UE Géoressources — Partie 1 - R. Thiéry - 2026

Géoressources, énergie et évolution des systèmes

Résumé

Cette première partie introduit la notion de géoressource et montre que les sociétés humaines dépendent de ressources naturelles limitées : matières premières minérales, ressources énergétiques et eaux souterraines. Parmi elles, l'énergie occupe une place fondamentale, car l'accès, l'extraction, la transformation, le transport et le recyclage de toutes les autres ressources nécessitent eux-mêmes de l'énergie. Le cours replace cette dépendance dans une perspective plus générale en considérant les galaxies, les étoiles et les sociétés humaines comme des systèmes ouverts dont l'organisation et l'évolution sont entretenues par des flux de matière et d'énergie. Ces systèmes peuvent être décrits comme des structures dissipatives : loin de l'équilibre thermodynamique, ils utilisent des flux d'énergie pour s'organiser, maintenir des structures complexes et produire localement de l'ordre, tout en dissipant de l'énergie et en exportant de l'entropie vers leur environnement. Les galaxies se structurent et évoluent grâce aux échanges de matière et à l'énergie gravitationnelle ; les étoiles maintiennent leur organisation en transformant notamment l'hydrogène par fusion nucléaire ; les sociétés humaines construisent et entretiennent leur complexité en mobilisant des flux énergétiques et des ressources naturelles toujours plus importants. Lorsque la quantité, la qualité, l'accessibilité ou la nature de ces flux se modifient, le système ne peut généralement pas conserver son organisation antérieure : il traverse une crise, se réorganise et évolue vers un nouvel état. Les crises et transitions énergétiques peuvent ainsi être comprises comme des phases de transformation profonde provoquées par une modification des ressources et des flux d'énergie disponibles. Cette perspective conduit à interroger le devenir des sociétés humaines confrontées à la raréfaction de certaines ressources, à la nécessité de réduire l'usage des combustibles fossiles et à la transformation de leur système énergétique. Elle permet d'introduire les notions de ressources et réserves, d'énergie primaire et finale, de rendement, de consommation, de dépendance, de crise et de transition énergétiques. La nucléosynthèse, la formation du Système solaire et la différenciation de la Terre permettent enfin de comprendre l'origine et la répartition des éléments constituant aujourd'hui nos géoressources. Le géologue apparaît ainsi comme un acteur essentiel pour identifier, comprendre, quantifier et gérer les ressources du sous-sol, mais également pour éclairer les choix des sociétés face aux contraintes énergétiques, matérielles et environnementales et aux transformations qu'elles peuvent imposer.

Mots-clés

géoressources • ressources naturelles • matières premières • ressources minérales • ressources énergétiques • eaux souterraines • énergie • flux énergétiques • hydrogène • évolution stellaire • nucléosynthèse • énergie primaire • énergie finale • rendement • ressources • réserves • consommation • dépendance énergétique • crise énergétique • transition énergétique • limites physiques • soutenabilité • adaptation • sociétés humaines • géologue • Système solaire • différenciation planétaire

Plan de la partie

CM 1	**Énergie, sociétés et géoressources : ordres de grandeur et bilans** Géoressources : notions de ressource, réserve et ressource exploitable • Géoressources : définitions, catégories et rôle du géologue • Ressources renouvelables et non renouvelables ; stocks et flux • Énergie et puissance : définitions, unités et conversions • Ordres de grandeur des phénomènes énergétiques • Perspective historique : énergie, ressources et développement des sociétés • Évolution historique de la consommation mondiale d'énergie • Consommation d'énergie par habitant et disparités entre pays • Croissance démographique, développement économique et consommation d'énergie • Relation entre consommation d'énergie et produit intérieur brut • Principes thermodynamiques : conservation, dégradation et dissipation • Structures dissipatives et fonctionnement des systèmes ouverts • Intensité énergétique des économies et évolution historique • Énergie primaire, énergie finale et pertes de conversion • Chaînes de conversion énergétique et rendements cumulés • Mix énergétique mondial et place dominante des combustibles fossiles • Les difficultés de la décarbonation du système énergétique mondial • Énergie, complexité et évolution des sociétés : approche d'Eric Chaisson	**Mardi 8 septembre 2026** 7h45-9h15 · B12
CM 2	**Origine cosmique des éléments, formation du Système solaire et différenciation planétaire** Évolution cosmique et histoire de la formation stellaire • Formation, évolution et recyclage de la matière dans les étoiles • Métabolisme de l'Univers : gaz, étoiles, résidus stellaires et enrichissement chimique • Fonction de masse initiale des étoiles et production des éléments • Métallicité des étoiles et évolution chimique des galaxies • Nucléosynthèse primordiale : formation des éléments légers • Nucléosynthèse stellaire : fusion et production des éléments jusqu'au fer • Supernovae, captures neutroniques et formation des éléments lourds • Évolution de la composition chimique de l'Univers • Abondance des éléments dans l'Univers, le Système solaire et la Terre • Formation du Système solaire et du disque protoplanétaire • Condensation et répartition des éléments dans le disque protoplanétaire • Différenciation planétaire : noyau, manteau et croûte • Affinités géochimiques : éléments lithophiles, sidérophiles, chalcophiles et atmophiles • Conséquences de la différenciation sur la répartition des géoressources • Ressource, réserve, gisement, teneur, concentration et facteur d'enrichissement	**Jeudi 10 septembre 2026** 9h30-11h00 · B12
TD 1	**Ordres de grandeur et bilans énergétiques** QCM : énergie, puissance, énergie primaire, énergie finale et rendement • Conversions d'unités énergétiques • Ordres de grandeur de quelques phénomènes et activités humaines • Individu humain : besoins énergétiques et puissance métabolique moyenne • Véhicule automobile : énergie consommée, rendement et bilan carbone • Centrale thermique : chaîne de conversion et rendement global	**Mercredi 9 septembre 2026** 14h45-16h15 · B007

Fig. 1

bleau 2.15 Conversion des unités énergétiques. (Adapté de [2.8].)

→	J	kWh	eV	erg	cal
J	1,000	$2{,}778 \cdot 10^{-7}$	$6{,}242 \cdot 10^{18}$	$1{,}000 \cdot 10^{7}$	$2{,}389 \cdot 10^{-1}$
kWh	$3{,}600 \cdot 10^{6}$	1,000	$2{,}247 \cdot 10^{25}$	$3{,}600 \cdot 10^{13}$	$8{,}601 \cdot 10^{5}$
eV	$1{,}602 \cdot 10^{-19}$	$4{,}450 \cdot 10^{-26}$	1,000	$1{,}602 \cdot 10^{-12}$	$3{,}828 \cdot 10^{-20}$
erg	$1{,}000 \cdot 10^{-7}$	$2{,}778 \cdot 10^{-14}$	$6{,}242 \cdot 10^{11}$	1,000	$2{,}389 \cdot 10^{-8}$
cal	4,186	$1{,}163 \cdot 10^{-6}$	$2{,}613 \cdot 10^{19}$	$4{,}186 \cdot 10^{7}$	1,000
kgm	9,807	$2{,}724 \cdot 10^{-6}$	$6{,}121 \cdot 10^{19}$	$9{,}807 \cdot 10^{7}$	2,343
BTU	$1{,}055 \cdot 10^{3}$	$2{,}931 \cdot 10^{-4}$	$6{,}585 \cdot 10^{21}$	$1{,}055 \cdot 10^{10}$	$2{,}521 \cdot 10^{2}$
tep	$4{,}200 \cdot 10^{10}$	$1{,}167 \cdot 10^{4}$	$2{,}622 \cdot 10^{29}$	$4{,}200 \cdot 10^{17}$	$1{,}003 \cdot 10^{10}$
tec	$2{,}930 \cdot 10^{10}$	$8{,}138 \cdot 10^{3}$	$1{,}829 \cdot 10^{29}$	$2{,}930 \cdot 10^{17}$	$7{,}000 \cdot 10^{9}$
MWj	$8{,}640 \cdot 10^{10}$	$2{,}400 \cdot 10^{4}$	$5{,}392 \cdot 10^{29}$	$8{,}640 \cdot 10^{17}$	$2{,}064 \cdot 10^{10}$

→	kgm	BTU	tep	tec	MWj
J	$1{,}020 \cdot 10^{-1}$	$9{,}479 \cdot 10^{-4}$	$2{,}381 \cdot 10^{-11}$	$3{,}413 \cdot 10^{-11}$	$1{,}157 \cdot 10^{-11}$
kWh	$3{,}671 \cdot 10^{5}$	$3{,}412 \cdot 10^{3}$	$8{,}571 \cdot 10^{-5}$	$1{,}229 \cdot 10^{-4}$	$4{,}167 \cdot 10^{-5}$
eV	$1{,}634 \cdot 10^{-20}$	$1{,}519 \cdot 10^{-22}$	$3{,}814 \cdot 10^{-30}$	$5{,}468 \cdot 10^{-30}$	$1{,}854 \cdot 10^{-30}$
erg	$1{,}020 \cdot 10^{-8}$	$9{,}479 \cdot 10^{-11}$	$2{,}381 \cdot 10^{-18}$	$3{,}413 \cdot 10^{-18}$	$1{,}157 \cdot 10^{-18}$
cal	$4{,}268 \cdot 10^{-1}$	$3{,}967 \cdot 10^{-3}$	$9{,}967 \cdot 10^{-11}$	$1{,}429 \cdot 10^{-10}$	$4{,}844 \cdot 10^{-11}$
kgm	1,000	$9{,}295 \cdot 10^{-3}$	$2{,}335 \cdot 10^{-10}$	$3{,}347 \cdot 10^{-10}$	$1{,}135 \cdot 10^{-10}$
BTU	$1{,}076 \cdot 10^{2}$	1,000	$2{,}512 \cdot 10^{-8}$	$3{,}601 \cdot 10^{-8}$	$1{,}221 \cdot 10^{-8}$
tep	$4{,}283 \cdot 10^{9}$	$3{,}981 \cdot 10^{7}$	1,000	1,433	$4{,}861 \cdot 10^{-1}$
tec	$2{,}988 \cdot 10^{9}$	$2{,}777 \cdot 10^{7}$	$6{,}976 \cdot 10^{-1}$	1,000	$3{,}391 \cdot 10^{-1}$
MWj	$8{,}810 \cdot 10^{9}$	$8{,}190 \cdot 10^{7}$	2,057	2,949	1,000

En outre : 1 W·an = $3{,}15 \cdot 10^{7}$ J
1 ch·h = $2{,}65 \cdot 10^{6}$ J (cheval·h)
1 u.m.a. = $1{,}49 \cdot 10^{-10}$ J (un. masse atom.)

tep = tonne équiv. pétrole
tec = tonne équiv. charbon
BTU = British Thermal Unit

Fig. 2

16 Ordres de grandeur des énergies associées à différents phénomènes. (D'après [2.12].)

Description	Énergie [J]
Big Bang	10^{68}
Énergie électromagnétique émise par la galaxie au cours de sa vie	10^{55}
Énergie rotationnelle de la voie lactée (énergie cinétique)	10^{52}
Énergie libérée lors de l'explosion d'une supernova	10^{44}
Énergie qui pourrait être libérée par la fusion du deutérium des océans	$3 \cdot 10^{30}$
Énergie rotationnelle de la terre (énergie cinétique)	10^{29}
Énergie solaire incidente sur la surface de la Terre en 1 an	$6 \cdot 10^{24}$
Énergie éolienne dissipée au voisinage de la surface terrestre en 1 an	10^{22}
Énergie primaire[1] totale utilisée par l'humanité en 1 an	$3 \cdot 10^{20}$
Énergie dissipée par les marées en 1 an	10^{20}
Énergie primaire[1] utilisée aux U.S.A. en 1 an	$8 \cdot 10^{19}$
Énergie primaire[1] utilisée en Suisse en 1 an	10^{18}
Énergie libérée au cours de l'éruption du Krakatoa de 1883	10^{18}
Énergie libérée par une bombe thermonucléaire de 15 mégatonnes	10^{17}
Énergie électrique produite par an par une centrale nucléaire de 1000 MWe	$3 \cdot 10^{16}$
Énergie cinétique d'un avion à réaction gros porteur (Boeing 747 – env. 1000 km/h)	10^{10}
Énergie libérée par la combustion de 100 kg de charbon	$3 \cdot 10^{9}$
Énergie libérée par la combustion d'un litre d'essence	$3 \cdot 10^{7}$
Énergie alimentaire quotidienne d'un adulte	10^{7}
Énergie cinétique d'un joueur de football en pleine course	10^{3}
Travail du cœur humain par pulsation	$5 \cdot 10^{-1}$
Travail effectué en tournant une page d'un livre	10^{-3}
Saut de puce	10^{-7}
Décharge d'un neurone	10^{-10}
Énergie de liaison d'un nucléon dans un noyau (H, C, Fe)	10^{-12}

[1] Énergie primaire : énergie fournie par les sources naturelles avant toute transformation.

tep = tonne équiv. pétrole
tec = tonne équiv. charbon
BTU = British Thermal Unit

Fig. 3

pétrole

Tableau 2.24 Unités utilisées dans le domaine du pétrole.

Nom	Symbole	Valeur
1 baril	[Bbl]	159 l
1 tonne	[t]	7,5 bbl
1 baril/jour	[Bbl/d]	50 t/an

Domaine du gaz naturel

Tableau 2.25 Unités utilisées dans le domaine du gaz naturel.

Nom	Symbole	Valeur
pied cube	[1 cuft]	0,02832 m^3
10^3 pieds cubes	[1 M cuft]	28,32 m^3
10^6 pieds cubes	[1 MM cuft]	$28{,}32 \cdot 10^3$ m^3
1 pied cube/jour	[1 cuft/d]	env. 10 m^3/an
$100 \cdot 10^6$ pieds cubes/jour	[100 MM cuft/d]	env. 10^9 m^3/an

Fig. 4

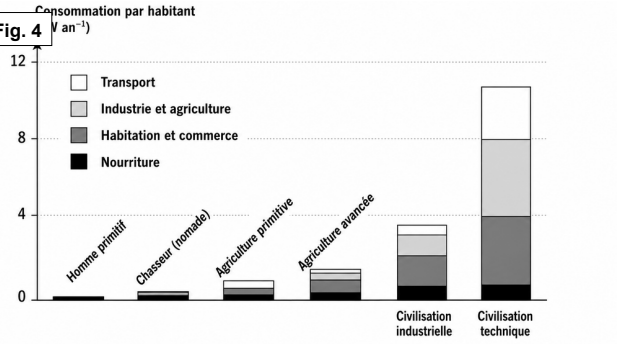


Fig. 3.5 Consommation désagrégée d'énergie en fonction du type de société.
(D'après Earl Cook, *The Flow of Energy in an Industrial Society, Scientific American*, 224 (3) : 136, 1971.)

Fig. 5

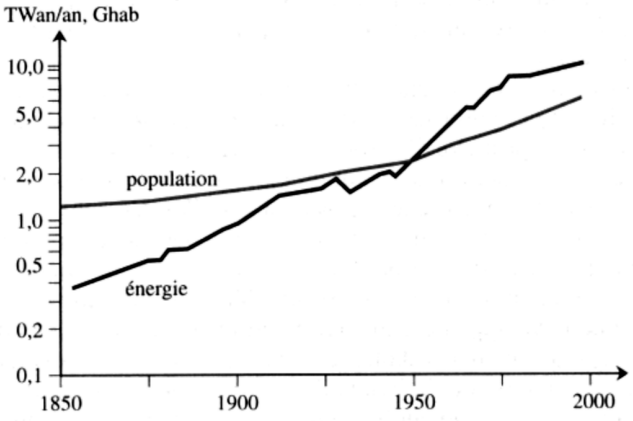


Fig. 3.6 Evolution de la consommation d'énergie primaire totale et de la population mondiale de 1850 à nos jours.

Fig. 6

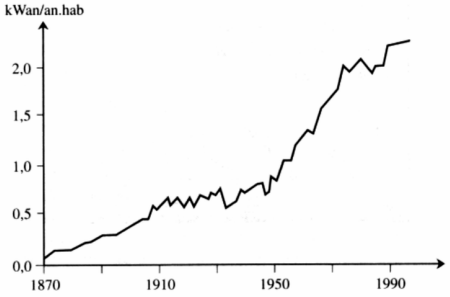


Fig. 3.7 Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire par habitant (1870-1998).

Fig. 7

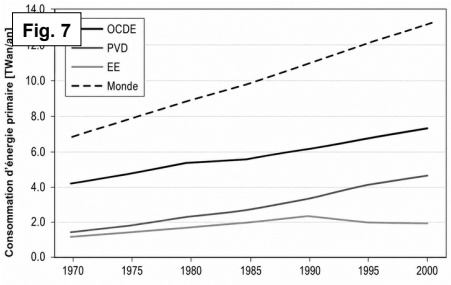


Fig. 3.9 Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire, 1970-2000. OCDE : Pays industrialisés, PVD : Pays en voie de développement, EE : Europe de l'Est et ex-URSS. (Source : [3.5].)

Fig. 8

Tableau 3.10 Parts des différents agents énergétiques dans la consommation mondiale d'énergie primaire en 2000. (Source : [3.5].)

	[GWan/an]	[%]
Agents énergétiques conventionnels		
Combustibles solides	2850	22
Pétrole	4650	36
Gaz	2700	21
Electricité, en équivalent de consommation primaire	1300	10
Total équiv. consommation énergie primaire	11 500	89
Agents énergétiques non conventionnels	1500	11
Total consommation énergie primaire	13 000	100

Fig. 9

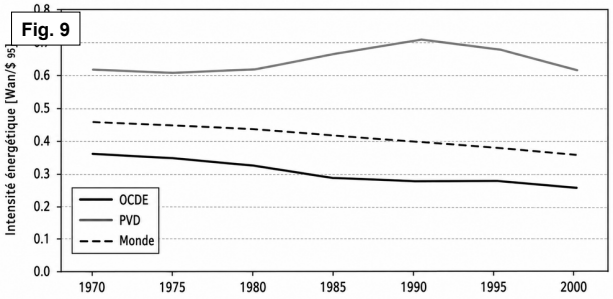


Fig. 3.11 Evolution de l'intensité énergétique, 1970-2000.
OCDE : Pays industrialisés, PVD : Pays en voie de développement (Source : [3.5].)

Fig. 10

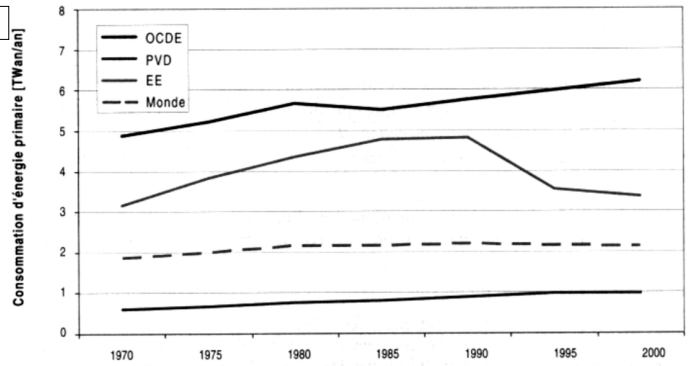


Fig. 3.12 Evolution de la consommation d'énergie primaire par habitant, 1970-2000. OCDE : Pays industrialisés, PVD : Pays en voie de développement, EE : Europe de l'Est et ex-URSS. (Source : [3.5].)

Fig. 11

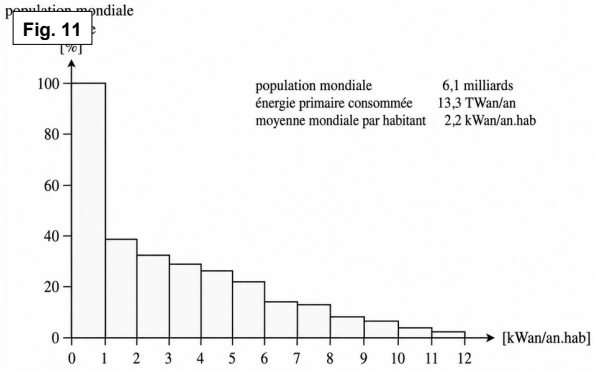


Fig. 3.13 Niveaux de consommation d'énergie primaire par habitant et fractions cumulées correspondantes de la population mondiale.

Fig. 12

Tableau 3.23 Bilan énergétique de la France, 2000. (D'après [3.5].)

Population : 58,800 Mhab		PIB : 1301,6 G$/an, soit 22,14 k$/an.hab	
	Pays [GWan/an]	Par habitant [Wan/an.hab]	[%]
Energie primaire – consommation :			
Conventionnelle	323,5	5502	96
Traditionnelle	14,9	253	4
Total	338,4	5755	100

Fig. 13

Tableau 3.23 (Suite et fin.)

Population : 58,800 Mhab		PIB : 1301,6 G$/an, soit 22,14 k$/an.hab	
	Pays [GWan/an]	Par habitant [Wan/an.hab]	[%]
Energie finale – consommation :			
Electricité	42,7	727	19
Produits pétroliers	119,5	2031	52
Combustibles solides	9,6	163	4
Gaz	45,7	777	20
Chaleur	0,9	16	0
Non conventionnelle	12,5	213	5
Total	**230,9**	**3927**	**100**
Energie finale – utilisation :			
Ménages	59,0	1003	26
Services, transports	95,5	1626	41
Industries, artisanat	50,1	852	21
Agriculture	4,3	72	2
Non énergétique	22,0	374	10
Total	**230,9**	**3927**	**100**

Fig. 14

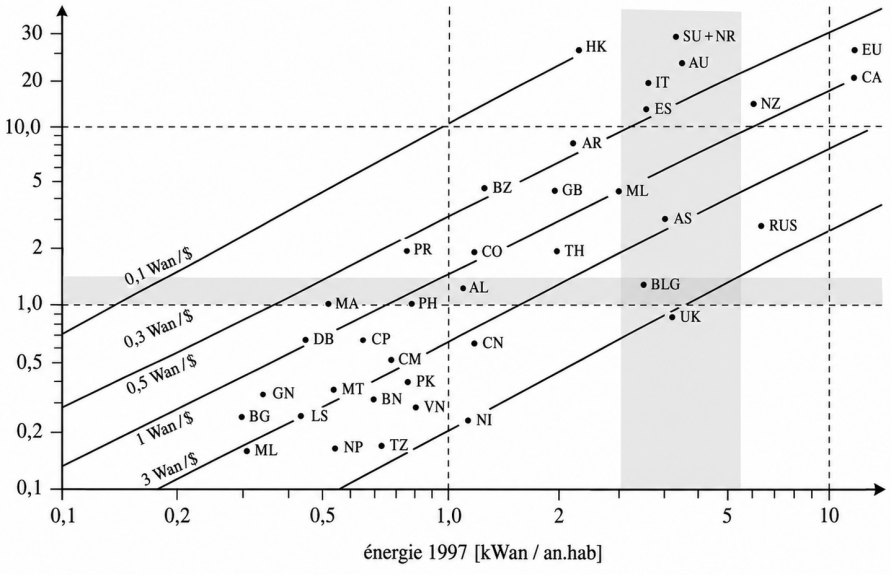


Fig. 3.39 PIB en fonction de la consommation d'énergie primaire en 1997. (Source : [3.5].)

Fig. 15

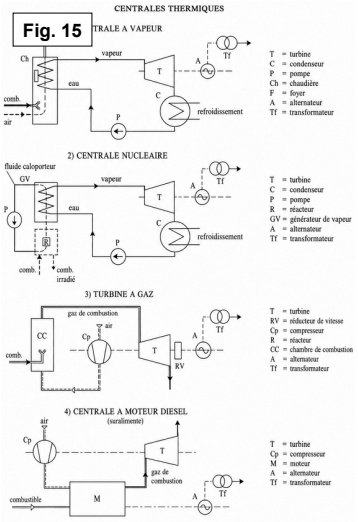


Fig. 6.5 Comparaison schématique des principaux types de centrales thermiques (Source : [6.3].)

Fig. 16

Le Crépuscule de la Création Stellaire

L'Univers a dépassé son apogée. Le taux de formation d'étoiles a culminé il y a plus de 10 milliards d'années.

Aujourd'hui, nous vivons dans une ère de déclin exponentiel.

L'Enigme : Comment transformer la lumière captée par nos télescopes en une histoire de la masse cosmique ?

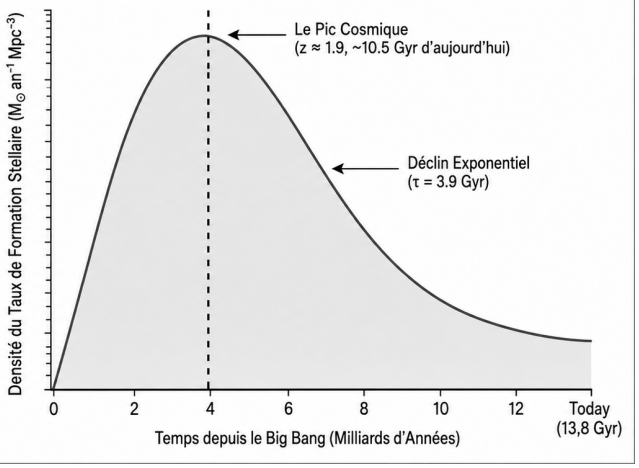


Fig. 17

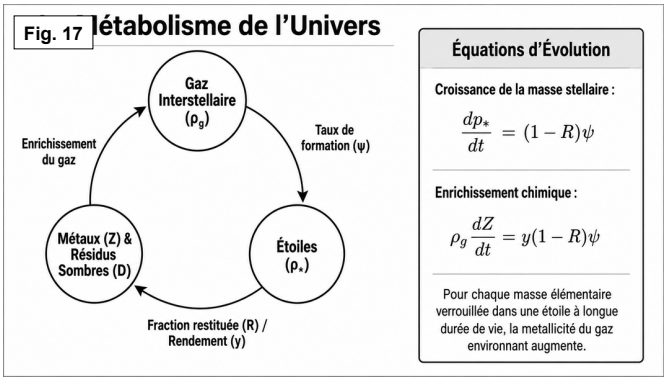
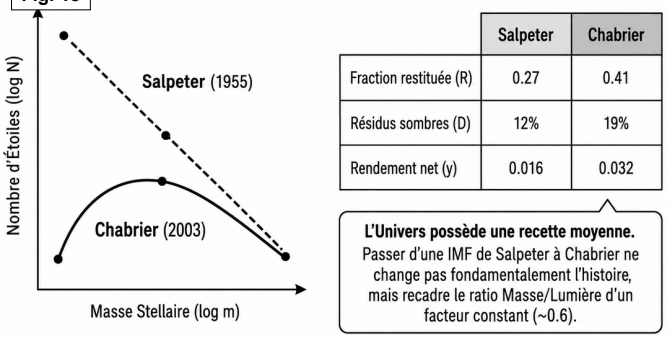


Fig. 18



	Salpeter	Chabrier
Fraction restituée (R)	0.27	0.41
Résidus sombres (D)	12%	19%
Rendement net (y)	0.016	0.032

L'Univers possède une recette moyenne. Passer d'une IMF de Salpeter à Chabrier ne change pas fondamentalement l'histoire, mais recadre le ratio Masse/Lumière d'un facteur constant (~0.6).

Fig. 19

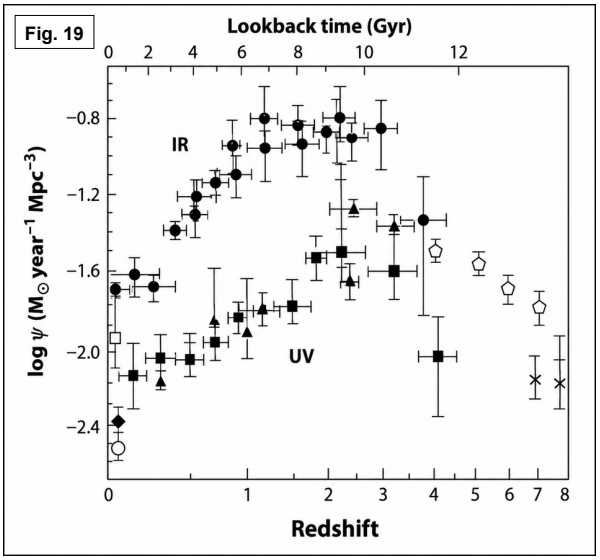


Fig. 20

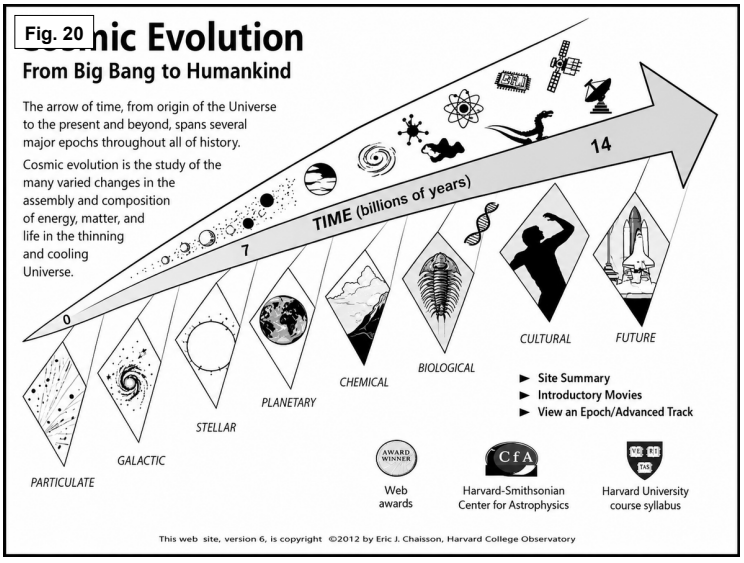


Fig. 21

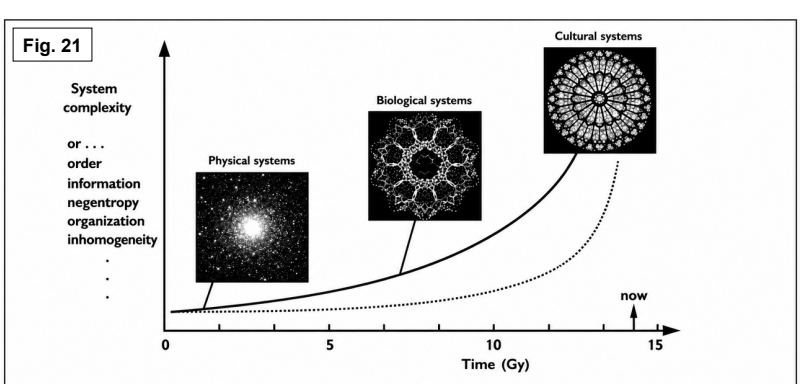


Figure 2. This plot graphs rising complexity, subjectively envisioned. Physical, biological and cultural evolution might well be governed by underlying scientific principles that guide the emergence of increasingly complex systems in the Universe. Resembling the beautiful stained-glass window in the south transept of the great Gothic cathedral in Paris (shown at top right), the pattern at centre actually represents a pseudo-coloured array of atoms viewed along the axis of a double-helical DNA molecule some two nanometres across. (Red denotes oxygen atoms; blue, nitrogen; green; carbon; yellow, phosphorus; hydrogen is not shown.) Likewise, images of images of swarming globular star clusters (as at bottom left, where thousands of aged red giants far outnumber youthful blue stars) exemplify change-filled events in the earlier Universe, such as here in the M80 star cluster nearly 100 light-years across and about 32 500 light-years distant. (Images courtesy of Cathedrale Notre-Dame de Paris; University of California, San Francisco; STScI/NASA.)

Fig. 22

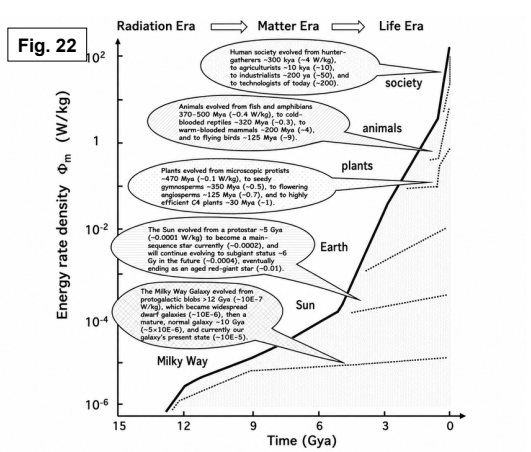


Figure 3. This plot graphs rising complexity, empirically reckoned. Increasing energy rate density, plotted here starting at those times when various complex systems emerged in Nature, has been especially rapid in the past billion years, much as expected from human intuition in figure 2 and the numerical values in table 1. The thick, black curve approximates the rise of normalized energy flows characterizing systems' ordered structures and active functions throughout the history of the Universe. The dotted lines inside the shaded area depict just a few of a huge ensemble of evolutionary paths as many varied types of complex systems changed and complexified over time. The five oval insets contain greater detail of measurements and calculations of energy rate density for stars and galaxies, plants and animals, as well as society and machines, which are representative examples of physical, biological and cultural evolution, respectively, most of which systems raise their complexity despite increasingly disordered environments.

Fig. 23

Table 1. Energy rate density estimates for some major complex systems.

complex system	age (Gy)	Φ_m (W kg^{-1})
society (human)	0	50
animals generally	~0.5	4
plants generally	~3	0.1
planets (Earth)	~4	0.007
stars (Sun)	~5	0.0002
galaxies (Milky Way)	~12	0.00001

Fig. 24

Table 2. Energy rate density for human society.

social system	origin (ya)	Φ_m (W kg^{-1})	Φ_m (kW per person)
technologists	0	~200	10
average citizen today	0	~50	2.5
industrialists	~200	~30	1.6
agriculturists	~10^4	~12	0.6
hunter-gatherers	~2×10^5	~4	0.2
australopithecines	~3×10^6	~2	0.1

Fig. 25

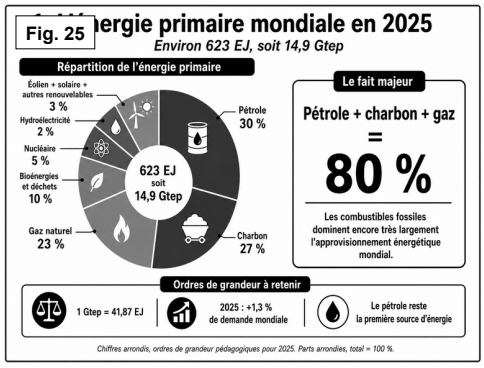


Fig. 26

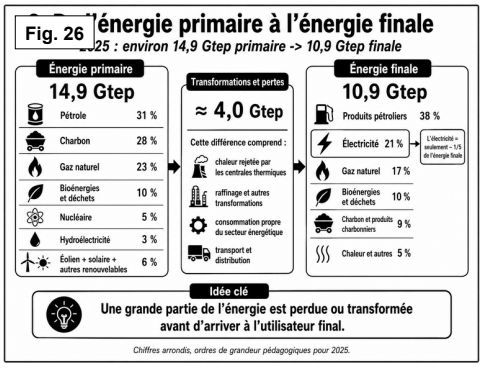


Fig. 27



Fig. 28

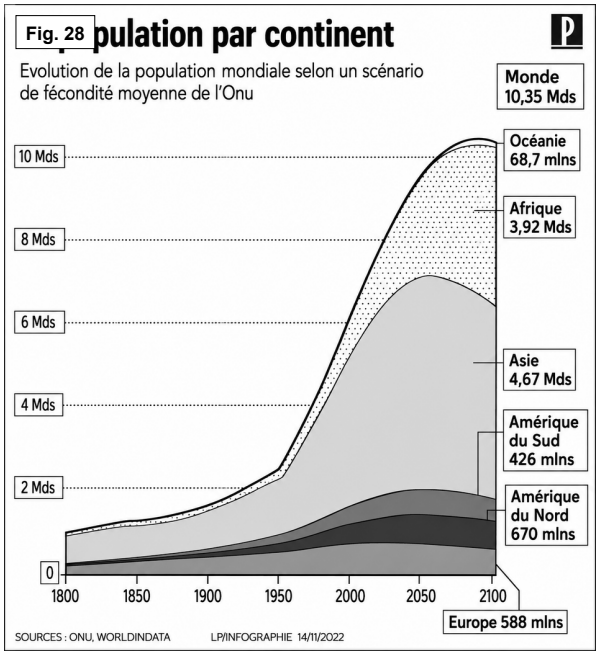


Fig. 29

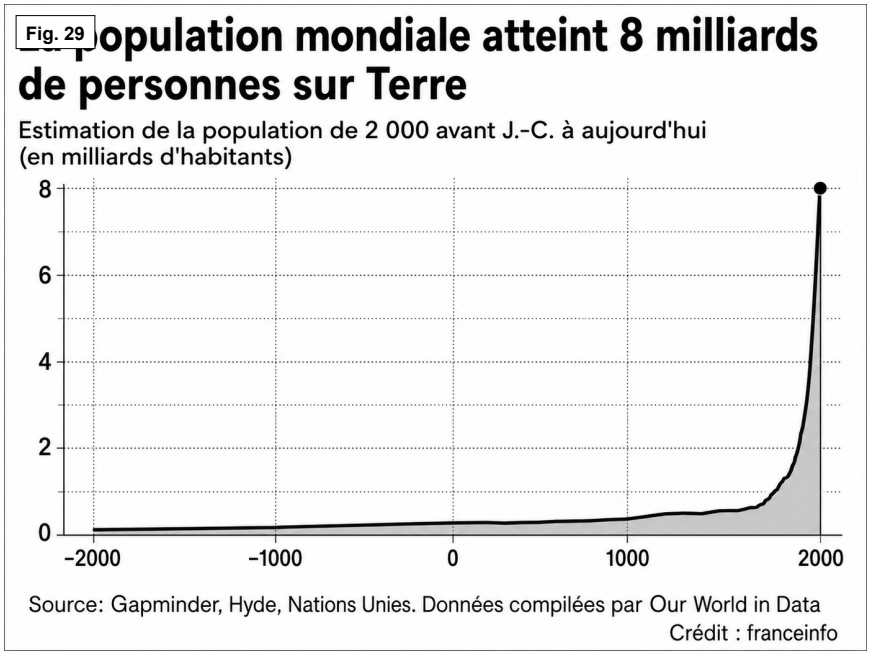


Fig. 30

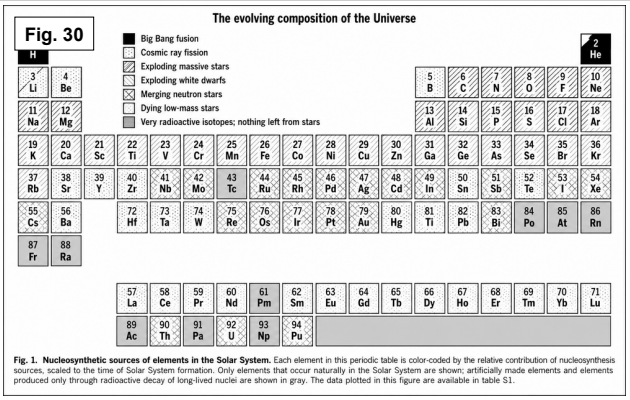


Fig. 1. Nucleosynthetic sources of elements in the Solar System. Each element in this periodic table is color-coded by the relative contribution of nucleosynthesis sources, scaled to the time of Solar System formation. Only elements that occur naturally in the Solar System are shown; artificially made elements and elements produced only through radioactive decay of long-lived nuclei are shown in gray. The data plotted in this figure are available in table S1.

Fig. 31

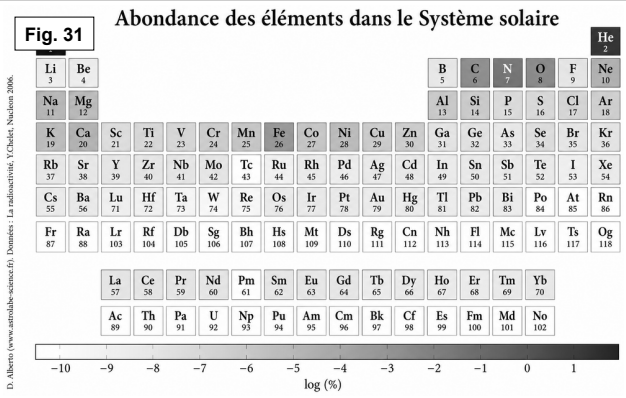


Fig. 32

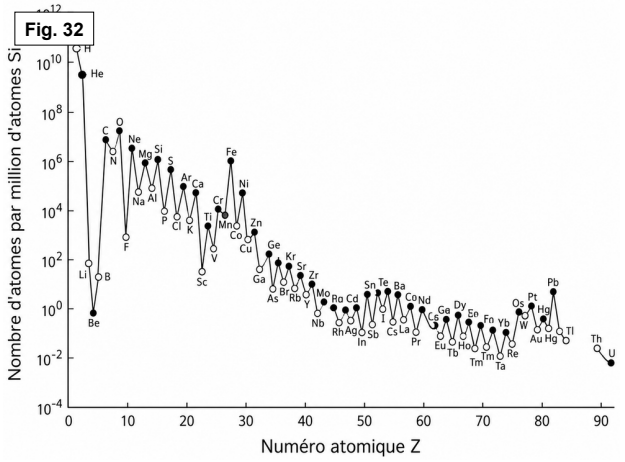


Fig. 33

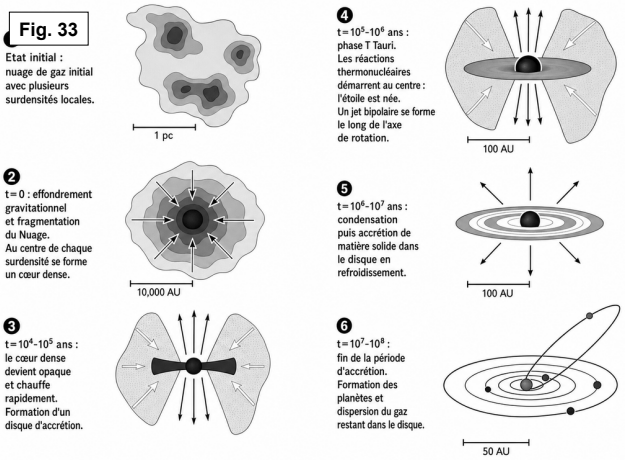


Fig. 34

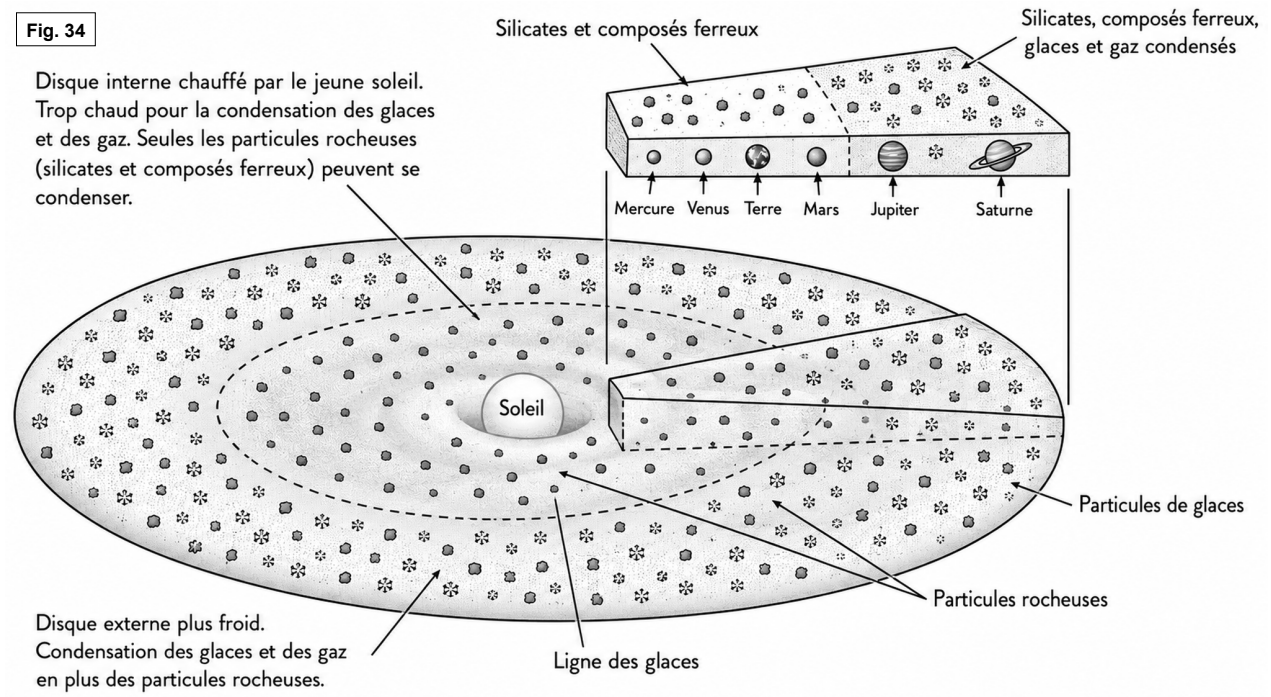
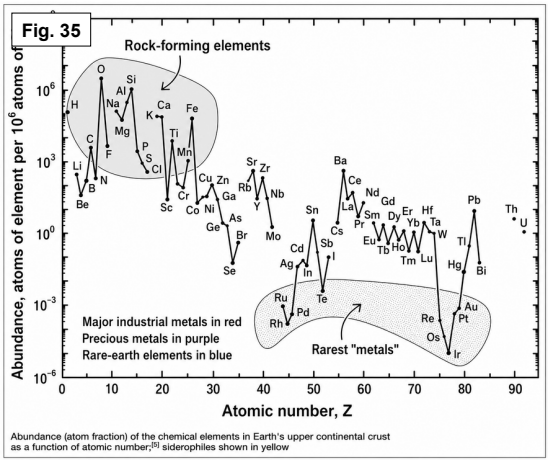


Fig. 35



Abundance (atom fraction) of the chemical elements in Earth's upper continental crust as a function of atomic number;[5] siderophiles shown in yellow

Fig. 36

26 Fe 2 3	Sidérophile	14 Si 4	Lithophile
16 S -2 0 4 6	Chalcophile	7 N -3 0 3 5	Atmophile
61 Pm 3	N'existe pas		

1																	18
1 H 1	2											13	14	15	16	17	2 He 0
3 Li 1	4 Be 2											5 B 6	6 C -4 -2 0	7 N -3 0 3 5	8 O -2 0	9 F -1	10 Ne 0
11 Na 1	12 Mg 2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 3	14 Si 4	15 P -3 5	16 S -2 0 4 6	17 Cl -1	18 Ar 0
19 K 1	20 Ca 2	21 Sc 3	22 Ti 4	23 V 5	24 Cr 3	25 Mn 4 3 2	26 Fe 2 3	27 Co 2 3	28 Ni 2	29 Cu 1 2	30 Zn 2	31 Ga 3	32 Ge 4	33 As 3 5	34 Se -2 0 4 6	35 Br -1	36 Kr 0
37 Rb 1	38 Sr 2	39 Y 3	40 Zr 4	41 Nb 3 5	42 Mo 4 6	43 Tc 7	44 Ru 3 4	45 Rh 2 3 4	46 Pd 2 4	47 Ag 1	48 Cd 2	49 In 3	50 Sn 4 2	51 Sb 3 5	52 Te -2 0 4 6	53 I -1	54 Xe 0
55 Cs 1	56 Ba 2		72 Hf 4	73 Ta 5	74 W 4 6	75 Re 7	76 Os 3 4	77 Ir 2 4 6	78 Pt 2 4	79 Au 1 3	80 Hg 2	81 Tl 1 3	82 Pb 2	83 Bi 3 5	84 Po 2 4	85 At -1	86 Rn 0
87 Fr 1	88 Ra 2	89 Ac 3															

58 Ce 3	59 Pr 3	60 Nd 3	61 Pm 3	62 Sm 3	63 Eu 3	64 Gd 3	65 Tb 3	66 Dy 3	67 Ho 3	68 Er 3	69 Tm 3	70 Yb 3	71 Lu 3
90 Th 4	91 Pa 5	92 U 4 6	93 Np 4 5	94 Pu 4	95 Am 3	96 Cm 3	97 Bk 3	98 Cf 3	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr