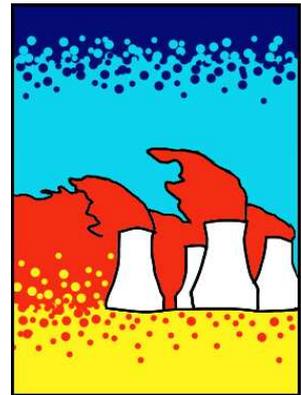


Quatrième partie

Données utiles



I Référence rapide

Unités du Système International

Le **watt** est une unité dérivée du système international (SI) pour la puissance, nommée d'après le nom du physicien écossais James Watt. Comme toutes les unités SI dont le nom est tiré de celui d'une personne, la première lettre de son symbole s'écrit en majuscule (W). Mais lorsqu'une unité SI est écrite en toutes lettres, elle l'est toujours en minuscules (« watt »), à l'exception du « degré Celsius ».

d'après Wikipédia en anglais

SI signifie « Système International ». Les unités SI sont celles qu'utilisent tous les ingénieurs (du moins ceux qui veulent éviter de perdre une sonde spatiale).

Unités SI			préfixe	kilo	méga	giga	téra	péta	exa	zetta
énergie	un joule	1 J	symbole	k	M	G	T	P	E	Z
puissance	un watt	1 W	facteur	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}
force	un newton	1 N								
longueur	un mètre	1 m	préfixe	centi	milli	micro	nano	pico	femto	atto
temps	une seconde	1 s	symbole	c	m	μ	n	p	f	a
température	un kelvin	1 K	facteur	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}

TABLEAU I.1. Unités et préfixes définis par le Système International des Unités (SI).

Mes unités favorites pour l'énergie, la puissance, et le rendement du transport

Mes unités favorites, exprimées en unités SI			
énergie	un kilowatt-heure	1 kWh	3 600 000 J
puissance	un kilowatt-heure par jour	1 kWh/j	$(1\,000/24)\text{ W} \simeq 40\text{ W}$
force	un kilowatt-heure pour 100 km	1 kWh/100 km	36 N
temps	une heure	1 h	3 600 s
	un jour	1 j	$24 \times 3\,600\text{ s} \simeq 10^5\text{ s}$
	un an	1 an	$365,25 \times 24 \times 3\,600\text{ s} \simeq \pi \times 10^7\text{ s}$
force par unité de masse	kilowatt-heure par tonne-kilomètre	1 kWh/t-km	$3,6\text{ m/s}^2 (\simeq 0,37 \times g)$

Unités et symboles supplémentaires

chose mesurée	nom d'unité	symbole	valeur
humains	personne	pers.	
masse	tonne	t	1 t = 1 000 kg
	gigatonne	Gt	1 Gt = $10^9 \times 1\,000\text{ kg} = 1\text{ Pg}$
transport	personne-kilomètre	pers-km	
transport	tonne-kilomètre	t-km	
volume	litre	L	1 L = 0,001 m ³
surface	kilomètre carré	km ²	1 km ² = 10 ⁶ m ² = 100 ha
	hectare	ha	1 ha = 10 ⁴ m ²
	Pays de Galles		1 Pays de Galles = 21 000 km ²
	Londres (Grand Londres)		1 Londres = 1 580 km ²
énergie	Département français		1 département français \simeq 5 000 km ²
	Dinorwig		1 Dinorwig = 9 GWh

Millions, milliards, billions, et préfixes fréquemment utilisés

Tout au long de ce livre, comme partout en Europe continentale, « un milliard » est un millier de millions, c'est-à-dire 10^9 , et « un billion » est un millier de milliards, c'est-à-dire 10^{12} . Le préfixe standard qui veut dire « milliard de » est « giga », et celui qui veut dire « billion de » est « téra ».

Attention cependant : vous risquez de trouver ici ou là de mauvaises traductions de l'anglais, qui parleront de « billions » pour désigner des milliards, et de « trillions » pour désigner des milliers de milliards — car c'est ce que signifient ces mots en anglais. Si d'autres que vous font la confusion, veillez à ne pas tomber dans le piège.

L'abréviation « m » est souvent utilisée, à tort, pour signifier « million de ». Mais cela ne correspond pas au sens que lui donne le Système International — pensez aux mg (milligrammes), par exemple. N'utilisez donc jamais un « m » minuscule pour signifier « million de », mais un « M » majuscule. Par exemple, on peut écrire « Mtep » pour parler de « millions de tonnes équivalent pétrole », et « Mt CO₂ » pour « millions de tonnes de CO₂ ».

Unités qui prêtent à confusion

Il y a toute une série d'unités d'usage courant qui, pour des raisons diverses, portent à confusion. J'ai fini par trouver ce que certaines d'entre elles signifiaient, et je les ai listées ci-dessous, pour vous aider à les traduire lorsque vous les rencontrerez dans les médias.

Foyers

Le « foyer » est une unité couramment utilisée pour décrire la puissance produite par des installations de production d'énergie renouvelable. Par

exemple, « les 140 turbines de la ferme éolienne de Whitelee, d'un coût de 375 millions d'euros produiront 322 MW — assez pour alimenter 200 000 foyers. » Le « foyer » est défini par l'Association britannique pour l'énergie éolienne comme étant égal à une puissance de **4 700 kWh par an** [www.bwea.com/ukwed/operational.asp]. Cela fait 0,54 kW, ou **13 kWh par jour**. (Quelques autres organisations utilisent 4 000 kWh/an par foyer.)

Cette notion de « foyer » me gêne, parce que je crains que les gens la confondent avec *la puissance totale que consomment les occupants d'un foyer* — cette dernière est, en fait, environ 24 fois plus grande. L'unité « foyer » couvre uniquement la consommation domestique moyenne d'électricité d'un foyer. Pas le chauffage de ce foyer. Ni le chauffage du lieu de travail des occupants de ce foyer. Ni leur transport. Ni tout ce que la société peut faire pour eux et qui consomme aussi de l'énergie.

Soit dit en passant, lorsqu'on entend parler « d'émissions de CO₂ d'un foyer », le taux de conversion officiel semble être de 4 tonnes de CO₂ par foyer et par an.

Centrales électriques, centrales nucléaires

Les idées pour économiser l'énergie sont parfois décrites sous la forme d'un nombre de centrales électriques ou de centrales nucléaires. Par exemple, selon un article de la BBC sur le fait de remplacer les ampoules des feux de circulation par des LED qui durent beaucoup plus longtemps, « la quantité d'énergie économisée serait énorme — laisser les feux de circulation allumés en permanence consomme l'équivalent de deux centrales électriques de puissance moyenne. » [news.bbc.co.uk/1/low/sci/tech/specials/sheffield_99/449368.stm]

Au fait, ça fait combien, une centrale électrique de puissance moyenne ? 10 MW ? 50 MW ? 100 MW ? 500 MW ? Je n'en ai aucune idée. Une recherche sur Google indique que pour certains, c'est 30 MW ; pour d'autres, c'est 250 MW ; pour d'autres encore, c'est 500 MW (c'est le choix le plus courant) ; et on trouve même 800 MW. Quelle unité d'une inutilité totale !

La situation est similaire pour l'unité « centrale nucléaire », même dans les pays comme la France, car tous les réacteurs nucléaires n'ont pas la même puissance, et en pratique, les centrales regroupent souvent plusieurs réacteurs au même endroit.

Il serait certainement plus clair pour tout le monde si l'article sur les feux de circulation exprimait ce qu'il veut exprimer sous forme d'un pourcentage : « laisser les feux de circulation allumés en permanence consomme 11 MW d'électricité, c'est-à-dire 0,03 % de l'électricité britannique. » Cela montrerait à quel point les économies de puissance (et non d'énergie) sont vraiment « énormes ».

La figure I.2 montre la puissance produite par les 19 centrales électriques au charbon du Royaume-Uni.

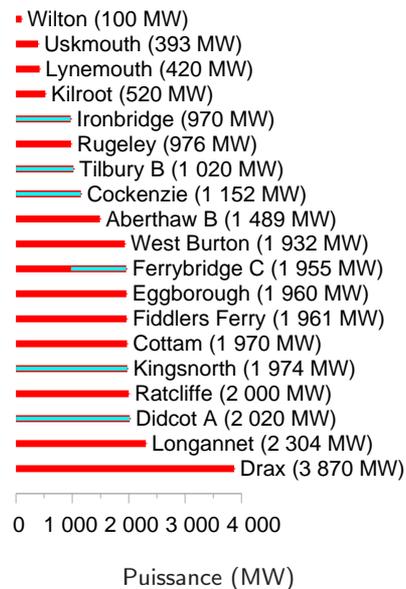


FIGURE I.2. Puissances des centrales électriques au charbon en Grande-Bretagne. J'ai mis en bleu les 8 GW de capacité de production qui fermeront d'ici 2015. 2 500 MW, partagés par l'ensemble des Britanniques, correspond à 1 kWh par jour et par personne.

Voitures en moins sur les routes

Certaines publicités parlent de réduction d'émissions de CO₂ en termes de « nombre de voitures en moins sur la route ». Par exemple, Richard Branson a dit que si la flotte de trains Virgin consommait 20 % de son carburant sous forme de biodiesel — soit dit en passant, vous ne trouvez pas choquant, vous, d'appeler un train à moteur Diesel un « train vert qui roule au biodiesel » alors qu'en fait, il roule à 80 % aux combustibles fossiles et seulement à 20 % au biodiesel ? — désolé, je me suis laissé distraire. Richard Branson a dit que *si* la flotte de trains Virgin consommait 20 % de son carburant sous forme de biodiesel — j'insiste sur le « *si* » parce que ce cher Richard attire toujours les micros lorsqu'il annonce *envisager* de faire des choses positives, y compris lorsque certaines de ces initiatives, annoncées en fanfare, sont ensuite discrètement enterrées, comme par exemple l'idée de remorquer les avions sur les pistes des aéroports pour les rendre plus verts — désolé, je me suis encore laissé distraire. Richard Branson, disais-je donc, a dit que *si* la flotte de trains Virgin consommait 20 % de son carburant sous forme de biodiesel, cela ferait baisser de 34 500 tonnes par an les émissions de CO₂, ce qui équivaut à « 23 000 voitures en moins sur les routes ». Cette phrase révèle le taux de conversion utilisé :

« une voiture en moins sur la route » \longleftrightarrow -1,5 tonnes par an de CO₂.

Calories

L'unité « calorie » prête à confusion parce que dans le langage courant, tout le monde appelle une kilocalorie une « Calorie ».

1 « Calorie » de nourriture = 1 000 calories.

2 500 kcal = 3 kWh = 10 000 kJ = 10 MJ.

Barils

Voilà une unité qui prête à confusion et qu'adorent les spécialistes du pétrole — avec la tonne de pétrole. Est-ce si difficile de se contenter d'une seule unité ? Un baril de pétrole vaut 6,1 GJ ou 1 700 kWh.

En fait, le baril prête doublement à confusion, parce qu'il en existe plusieurs définitions, toutes avec des volumes différents.

Voici tout ce que vous devez savoir à propos des barils de pétrole. Un baril fait 42 gallons U.S., ou 159 litres. Un baril de pétrole, c'est 0,136 4 tonnes de pétrole. Un baril de pétrole brut renferme une énergie de 5,75 GJ, soit 1 600 kWh. Un baril de pétrole pèse 136 kg. Une tonne de pétrole brut est égale à 7,33 barils et renferme une énergie de 42,1 GJ (soit 11 700 kWh). Le taux de pollution au carbone du pétrole brut est de 400 kg de CO₂ par baril. [www.chemlink.com.au/conversions.htm] Cela signifie que lorsque le prix du pétrole est de \$100 par baril, l'énergie du pétrole coûte \$0,06 par kWh. S'il y avait une taxe carbone de \$250 par tonne de CO₂ sur les combustibles fossiles, cette taxe augmenterait le prix d'un baril de pétrole de \$100.

Gallons

Le gallon pourrait être une unité bien sympathique, si les Yankees ne s'étaient pas amusés à la définir différemment de tout le monde — comme ils l'ont fait pour la pinte et le quart, d'ailleurs. Pour les Américains, ces unités de volume font en gros cinq sixièmes des volumes de même nom dans le reste du monde.

1 gallon US = 3,785 L = 0,83 gallon impérial. 1 gallon impérial = 4,545 L.

Les tonnes chez les anglo-saxons

Les tonnes peuvent parfois prêter à confusion, parce que dans les pays anglo-saxons, il existe des petites tonnes (« *short tons* »), des grandes tonnes (« *long tons* ») et des tonnes métriques (« *metric tons* »). En Europe continentale, on n'utilise que la tonne métrique, définie par le Système International. Mais en fait, toutes ces tonnes sont si proches que l'on peut se permettre de ne pas faire la distinction entre elles. 1 petite tonne = 907 kg; 1 grande tonne = 1 016 kg; 1 tonne métrique (ou tonne) = 1 000 kg.

BTU et quads

Les « unités thermiques britanniques » (« *British thermal units* » ou BTU) prêtent à confusion à la fois parce qu'elles ne font pas partie du *Système International*, et que leur petite taille ne les rend pas très utiles. Tout comme le bien peu pratique joule, le BTU est trop petit, de sorte que, pour en faire une unité d'une quelconque utilité, on est obligé d'y ajouter un préfixe compliqué (« quadrillion de », dans le sens anglo-saxon du mot qui plus est, ce qui prête encore plus à confusion, parce qu'en fait, il s'agit d'un million de milliards, soit 10^{15}).

1 kJ est égal à 0,947 BTU. 1 kWh est égal à 3 409 BTU.

Un « quad » est égal à un million de milliards (10^{15}) de BTU, soit 293 TWh.

Unités bizarres

Tasses de thé

On sait les Anglais fondus de thé, mais est-ce que ce qui suit montre les panneaux solaires sous un jour vraiment très favorable? « Une fois les 7 000 panneaux photovoltaïques installés, ils devraient générer 180 000 unités d'électricité renouvelable chaque année — suffisamment d'énergie pour faire chauffer **neuf millions de tasses de thé.** » Une telle annonce établit l'équivalence : 1 kWh égale 50 tasses de thé.

En tant qu'unité de volume pour la cuisine, la tasse (la moitié d'une pinte) vaut officiellement un quart de litre; mais en pratique, une tasse de thé ou de café fait généralement moins, autour de 0,18 L. Pour porter 50 tasses remplies d'eau de 15 °C à 100 °C, en comptant 0,18 L par tasse, il faut 1 kWh.

Par conséquent, dit autrement, « neuf millions de tasses de thé par an », c'est juste « 20 kW ».

Bus à impériale, Royal Albert Hall et stades de Wembley

« Si chaque Britannique en mesure de le faire isolait les murs creux de son habitation, on pourrait réduire nos émissions de dioxyde de carbone de 7 millions de tonnes — c'est énorme ! Cela remplirait près de 40 millions de bus à impériale, ou 900 fois le nouveau stade de Wembley ! »

Ce qui nous permet d'apprendre, au passage, qu'un stade de Wembley, ça ferait 44 000 bus à impériale. En fait, le volume intérieur de Wembley est de 1 140 000 m³.

« Si chaque foyer installait juste une ampoule à économie d'énergie, cela économiserait assez de dioxyde de carbone pour remplir 1 980 fois le Royal Albert Hall ! » (Un Royal Albert Hall, ça fait 100 000 m³.)

Exprimer des quantités de CO₂ en volume plutôt qu'en masse, c'est une excellente manière de rendre les choses bien plus énormes qu'elles ne le sont en réalité. Si « 1 kg de CO₂ par jour », ça vous paraît trop petit, dites simplement « 200 000 litres de CO₂ par an » (notez au passage le subreptice changement d'unité de temps). C'est facile !

Encore des volumes

Un conteneur fait 2,4 mètres de large sur 2,6 mètres de haut par (6,1 ou 12,2) mètres de long (pour un volume de, respectivement, un ou deux EVP).

Un EVP est le volume standardisé d'un petit conteneur long de vingt pieds, soit 6,1 mètres — ce qui offre un volume intérieur d'environ 33 m³. La plupart des conteneurs que l'on voit aujourd'hui sont deux fois plus longs, et offrent un volume de 2 EVP. Un conteneur de 2 EVP pèse 4 tonnes et peut transporter 26 tonnes de marchandises ; son volume est de 67,5 m³.

Une piscine a un volume d'environ 3 000 m³.

Un bus à impériale a un volume de 100 m³.

Le ballon d'une montgolfière occupe environ 2 500 m³.

La grande pyramide de Gizeh a un volume de 2 500 000 mètres cubes.

Surfaces

La superficie de la surface terrestre est de 500×10^6 km² ; la superficie des terres émergées est de 150×10^6 km².

Un terrain de football typique a une surface d'un peu plus de 7 000 m².

Ma maison britannique typique, avec ses 3 chambres, a une surface habitable de 88 m². Aux États-Unis, la surface moyenne d'une maison qui héberge une famille est de 216 m².

masse de CO ₂ ↔ volume	
2 kg de CO ₂ ↔	1 m ³
1 kg de CO ₂ ↔	500 litres
44 g de CO ₂ ↔	22 litres
2 g de CO ₂ ↔	1 litre

TABLEAU 1.3. Conversion de volumes en masses.



FIGURE 1.4. Un conteneur d'un équivalent vingt pieds (1 EVP).

hectare	= 10 ⁴ m ²
kilomètre carré	= 100 ha
kilomètre carré	= 10 ⁶ m ²
département français	≈ 5 000 km ²
France	≈ 550 000 km ²

TABLEAU 1.5. Surfaces.

Occupation des sols	surface par personne (m ²)	pourcentage
– bâtiments d'habitation	30	1,1
– jardins individuels	114	4,3
– autres bâtiments	18	0,66
– routes	60	2,2
– voies de chemin de fer	3,6	0,13
– chemins	2,9	0,11
– espaces verts	2 335	87,5
– eau	69	2,6
– autres occupations des sols	37	1,4
Total	2 670	100

TABLEAU I.6. Superficies de différentes occupations des sols en Angleterre. Source : Base de données de statistiques sur l'usage généralisé des terres pour l'Angleterre, 2005. [3b7zdf]

1 000 BTU par heure	=	0,3 kW	=	7 kWh/j
1 cheval (1 ch)	=	0,75 kW	=	18 kWh/j
		1 kW	=	24 kWh/j
1 therm	=	29,31 kWh		
1 000 BTU	=	0,2931 kWh		
1 MJ	=	0,2778 kWh		
1 GJ	=	277,8 kWh		
1 tep (tonne équivalent pétrole)	=	11 630 kWh		
1 kcal	=	$1,163 \times 10^{-3}$ kWh		
1 kWh	=	0,03412 therms	3 412 BTU	3,6 MJ
			86×10^{-6} tep	859,7 kcal

CADRE I.7. Le rapport entre le kilowatt-heure, le kilowatt-heure par jour et d'autres unités de puissance et d'énergie.

Puissances

Quand on ajoute le suffixe « (e) » à une unité de puissance, cela veut dire que l'on parle explicitement de puissance électrique. Ainsi, par exemple, la production d'une centrale électrique peut être de 1 GW(e), alors que cette même centrale consomme de la puissance chimique à hauteur de 2,5 GW. De la même manière, on peut ajouter le suffixe « (th) » pour indiquer qu'il s'agit d'une puissance thermique (ou calorifique). On peut aussi ajouter les mêmes suffixes aux unités d'énergie. « Ma maison consomme 2 kWh(e) d'électricité par jour. »

Enfin, si c'est le suffixe « (c) » que l'on ajoute à l'unité de puissance, cela indique que l'on parle d'une puissance-crête (dite aussi « puissance de pointe »), ou capacité. Par exemple, 10 m² de panneaux peuvent avoir une puissance de 1 kW(c).

$$1 \text{ kWh/j} = \frac{1}{24} \text{ kW.}$$

1 tep/an = 1,33 kW.

L'essence sort d'une pompe à essence à un rythme d'environ un demi-litre par seconde. Cela fait 5 kWh par seconde, ou 18 MW.

La puissance d'une Formule 1 est de 560 kW.

La consommation d'électricité britannique est de 17 kWh par jour et par personne, soit 42,5 GW par Royaume-Uni. Celle de la France est de 22 kWh par jour et par personne, soit 55 GW par France.

« Une tonne » de climatisation = 3,5 kW.

Consommation de puissance dans le monde

La consommation de puissance dans le monde est de 15 TW.

La consommation d'électricité mondiale est de 2 TW.

Facteurs de conversion bien utiles

Pour convertir des TWh/an en GW, il faut les diviser par 9.

1 kWh/j par personne, c'est la même chose que 2,5 GW par France, ou 22 TWh/an par France.

A la température ambiante, $1 kT = \frac{1}{40} eV$

A la température ambiante, $1 kT$ par molécule = 2,5 kJ/mol.

Lecture du compteur

Pour convertir en kilowatts-heures ce que vous indique votre compteur de gaz, il suffit de prendre le nombre de **mètres cubes** indiqué, et de le multiplier par **11,42** pour obtenir le nombre de kWh.

Valeurs calorifiques de combustibles

Pétrole brut : 37 MJ/L ; 10,3 kWh/L.

Gaz naturel : 38 MJ/m³. (Le méthane a une densité de 1,819 kg/m³.)

1 tonne de charbon : 29,3 GJ ; 8 000 kWh.

L'énergie de fusion de l'eau ordinaire : 1 800 kWh par litre.

Voir aussi le tableau 26.14, page 235, et le tableau D.3, page 334.

Capacités calorifiques

La capacité calorifique de l'air est de 1 kJ/kg/°C, ou 29 J/mol/°C. La densité de l'air est de 1,2 kg/m³. La capacité calorifique de l'air par unité de volume est donc de 1,2 kJ/m³/°C.

La chaleur latente de la vaporisation de l'eau : 2 257,92 kJ/kg. La capacité calorifique de la vapeur d'eau : 1,87 kJ/kg/°C. La capacité calorifique de l'eau est de 4,2 kJ/L/°C.

La densité de la vapeur est de 0,590 kg/m³.

	kWh/t-km
fluvial	0,083
rail	0,083
camion	0,75
air	2,8
oléoduc	0,056
gazoduc	0,47
maritime, par conteneur	0,056
maritime, en gros	0,056
pétrolier	0,028

TABLEAU 1.8. Intensité en énergie de modes de transport aux États-Unis. Source : Weber et Matthews (2008).

Pression

Pression atmosphérique : 1 bar $\simeq 10^5$ Pa (pascals).

Pression sous 1 000 mètres d'eau : 100 bars.

Pression sous 3 000 mètres d'eau : 300 bars.

Argent

J'ai fait l'hypothèse des taux de change suivants lorsque je parlais d'argent : 1 € = \$1,25; £1 = \$1,85; \$1 = \$1,12 canadien. Ces taux de change étaient ceux valables mi-2006.

Facteurs de conversion pour les gaz à effet de serre

France	83
Suède	87
Canada	220
Autriche	250
Belgique	335
Union européenne	353
Finlande	399
Espagne	408
Japon	483
Portugal	525
Royaume-Uni	580
Luxembourg	590
Allemagne	601
États-Unis	613
Pays-Bas	652
Italie	667
Irlande	784
Grèce	864
Danemark	881

FIGURE 1.9. Intensité en carbone de la production d'électricité (g CO₂ par kWh d'électricité).

Type de combustible	émissions (g CO ₂ par kWh d'énergie chimique)
gaz naturel	190
gaz de raffinerie	200
éthane	200
GPL	210
kérosène	240
essence	240
gazole/fioul	250
fioul lourd	260
naptha	260
coke (charbon)	300
charbon	300
coke de pétrole	340

FIGURE 1.10. Émissions associées à la combustion (c'est-à-dire le fait de brûler des combustibles).
Source : DEFRA's Environmental Reporting Guidelines for Company Reporting on Greenhouse Gas Emissions.

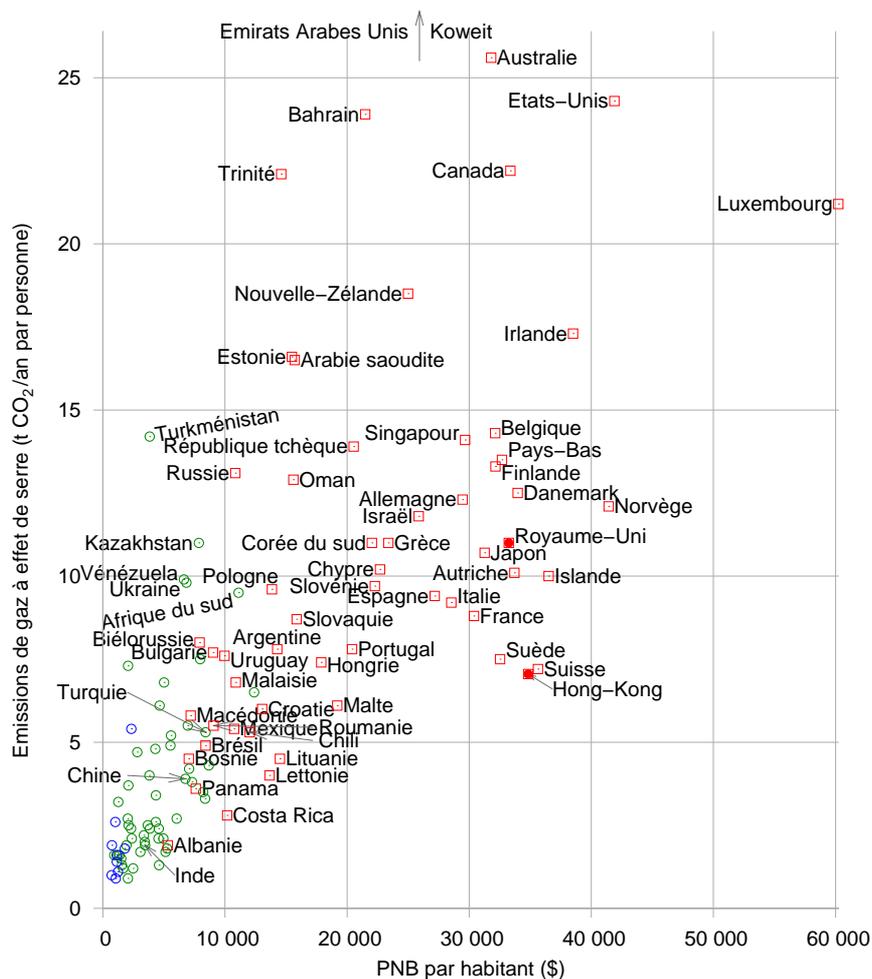


FIGURE I.11. Émissions de gaz à effet de serre par habitant, comparées au PNB par habitant, en dollars US à parité de pouvoir d'achat. Les carrés indiquent les pays qui ont un « haut niveau de développement » ; les ronds, les pays qui ont un « niveau de développement moyen » ou « faible ». Voir aussi les figures 30.1 (page 274) et 18.4 (page 126). Source : Rapport sur le développement humain du PNUD, 2007. [3av4s9]

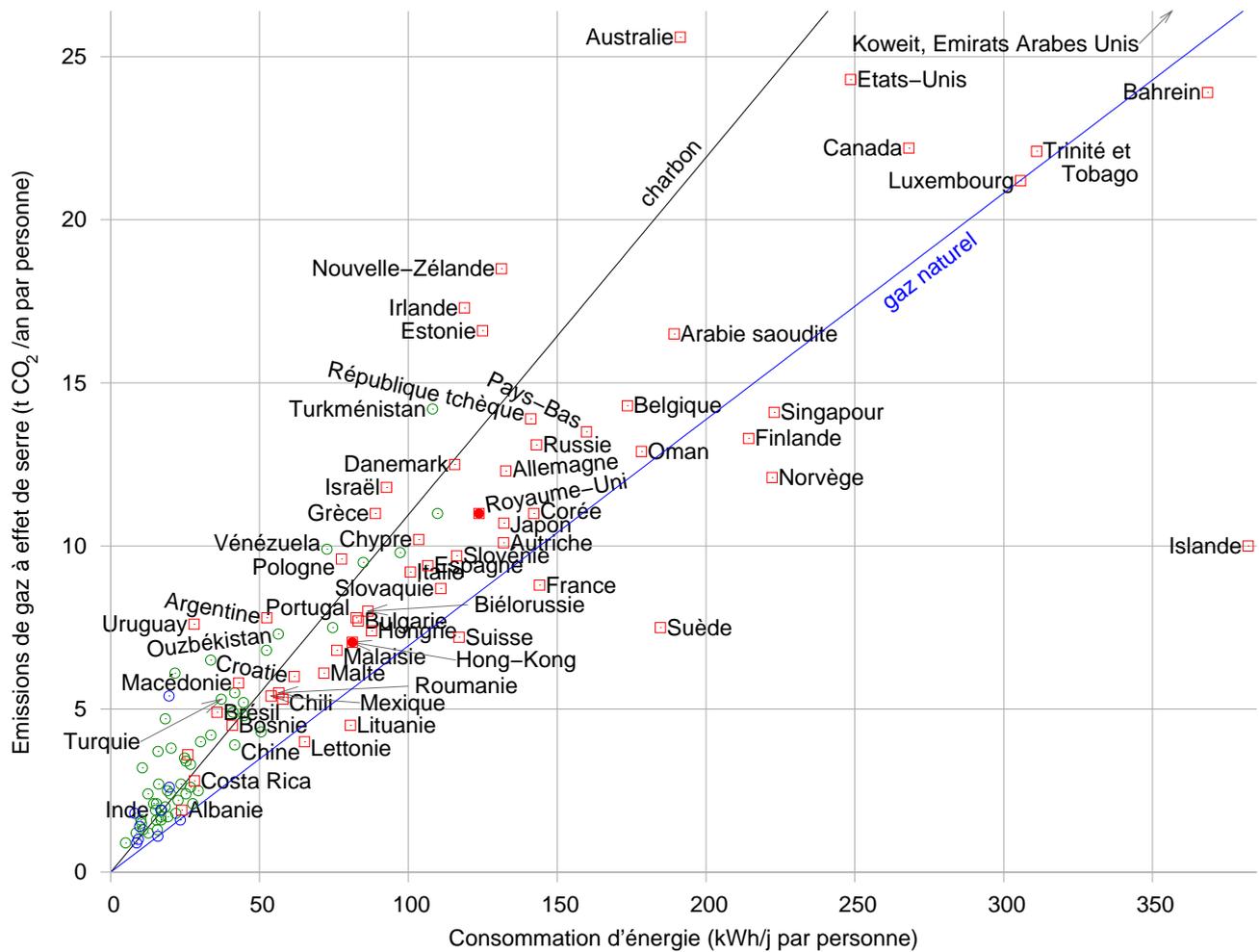


FIGURE I.12. Émissions de gaz à effet de serre par habitant, comparées à la consommation de puissance par habitant. Les deux lignes montrent les intensités en carbone du charbon et du gaz naturel. Les carrés indiquent les pays qui ont un « haut niveau de développement » ; les ronds, les pays qui ont un « niveau de développement moyen » ou « faible ». Voir aussi les figures 30.1 (page 274) et 18.4 (page 126). Source : Rapport sur le développement humain du PNUD, 2007.