules à batterie (BEV). Avec une plage de chiffres et deux ou trois scénarios. 5 ans plus tard, nous ne sommes même pas entrés dans la partie inférieure de la plage de chiffres. Tout le monde s'est trompé, et dans les grandes largeurs.

Du coup, Cambridge Econometrics et Element Energy viennent de recommencer le travail (2018). Le scénario bas dit Tech prévoit 6% de BEV en 2025, 15% en 2030 (marché). Ce scénario se situe sur le bord inférieur de la plage de chiffres précitée.

Quant à elle, l'Agence Internationale de l'Énergie, selon son dernier scénario prudent (IEA WEO 2018 à l'horizon 2030, scénario bas dit NPS), prévoit en VEx (batterie pure, hybride rechargeable, extension d'autonomie ou pile à combustible) 8 % des 100 Millions de VP et de VUL du marché 2025.

Raisonnement : retro-planning. Mais aujourd'hui, où sont les 16 giga-usines (ou les agrégats d'usines plus petits tels que « l'Airbus » d'origine franco-allemande), chacune pour 0,5 Millions de VEx par an ? Où sont les 16 x 4,5 = 72 Milliards de dollars de CAPEX nécessaires ?

Slide 50 Piloter l'offre ou la demande ?

Le pilotage public par les normes et les réglementations n'est pas suffisant.

En 20 ans, les progrès sur les motorisations ont été contrebalancés par l'alourdissement des voitures de 30 % (sécurité et confort).
Aujourd'hui, la segmentation du marché évolue vers l'augmentation de la taille.

La plongée du diesel, liée à la pollution atmosphérique, parfois avec des arguments erronés, plombe le marché du neuf puis celui de l'occasion.

Somme toute, en réalité, les émissions de CO₂ se dégradent.

Au niveau européen (c'est pire en France), 2018 est revenue 4 ans en arrière.
L'affaire Volkswagen. L'évolution des cycles (NEDC vers WLPT, Real Emission Drive) aura pour conséquence un retour (des chiffres) 10 ans en arrière, nécessitant une révision des prévisions à terme de l'ordre de 15%.
Source : Institut Jato Dynamics.

Slide 51 Croissance économique = Énergie disponible

Maths : les théories économiques ne considèrent pas l'énergie comme un facteur de production. Des marxistes aux libéraux, le modèle de Solow n'utilise que le capital K et le travail L, éventuellement un « résidu » (exemple de la prise en considération de la destruction créatrice et de l'innovation par Schumpeter).

Le PIB est une fonction affine de l'énergie disponible. La raison profonde réside dans tous les services et dans toute la logistique qui entourent une source d'énergie, fût-elle renouvelable, plus, bien sûr les matières premières.
Source : BP statistical review - Banque Mondiale 2015, repris par Carbone 4.

Le taux annuel d'efficacité énergétique (PIB / Énergie) est invariablement de + 0,8% par an. Il est faible et n'a pas bougé après les chocs pétroliers (la chasse au gaspi n'a rien donné de plus). Depuis 1980, le taux annuel Énergie / Personne a baissé de + 2,5% à + 0,4%.

Nous avons maintenu artificiellement notre niveau de vie en nous endettant, tout simplement.

Source : Gaël Giraud, Victor Court (CNRS).

Les chocs pétroliers résultent d'un transfert entre acteurs économiques et n'induisent pas une réduction des émissions carbonées.

En réalité, notre économie est devenue plus dépendante des pétroles liquides, et c'est chaque ralentissement de leur production qui provoque une crise.

La politique énergétique est coupée en deux, entre l'énergie qui est une optimisation des flux et l'environnement qui limite la consommation de matières

Slide 52 L'électricité

Maths : l'équation de Kaya. En laissant de côté les problématiques liées à la population et à la croissance économique, à l'efficacité énergétique, dont nous venons de voir qu'elle est faible, il reste une seule solution. Pour s'émanciper des énergies fossiles, le vecteur électricité est le point de passage obligé de la transition énergétique.

$$\text{CO}_2 = \text{Population} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \frac{\text{Energie}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{CO}_2}{\text{Energie}}$$

Les campagnes électorales se focalisent sur l'électricité, qui couvre moins du tiers de nos besoins. La question devient alors : où place-t-on le curseur entre nucléaire et renouvelables ?

L'électricité est un produit de luxe (TVA), pénalisé par la taxation (beaucoup plus forte que ce que l'on pense, proche des assises sur l'essence si l'on intègre le TURPE et les évolutions en cours de la CSPE).

Pénalisé également par la tarification. La clef de répartition moyenne, 20% abonnement et 80% consommation, est le contraire de ce qu'il faudrait faire. En termes d'extraction des énergies fossiles, ce qui compte, c'est l'énergie primaire (EP). Les autres comptabilités sont biaisées.

Exemple du Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) des logements, très éloigné de la réalité (notion de kWhEP). Le facteur de conversion de l'électricité dans la Réglementation Thermique (RT), 2,58, est le résultat artificiel de nombreuses hypothèses pour compenser la chaleur « perdue » en amont. Pour contrebalancer l'exagération du raisonnement, on défalque certaines consommations d'électricité sous condition.

Les discussions en cours dans le cadre de la future RT, par exemple autour des radiateurs électriques, montrent que la doctrine n'est toujours pas établie.

La neutralité carbone tolère la compensation financière : ce n'est plus une comptabilité de l'énergie.

L'électricité verte est virtuelle : quelle est la couleur de l'électron lorsqu'il passe une frontière ?

Slide 53 Expérimentation

Slides 54 55 56 Le paradoxe de Braess

Une collaboration non imposée (différente du feu rouge ou de la priorité à droite) nécessite une négociation préalable avec les utilisateurs.

Le principe de Wardrop énonce que chaque utilisateur manipule une fonction intrinsèque d'aide à la décision, valorisant donc comparant ses différents chemins origine-destination.

Maths : la théorie des jeux dit qu'une population dans laquelle chacun a un impact négligeable est soumise à un équilibre de Nash. Or ce système n'est pas nécessairement optimal.

Même dans le transport collectif, un nouveau moyen peut se traduire par une dégradation des performances (exemples de lignes de tramway ou de bus à Paris).

Dans l'autre sens, certaines expériences récentes montrent que la suppression de routes (périphérique de Séoul, interstates et rues downtown aux USA, 2 x 2 voies à Nice) peut fluidifier le trafic.

C'est contre-intuitif. De nombreux exemples, renforcés par les aides à la navigation (Waze) et les réseaux sociaux.

Cas d'école très simplifié.

Débit régulier en A.

1h immuable sur CB ou AD.

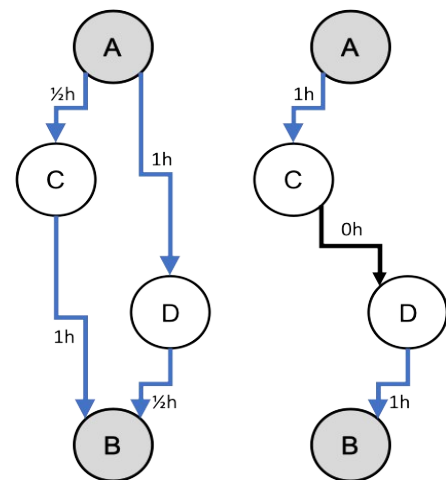
Le temps est proportionnel au trafic sur AC ou DB.

Premier équilibre : 1h ½.

On crée la liaison CD (0h).

Comme CDB est toujours au moins aussi rapide que CB, et ACD que AD, tous les véhicules passent par C.

Second équilibre : 2h.



Slide 57 La combinatoire

Maths : la combinatoire introduit rapidement un très grand nombre de cas à étudier.

La formule de Stirling pour une factorielle donne des exponentielles d'exponentielles :

$$n! \cong \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

Dans la vie courante, on est mal organisé pour affronter cette difficulté.

Exemple de la consommation d'électricité chez un particulier. D'un côté, le réseau procède à une certaine optimisation de l'offre par rapport à la demande (voir slide 35). Finalement, il propose un tarif dont la plus grande complexité est la formule Tempo : un choix de puissance, trois couleurs de jours (calendrier imposé), heure pleine heure creuse (commutation imposée). De l'autre côté, le compteur Linky offre 10 index, mesure à un pas de 30 minutes, relève à distance une fois par jour, supporte 7 contacts en aval et une pointe mobile sur plage horaire. Où est l'optimisation fine ?

Slide 58 La couverture de graphe

Maths : les mathématiques proposent un outil algorithmique, bien connu des informaticiens, la théorie des graphes. Cette théorie permet de rapprocher une macro organisation d'une multitude de micro décisions.

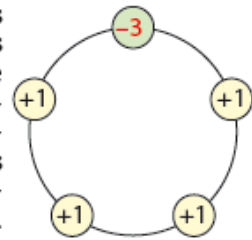
Donnons un autre exemple, celui de la mobilité partagée.

Commençons par un cas simple (en apparence), issu d'un jeu publié par votre serviteur dans Le Monde du 7 novembre 2018 :

Procédures auto-matiques

N° 1075

La flotte des voitures d'un opérateur d'auto-partage est répartie entre cinq parcs situés autour d'une grande ville. Les réservations, faites la veille sur Internet, sont limitées par un programme à un total strictement inférieur au nombre de voitures. Le nombre de chaque parc est ajusté durant la nuit *via* une procédure automatique. Chaque opération de la procédure consiste à choisir un parc où il manque N voitures, puis à transférer vers lui $2N$ voitures, prélevées moitié moitié sur chacun des deux parcs voisins (le programme fait en sorte que ce soit toujours possible). Cette nuit-là, au vu des réservations, il manque trois voitures dans le parc vert et il y en a une de trop dans les jaunes. L'objectif est de faire en sorte que, dans chaque parc, il ne manque aucune voiture.



1. Combien d'opérations, au minimum, permettront d'atteindre l'objectif ?
2. L'objectif pourra-t-il être toujours atteint quelles que soient les réservations ?

Solution du problème 1075

1. 10 opérations permettent d'atteindre l'objectif.

Les nombres successifs de voitures manquantes ou en trop sont indiqués à partir du parc du haut en tournant dans le sens trigonométrique.

$(-3,+1,+1,+1,+1) \rightarrow (+3,-2,+1,+1,-2) \rightarrow (+1,+2,-1,+1,-2)$
 $\rightarrow (+1,+1,+1,0,-2) \rightarrow (-1,+1,+1,-2,+2) \rightarrow (+1,0,+1,-2,+1)$
 $\rightarrow (+1,0,-1,+2,-1) \rightarrow (+1,-1,+1,+1,-1) \rightarrow (0,+1,0,+1,-1)$
 $\rightarrow (-1,+1,0,0,+1) \rightarrow (+1,0,0,0,0)$.

On ne peut pas réussir en moins de 10 opérations.

On peut le montrer en suivant tous les chemins possibles.

Il existe dans le cas général une méthode (trop longue pour être décrite ici) qui permet d'obtenir, sans dérouler l'intégralité du processus, le nombre minimum d'opérations.

2. Quelle que soit la situation de départ des parcs, l'objectif sera atteint au bout d'un nombre fini d'opérations.

On écrit, comme plus haut, la suite des nombres successifs de voitures manquantes ou en trop à partir du parc du haut en tournant dans un des sens : (a, b, c, d, e) . On pose :

$$F(a, b, c, d, e) : (a-c)^2 + (b-d)^2 + (c-e)^2 + (d-a)^2 + (e-b)^2$$

Sans perte de généralité, supposons $a < 0$. Le transfert vers le parc concerné amène la situation : $(-a, b+a, c, d, e+a)$.

Un calcul simple montre :

$$F(-a, b+a, c, d, e+a) - F(a, b, c, d, e) = 2a(a+b+c+d+e)$$

Cette différence est strictement négative avec l'hypothèse de départ : $a+b+c+d+e > 0$ et $a < 0$.

Ainsi, tant qu'il manque une voiture dans un parc, l'opération associée fait décroître strictement l'entier positif F .

L'objectif sera donc atteint en un nombre fini d'opérations.

On mesure toute la difficulté sur ce cas qui ne contient que peu de nombres, et des petits nombres.

Toujours dans l'automobile, prenons un autre exemple, le Vehicle to Grid (V2G). Son intérêt est qu'il combine réseau électrique et mobilité. Un exemple de synergie énergétique insoupçonnée. Et on fait d'une pierre deux coups, car on déplace indirectement une consommation d'énergie fossile.

La puissance dormante du stationnement automobile est immense. Selon Dominique Chauvin, en ne prenant en compte qu'un véhicule sur 6, le calcul donne environ 1,5 fois la puissance du parc français de production d'électricité.

On imagine bien qu'un véhicule électrique se recharge normalement la nuit en heure creuse. On ne voit pas qu'il serait d'une grande utilité en se déchargeant (sur le réseau Basse Tension) en milieu de matinée ou en fin d'après-midi. Ou bien alors on ne voit pas l'intérêt comparatif et relatif par rapport aux systèmes batteries.

La fonction objectifs ne devrait pas se contenter de lisser la courbe de production (et d'une politique de tarification simpliste).

Maths : l'arrangement de la réservation du véhicule, l'emplacement où le véhicule est à disposition, la ou les plages de temps durant lesquelles le véhicule se recharge, les clients de dernière minute, etc. posent des problèmes mathématiques redoutables. La couverture de graphe est complexe. Un spécialiste de l'algorithmique dit qu'il s'agit de NP-complétude. Du coup, il simplifie la programmation en approximant de façon linéaire.

Slide 59 Merci pour votre attention !

Une dernière observation sur les flux à l'échelle planétaire.

L'idéal serait de combiner les flux d'énergie avec la réduction du CO₂ (et non de stocker, une fois de plus, les émissions de ce GES).

D'où des idées intéressantes.

Cultiver les micro-algues sur les façades des bâtiments, comme le feraient les océans. XTU Architects, projet réinventer Paris, 13^e arrondissement.

Produire des carburants liquides par électroréduction. Électrocatalyse. On « craque » l'eau puis on réduit le CO₂ en hydrocarbures.