

2015 LECON 2

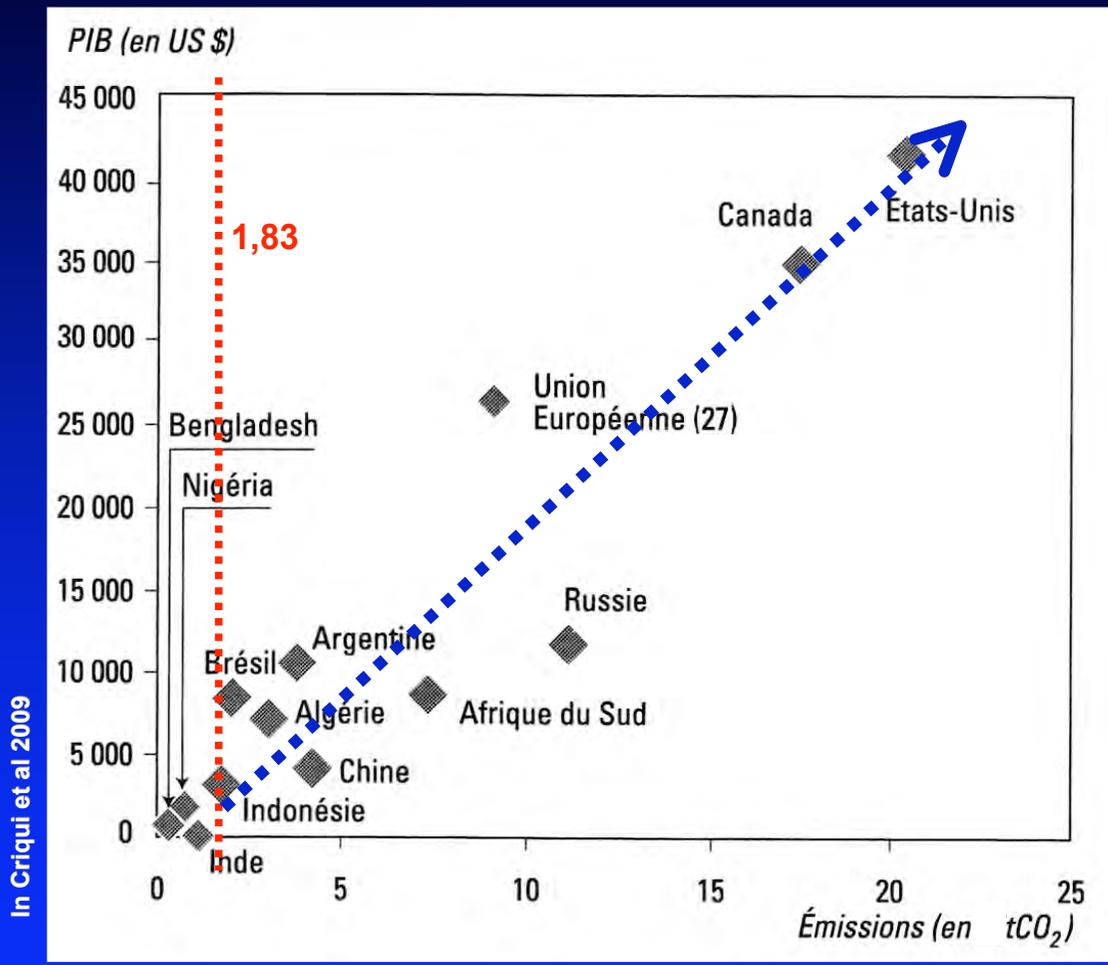
LES 'GES' ou GAZ A EFFET DE SERRE

LES TEMPS GEOLOGIQUES

LES BASSINS SEDIMENTAIRES



EMISSION DE CO₂ et PIB/HABITANT (2009)



GES contribution effective en fonction des différentes fréquences d'absorption/émission dans l'infrarouge => 'fourchettes'... car certaines fréquences sont communes à plusieurs molécules

Vapeur H₂O_{atm} : 36 à 72%

CO₂ : 9 à 26 %

CH₄ : 4 à 9 %

O₃ : 3 à 7 %

....

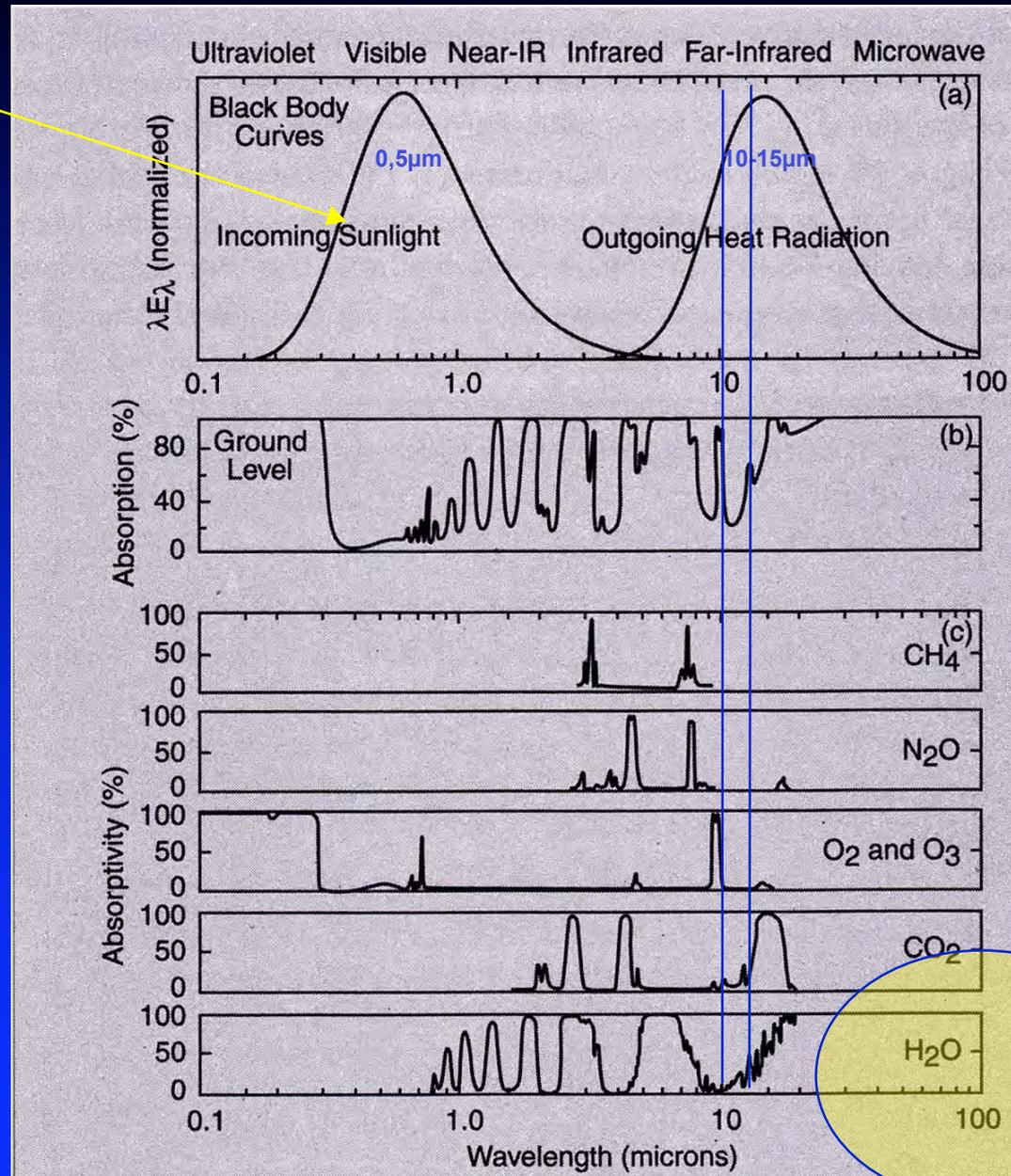
+PRG différent (Potentiel de Réchauffement Global)
.... fonction du temps de résidence....

BELGIQUE contribution 8 tonnes/hab

Capacité absorption TERRE (végétation, océans...)
= 1,83 tonne/habitant (2009)



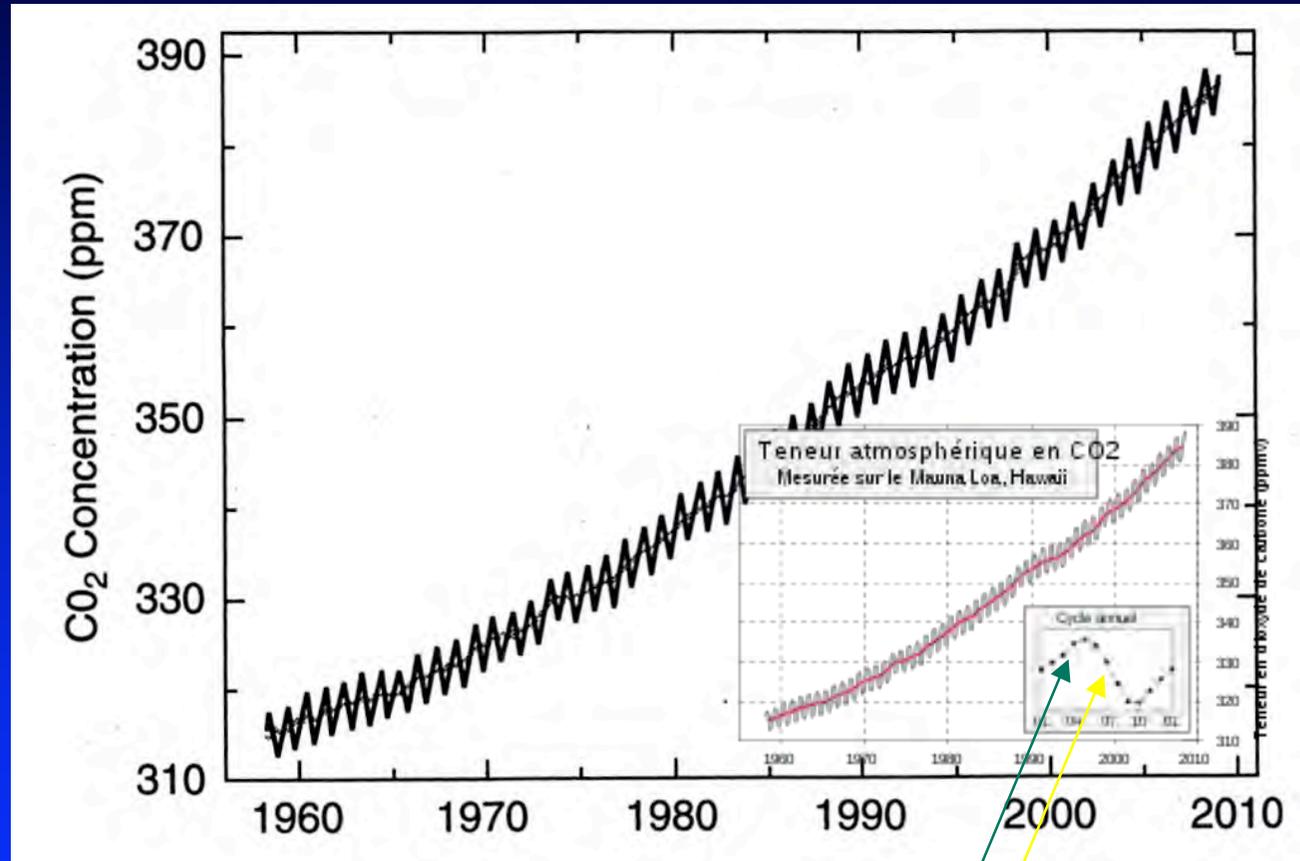
T surface = 5800°K



« waterhouse? »

Courbe de Keeling (1928-2005)

Etablie sur le site du volcan Mauna Loa à Hawaii à 4000m d'altitude
Mesures ininterrompues depuis 1958

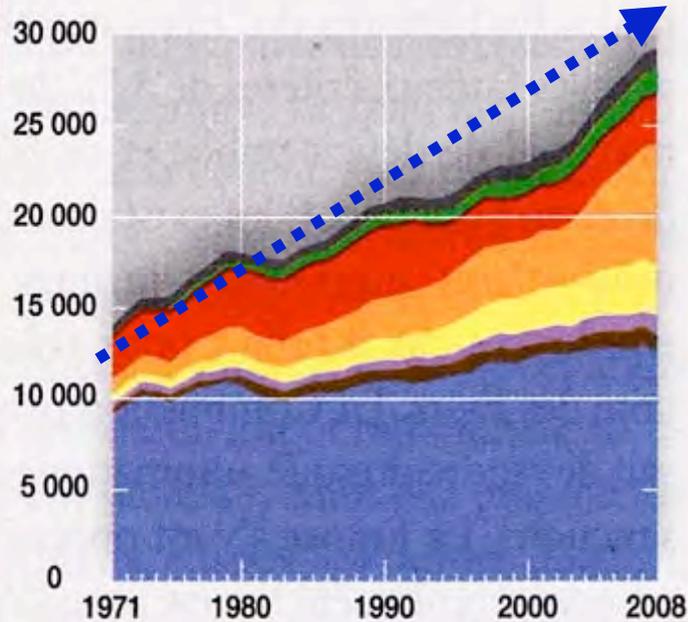


390 en 2012

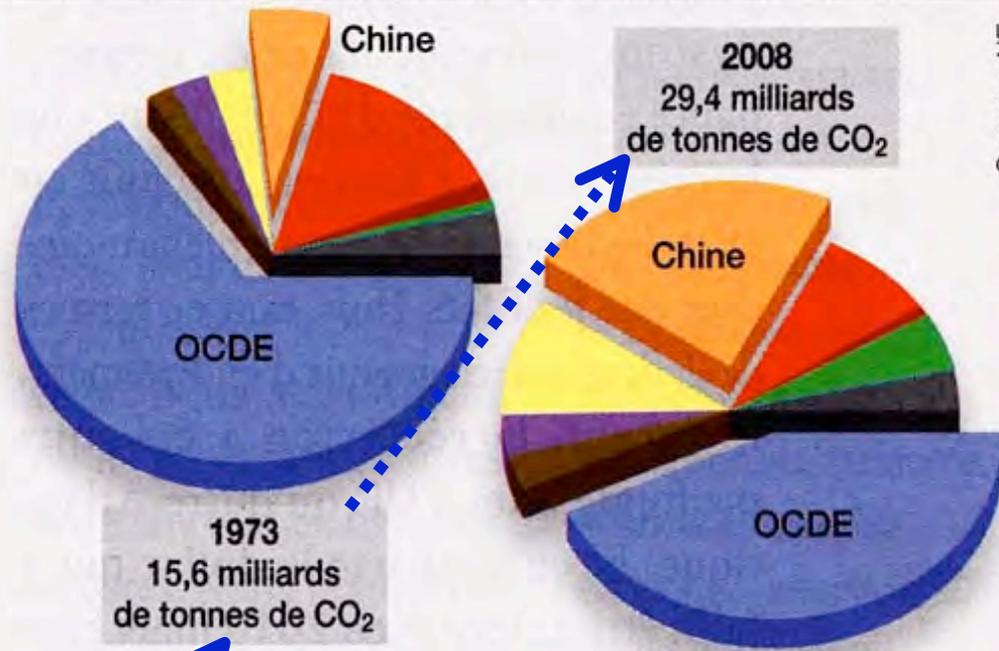
Fin hiver (Hémisphère N)

Printemps-Début été (croissance des plantes)

Emissions de CO₂ par région, en millions de tonnes



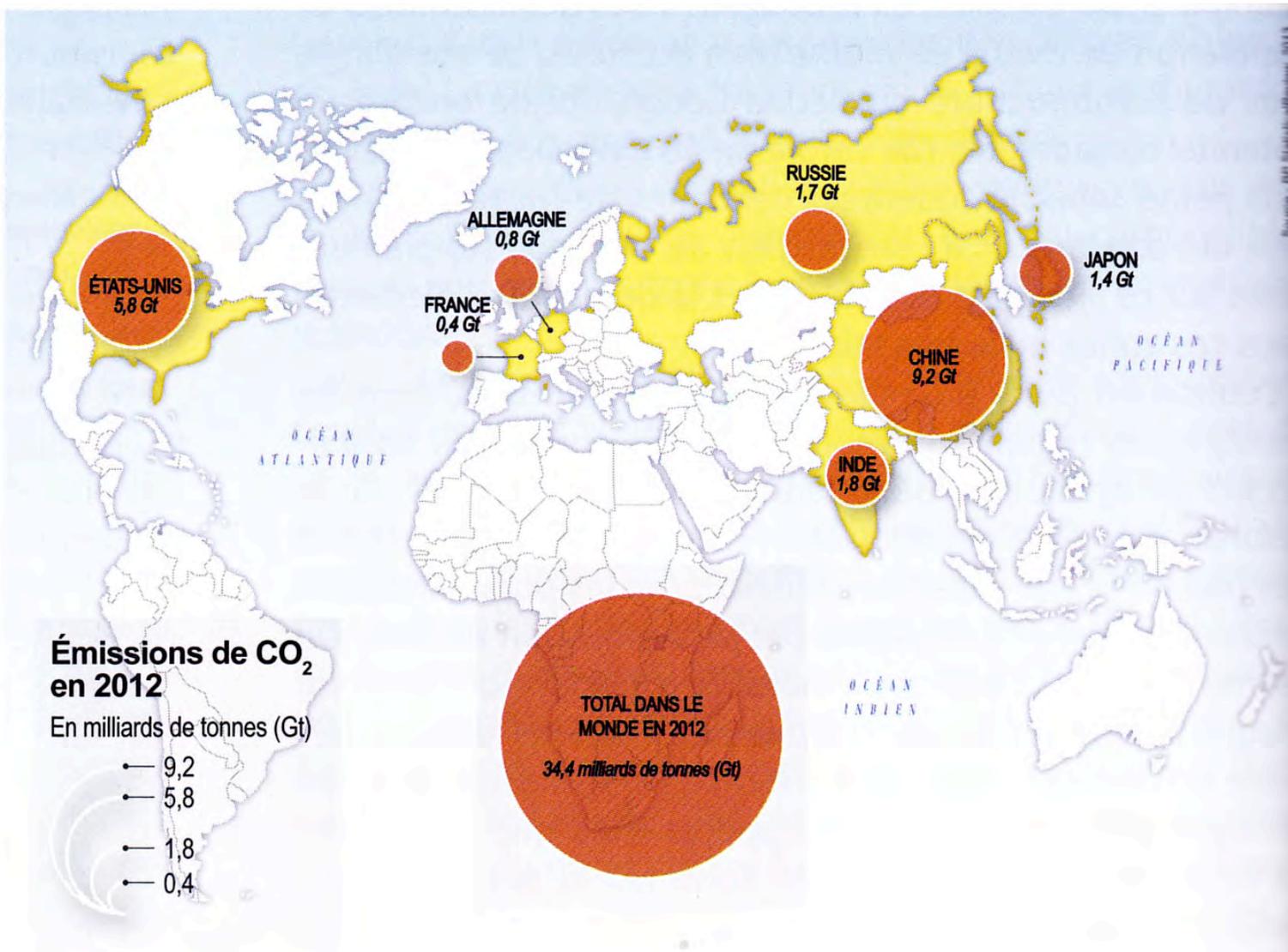
Comparaison de la répartition des émissions par région, en 1973 et en 2008



Source : AIE

- OCDE
- Afrique
- Amérique latine
- Asie
- Chine
- Transports aériens et maritimes internationaux
- Communautés des Etats Indépendants
- Europe hors OCDE
- Moyen-Orient

> 12 Gt CO₂

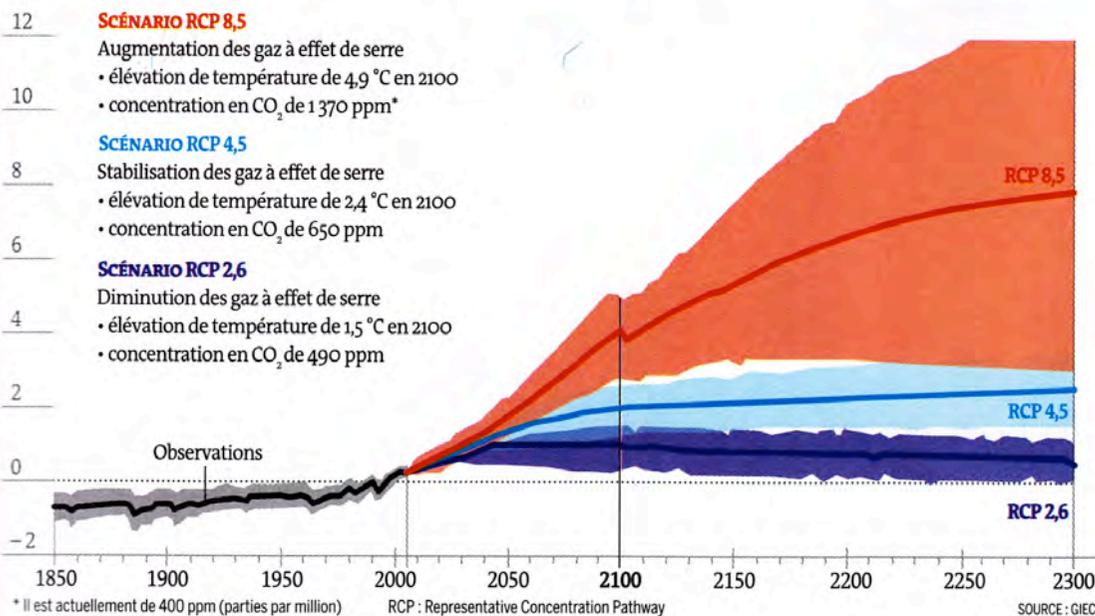


**Émissions de CO₂ liées à l'énergie dans le monde en 2012
(total monde : 34,4 Gt)**

2014

Climat

Evolution du réchauffement climatique à la surface terrestre, en degrés celcius selon trois scénarios du GIEC



Le scénario du pire

Le cinquième rapport du GIEC, publié fin septembre, évoque une hausse des températures allant jusqu'à 4,8°C d'ici à la fin du siècle

Fin nov 2013 (Global Carbon Project, U. East Anglia UK)

9,9 GtC anthropique (E fossiles+ciment)
(=36 GtCO₂) dans atmosphère
+ 0,8 GtC déforestation

Soit 10,7 GtC (ou **40 GtCO₂**)

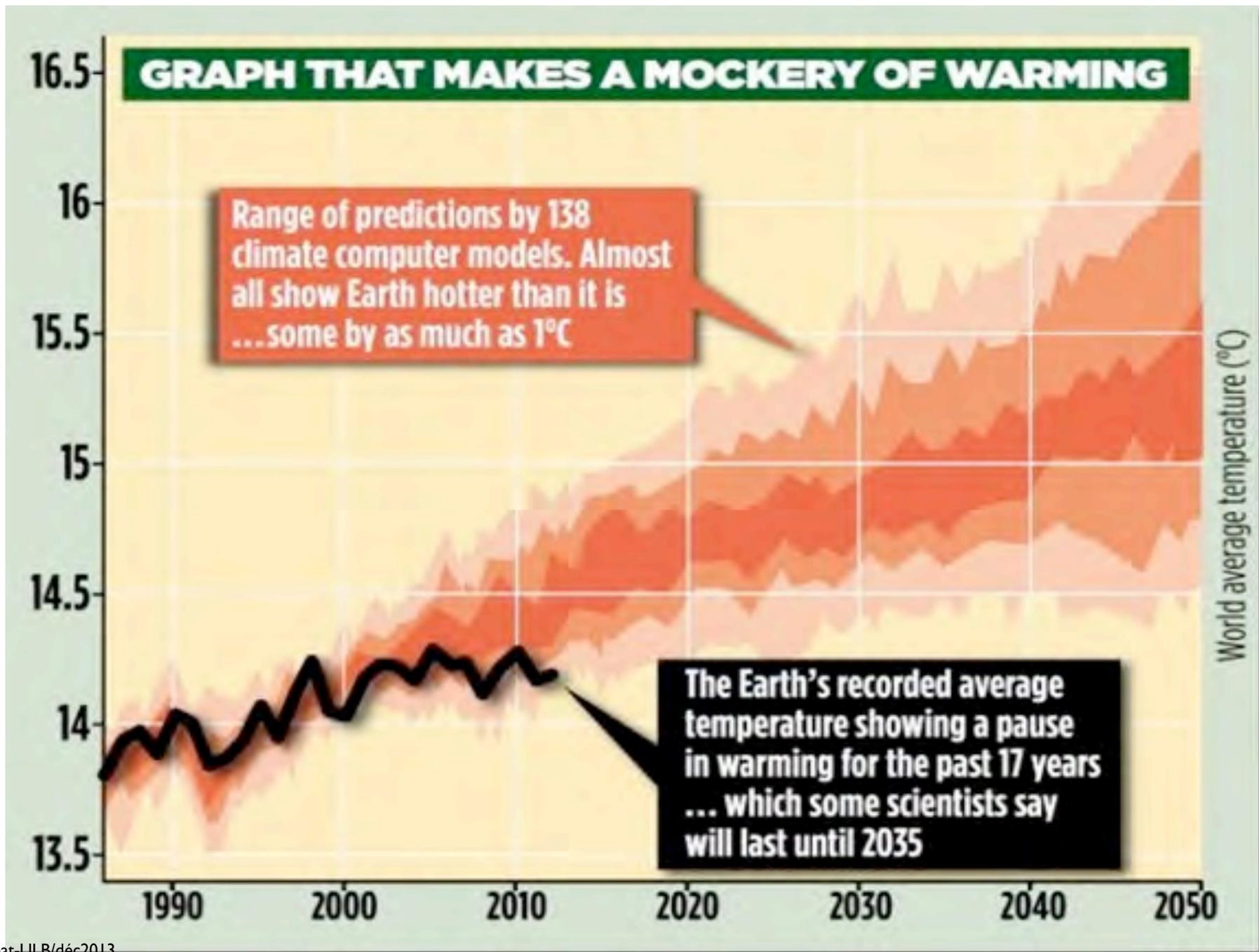
= +2,1% pr 2012

En 2012: Chine 27%, USA 14%, UE 10%, Inde 6%
Soit 4,4tC/an USA, 1,9 Chine

La rumeur d'une pause...

L'information circule en boucle sur le Net : le réchauffement se serait arrêté en 1998 et, depuis, la température moyenne mondiale n'augmenterait plus. Le rapport du GIEC confirme que la température moyenne de l'atmosphère n'a pas augmenté aussi vite entre 1998 et aujourd'hui que depuis 1951. Mais cela est largement dû au fait que 1998 a été une année exceptionnellement chaude, marquée par un phénomène El Niño intense. En outre, note le GIEC, d'autres effets du réchauffement (fonte des glaces, etc.) se sont accélérés au cours de la même période.





GES	TEMPS DE RESIDENCE 'removal time'	PART APPROXIMATIVE
CO ₂	>100 ans?? <i>= qq années! <10ans</i>	60%
CH ₄	10 ans	25%
O ₃	50 jours	20%
N ₂ O	> 100 ans	5%
Fluorocarbones	> 1000 ans	<1%
Aérosols sulfatés	10 ans	-30%
Particules carbone (suie)	10 ans	20%

Richter 2010



'GEOENGINEERING'

- Réflecteurs géants dans l'espace >300kmL
- Fertiliser l'océan avec du fer (plancton)
- Injecter des aérosols sulfatés



GES en 2004

GES	CO ₂ éq	'removal time'	% total
CO ₂ combustible fossile	27,7Gt	>100 ans? 	57%
CO ₂ industriel	1,4Gt	>100 ans	3%
CO ₂ agriculture	8,5Gt	> 100 ans	17%
CH ₄ agriculture + industriel	7,0Gt	10 ans	14%
N ₂ O agriculture	3,9Gt	100 ans	8%
Gaz fluorés	0,5Gt	1000 ans	1%

49Gt

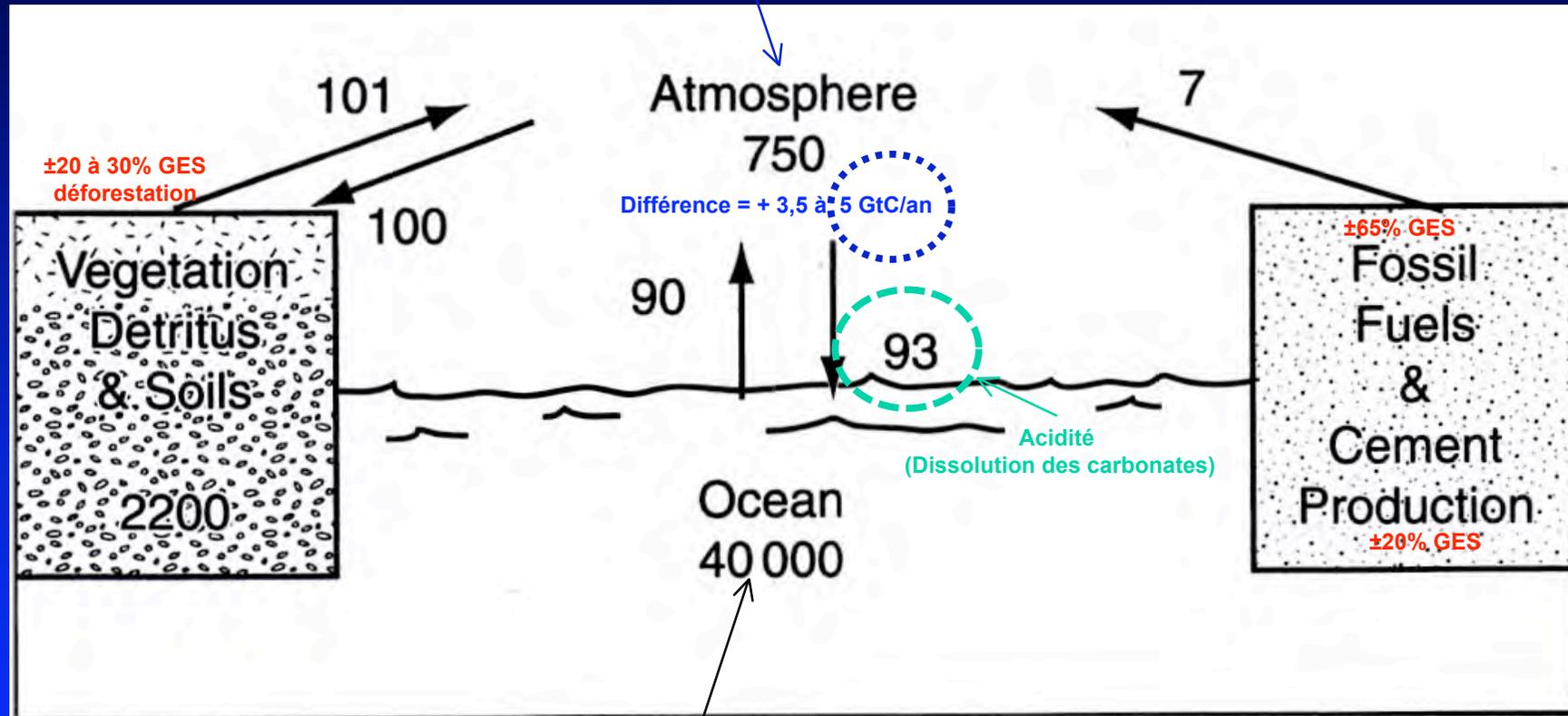
100%

UN GRAND ABSENT : H₂ O

Richter 2010

Réservoir le plus petit

En Gt de C
pour l'année 2007

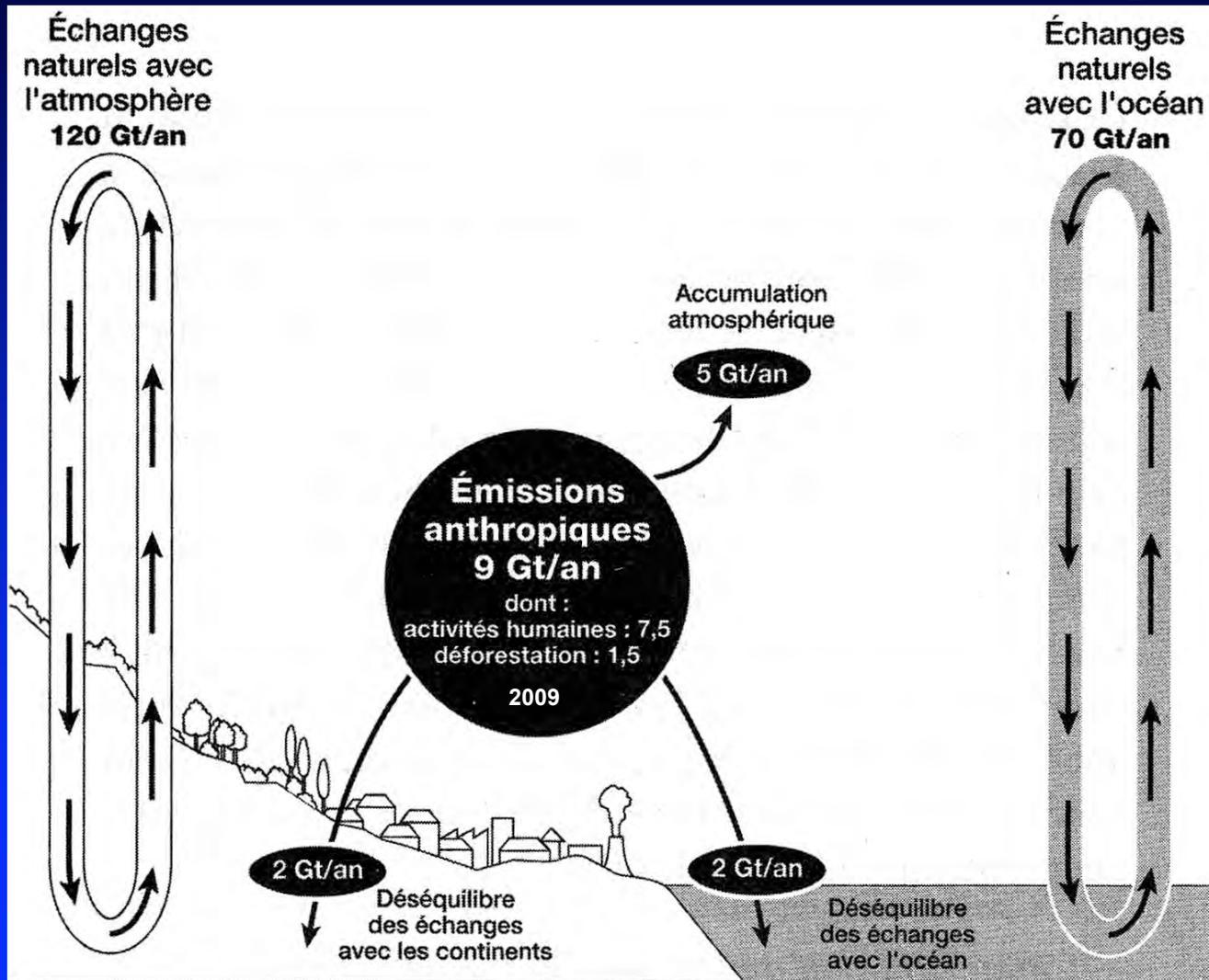


1 kg CO₂ = 0,2727 kg C
3,7 kg CO₂ = 1 kg C

Réservoir le plus grand

Richter 2010

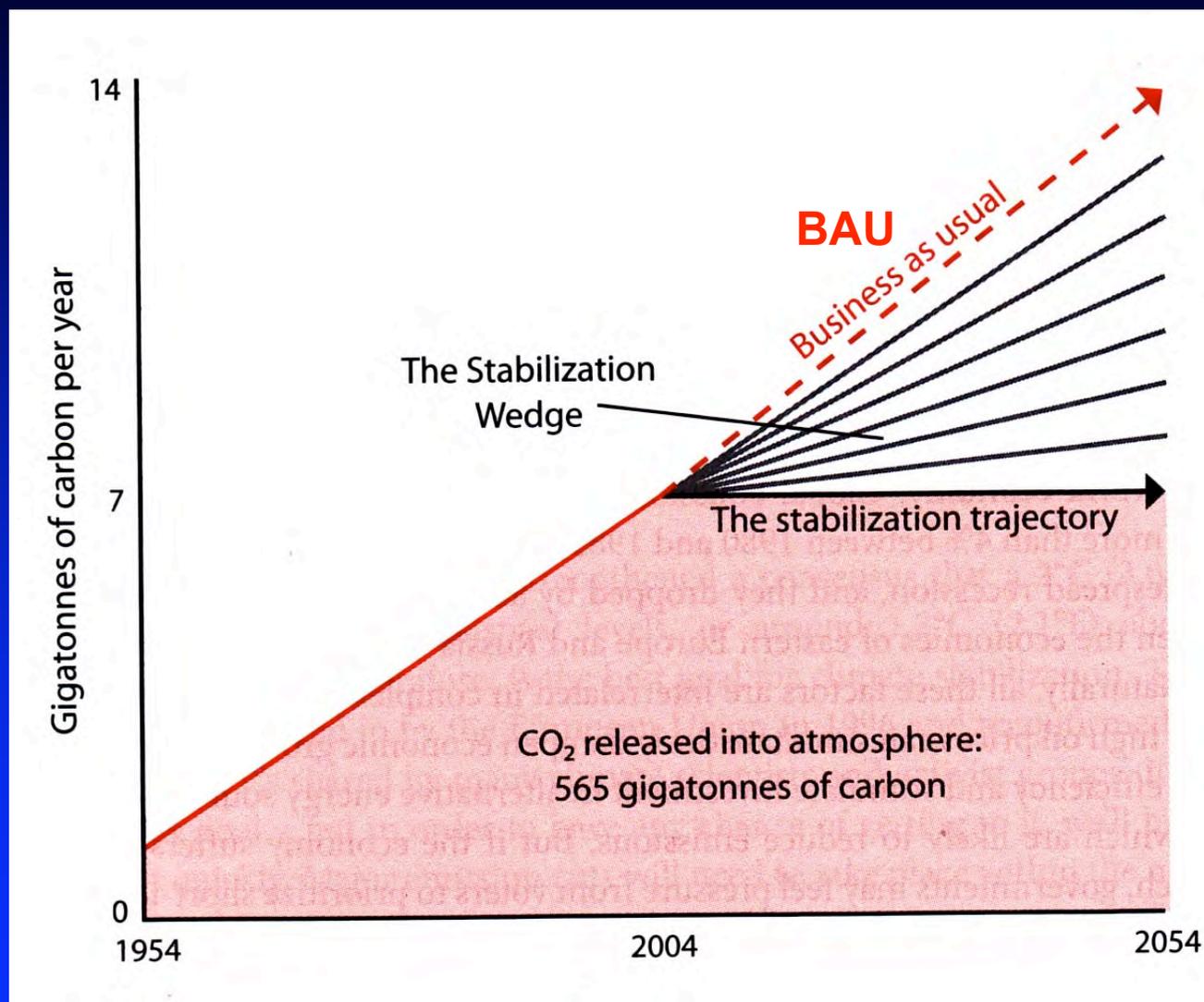
Echanges naturels entre les différents réservoirs
atmosphérique, océanique et continental
brassent 190 GtC/an => déséquilibre 'anthropique' par le CO₂...



Le Treut 2009

Pourtant les émissions annuelles de CO₂ anthropique ne représentent que 0,9% du stock CO₂ de l'atmosphère

Si les émissions de CO₂ continuent à augmenter >1%/an => X2 en 2054



Depuis 1990 l'augmentation des émissions de CO₂ = +39% (en 2010)

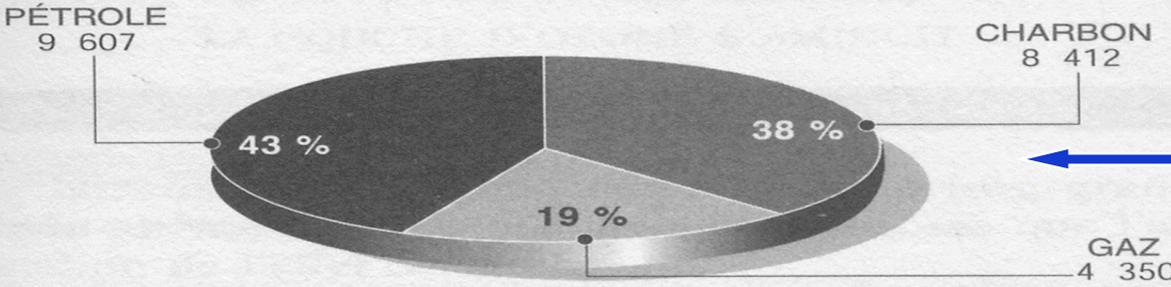
Le protocole de Kyoto: réduction de 5,5% des émissions GES pour la période 2008-2012 pr au taux de 1990

CO₂

Le gaz naturel est le combustible fossile le moins nocif

ÉMISSION DE CO₂ PAR COMBUSTIBLE EN 1998

en millions de tonnes équivalent carbone et %



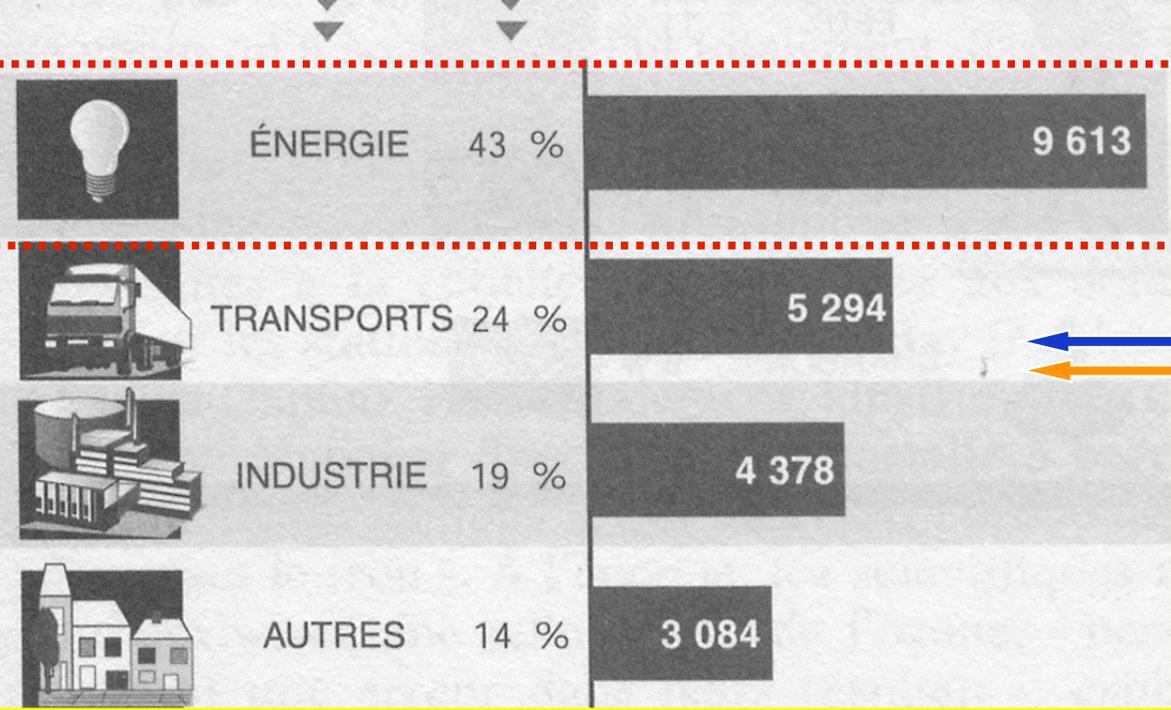
± idem en 2000'

2006
Charbon 41,7%
Pétrole 38,5%
Gaz 19,4%
Autres 0,4%

Les sources de CO₂ liées à l'activité humaine

SECTEUR	PART	ÉMISSION DE CO ₂ EN 1998
---------	------	-------------------------------------

en millions de tonnes



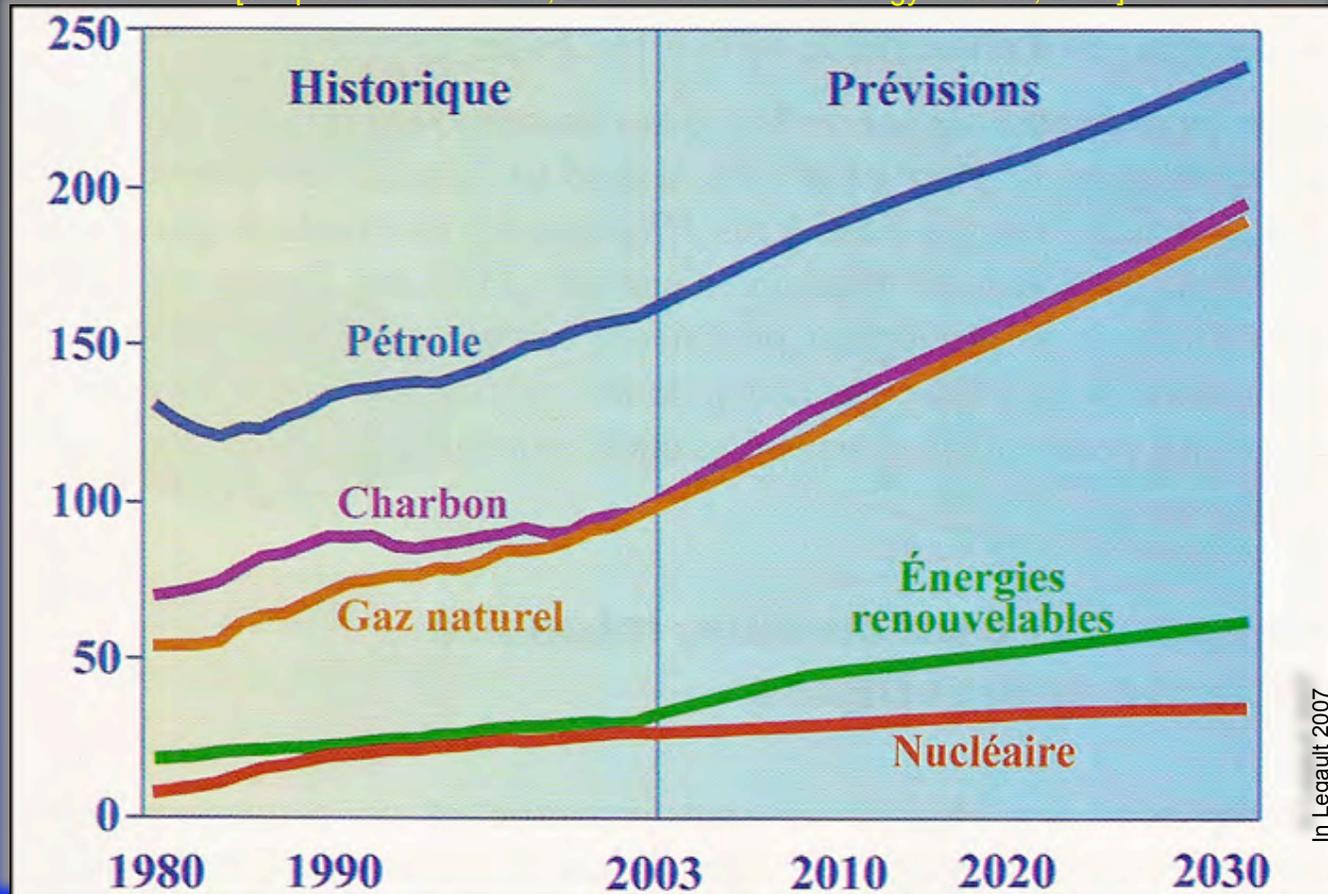
41,7 % en 2008
> 40%
centrales à charbon...

AUGMENTE SANS CESSE
 >50% France, Belgique...

1 auto 16000km/an, 8l/100
 = 1tC/an = X3,7 en CO₂
 En 2050
 2 G autos?
 =
 2 GtC/an
 ou 1 GtC/an
 (4l/100)
 1 avion Bxl-Malaga
 aller simple
 = 27t CO₂
 En été 400avions/jour!
 Nb 2008: 900 Cies avion

CONSOMMATION MONDIALE ENERGIE PRIMAIRE

[en quadrillions de BTU, EIA et International Energy Outlook, 2006]



In Legault 2007

AUJ. 2009

1. RETARD D'INVESTISSEMENT
[Raffinage...]
2. DEMANDE DURABLE
[Croissance soutenue pays émergents, Chine, Inde...]
3. INSTABILITE Z. PRODUCTRICES

Chine... 150 aéroports
Malaga... 400j

+ 71 %

en

27 ans

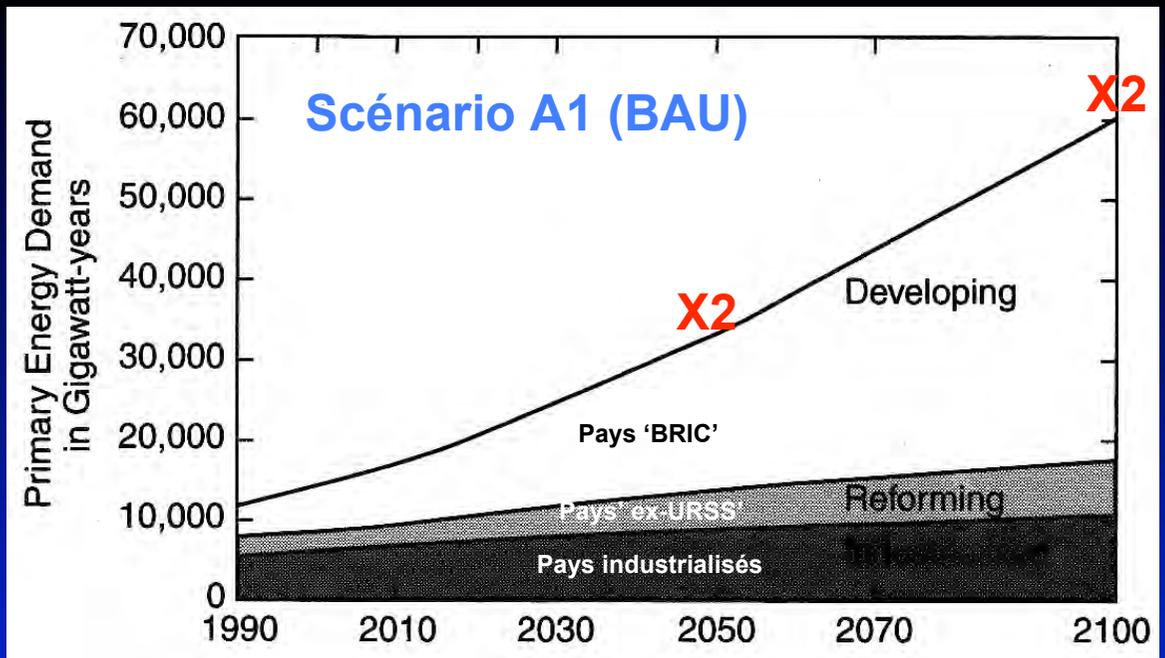
... avec les 2/3 = pays en voie de développement



A tout moment = 500 000 passagers en avion donc dans le ciel , soit 30 millions de vols commerciaux en 2011
ayant transporté 2,8 milliards de passagers
= 380 vols/minute et 14 000 aéroports dans le monde (en 2012)

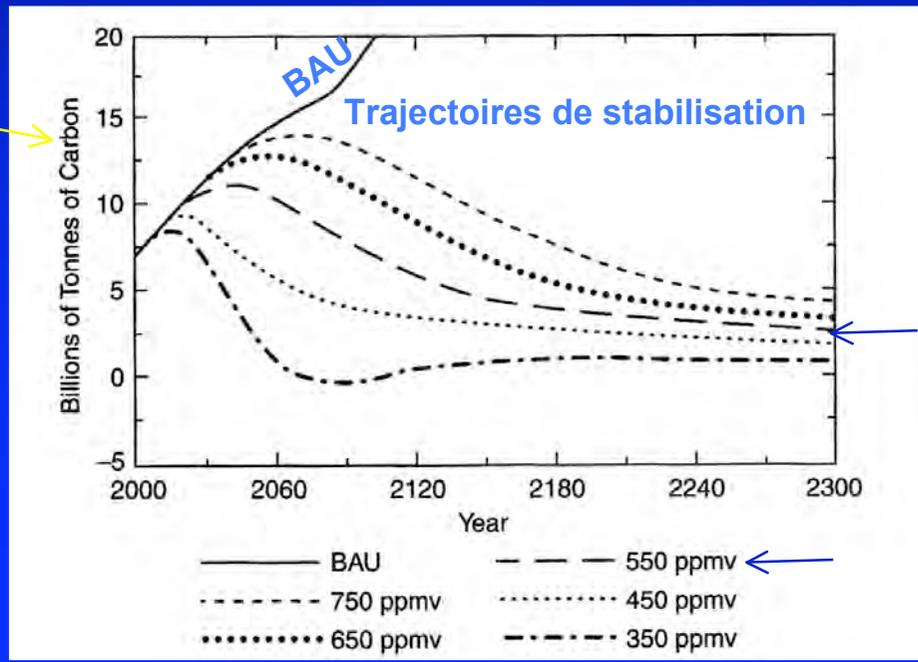
Prévisions pour 2014 : 3,3 milliards de passagers
Prévisions pour 2020 : 200 millions de vols commerciaux





X3,7 CO₂

BAU = Business As Usual



in Henson 2008

dangereux ?
(premiers symptomes = ±1000ppm)

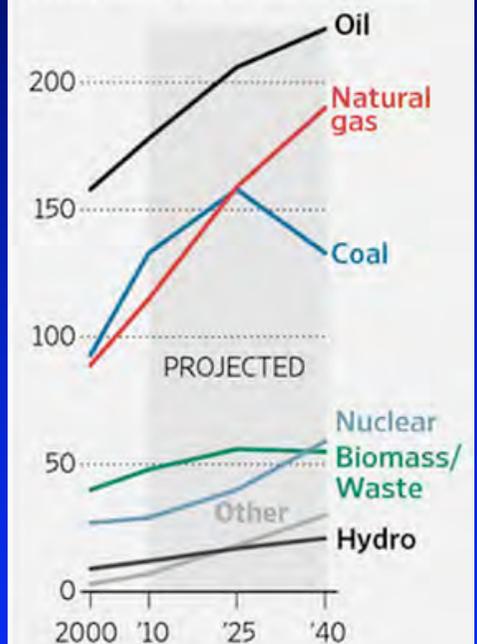
Table 2.2 ▶ World primary energy demand by fuel in the New Policies Scenario (Mtoe)

	1990	2010	2015	2020	2030	2035	2010-35*
Coal	2 231	3 474	3 945	4 082	4 180	4 218	0.8%
Oil	3 230	4 113	4 352	4 457	4 578	4 656	0.5%
Gas	1 668	2 740	2 993	3 266	3 820	4 106	1.6%
Nuclear	526	719	751	898	1 073	1 138	1.9%
Hydro	184	295	340	388	458	488	2.0%
Bioenergy**	903	1 277	1 408	1 532	1 755	1 881	1.6%
Other renewables	36	112	200	299	554	710	7.7%
Total	8 779	12 730	13 989	14 922	16 417	17 197	1.2%

*Compound average annual growth rate. ** Includes traditional and modern biomass uses.

A World View

Demand for energy sources in quadrillion British thermal units



Source: Exxon
The Wall Street Journal

2014

EMISSIONS DE GES

(les 6 gaz reconnus par le protocole de Kyoto)

EMISSIONS CUMULEES DE CO₂ (1950-2005)

En 2005, en tonnes d'équivalents CO₂

* Les 6 gaz à effet de serre reconnus par le protocole de Kyoto

Part du pays dans les émissions mondiales

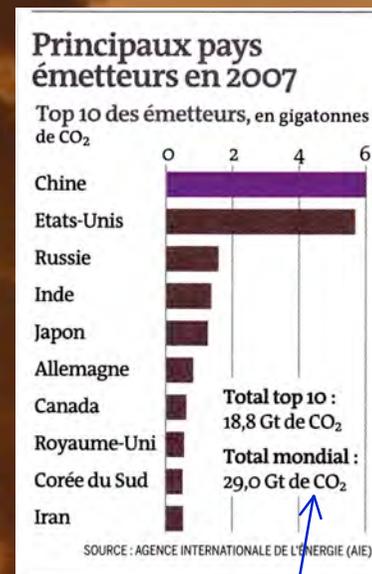
RANG	Emissions par habitant		RANG
5	Australie**	26,9 tonnes de GES	17
7	Etats-Unis	23,5	2
8	Canada	22,6	9
13	Arabie Saoudite	16,2	23
18	Russie	13,7	4
25	Allemagne	11,9	8
31	Corée du Sud	11,4	16
36	Royaume-Uni	10,6	10
37	Japon	10,5	6
39	UE à 27	10,3	3
40	Ukraine	10,3	18
41	Espagne	10,1	19
44	Pologne	9,8	22
45	Italie	9,7	14
47	France	9	15
48	Afrique du Sud	9	20
54	Iran	8,2	13
65	Mexique	6,1	11
72	Chine	5,5	1
74	Brésil	5,4	7
120	Inde	1,7	5

Entre 1950 et 2005, en tonnes

Part du pays dans les émissions mondiales

RANG	Emissions par habitant		RANG
2	Etats-Unis*	809,4 tonnes de CO ₂	1
6	Canada	625,4	11
7	Allemagne	612,1	5
11	Russie	586,5	4
13	Australie	530	16
14	Royaume-Uni	529,8	7
16	Ukraine	471,9	9
19	Pologne	443,8	12
24	UE à 27	413,3	2
33	France	337,5	10
34	Japon	334,5	6
40	Italie	286	13
43	Arabie Saoudite	258,8	26
49	Afrique du Sud	233,5	14
51	Espagne	213,3	17
57	Corée du Sud	189,2	19
76	Iran	108,6	21
79	Mexique	105,2	15
89	Chine	69,9	3
100	Brésil	47	20
125	Inde	21,7	8

* Les Etats-Unis, 1^{ers} de notre liste, ne sont que 2^{es} de ce classement, car ils sont dépassés par... le Luxembourg !

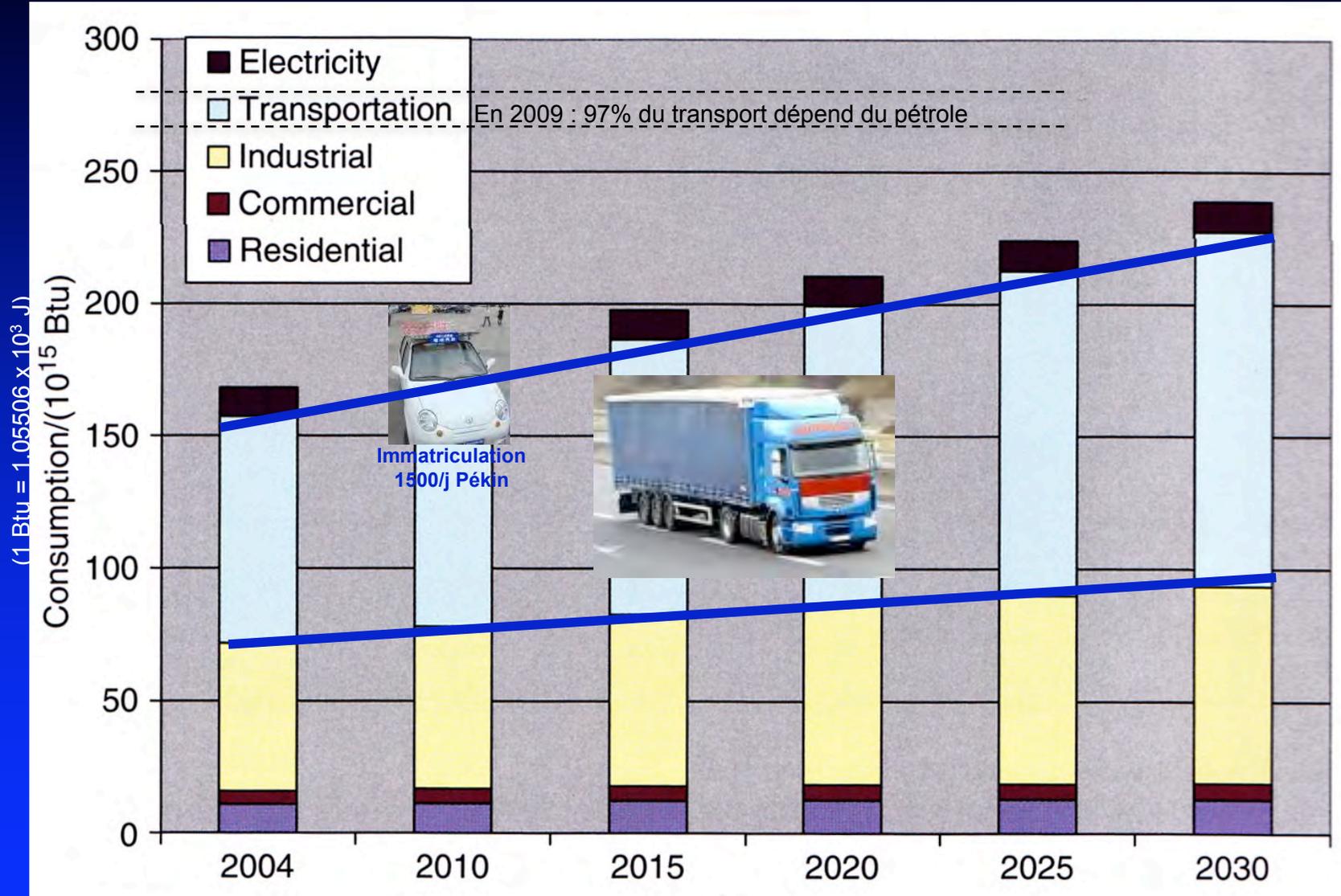


Emissions 2009 = -3%
(= crise)
au lieu de la progression
moyenne
annuelle de +3%

> 12 Gt CO₂

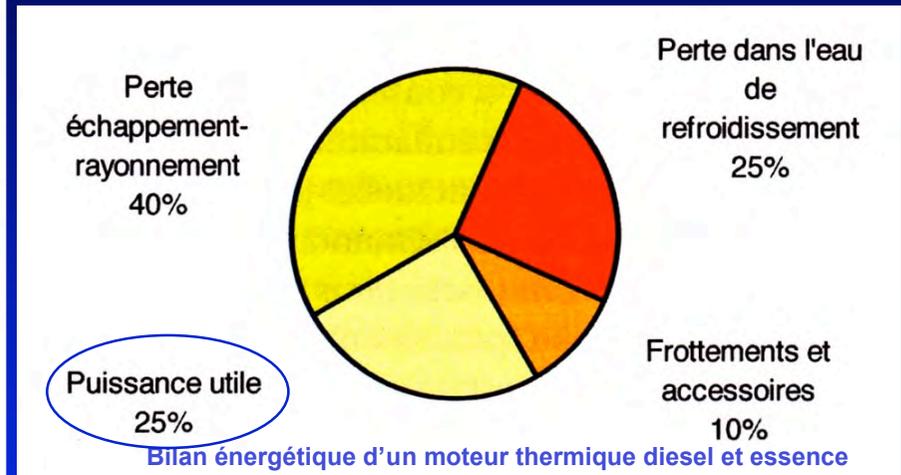
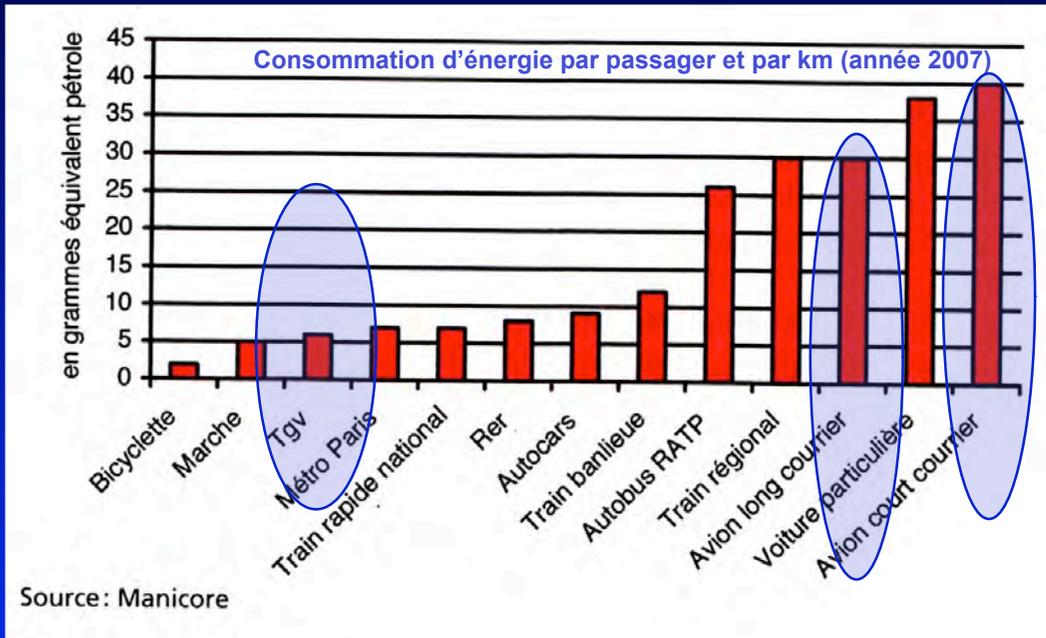
Courrier International 2009

En 2009: seuls 2% de Chinois possèdent une voiture => 3,5 M voitures à Pékin sont à prévoir (auj 1voiture/minute à Pékin!)



En 2009: 476.194 voitures NEUVES ont été immatriculées en Belgique soit 1305/j (= -11% pr 2008) soit ±1voiture/min

Pour résumer: les émissions à GES progressent à un rythme plus rapide que ne l'avait prédit le GIEC dans ses scénarios les plus pessimistes, malgré une diminution de l'UE de 7,7% depuis 1990.



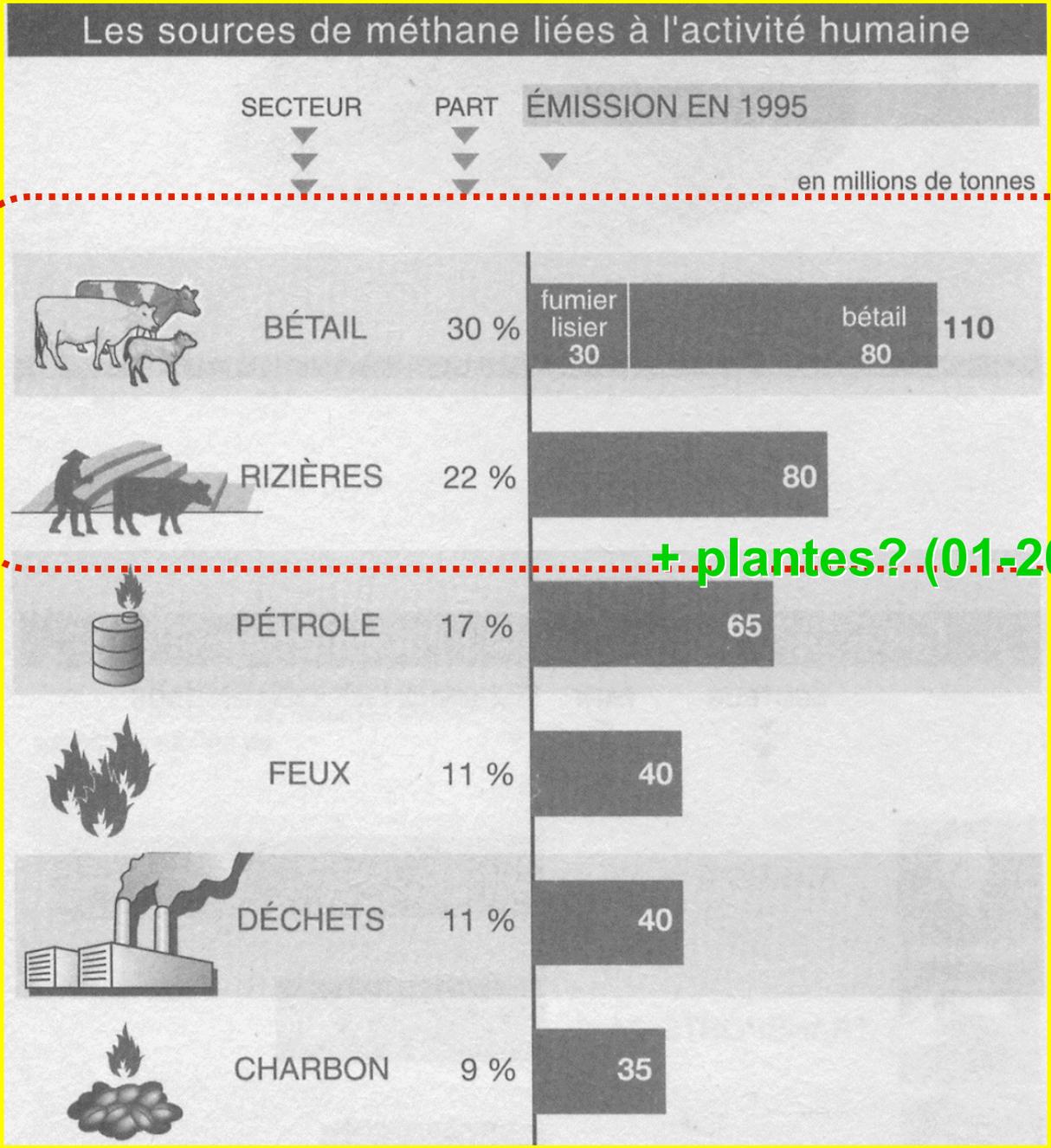
TRES CHER

'LOW COST'

Absorption maximale (Terre à l'équilibre) : 10 à 12 Gt CO₂,
 soit pour 6,5 milliards de terriens = ±1800 kg/hab/an
En Belgique 2008: 14,3 tonnes éq. CO₂/hab/an
= environ X10
(1 kg CO₂ = 0,2727 kg C)



+
Clathrates?

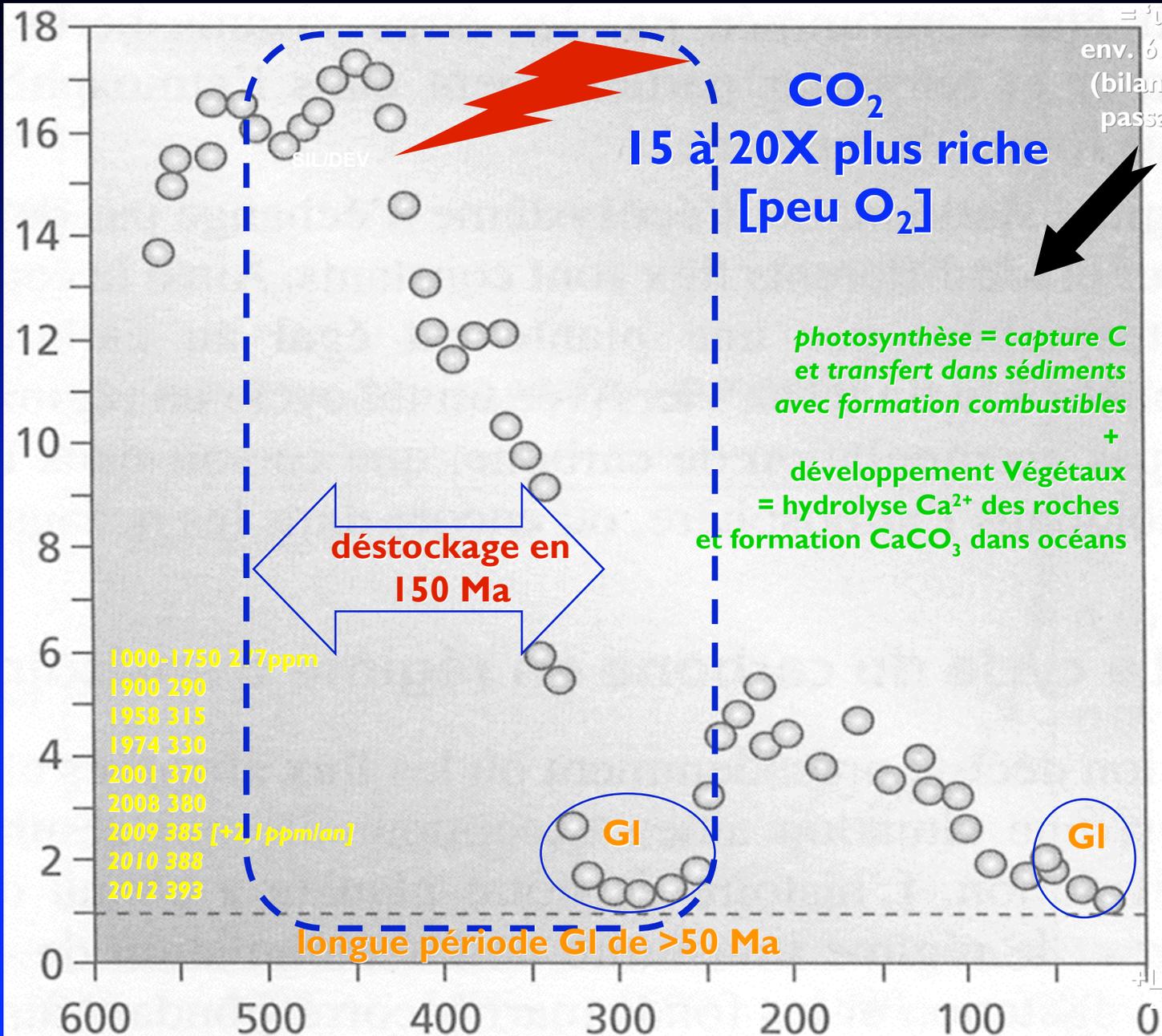


+ plantes? (01-2006)

± 50%

Crutzen 1998

Concentration CO₂ dans l'atmosphère



= 'Usine végétale' qui extrait env. 60 Gt/an de C de l'atmosphère (bilan photosynthèse-respiration) passage minéral ==> organique

CO₂ 15 à 20X plus riche [peu O₂]

photosynthèse = capture C et transfert dans sédiments avec formation combustibles +
développement Végétaux = hydrolyse Ca²⁺ des roches et formation CaCO₃ dans océans

déstockage en 150 Ma

longue période GI de >50 Ma

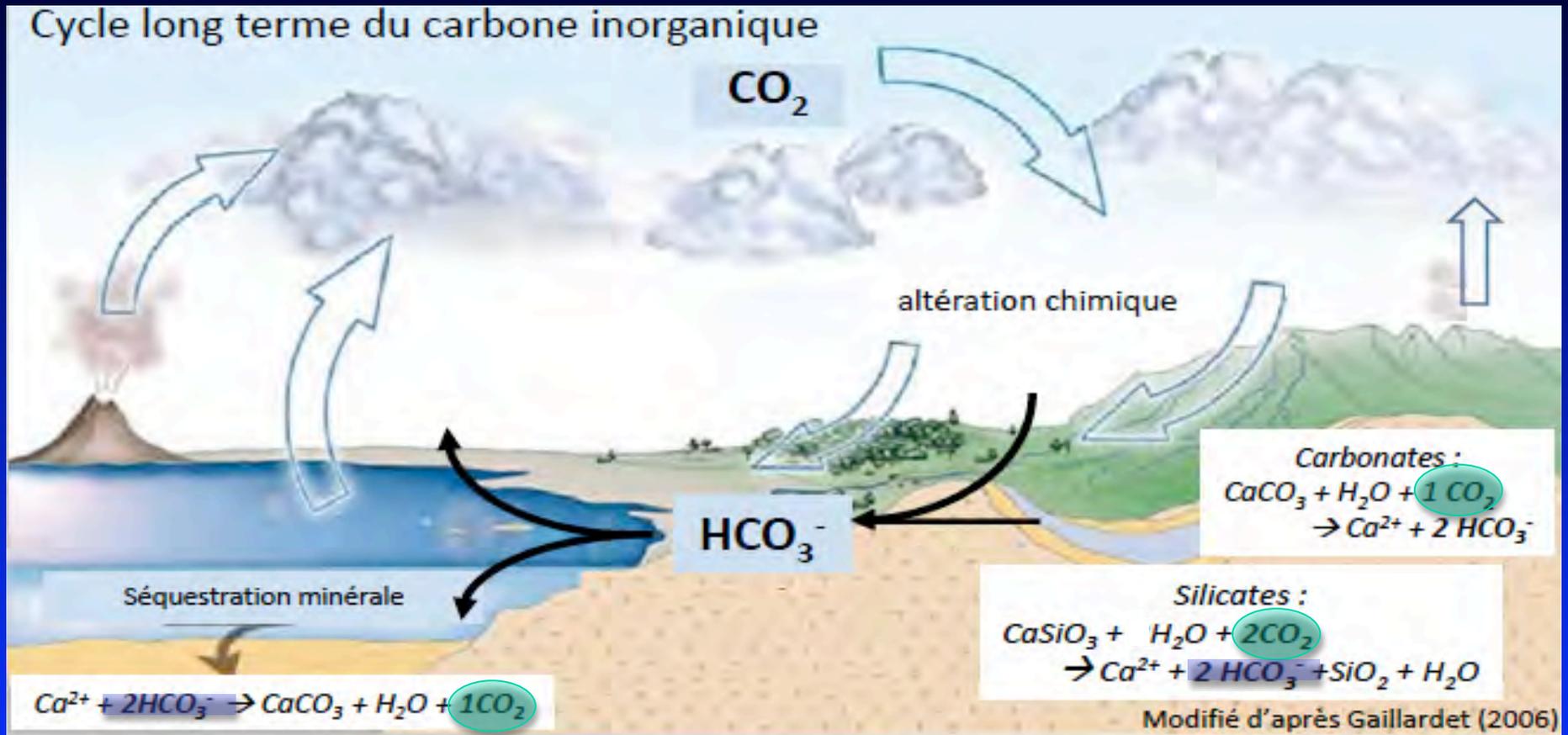
=
Déstockage 'naturel' du C de l'atm

Jusqu'à un équilibre =
récente période industrielle

1994

nb Himalaya et Hercynien
IP = Large Igneous Provinces

L'ALTERATION DES SILICATES EST UNE POMPE A CO₂



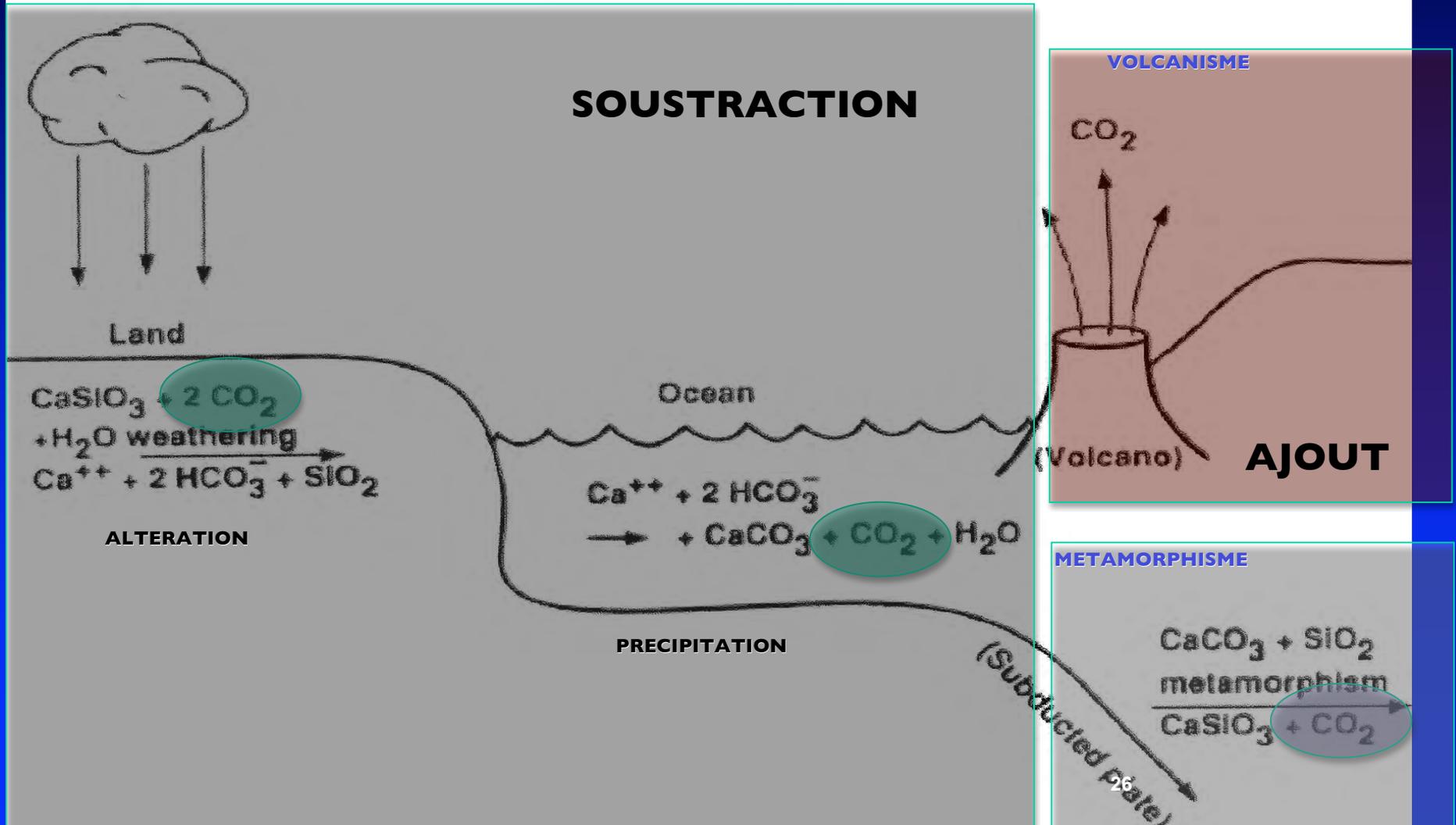
Altération des carbonates: 1 CO₂ prélevé => 1 CO₂ libéré => 0 CO₂ séquestré

Altération des silicates Ca et Mg : 2CO₂ prélevés => 1 CO₂ libéré => 1 CO₂ séquestré

Nb Himalaya : consommation par altération de 34X la teneur en actuelle de CO₂

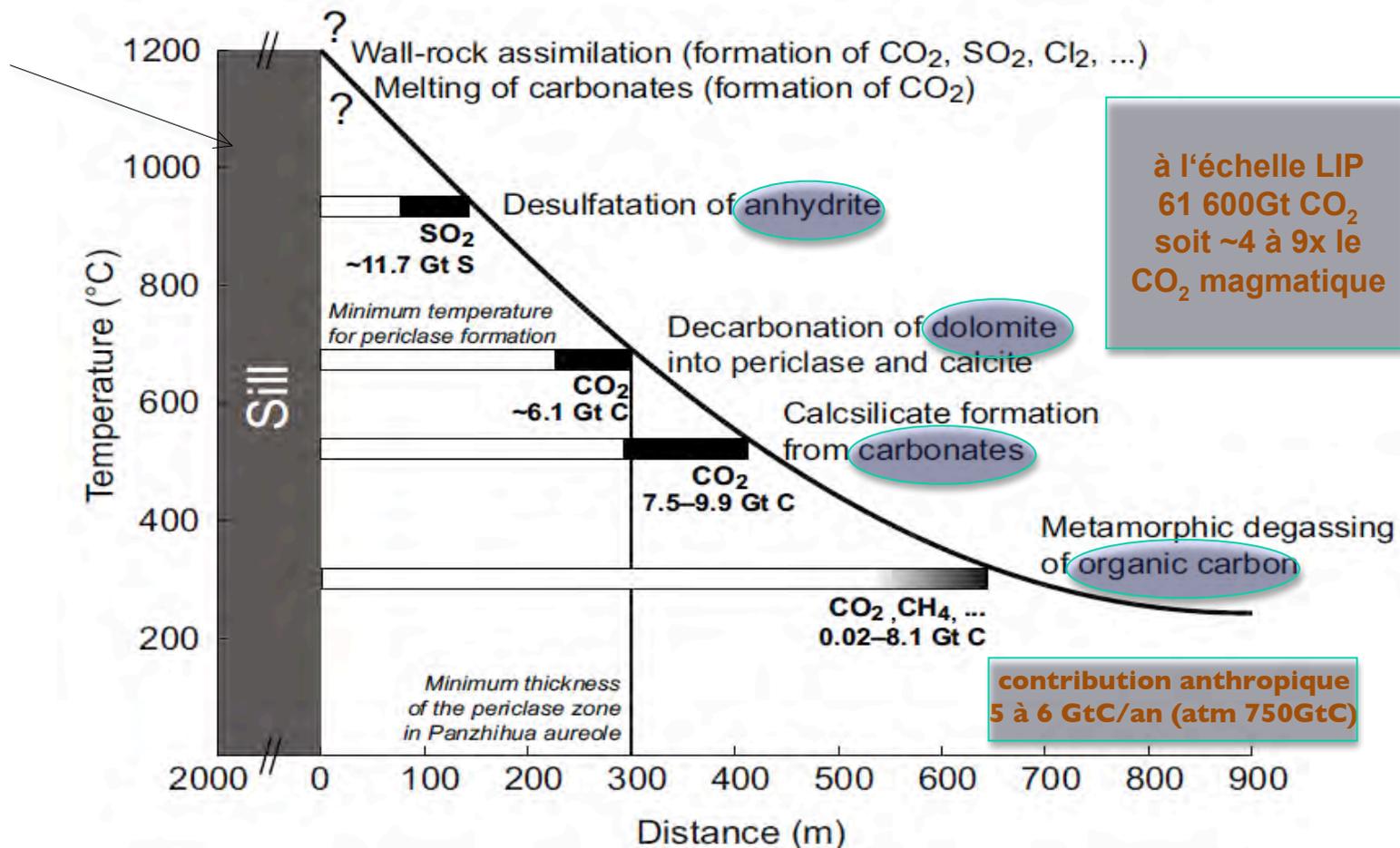
CYCLE D'ALCALINITE de 3000 ans (temps de réponse à toute perturbation géologique)

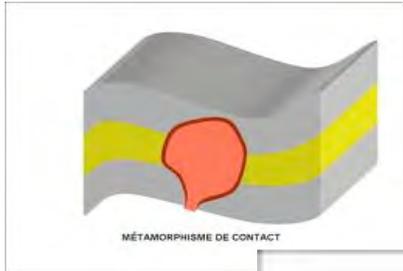
THE CARBONATE – SILICATE CYCLE s.I.



LIP + LARGE IGNEOUS PROVINCES

Dégazage GES ($\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{SO}_2, \dots$) dans séries carbonatées, charbonneuses, évaporitiques, shales organiques (auréoles de métamorphisme de contact)
 ⇒ changements climatiques (ici traps sibériens permien en Chine intrudés dans le Silurien)
 ⇒ surface >500 000km²





MÉTAMORPHISME DE CONTACT

Récemment Svensen and Jamveit (2010) ont montré que les réactions de métamorphisme de contact, opérant à des températures de 400 à 500°C dans les 'bassins volcaniques', pouvaient injecter des quantités considérables de CH₄ et de CO₂ dans l'atmosphère, constituant ainsi un processus de premier ordre dans le réchauffement climatique.

Un seul % (en poids) du carbone organique contenu dans les schistes et les grès d'un de ces bassins peut produire l'équivalent de 230 à 920 GtC, soit l'équivalent de 310 à 1200 Gt de méthane à l'échelle de quelques années (Svensen et al. 2004, 2007)

Le métamorphisme de contact, jamais pris en considération dans les études actuelles concernant le CO₂ atmosphérique, est un processus de première importance reliant la biosphère et le manteau

MÉTAMORPHISME DE CONTACT

VOLCANISME EFFUSIF

L'apport du CO₂ volcanique ou mantellique est sujet à de nombreuses controverses mais a fortement été sous-estimé à 0,05Gt par an.

De récents travaux suggèrent que cet apport serait plus important d'un facteur 100 ou plus. En effet, Il y aurait près de 3,5 millions de volcans sous-marins (Hillier & Watts, 2007) et 4% d'entre eux seraient actifs, produisant, suivant les différentes manières de calculer, des quantités de CO₂ allant de 24,5GtC/an (Kerrick & Caldeira 1998, Kerrick 2001) à 121 GtC/an (Casey 2010). Ces chiffres sont à mettre en regard avec la contribution anthropique reconnue (± 5 à 8 GtC/an).

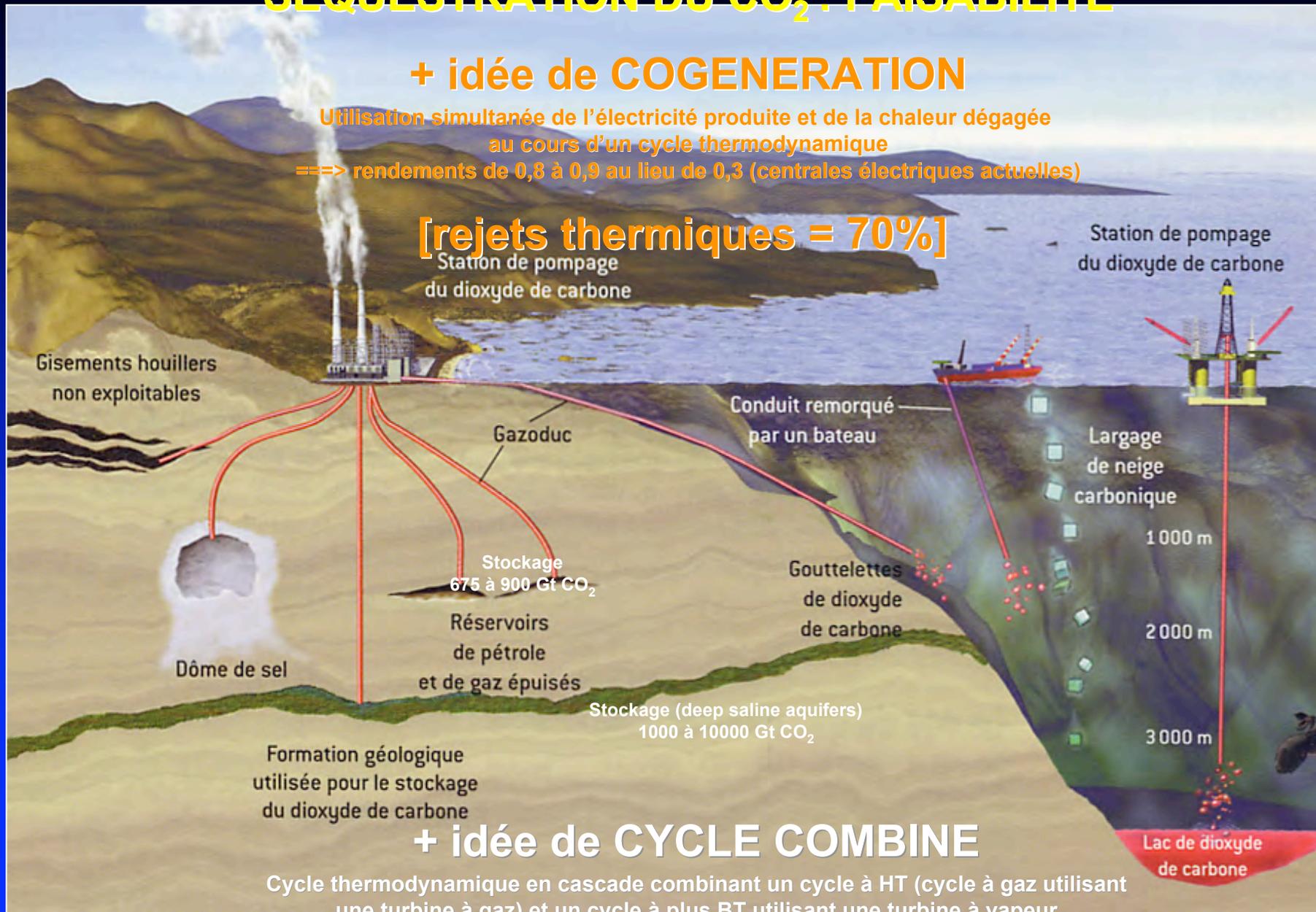
Des études statistiques des provinces volcaniques sous-marines seront nécessaires pour établir des bilans isotopiques complets.

SEQUESTRATION DU CO₂ : FAISABILITE

+ idée de COGENERATION

Utilisation simultanée de l'électricité produite et de la chaleur dégagée
au cours d'un cycle thermodynamique
==> rendements de 0,8 à 0,9 au lieu de 0,3 (centrales électriques actuelles)

[rejets thermiques = 70%]



+ idée de CYCLE COMBINE

Cycle thermodynamique en cascade combinant un cycle à HT (cycle à gaz utilisant une turbine à gaz) et un cycle à plus BT utilisant une turbine à vapeur

==> rendements plus élevés lors de la conversion de la chaleur en électricité

?

90/10

(? NOUVELLE) GESTION DE L'ENERGIE

INCERTITUDES GEOLOGIQUES -- INCERTITUDES (GEO)POLITIQUES -- INCERTITUDES TECHNOLOGIQUES



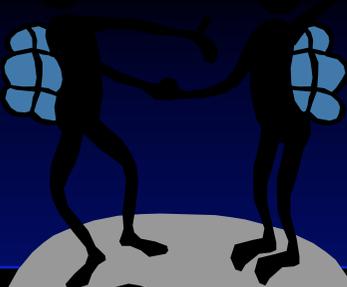
LES ENERGIES FOSSILES

INCERTITUDES GEOLOGIQUES ... ET ENERGIE



NOTIONS DE GEOLOGIE

POUR- -QUOI?



NOTIONS DE GEOLOGIE

ENERGIES FOSSILES

= ROCHES SEDIMENTAIRES = BASSINS SEDIMENTAIRES

[et aussi ROCHES MAGMATIQUES pour l'Uranium]

Phase EXPLORATION: 1====>9, auj. 1====>5

Phase DEVELOPPEMENT: 1====>3, auj. 1====>2

Phase 'ABANDON': 1:50 à 1:100

Nb 50.000 à 100.000 puits/an (explo),

X1,5km = ± 20 à 30 rayons terrestres

± 80 % USA [80.000] et <1000 puits [650] = <1% Moyen Orient...

POUR- -QUOI?

NOTIONS DE GÉOLOGIE et ...!

Réserves = Incertitudes Géopolitiques...

Exemple Récent

En 2002, BP annonce que les gisements inexploités de la Caspienne ne recélaient pas 200 G bbl comme espéré MAIS 39 G bbl d'un pétrole de mauvaise qualité! = géologie et bassins sédimentaires [...10 G bbl]

nb 200 Gbbl = total USA, 220 = Russie, 75 = Europe, MO = 680
(chiffres ASPO/2006 de prod estimée jusqu'en 2100)

- Exemple Récent: le 9 janvier 2004, SHELL annonce que ses réserves étaient SURESTIMEES de 20% (son Président a dû démissionner, la Société étant sur-évaluée à la Bourse = finances....)
- Exemple Récent: en 2002, la DOUMA a voté une loi: révéler les réserves de gaz et de pétrole russe est un crime passible de 7 ans de prison! = (géo)politique...

5 milliards
de bbl en trop!

nb les réserves détenues par les Cies pétrolières = 'seulement' 15 %

2003 (chiffres d'affaires)

1 Royal Dutch/Shell 269 milliards US \$

2 Exxon Mobil 237

3 BP Amoco 232,6

4 Total 131,6

5 Chevron Texaco 113

...



9 déc 2003, le responsable Explo-Prod écrit au PDG de Shell

‘ Je suis malade et fatigué de mentir à propos des problèmes concernant l’augmentation de nos réserves et des révisions à la baisse qui doivent être faites suite aux annonces précédentes, largement trop agressives et optimistes.... ’



nb La Royal Dutch/Shell est avec Exxon Mobil un des plus grands producteurs (> 4 millions bbl/j)



(07 Janv) 2010: 83\$ soit +80% en un an...



- froid (-1°C = 5% E)
- 'reprise économique'
- repli € vs \$

VOLATILITE DES PRIX : court terme

1997 /1998 1bbl = 9\$

Fin 2007 1bbl = 100\$

Consommation x11?, Production :11?

= spéculation (transactions financières = 15x transactions physiques)

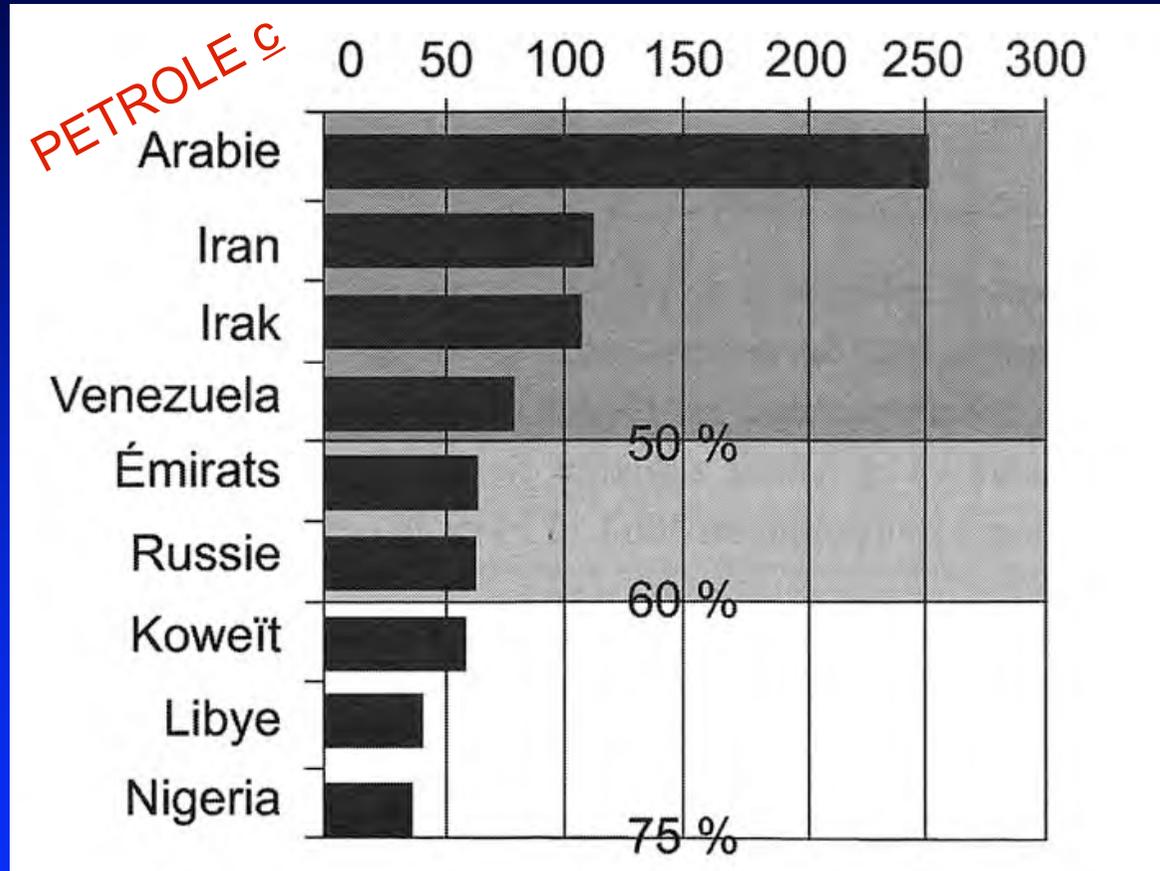
= crise asiatique (augm prod et baisse demande) >> hausse demande et menaces approvisionnements [Irak, difficultés loukos, instabilité Venezuela et Nigeria]

2012 MMbbl/d pr 2011

USA	18,6 <small>-2,3%</small>
Chine+HK	10,2 <small>+5%</small>
Japon	4,7 <small>+6,3%</small>
Inde	3,7 <small>+5</small>
Russie	3,2 <small>+9,2%</small>
Arabie S	2,9 <small>+3,9%</small>
Brésil	2,8 <small>+2,5%</small>
Allemagne	2,4 <small>+1,1%</small>
Corée Sud	2,5 <small>+2,5%</small>
Canada	2,4 <small>+0,9%</small>
	53,4

Σ±87,3 +3,1%

Les neuf pays possédant 75% des réserves prouvées



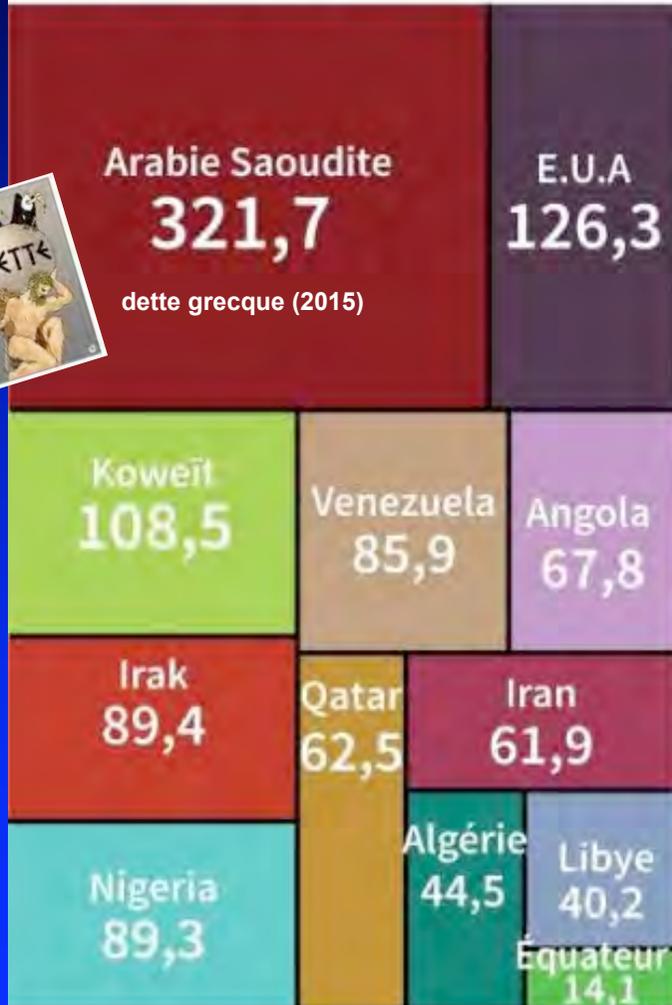
Mathieu IFP in Durand 2009

« je les considère comme des pays ? »

Opep : exportations

Valeur en milliards de dollars (2013)

Total de l'Opep : 1 112 milliards de \$



dette grecque (2015)

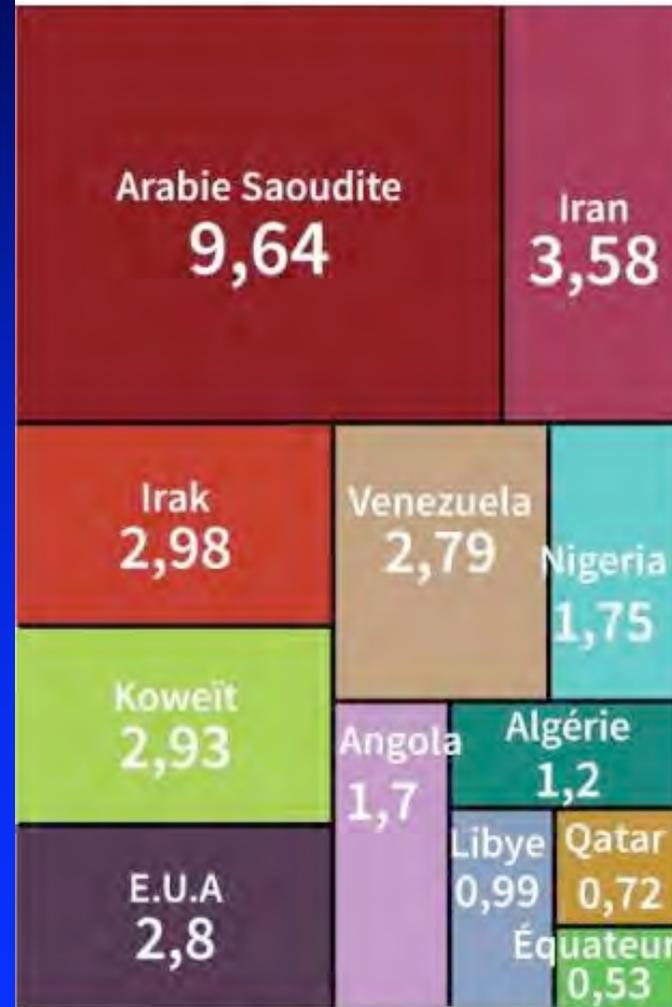
Source : Opep

AFP

Production de l'Opep

En millions de barrils/jour (2013)

Total de l'Opep : 31,6 millions mbj



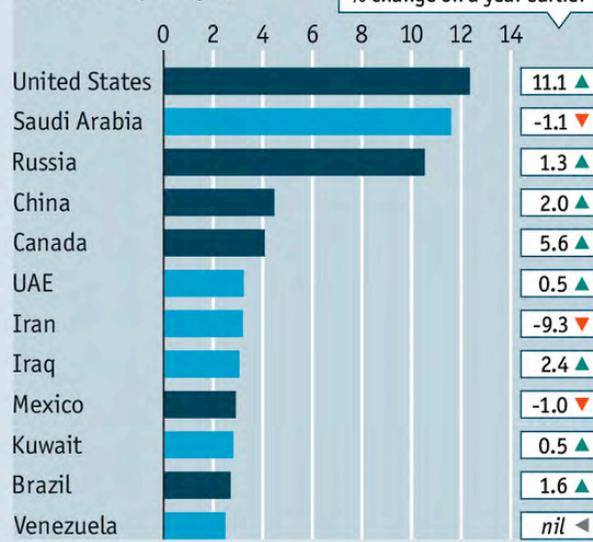
Source : Opep

AFP

Unsettled outlook

Biggest oil producers

2013, barrels per day, m



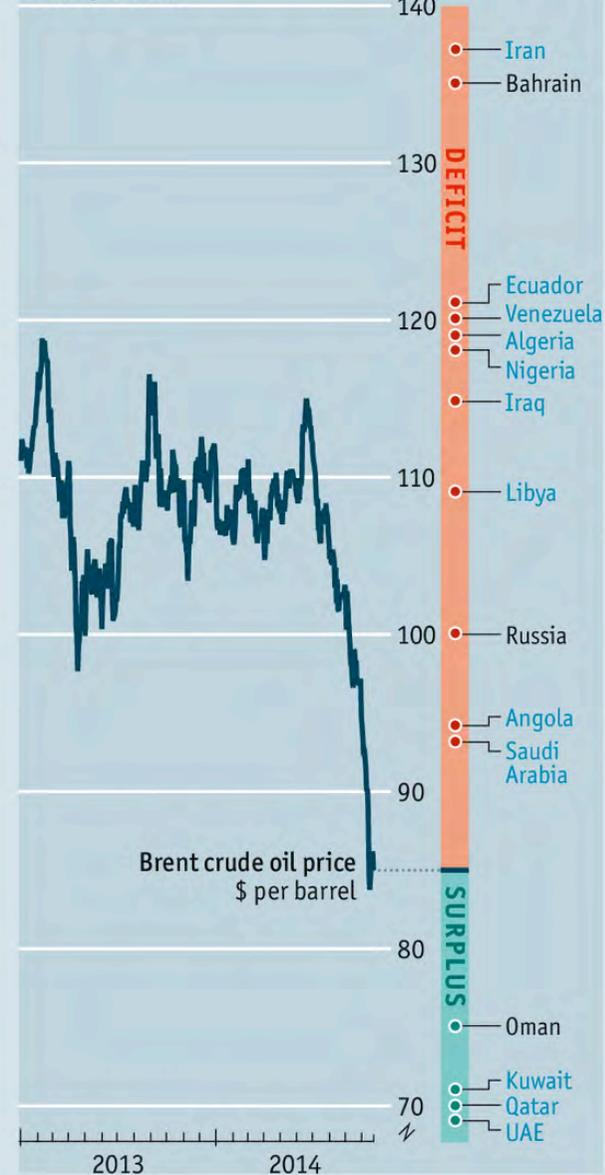
Biggest net oil:

2013, barrels per day, m



Government budgets' break-even oil price

2014, \$ per barrel



HOME » FINANCE » OIL PRICES

Saudis risk playing with fire in shale-price showdown as crude crashes

A deep slump in prices might heighten geostrategic turmoil across the Middle East

 3K  838  0  574  5K  Email



As late as last year, Opec was dismissing US shale as a flash in the pan Photo: EPA



By **Ambrose Evans-Pritchard**

4:49PM GMT 30 Nov 2014

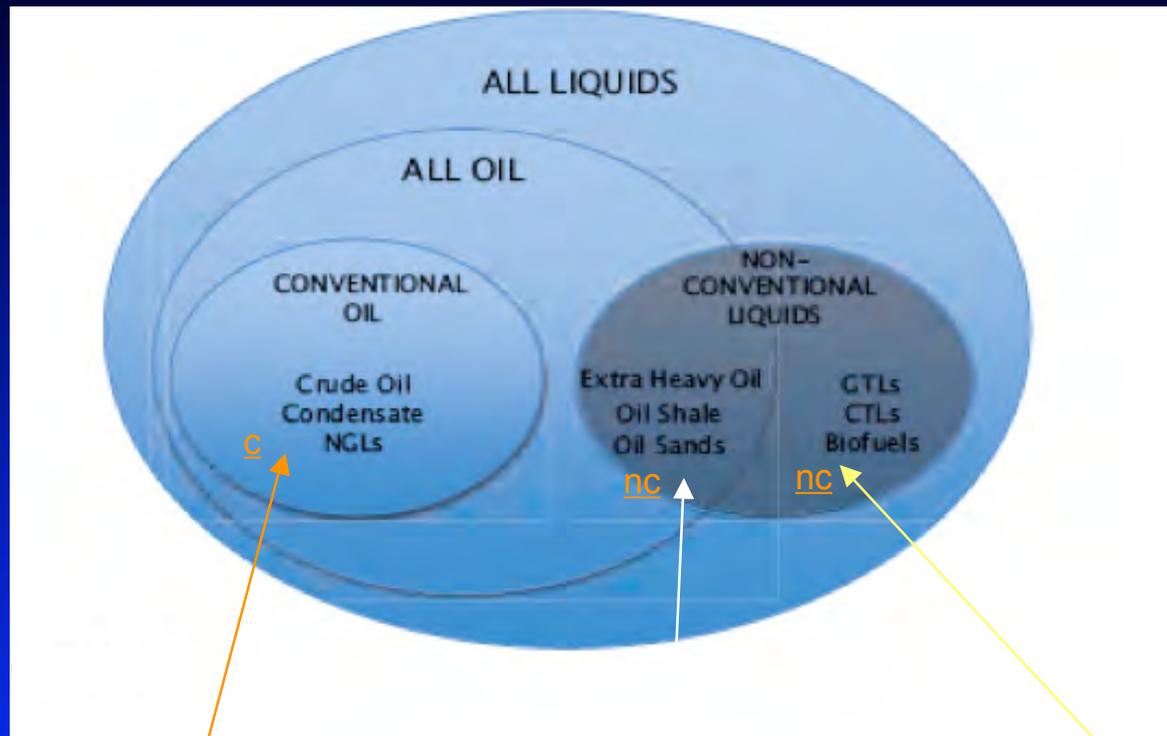
 Follow 16.6K followers

 Print this article

Oil Prices

Finance » Comment »
Ambrose Evans-

ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc



IAE 2008



Crude Oil : brut (mélanges HC)

Condensate : huile très légère (C_{5+}) se condensant à partir de gaz naturels (p,T surface)

NGLs : HC légers liquides associés au gaz naturel (méthane-éthane, propane, butane)

Extra Heavy Oil : brut avec un d° API $< 10^\circ$ (gravité): très visqueux, injection vapeur

Oil Shales : schistes bitumineux (kérogène), doivent être pyrolysés ($>400^\circ\text{C}$)

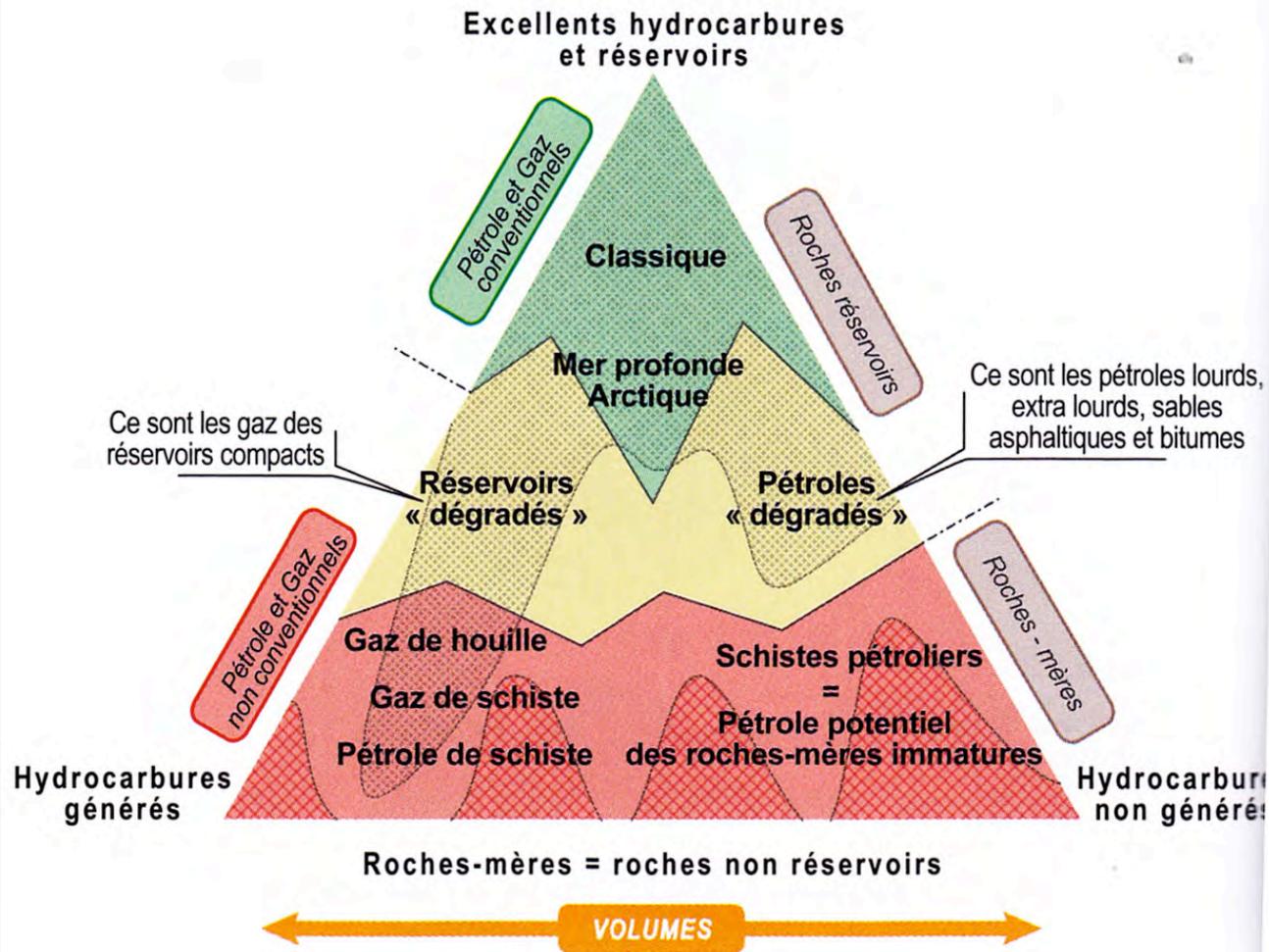
Oil Sands: grès imprégnés d'huile extra-lourde ou lourde, 'mining' et procédés = syncrude

CTLs : fuel synthétique liquide obtenu par gazéification du charbon suivi par procédé Fischer-Tropsch

GTLs : fuel synthétique liquide obtenu par liquéfaction du méthane (Fischer-Tropsch, 1923)

Biofuels : fuels synthétiques obtenus par la biomasse (bio-éthanol, bio-diesel)

Fin 2009- 2010 : GAS SHALES 'fracker'

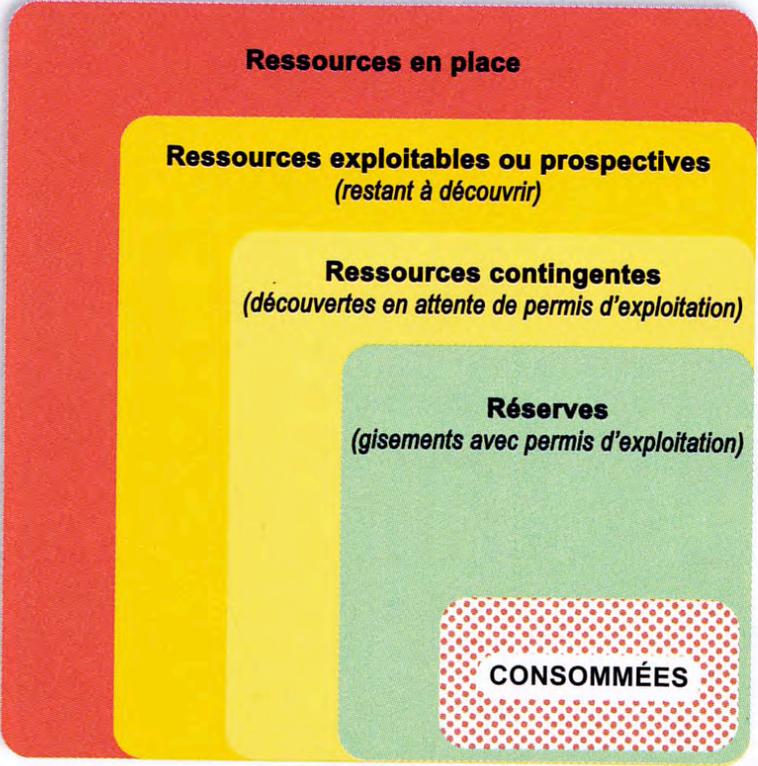


Accessibilité des ressources

- | | |
|--|--|
| Exploitation classique | Accessible avant 1980 |
| Exploitation par stimulations | Actuellement accessible |
| Accessibilité et Acceptabilité | Accessible vers 2020 |

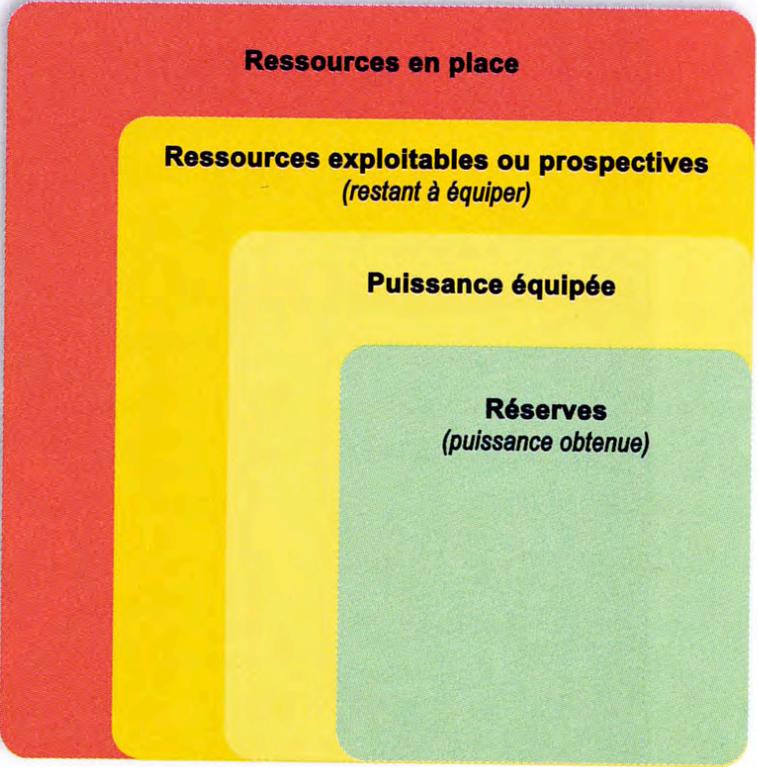
NON RENOUEVABLES

Pétrole, Gaz naturel, Charbons, Uranium, etc.



RENOUEVABLES

Solaire, Éolien, Hydraulique, etc.



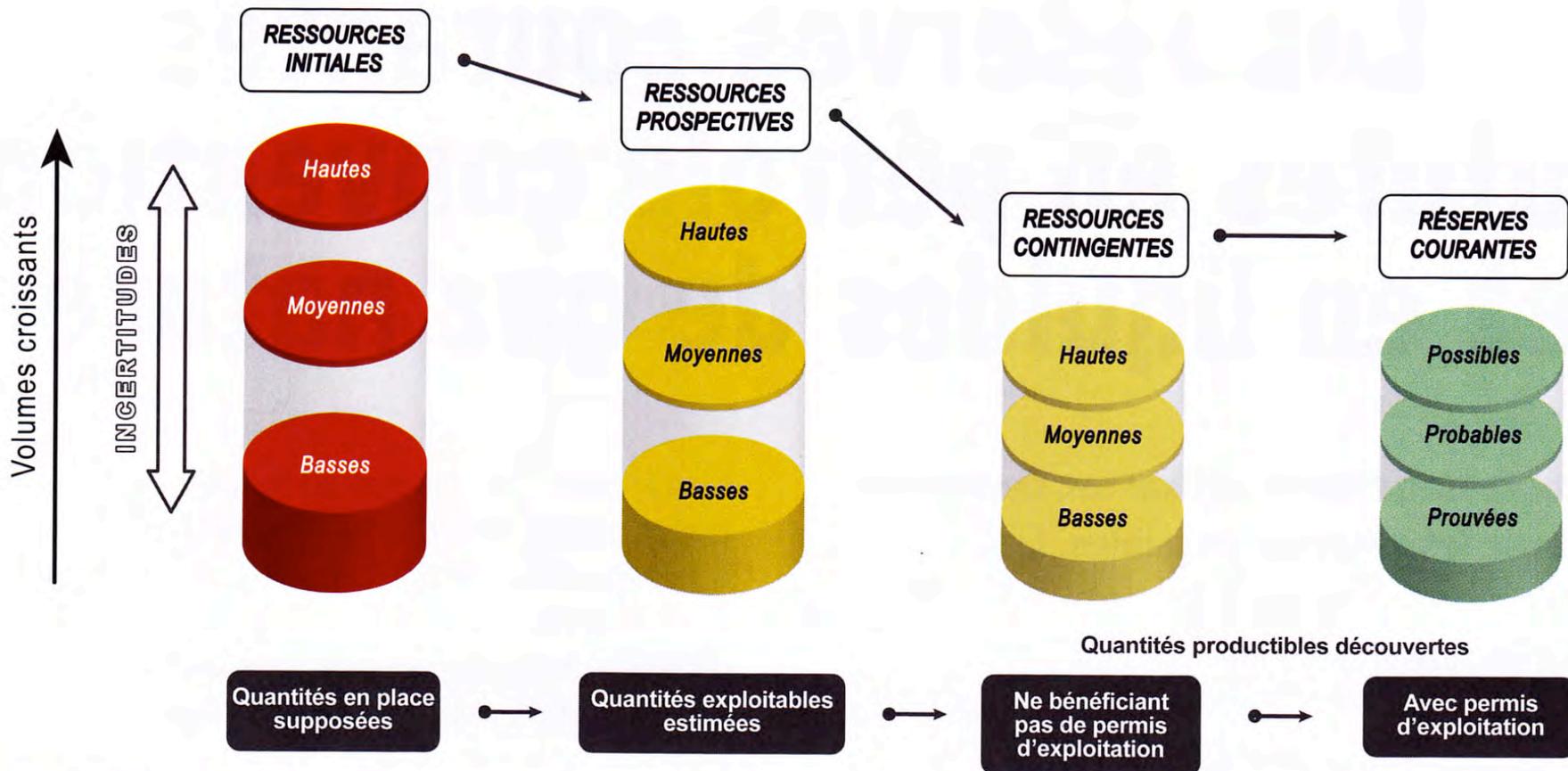
La dimension des carrés est indépendante des volumes concernés

Non renouvelables

- Restantes
- Exploitables
- Inexploitables
- Consommées

Renouvelables

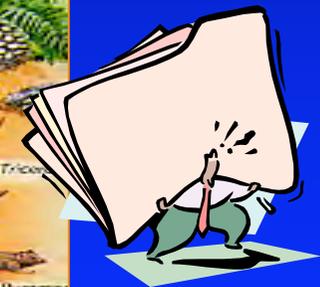
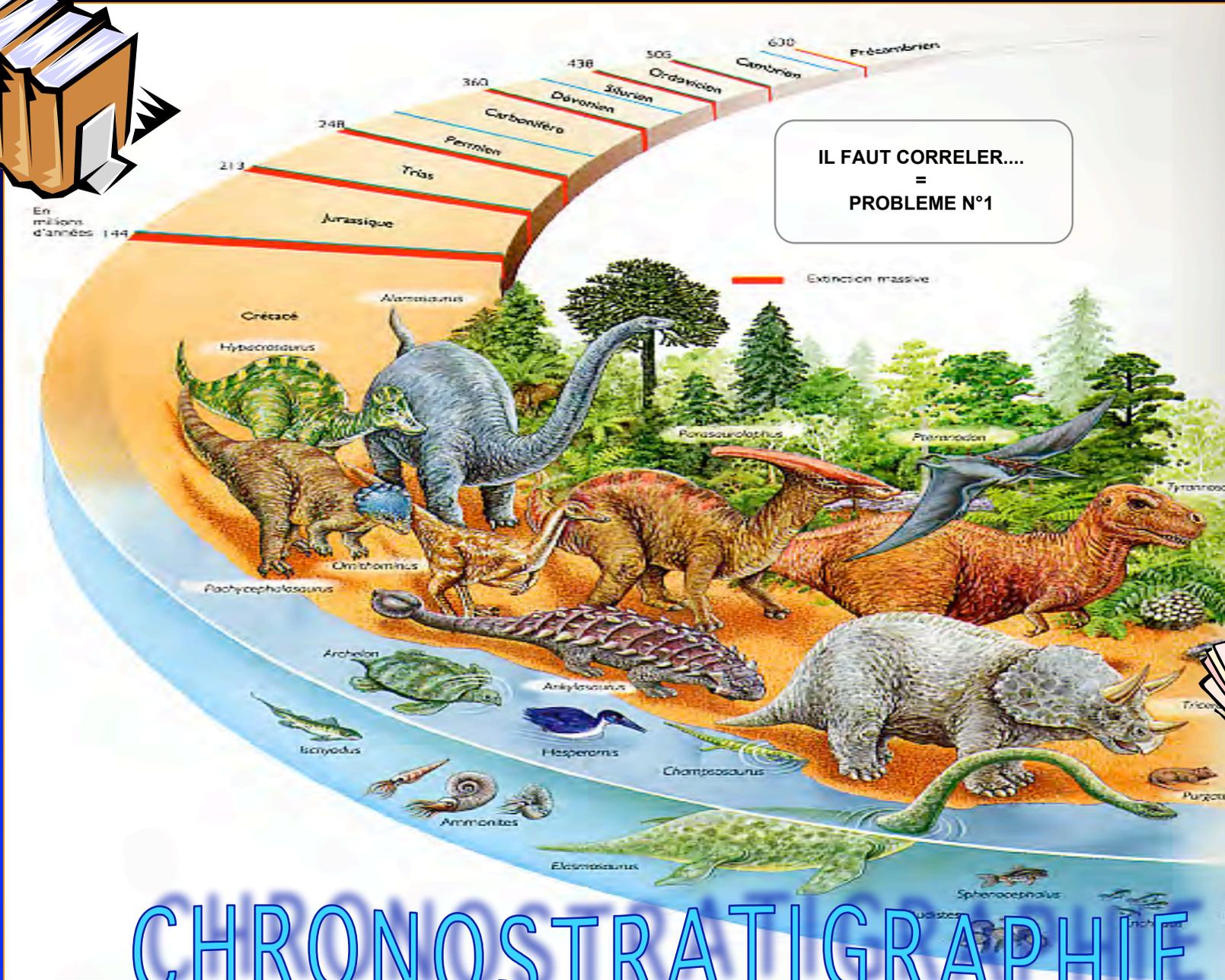
- Effectives
- Exploitables
- Totales



Ressources et réserves : types et incertitudes

ECHELLE
des
ECHELLE
TEMPS
des
GEOLOGIQUES





PREAT A. GEOL-F-103 leçon2

CHRONOSTRATIGRAPHIE

BIOSTRATIGRAPHIE



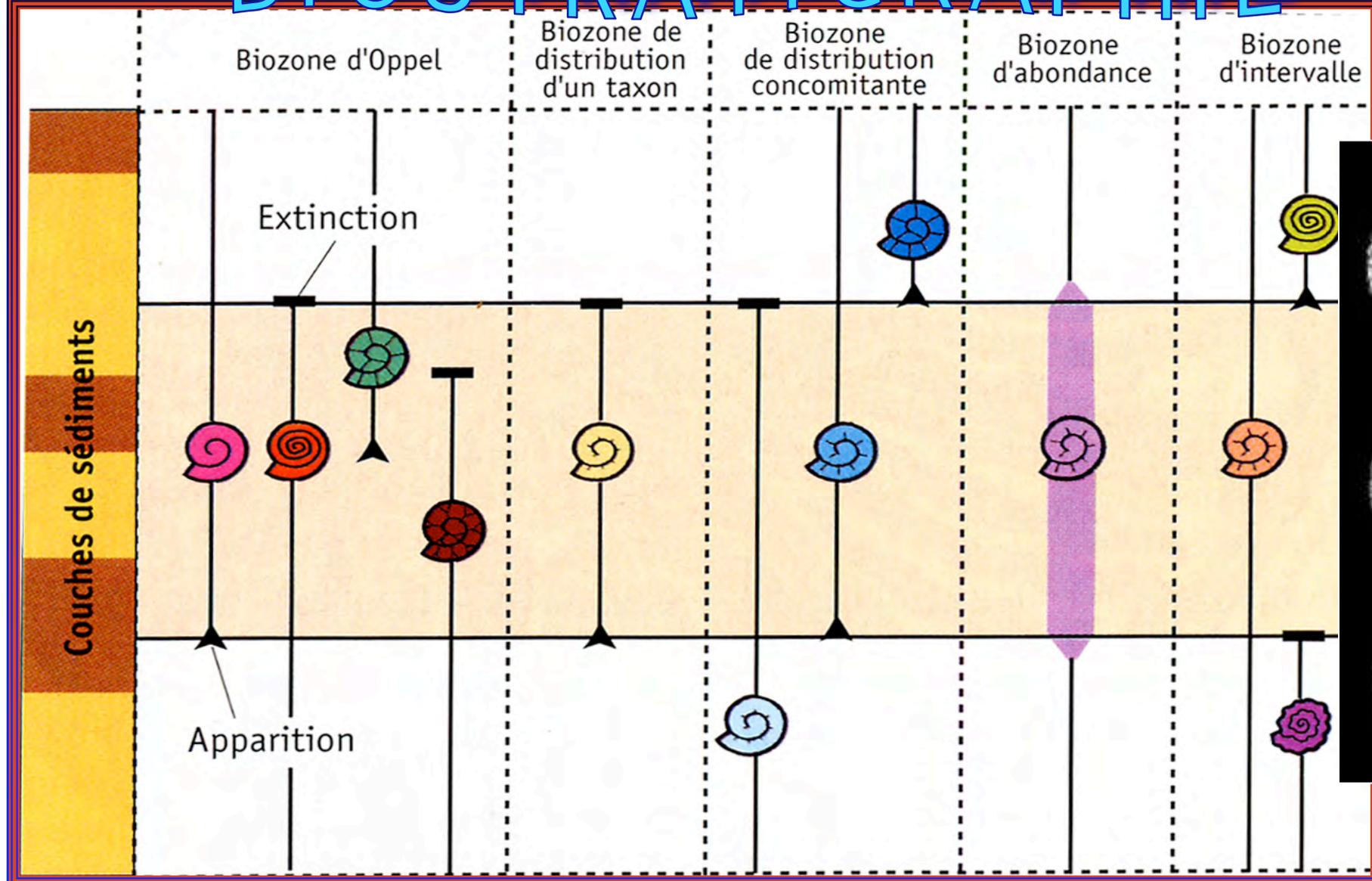
BIOSTRATIGRAPHIE

Ammonite
jurassique
la plus gde
du monde!



Lytoceras, Nvle Zélande

BIOSTRATIGRAPHIE

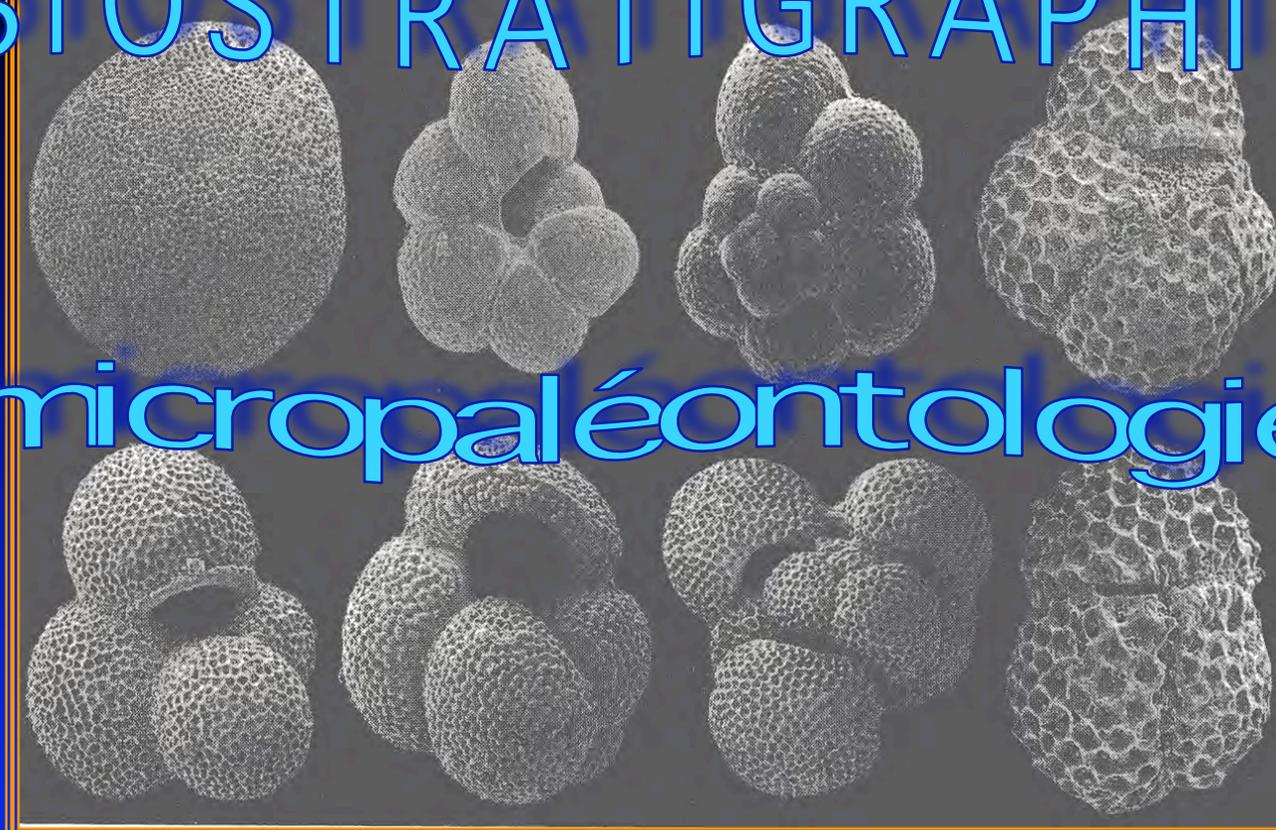


Un fossile 'seul' n'est d'aucune utilité..... (hélas!)

BIOSTRATIGRAPHIE

micropaléontologie

Globigérines
(pélagiques)
Pliocène
Chypre

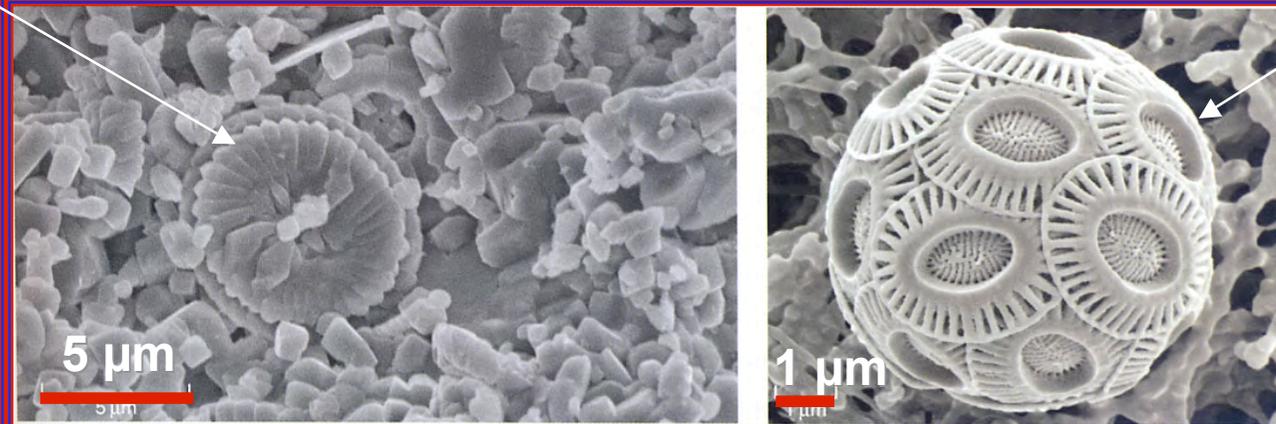


Orbitolines
Crétacé



Coccolithe
Crétacé

Algue unicellulaire
Trias-Actuel



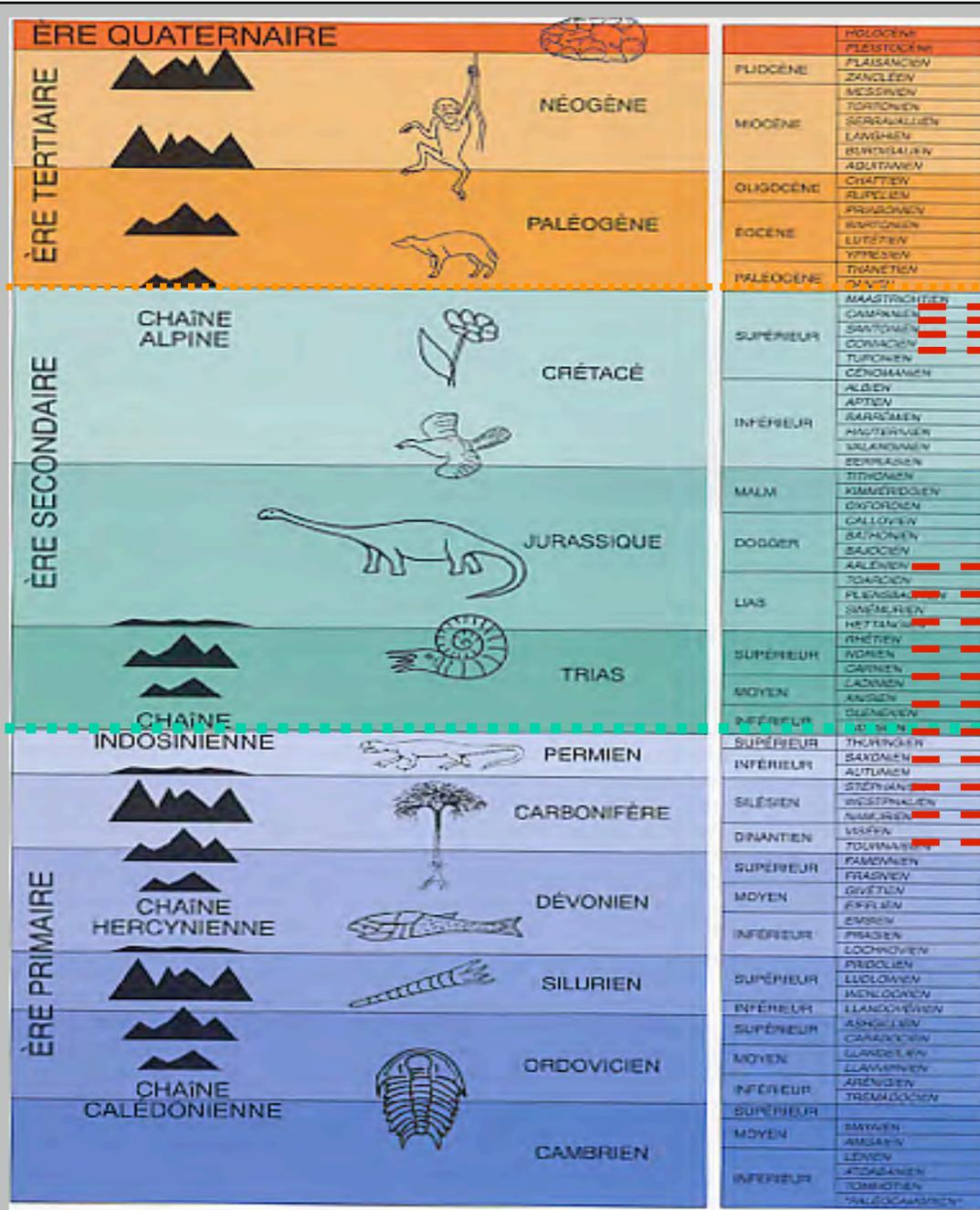
Coccolithophore
RECENT
Algue brune

ERES



HIERARCHIE

1760 Giovanni ARDUINO
(vénitien)

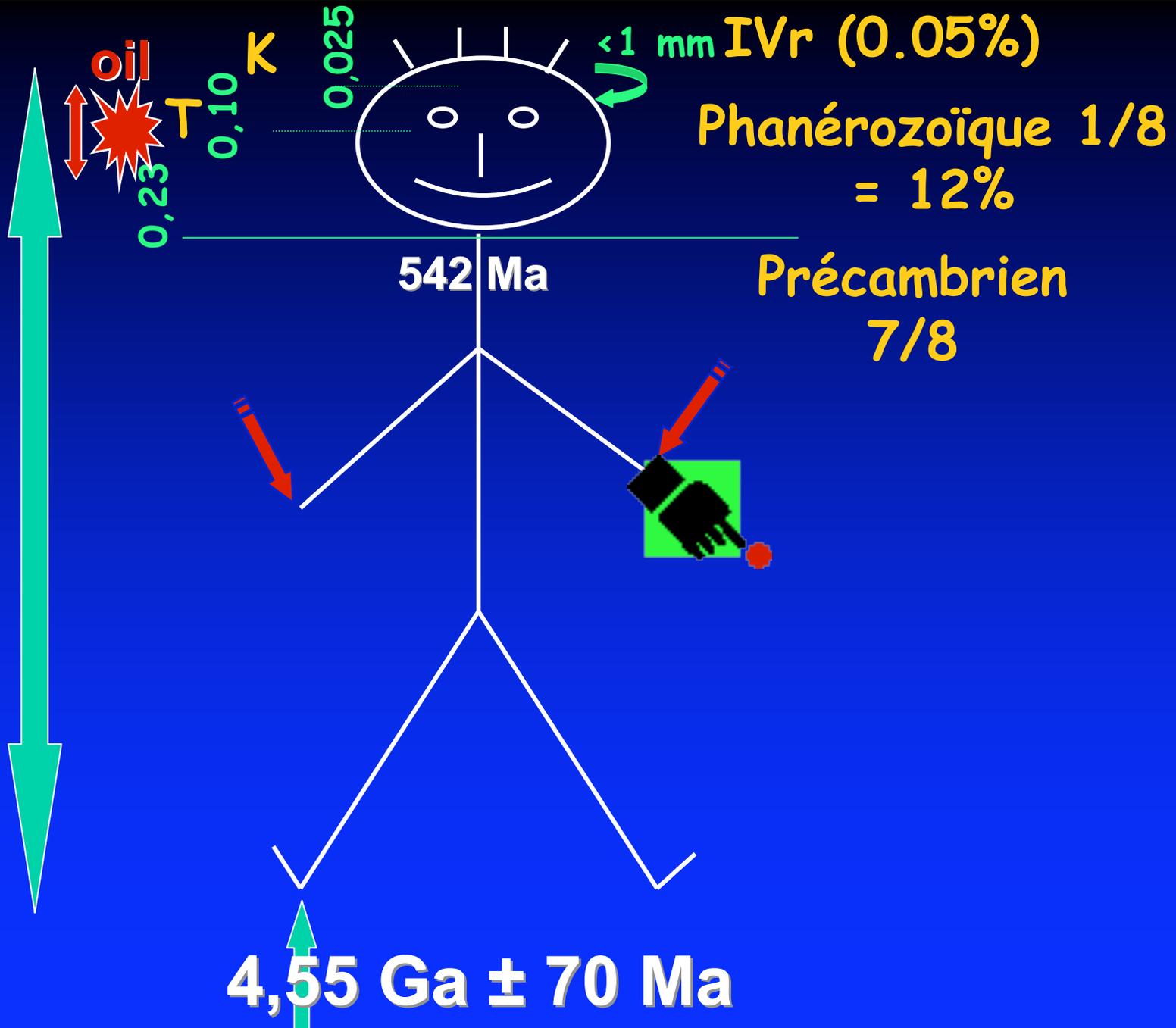


ETAGES



HIERARCHIE

1,85 m



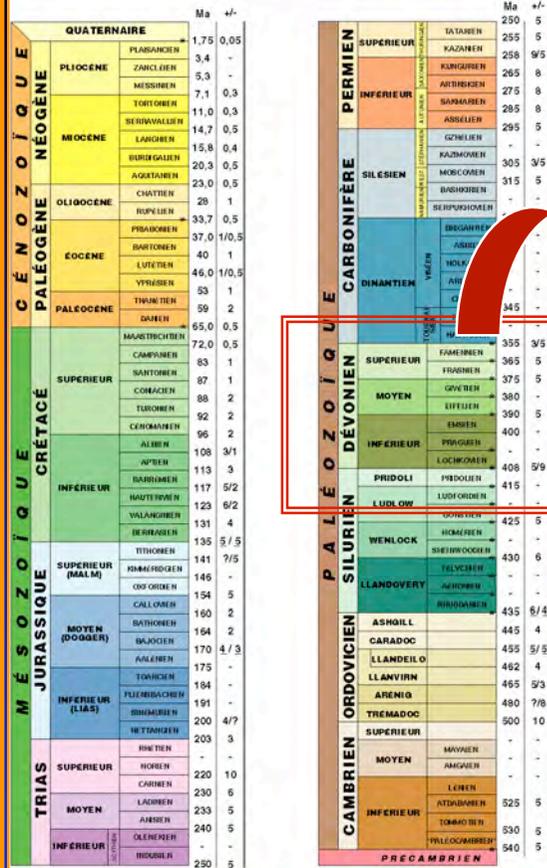
$<1 \text{ mm IVr (0.05\%)}$
Phanérozoïque $1/8$
 $= 12\%$

Précambrien
 $7/8$

542 Ma

4,55 Ga \pm 70 Ma

ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES (1995)



Échelle des temps géologiques en 1994. Les subdivisions chronostratigraphiques des dépôts marins sont utilisées hormis pour le paléozoïque supérieur pour lequel des unités continentales usitées sont indiquées (en jaune). Les âges des limites mal connues ne sont pas estimés (tirés). Les astisques signalent les limites actuellement définies selon le concept des Points Stratotypiques Globaux. La colonne à droite indique l'intervalle de temps dans lequel les datations isotopiques situent la limite. 251 points datés rassemblés dans Odín (1982); 95 points nouveaux considérés dans Odín et Odín (1985). 55 nouvelles études réalisées durant les 4 dernières années. Les estimations obtenues par extrapolation seule sont notées sans marges d'incertitude (tirés). Notez que les marges d'incertitude peuvent être dissymétriques de part et d'autre de l'âge préféré. Les « ou - » soulignés attirent l'attention sur le fait que l'âge préféré et l'âge extrême sont également probables. Amélioré avril 1995.

D'après G. S. Odín, C. R. Acad. Sci. Paris, t. 318, série II, p. 59 à 71, 1994

G. S. Odín Université Pierre et Marie Curie Géochronologie et Géodynamologie Océanlogie, Département de Géologie Sédimentaire, Case 118A-4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France. Réimpression Jean-Baptiste Clavaud, AEST P7 (Association des Étudiants en Sciences de la Terre de Paris 7), AEST P7 T24 - 25 Ter Claye 4, place Jussieu 75252 Paris Cedex 05, France. Email: clavaud@topp.jussieu.fr

avec âges absolus

depuis une 40' d'années seulement

1 2 3 4 5 6

PALEOZOÏQUE	DÉVONIEN	HASTARIEN		
		FAMENNEN	* 355	3/5
		FRASNIEN	* 365	5
		GIVÉTIEN	* 375	5
		MOYEN	* 380	-
		INFÉRIEUR	* 390	5
		PRIDOLI	* 400	-
		PRIDOLIEN	* -	-
		PRIDOLI	* 408	5/9
		PRIDOLI	* 415	-

0 m à x 100' m (ou +!)

ETAGES GEOLOGIQUES



THE GEOLOGIC TIME SCALE 2012

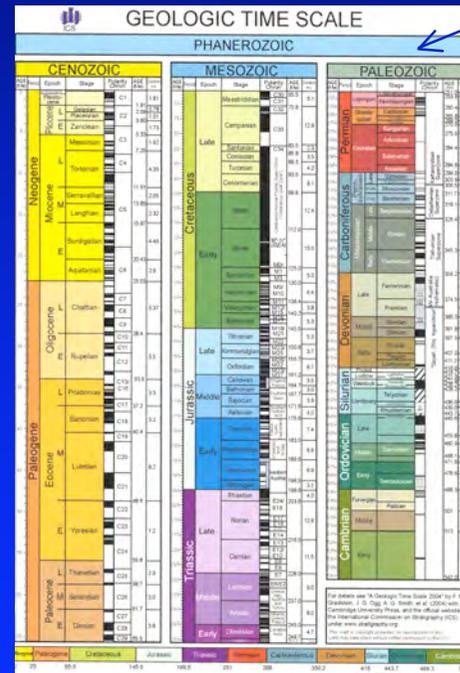
VOLUME 1
VOLUME 2
1144 p.

FELIX M. GRADSTEIN
JAMES G. OGG
MARK D. SCHMITZ
and GABI M. OGG

PREAT A. GEOL-F-103 leçon2

www.stratigraphy.org
DERNIERE MISE A JOUR: 08-2012

387.7±0.8 (2012)



Août 2004-2008
Giv 391.8
Eif ± 2.7

*et non plus
380 Ma!
± 5
(en 1995)*

PROCHAINE MISE A JOUR: 08-2016
www.stratigraphy.org

OF CLOCKS AND ROCKS -THE FOUR AEONS OF EARTH
Episodes 1991 14/4:327-329

0,7 → PHANEROZOIQUE 'visible'=multicellulaires
2,5 → PROTEROZOIQUE période 'moyenne' de la vie
4Ga → ARCHEEN 'jeunesse' = 'early life history'
HADEEN naissance Terre = prébiotique

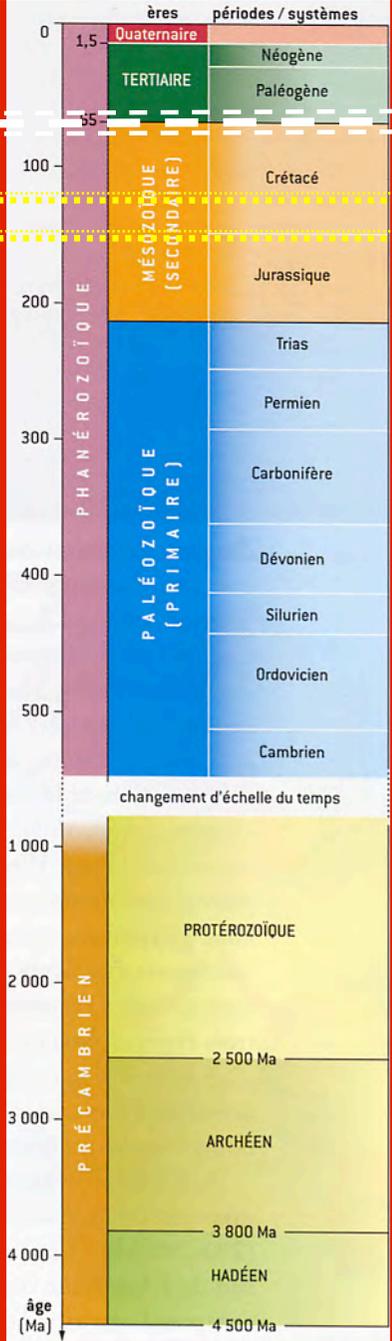
Néo **SUP** → 1,1 Ga
Mésos **MOY** → 1,6 Ga
Paléo **INF**

PROTEROZOIQUE =cyanobactéries

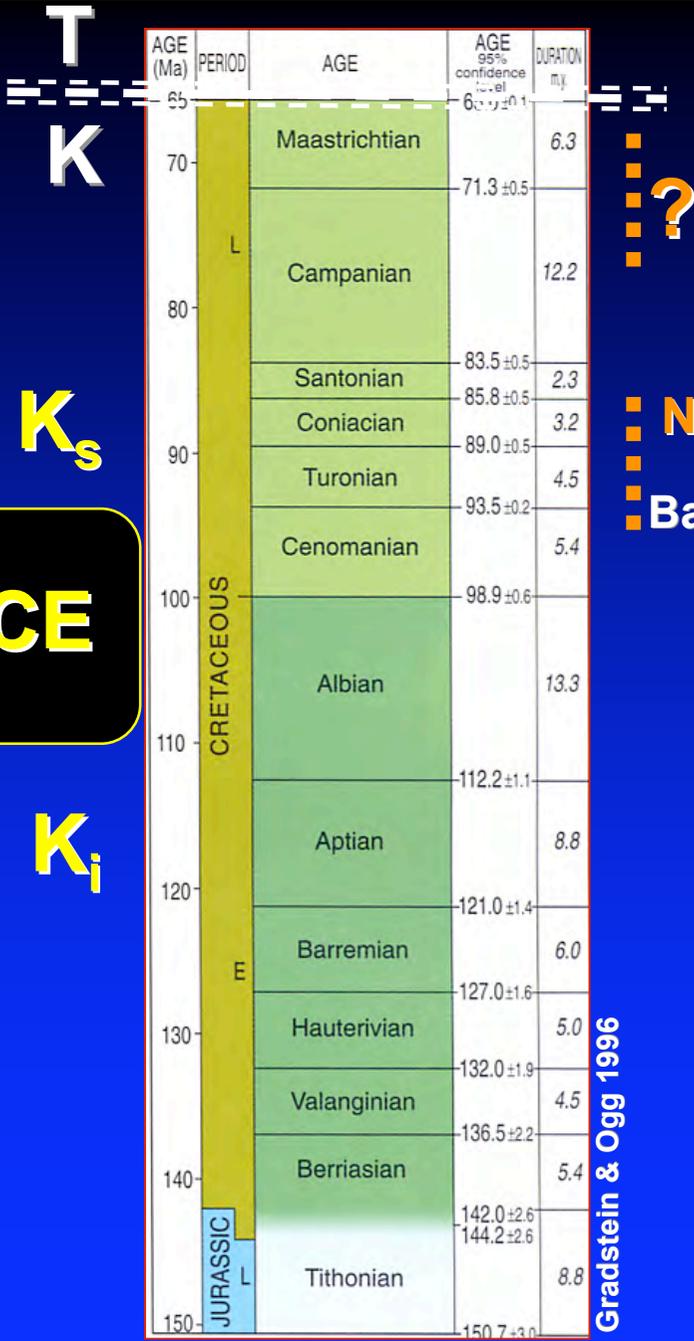
T
K

K_i

IL FAUT CORRELER....
= PROBLEME N°1

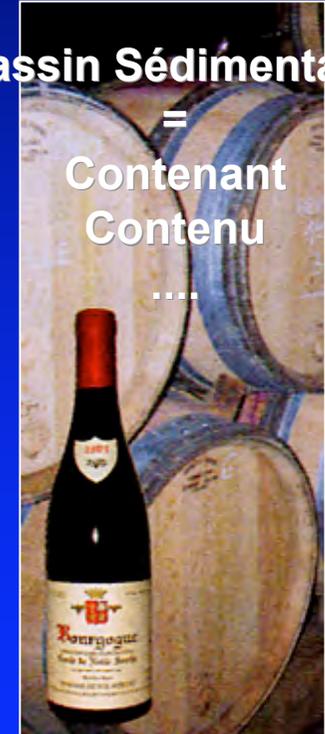


LE CRETACE



?

- NM: +250m [350m]
- Bassin Sédimentaire



=
Contenant
Contenu

Gradstein & Ogg 1996

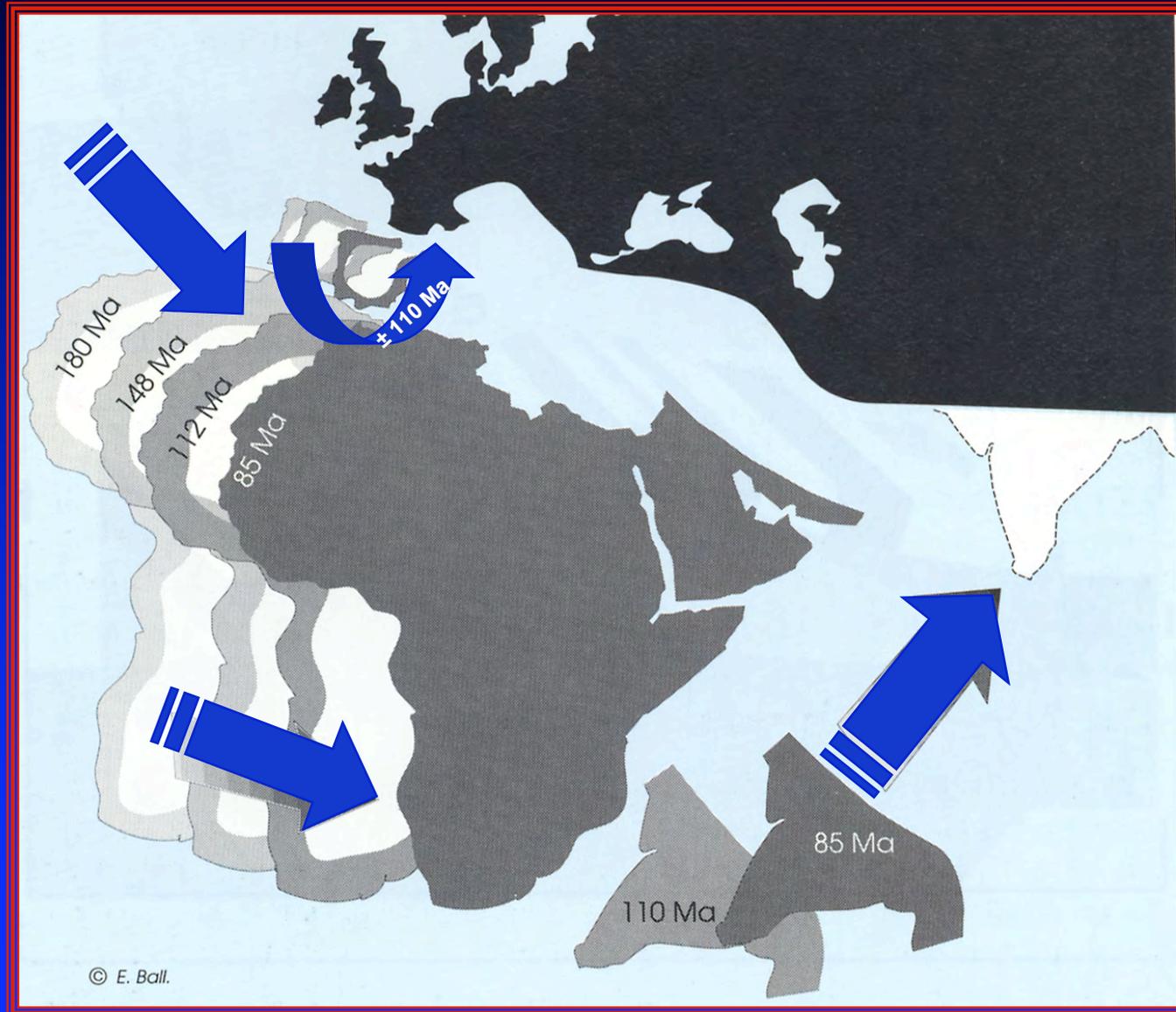
RIDES MEDIO-OCEANIQUES

L > 75 000 km
> 75% volcanisme Terre
1mm/cm à 20cm/an
soit 10 à 200 km/Ma

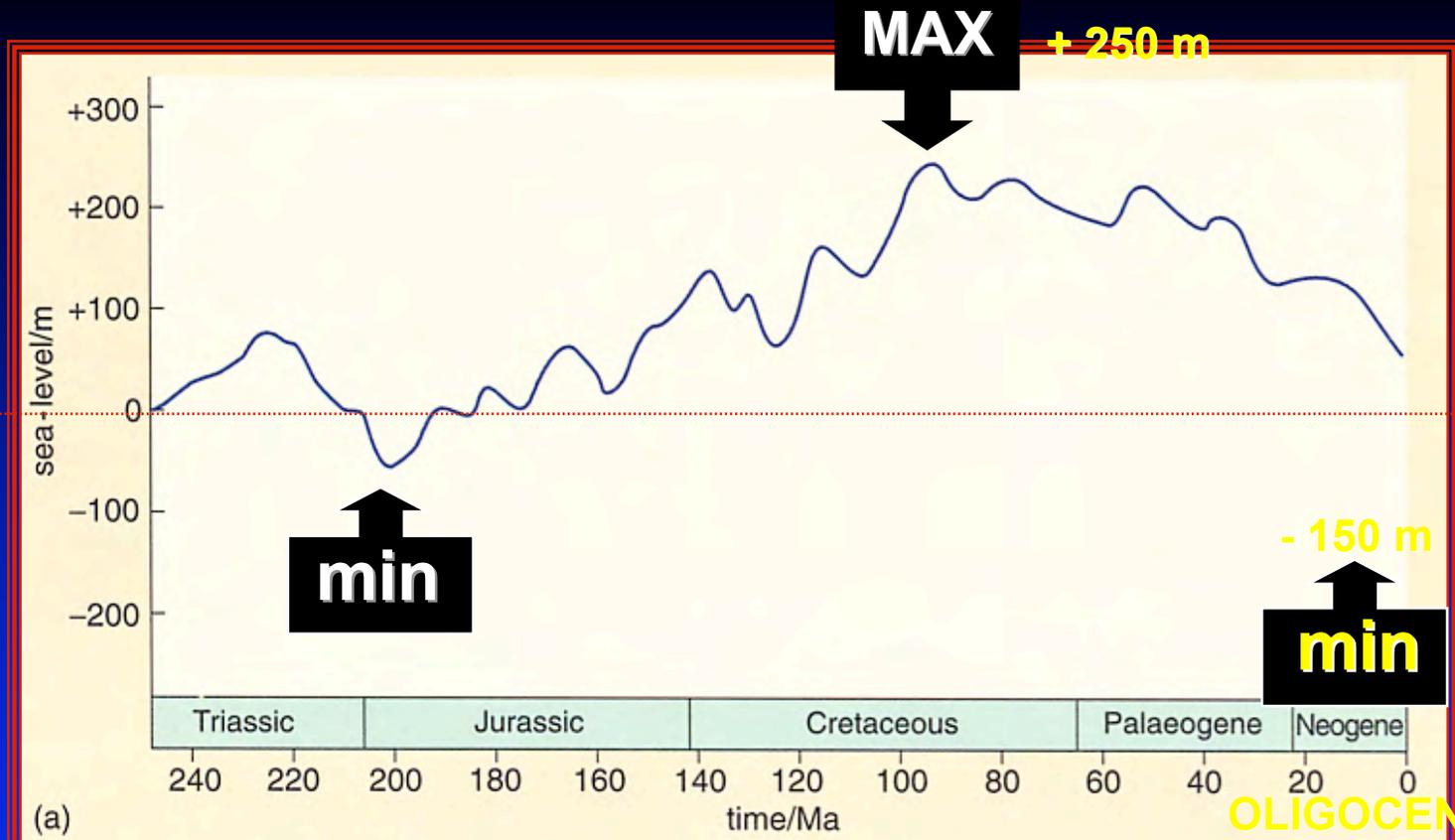
> 50% surface bassins oc



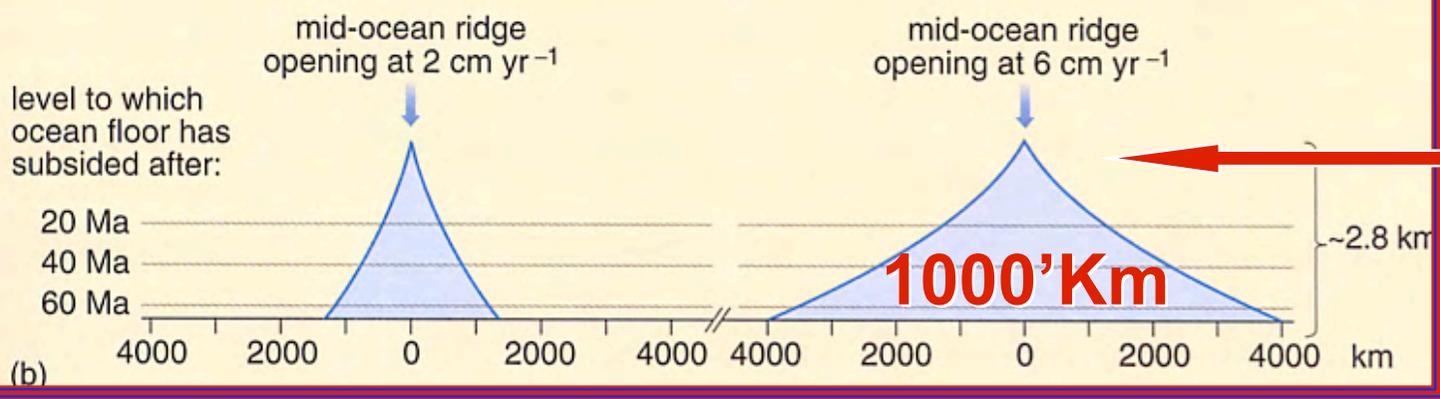
RIDES MEDIO-OCEANIQUES



Patriat et al 1982



(a)



(b)

Skelton 2003

2^e o.
10'-80 Ma



bref refroidissement va suivre



*prolifération biologique
=> séquestration C ==> pétrole*

NM +200-300m

**ANOXIES
'TECTONIQUES'**

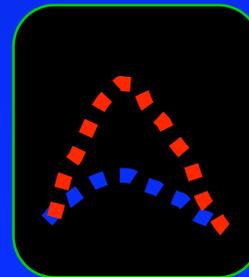
T
E
C
T
O
N
I
Q
U
E

(Mésozoïque = période chaude...)

dilatation thermique

Δ volume

T° = +6°C [T° Fond 10° ≠ 2°C]



REPRESENTATIVITE DU TEMPS 'GEOLOGIQUE' DANS LES ROCHES OU SERIES...

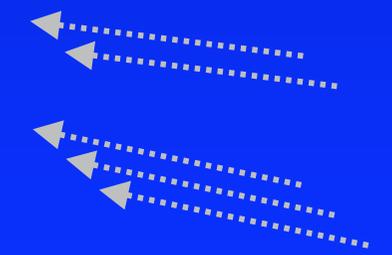
50 m



joints de stratification

+

LOFERITES
(tidal flats)
0,3-3 mm/an



Crétacé
Inf
Fara
San Martino

Maiella
Abruzzes

CRÉTACÉ INFÉRIEUR (FSM) Italie Centrale



4%

LOFERITES (tidal flats)
0,3-3 mm/an

1000 ans



100 ans

cyanobactéries
0.3 mm ==>> 300 m/Ma
soit 1Ma/25Ma = 4%
[ou 0,4% si 3 mm]

LES SERIES NE SONT DONC PAS CONTINUES

Crétacé
Inf
FSM



Maiella
Abruzzes

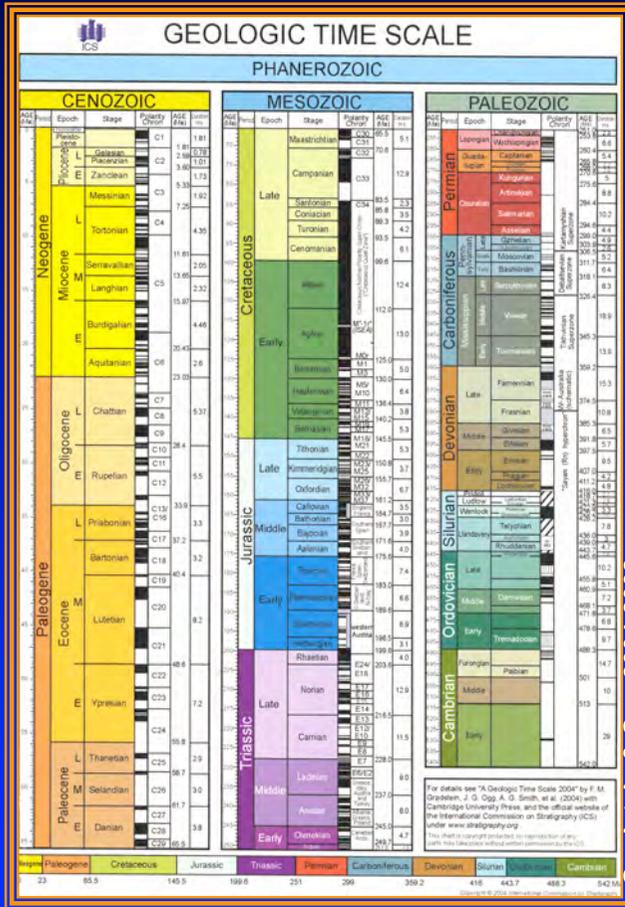


96 à 99.6%
←
←
←
←
joints de stratification
+
LOFERITES
(tidal flats)
0,3-3 mm/an
et diasthèmes

96 à 99.6%
←
←
←
←

QUE SERAIT UN 'BON' ENREGISTREMENT SEDIMENTAIRE ?

=> RAISONNEMENT PAS L'ABSURDE ...



Gradstein & Ogg 2004-2008

PHANEROZOÏQUE

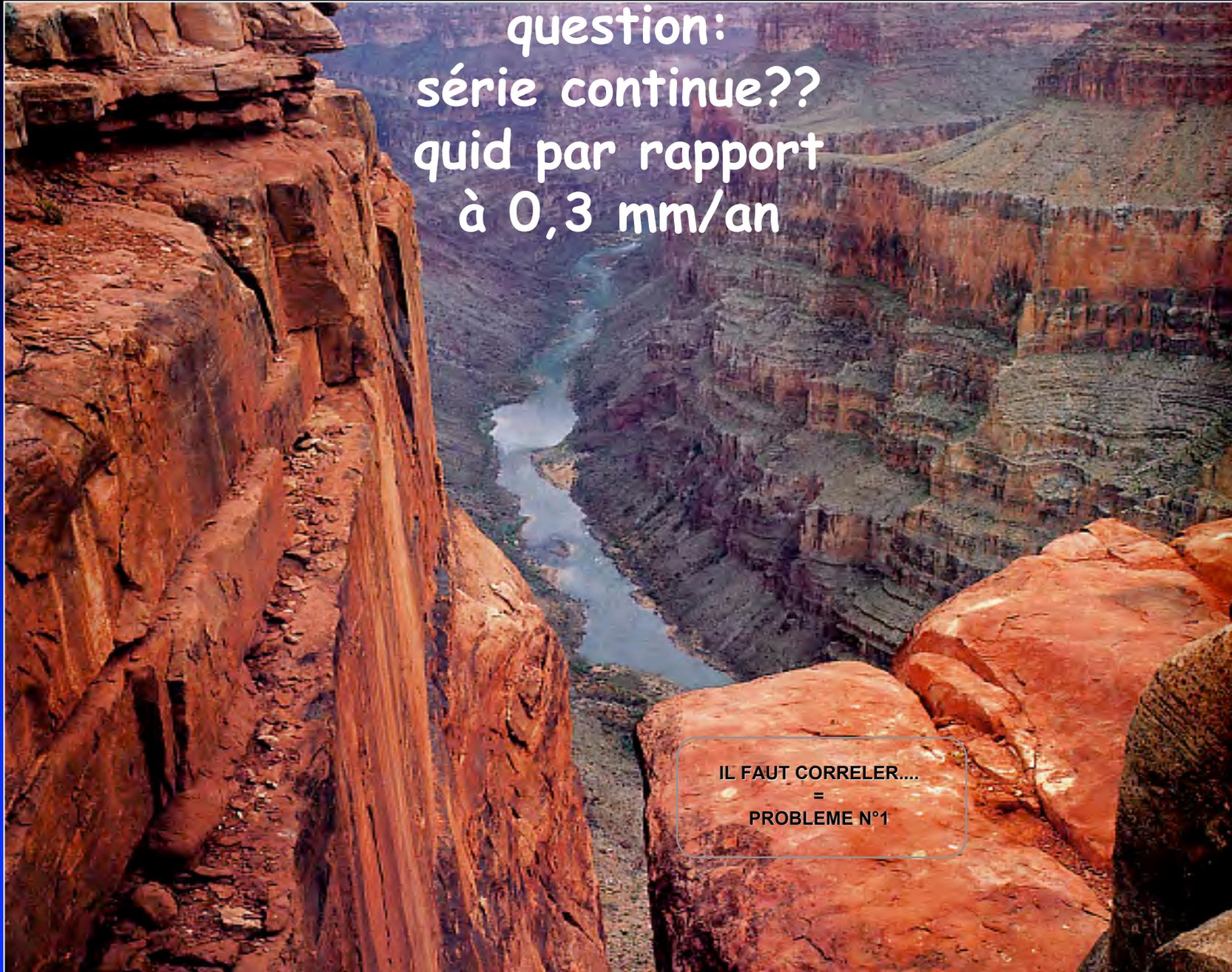
- (Holocène) ⁰
- (Pléistocène)
- Pliocène
- Miocène
- Oligocène
- Eocène
- Paléocène
- Crétacé 15.8km
- Jurassique
- Trias
- Permien
- Carbonifère
- Dévonien 11.7km
- Silurien
- Ordovicien 13.8km
- Cambrien 11.8km

M
A
X

154Km
=
0,28 mm/an
y compris 'gaps' et discontinuités

soit ± 0,3 mm/an

GRAND CANYON



question:
série continue??
quid par rapport
à 0,3 mm/an

1200m/500

IL FAUT CORRELER....
=
PROBLEME N°1

M PHANEROZOIQUE

A $154\text{Km} = 0,24 \text{ mm/an}$

X y compris 'gaps' et discontinuités

situation la plus réaliste
GD CANYON (USA)

$1,2\text{Km} = 500 \text{ Ma}$

$1\text{an} = 0,0024 \text{ mm}$ HORS PCM

>100X
MOINS!

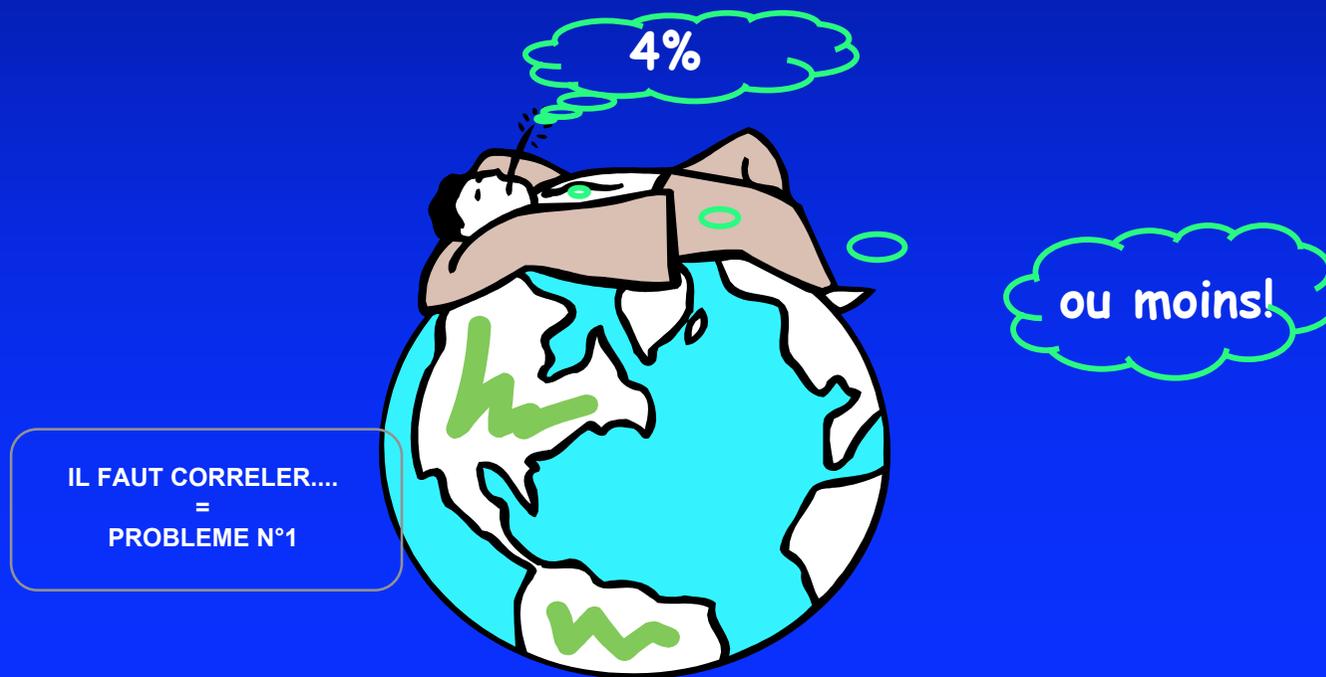
>1000X
MOINS!

par rapport
à l'ACTUEL

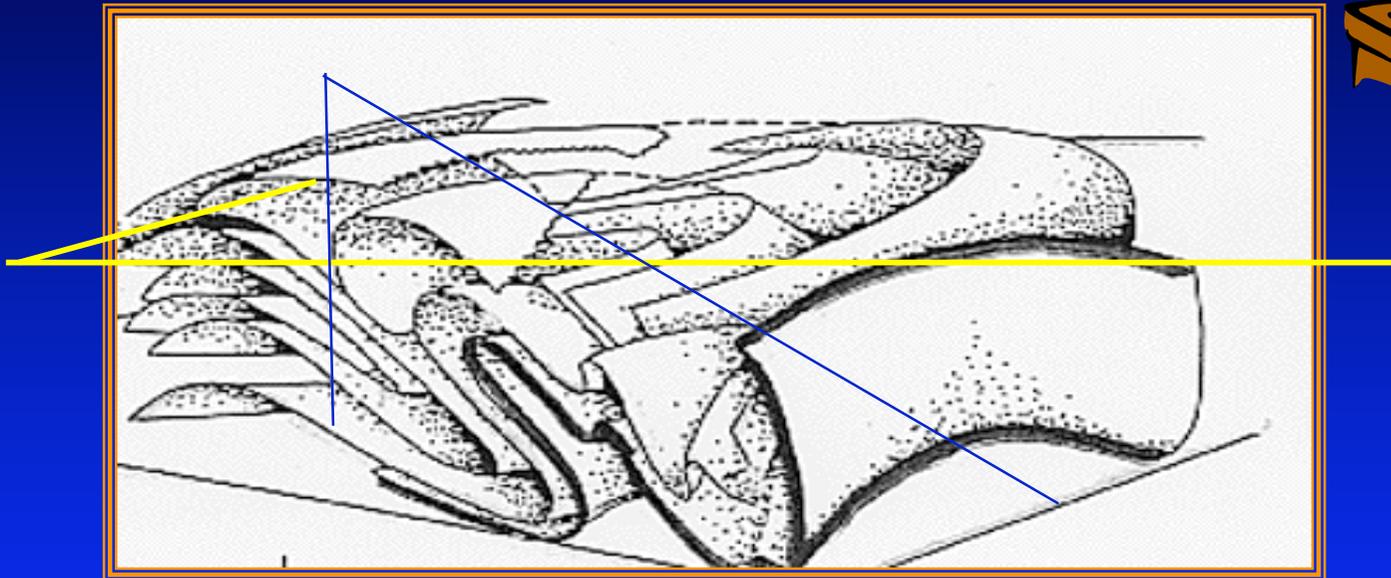
>> 90% du temps n'est pas représenté...

LE TEMPS EN GÉOLOGIE...

*... beaucoup de problèmes
(de corrélations des séries...)*



affleurements = cahier plissé, déchiqueté
... cartographie en premier lieu = constat
déjà TRES incomplet à ce premier stade



métamorphisme \Leftrightarrow compression
APPALACHES SUD (Caroline)

les plissements sont si souvent complexes
qu'il est difficile de les représenter
même sous forme de diagrammes!



PRINCIPE(S)
DE BASE
= INTUITIF

le dépôt d'une certaine quantité de matériau
(càd l'ép. d'une couche) ↔ certain laps de temps



finalement cela fonctionne
comme cela pendant 2 à 3 siècles

INITIALEMENT apparitions/disparitions
successives de groupes d'organismes
-----> terrains non métamorphisés et non
magmatiques càd terrains sédimentaires



STRATIGRAPHIE = CHRONOLOGIE RELATIVE
(XVIII^e s.)

les âges des terrains sont exprimés les uns pr aux autres
SANS UNITÉ DE TEMPS!!!

établir une chronostratigraphie ...

18^e s. Age de la Terre = qq 10^3 années [-6006, 23oct, 9h...]
19^e s. = qq Ma: évaluation des stocks salifères
= une 100' Ma: bilan thermique du Globe (Lord Kelvin)

1905 RUTHERFORD

liaison radioactivité et désintégration radioactive des éléments instables ==> CHRONOMETRE INTERNE

==> ==> GEOCHRONOLOGIE (RADIOMETRIE) ABSOLUE

Avantage: SUCCESSION ESPACES TEMPS HIERARCHISES DE DUREES INDEPENDANTES DU CONTENU càd des dépôts et des phénomènes



PRECISION INSUFFISANTE (qq Ma! très vite en reculant dans le temps) > < chronologie relative: ex du Gv: durée ± 4 Ma à 2,5Ma près!

CHRONOLOGIE ABS ou ISOTOPIQUE

$^{87}\text{Rb} \implies ^{87}\text{Sr}$ [5.10¹⁰ années]

$^{232}\text{Th} \implies ^{208}\text{Pb}$ [13,9.10⁹ années]

$^{40}\text{K} \implies ^{40}\text{Ar}$ [11,9.10⁹ années]

$^{238}\text{U} \implies ^{206}\text{Pb}$ [4,6.10⁹ années]

$^{235}\text{U} \implies ^{207}\text{Pb}$ [7.10⁸ années]

$^{234}\text{Th} \implies ^{230}\text{Th}$ [250.000 années]

$^{230}\text{Th} \implies ^{226}\text{Ra}$ [75.200 années]

$^{14}\text{C} \implies ^{14}\text{N}$ [5.568 années]

$^3\text{T} \implies ^2\text{H}$ [12,26 années]

...

nb: $^{147}\text{Sm} \implies ^{143}\text{Nd}$ [10.10¹⁰ années]

C
R
I
S
T
O
P
H
I
C

l' ETAGE représente donc en moyenne 5 Ma càd environ

- *1 % temps Phanérozoïque*
 - *1/1000è histoire Terre*
 - *0 m [le plus souvent!]
à qq 100'm [stratotype]*
- il existe plus d'une centaine d'étages...
chacun comprenant 3 à 5 biozones*



INTERNATIONAL CHRONOSTRATIGRAPHIC CHART

www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy
August 2012



Eonothem / Eon Erathem / Era System / Period	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Phanerozoic	Quaternary	Holocene		present
		Pleistocene	Upper	0.0117
			Middle	0.126
			Lower	0.781
		Pliocene	Calabrian	1.806
			Gelasian	2.588
			Piacenzian	3.600
			Zanclean	5.333
			Messinian	7.246
		Neogene	Miocene	Tortonian
	Serravallian			13.82
	Langhian			15.97
	Burdigalian			20.44
	Aquitanian			23.03
	Oligocene		Chattian	28.1
			Rupelian	33.9
			Priabonian	38.0
			Bartonian	41.3
			Lutetian	47.8
	Paleogene	Eocene	Ypresian	56.0
			Thanetian	59.2
			Selandian	61.6
			Danian	66.0
			Maastrichtian	72.1 ± 0.2
		Upper	Campanian	83.6 ± 0.2
			Santonian	86.3 ± 0.5
			Coniacian	89.8 ± 0.3
			Turonian	93.9
			Cenomanian	100.5
	Cretaceous	Albian	Albian	~113.0
Aptian			~125.0	
Barremian			~129.4	
Hauterivian			~132.9	
Valanginian			~139.8	
Lower		Berriasian	~145.0	

Eonothem / Eon Erathem / Era System / Period	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Phanerozoic	Jurassic	Upper	Tithonian	145.0 ± 0.8
			Kimmeridgian	152.1 ± 0.9
		Middle	Oxfordian	157.3 ± 1.0
			Callovian	163.5 ± 1.0
			Bathonian	166.1 ± 1.2
			Bajocian	168.3 ± 1.3
			Aalenian	170.3 ± 1.4
		Lower	Toarcian	174.1 ± 1.0
			Pliensbachian	182.7 ± 0.7
			Sinemurian	190.8 ± 1.0
	Hettangian		199.3 ± 0.3	
	Hettangian		201.3 ± 0.2	
	Triassic	Upper	Rhaetian	~208.5
			Norian	~228
		Middle	Carnian	~235
			Ladinian	~242
		Lower	Anisian	247.2
			Olenekian	251.2
			Induan	252.2 ± 0.5
			Changhsingian	254.2 ± 0.1
			Wuchiapingian	259.9 ± 0.4
			Capitanian	265.1 ± 0.4
	Permian	Lopingian	Wordian	268.8 ± 0.5
			Roadian	272.3 ± 0.5
			Kungurian	279.3 ± 0.6
			Artinskian	290.1 ± 0.1
			Sakmarian	295.5 ± 0.4
		Guadalupian	Asselian	298.9 ± 0.2
			Gzhelian	303.7 ± 0.1
			Kasimovian	307.0 ± 0.1
Moscovian			315.2 ± 0.2	
Bashkirian			323.2 ± 0.4	
Carboniferous	Upper	Serpukhovian	330.9 ± 0.2	
		Visean	346.7 ± 0.4	
		Toumaisian	358.9 ± 0.4	

Eonothem / Eon Erathem / Era System / Period	Series / Epoch	Stage / Age	GSSP	numerical age (Ma)
Phanerozoic	Devonian	Upper	Famennian	372.2 ± 1.6
			Frasnian	382.7 ± 1.6
		Middle	Givetian	387.7 ± 0.8
			Eifelian	393.3 ± 1.2
			Emsian	407.6 ± 2.6
		Lower	Pragian	410.8 ± 2.8
			Lochkovian	419.2 ± 3.2
			Pridoli	423.0 ± 2.3
			Ludlow	425.6 ± 0.9
			Wenlock	427.4 ± 0.5
	Silurian	Llandovery	Homerian	430.5 ± 0.7
			Sheinwoodian	433.4 ± 0.8
			Telychian	438.5 ± 1.1
			Aeronian	440.8 ± 1.2
			Rhuddanian	443.4 ± 1.5
		Upper	Hirnantian	445.2 ± 1.4
			Katian	453.0 ± 0.7
			Sandbian	458.4 ± 0.9
			Darnwilian	467.3 ± 1.1
			Dapingian	470.0 ± 1.4
	Ordovician	Middle	Floian	477.7 ± 1.4
			Tremadocian	485.4 ± 1.9
			Stage 10	~489.5
			Jiangshanian	~494
			Paibian	~497
		Lower	Guzhangian	~500.5
			Drumian	~504.5
			Stage 5	~509
			Stage 4	~514
			Stage 3	~521
Cambrian	Series 2	Stage 2	~529	
		Fortunian	541.0 ± 1.0	

Eonothem / Eon	Erathem / Era	System / Period	GSSP	numerical age (Ma)
Proterozoic	Neo-proterozoic	Ediacaran		~541
		Cryogenian		~635
		Tonian		850
		Stenian		1000
		Ectasian		1200
	Meso-proterozoic	Calymmian		1400
		Statherian		1600
		Orosirian		1800
		Rhyacian		2050
		Siderian		2300
	Paleo-proterozoic	Neo-archean		2500
		Meso-archean		2800
		Paleo-archean		3200
		Archean		3600
		Eo-archean		4000
Precambrian	Hadean			~4600

Units of all ranks are in the process of being defined by Global Boundary Stratotype Section and Points (GSSP) for their lower boundaries, including those of the Archean and Proterozoic, long defined by Global Standard Stratigraphic Ages (GSSA). Charts and detailed information on ratified GSSPs are available at the website <http://www.stratigraphy.org>

Numerical ages are subject to revision and do not define units in the Phanerozoic and the Ediacaran; only GSSPs do. For boundaries in the Phanerozoic without ratified GSSPs or without constrained numerical ages, an approximate numerical age (~) is provided.

Numerical ages for all systems except Triassic, Cretaceous and Precambrian are taken from "A Geologic Time Scale 2012" by Gradstein et al. (2012); those for the Triassic and Cretaceous were provided by the relevant ICS subcommissions.

Coloring follows the Commission for the Geological Map of the World. <http://www.cgmw.org>



Chart drafted by K.M. Cohen, S. Finney, P.L. Gibbard
(c) International Commission on Stratigraphy, August 2012

CHRONOLOGIE
ABS + REL
=
DYNAMIQUE DES BASSINS
(sédimentaires)

...



MALGRÉ TOUT
bcp d'incertitudes
demeurent!

LES ENERGIES FOSSILES

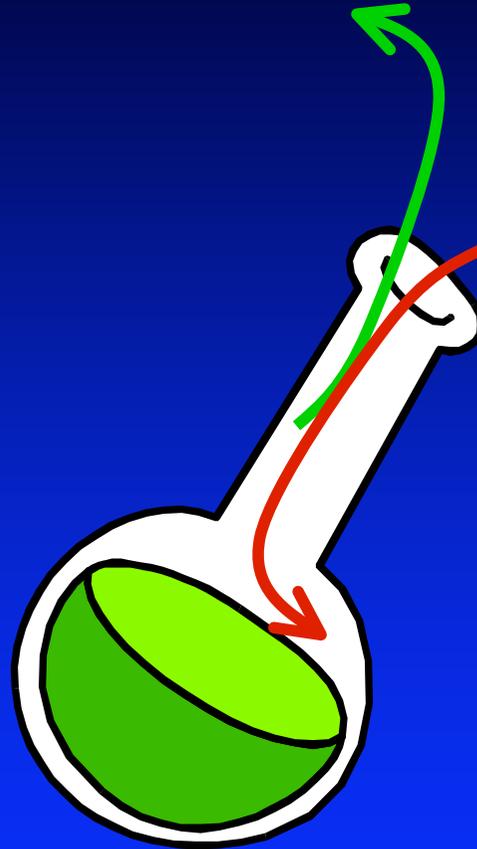


NOTIONS DE GEOLOGIE

[SUITE ...]

LES BASSINS SEDIMENTAIRES

CONTENU = REEMPLISSAGE
Roches sédimentaires surtout

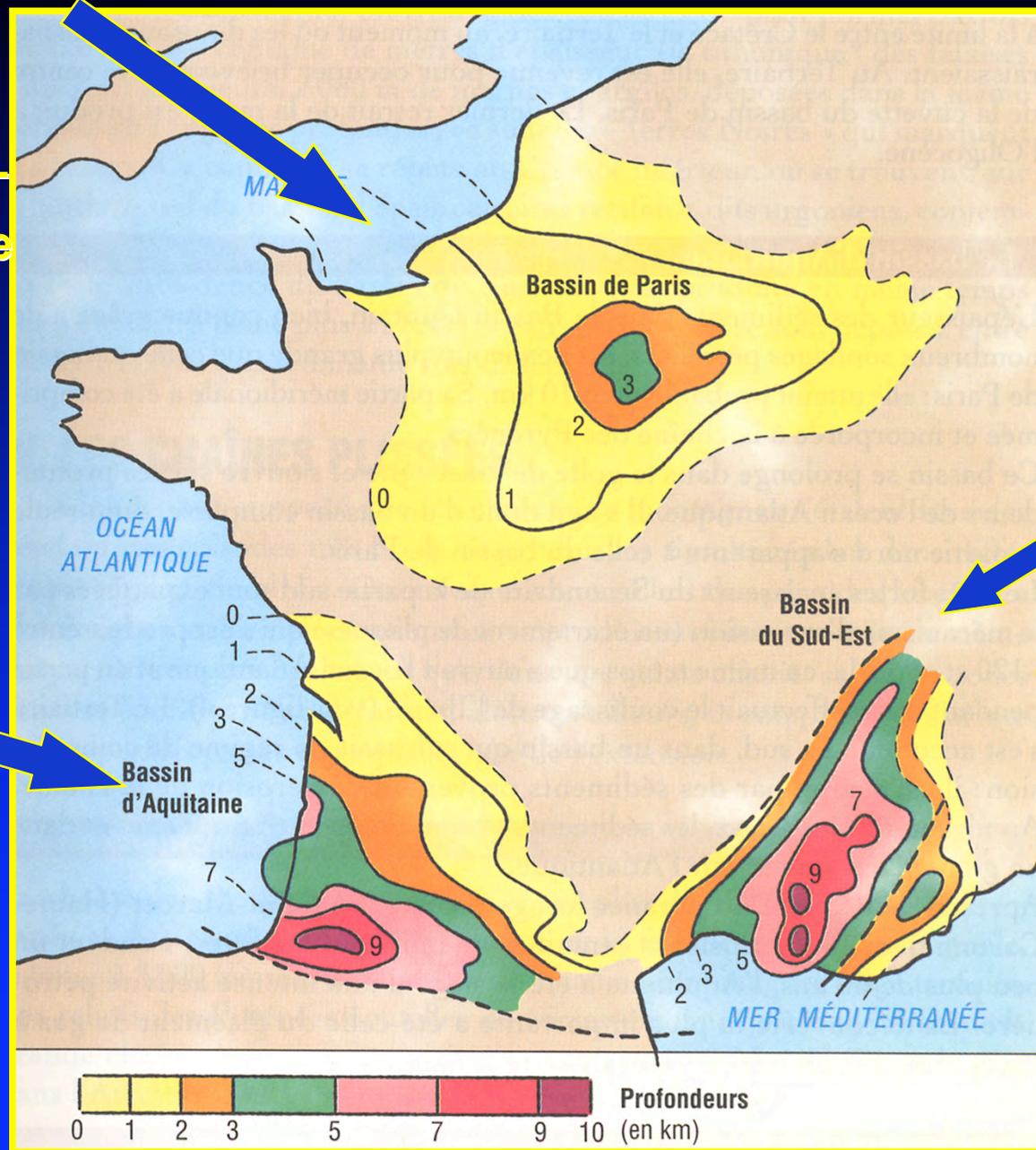


CONTENANT = SOCLE, SUBSTRATUM
Roches cristallines surtout (magmatiques, métamorphiques)

TRIAS-ACTUEL
'intracratonique

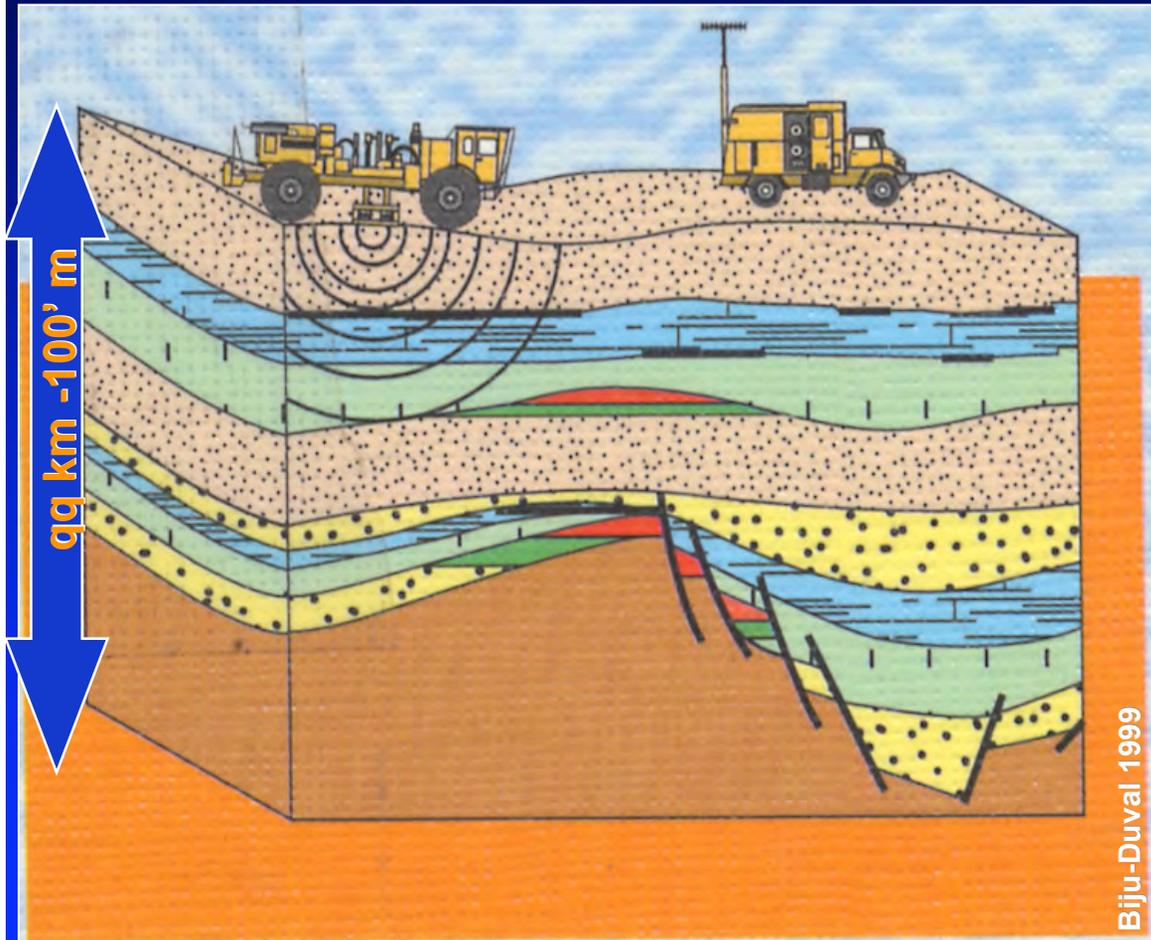
Extension Atl
Coulissage
Ibérie

Tr-K
Extension
Compression
(Pyrénées
et Alpes)



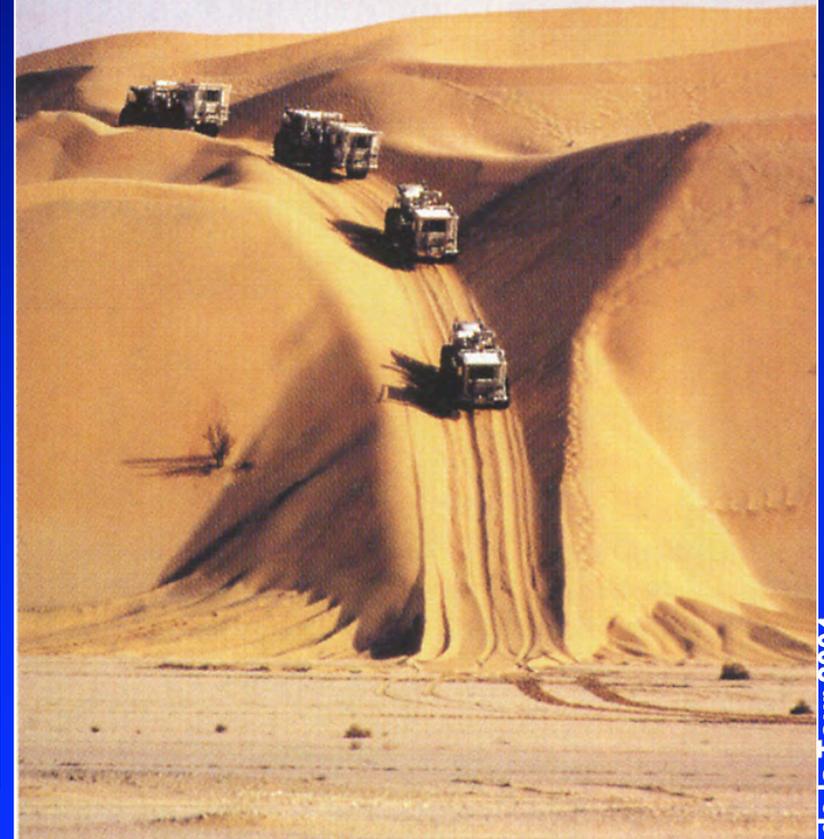
Sabouraud 2004

LES BASSINS SEDIMENTAIRES



Biju-Duval 1999

DESERT d'OMAN
Campagne sismique
Camions vibreurs



de la Tour 2004

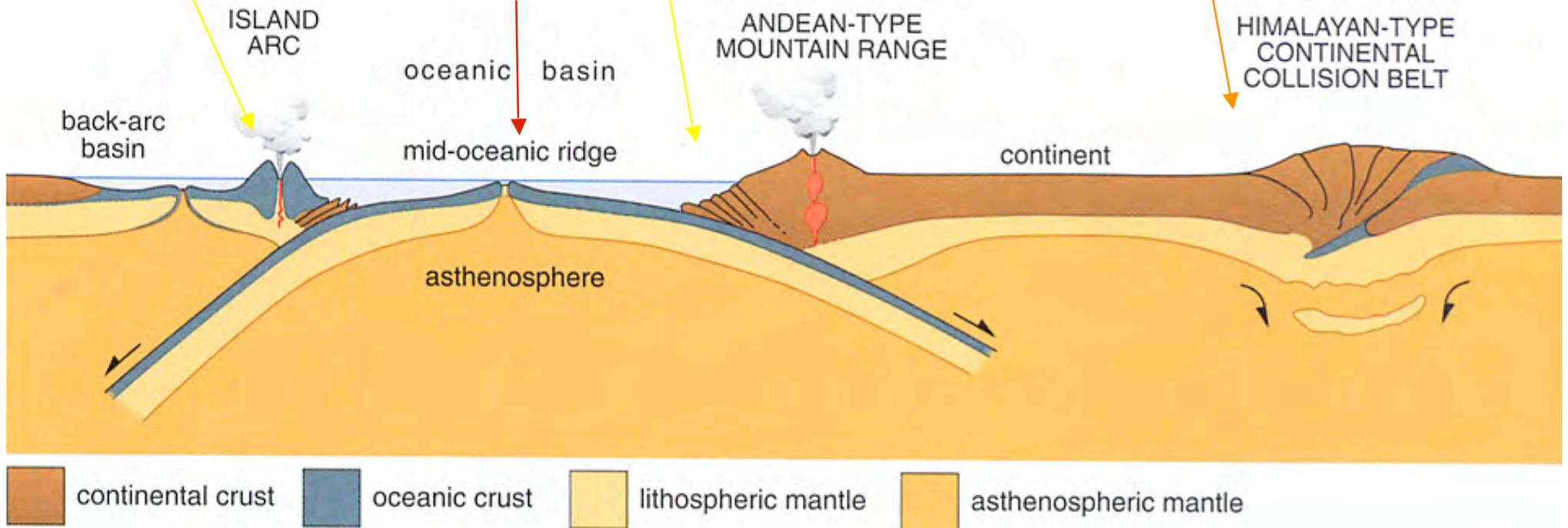
$R_{sce} + RR = R_{cvture} = \text{'Systèmes et pièges pétroliers'}$

subduction c.oc.
formation d'un arc volc.
[la plaque plonge SOUS la c.oc.]

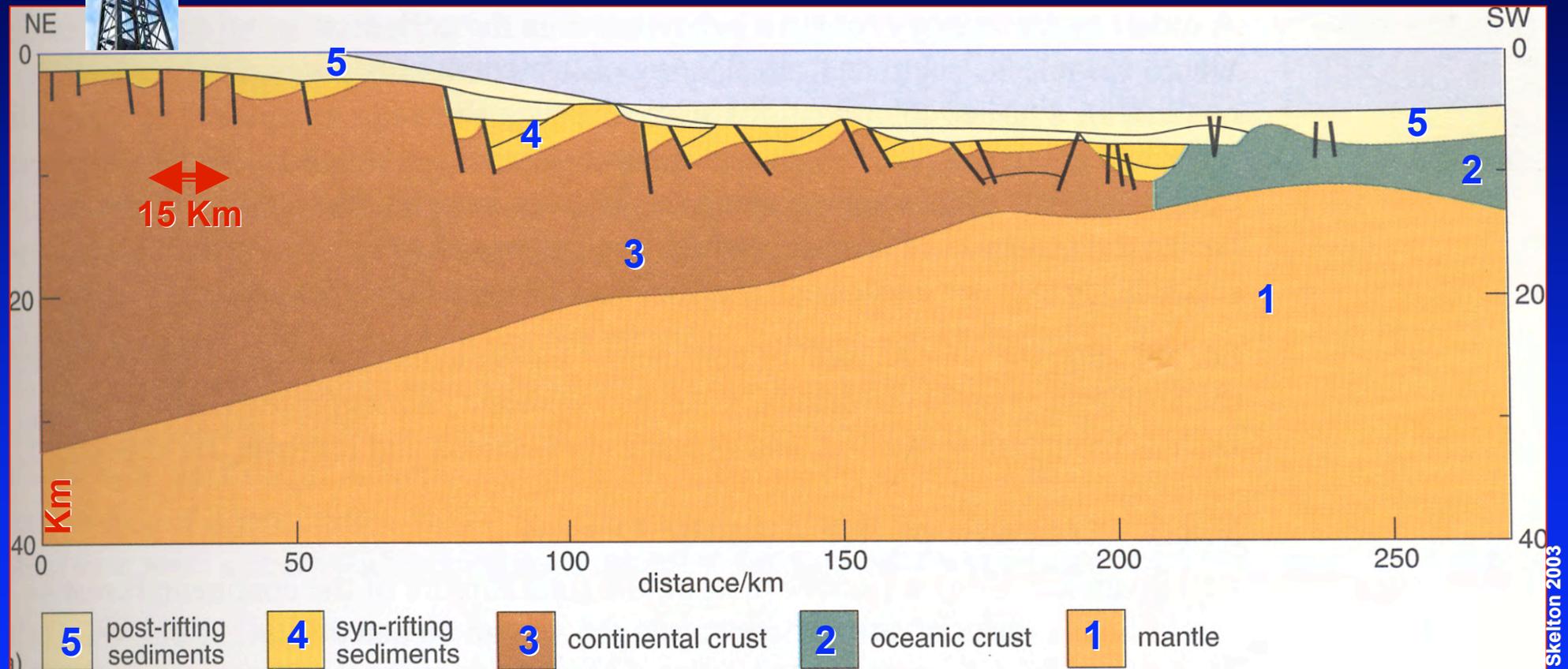
subduction c.oc.
formation d'une ch. Mtgnes
[la plaque plonge SOUS la c.c.]

obduction

marge divergente



BASSINS DE MARGES PASSIVES (DIVERGENCE)



Skelton 2003

DEFINITION... des BASSINS SEDIMENTAIRES

- ils sont liés aux mouvements lithosphériques des **PLAQUES** et à la montée des panaches chauds évoluant dans le temps, à l'échelle des dizaines de Ma ...
- ce sont donc des 'dépressions', des 'creux', des cuvettes de toutes formes et dimensions (...) où se sont accumulés (ou s'accumulent aujourd'hui) des **SEDIMENTS** (= séries géologiques)

1975: BALLY un bassin sédimentaire est une zone subsidente possédant un certain volume de sédiments -au moins un km- restés préservés sous une forme relativement simple

qu'est ce que la ...

SUBSIDENCE?

Elle est SURTOUT liée au départ à des mécanismes tectoniques que l'on peut rattacher à deux grands contextes géodynamiques
(= tectonique des plaques)

1. Amincissement crustal (intraplaque) lié à des régimes de contraintes en tension, accompagnés de flux thermiques élevés = phase de **RIFTING**
 2. Flexuration crustale, ou plissement de forme synclinale, en régime dominant de compression (cf **subduction**) associée à des flux thermiques faibles, en déséquilibre isostatique
- + **subsidence sédimentaire** (halocinèse, argilocinèse, compaction différentielle)

nb subsidence et changement dans le temps

**Exemples: tourbe 'Woluwé, Shanghai 1-10cm/an!, Mexico...,
Plates-formes forages Mer du Nord...**

Shanghai > 10 millions d'habitants

- Ville côtière (Mer de Chine) au débouché de la Rivière 'Changjiang', ± 6300km et 4ème rivière au monde pour ses apports en sédiments FINS
- Pompage non contrôlé des aquifères suite à l'essor industriel

SUBSIDENCE 'anthropique'... dès 1921

= 98 mm/an [moy] de 1956 à 1959, avec subsidence MAX de 3m en 1965 sur les 70 m de sédiments 'fins' et compressibles du Quaternaire...



Subsidence tectonique (échelle géologique)

0,01 à 0,1 mm/an soit 10 à 100m/Ma (marges stabilisées)

Mexico > 18 millions d'habitants

- Ville sur marécages, affaissement cathédrale de 2,8m (relevée de 1m)
- >50% de l'eau est pompée localement, pas d'infrastr. pour 'importer'...
- séisme en 1985 ==> parasismique 'obligatoire'...

Il existe plusieurs classifications des bassins sédimentaires
Les plus utilisées sont celles des pétroliers
clés d'entrée = type de croûte et/ou limite de plaques

LIMITES DE PLAQUES

- **marges passives = divergentes**
- **marges actives = convergentes**
- **marges coulissantes = failles transformantes**

Marge passive: intracontinental, rift, bassin étroit 'stratifié', bassin oc...

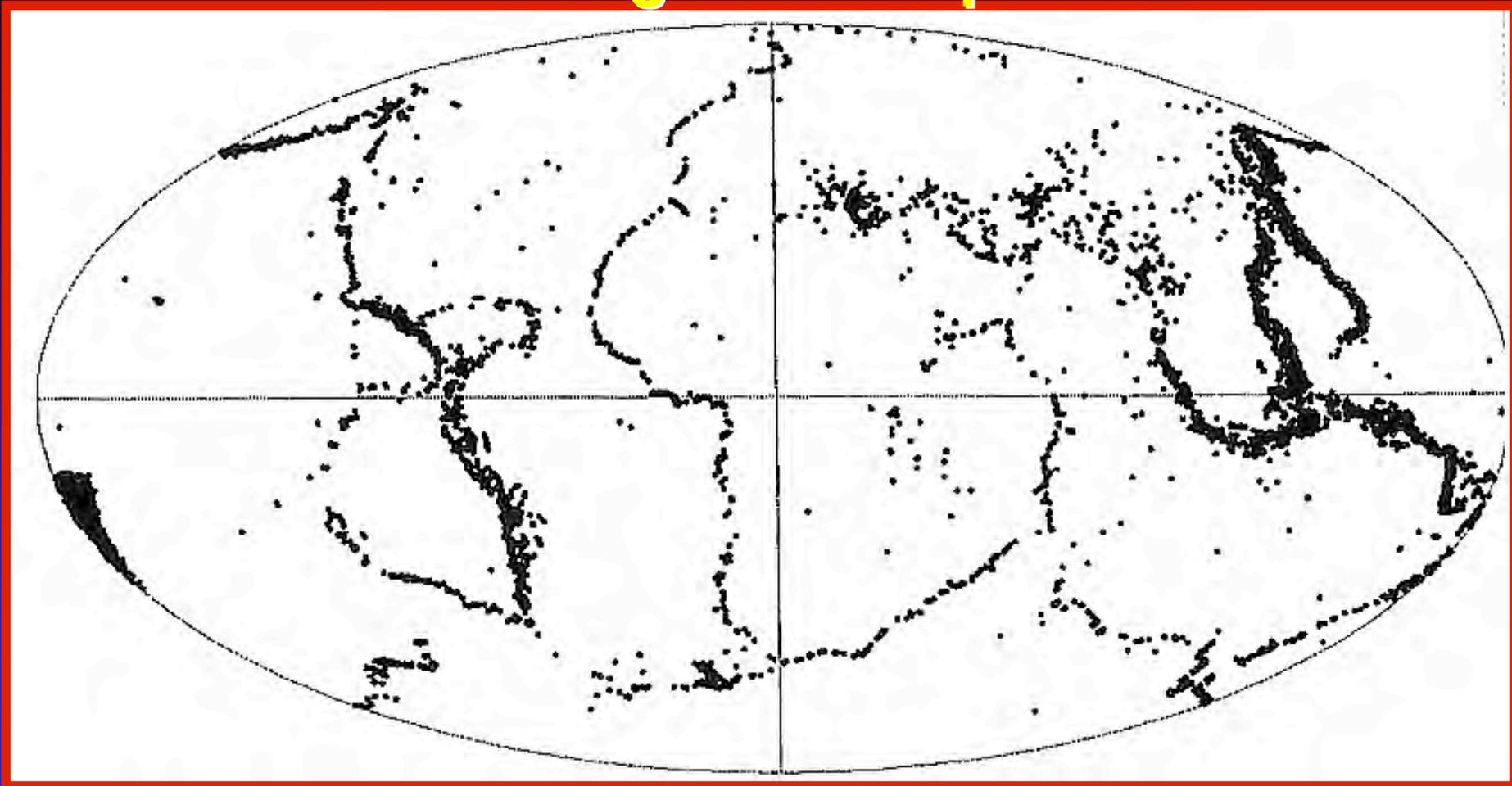
Marge active: avant-pays, avant-fosse, arrière-arc, avant-arc...

Marge coulissante: rifts en pull-apart...

Facteurs: T°, P (rhéologie), apports (érosion), chimie....

nb les bassins sont POLYPHASES

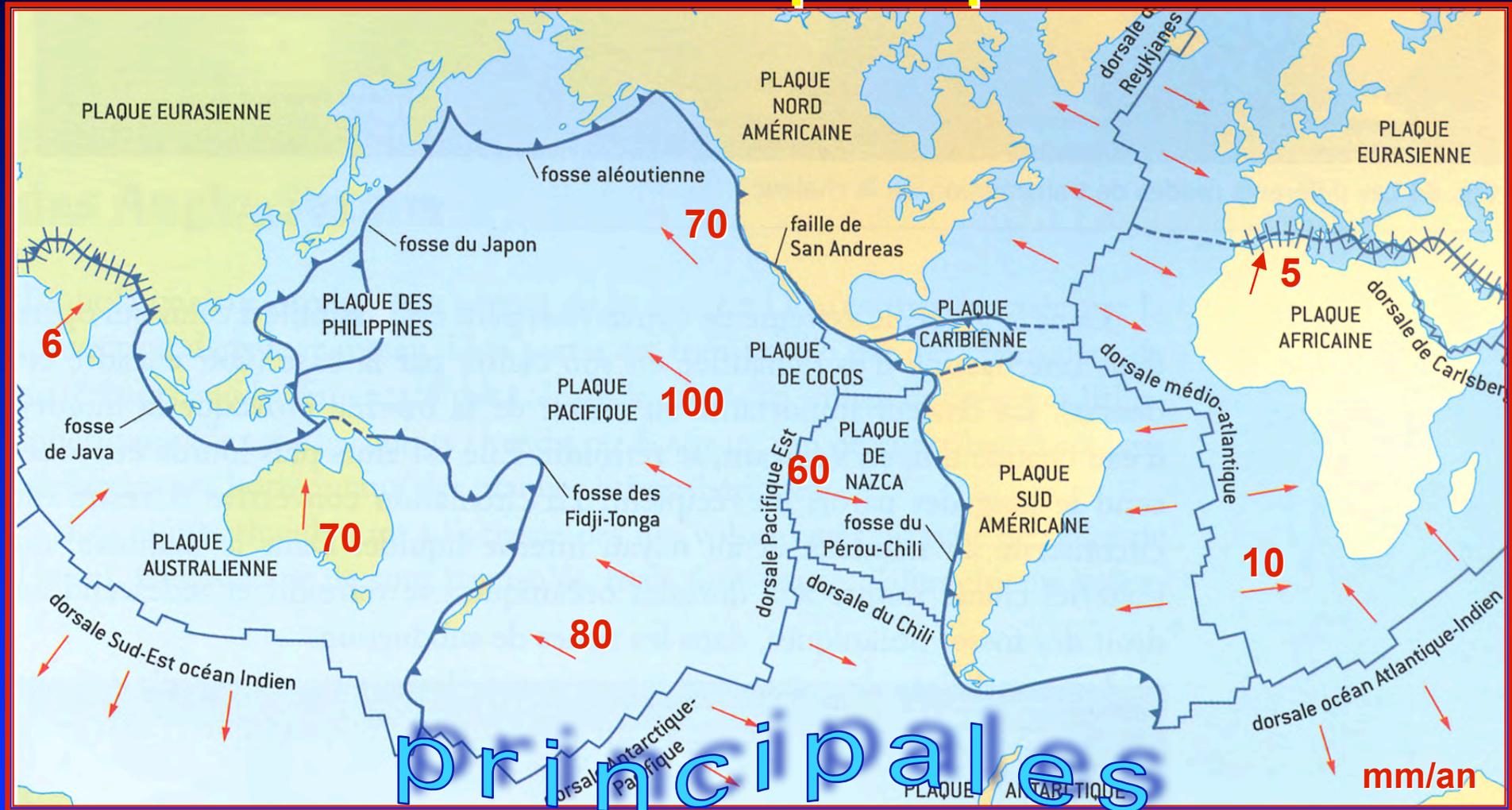
Sismicité de magnitude supérieure à 5



Jolivet 1995

les déformations actives (cfr sismicité) sont localisées le long de domaines étroits
ou limites de **PLAQUES**

± 12 (micro)plaques tectoniques ou lithosphériques

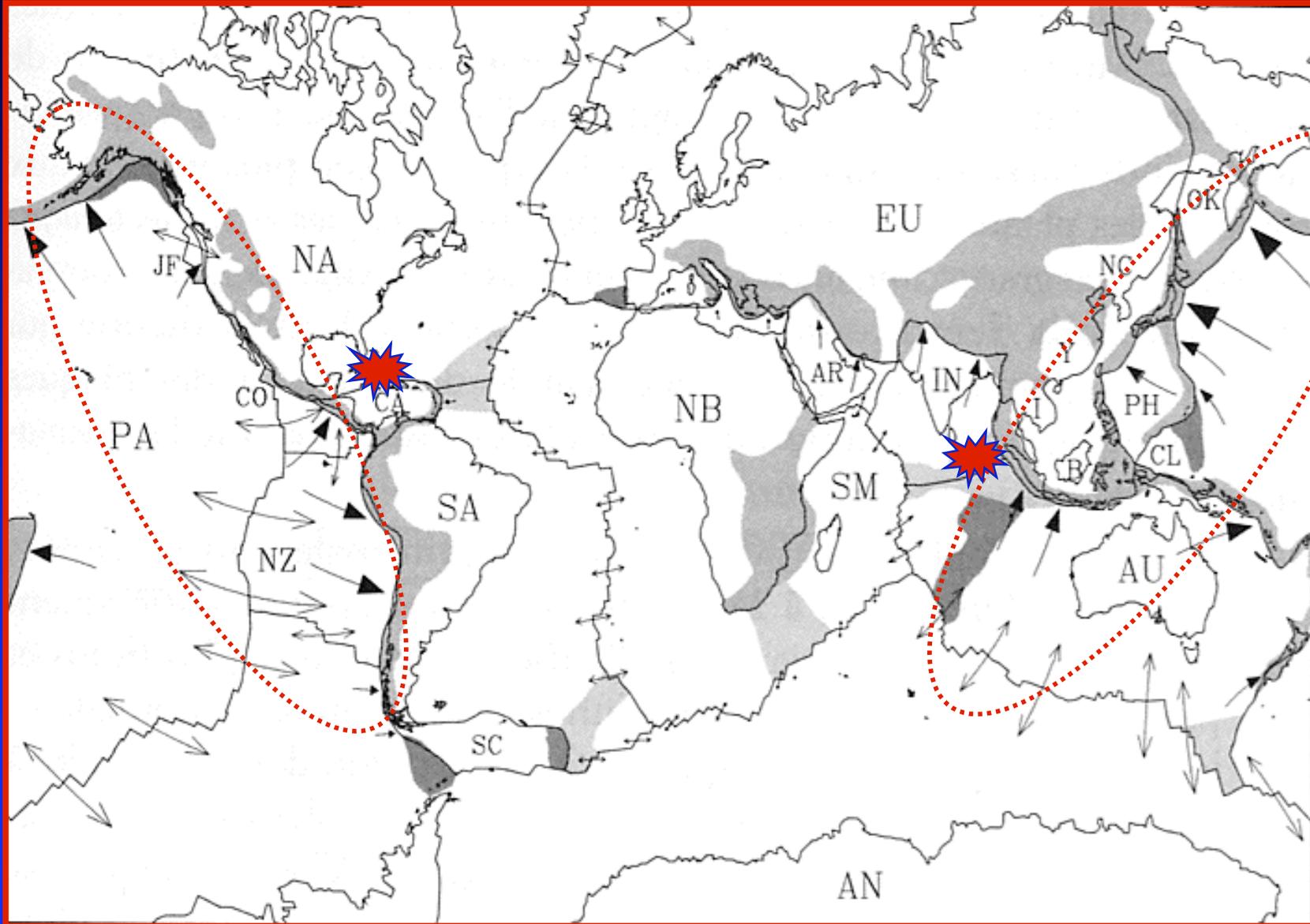


principales

limites de PLAQUES

**Longueur des flèches
= déplacement à VITESSE et TRAJECTOIRES CONSTANTES pendant 25 Ma**

Haiti
12janv2010



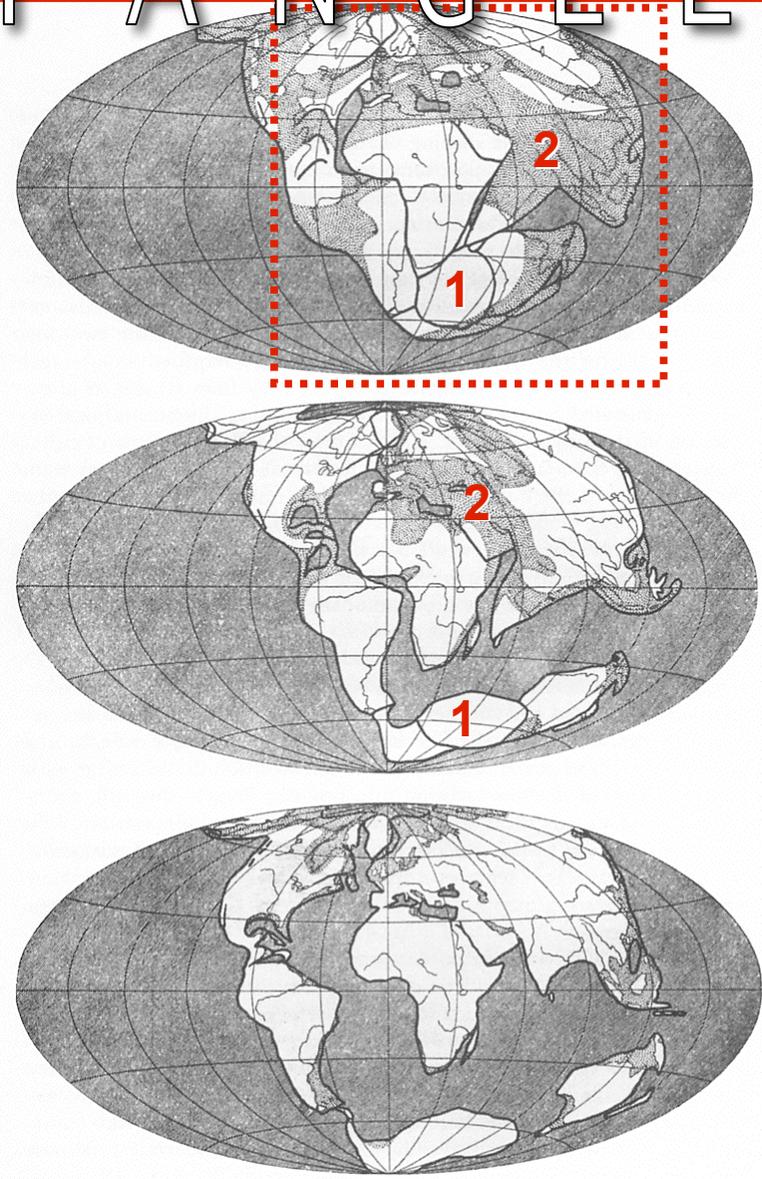
Pukhet
26déc2004

PANGÉE

Pour rappel:

Wegener & Jeffreys 1924
*'The Earth, Its Origins, History
And Physical Constitution'*

1 continental
2 mers peu profondes



... VERS LA PANGÉE

**Alexander
Du Toit
(géologue Afr S)**

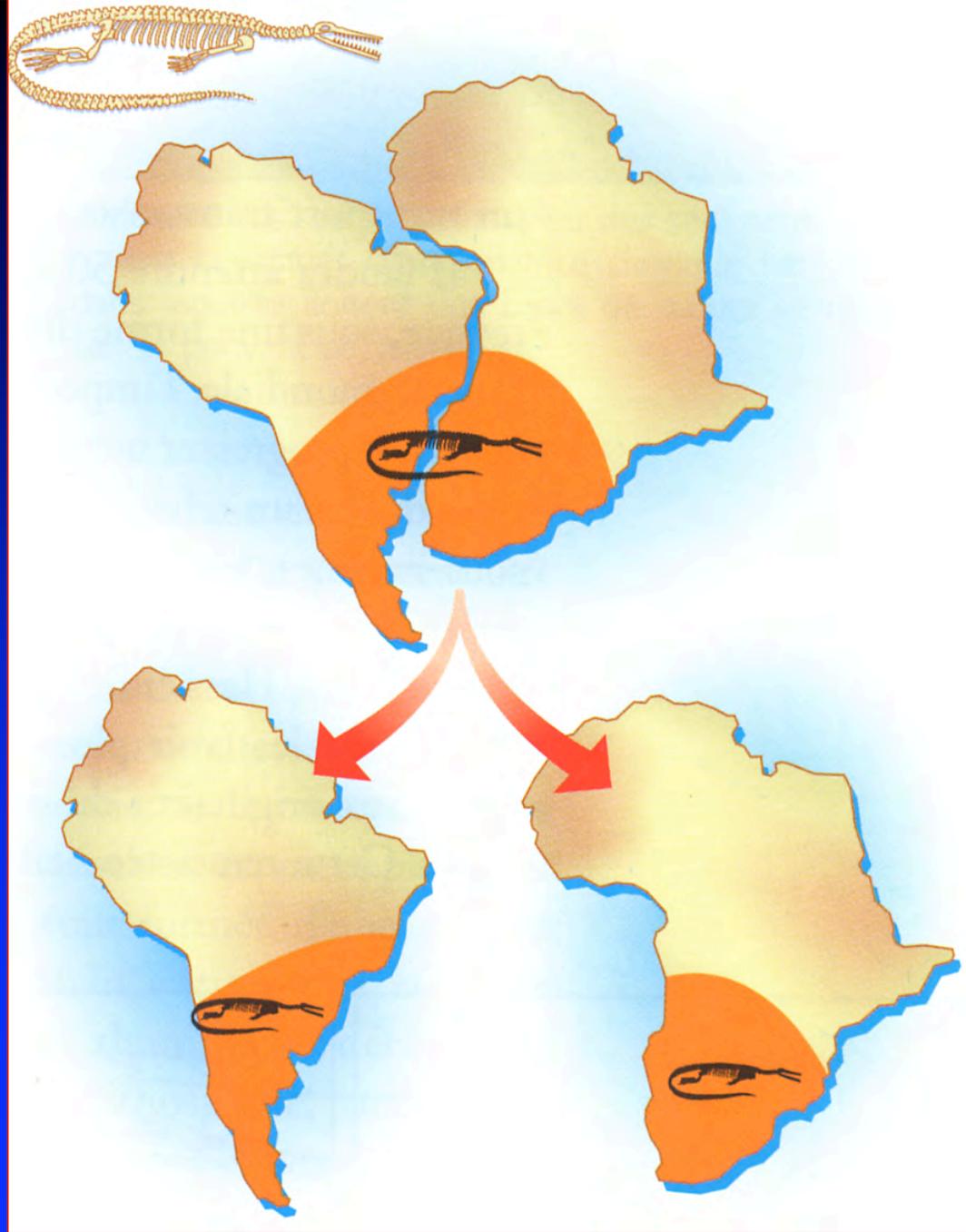
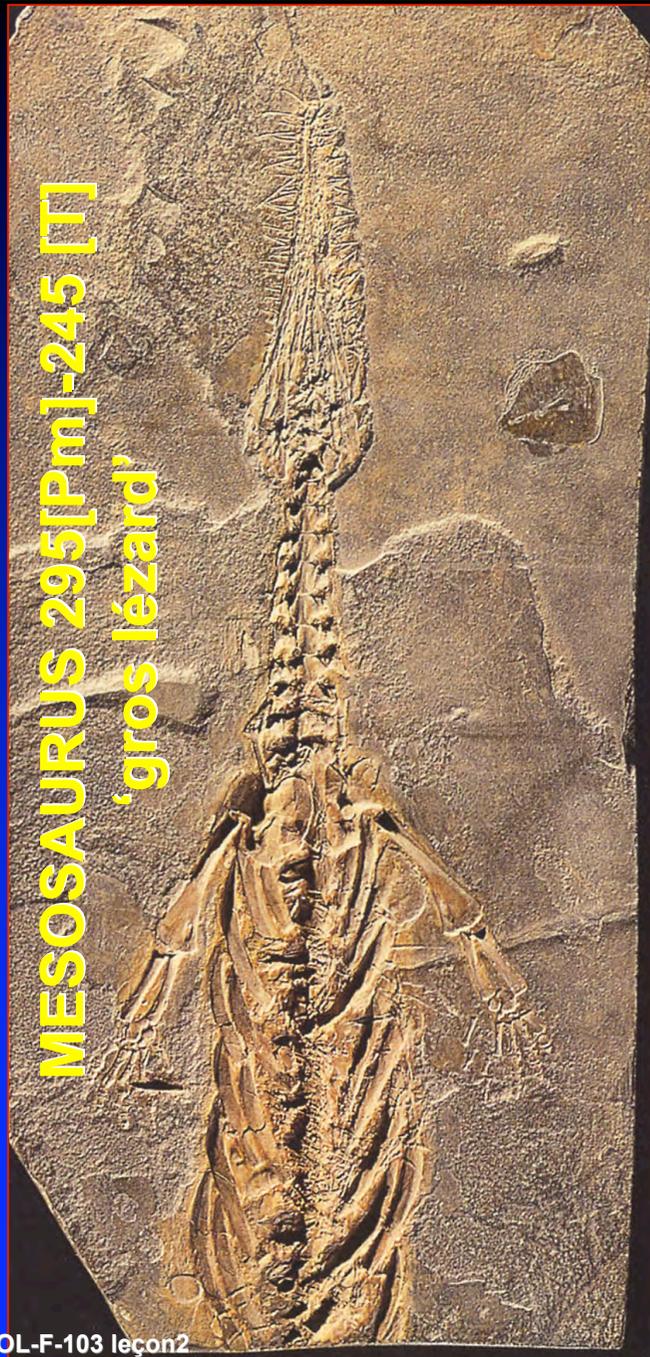
**'il y avait
2 'supercontinents'
séparés par une
mer étroite'**

(1920')



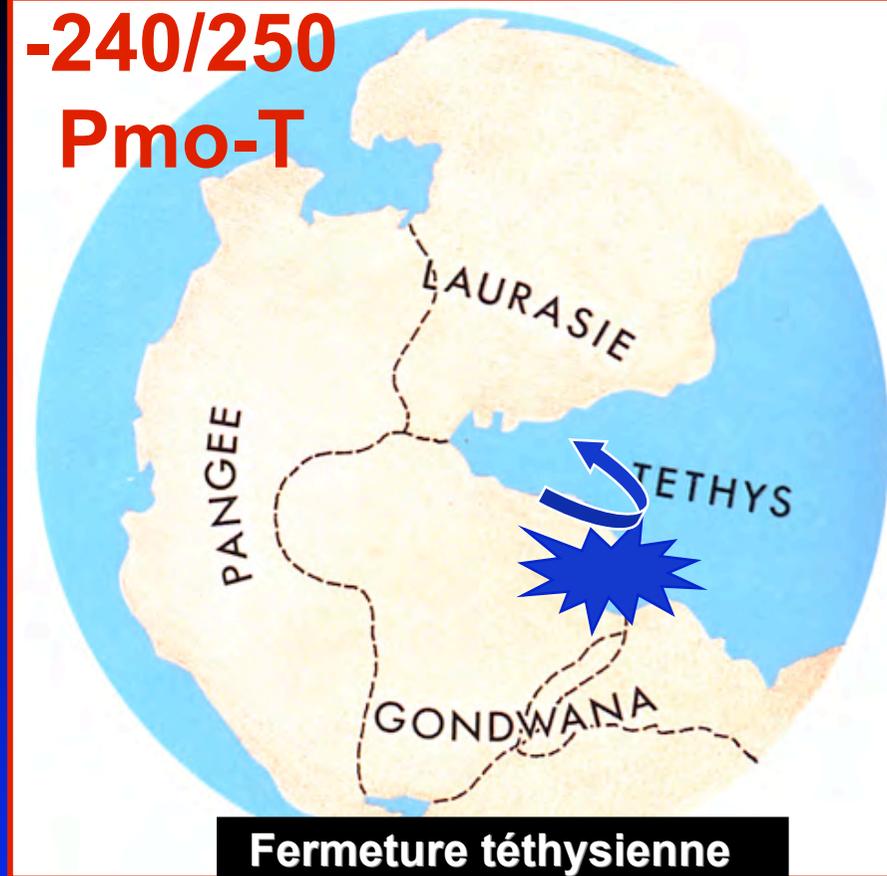
TETHYS

MESOSAURUS 295[pm]-245 [T]
'gros lézard'



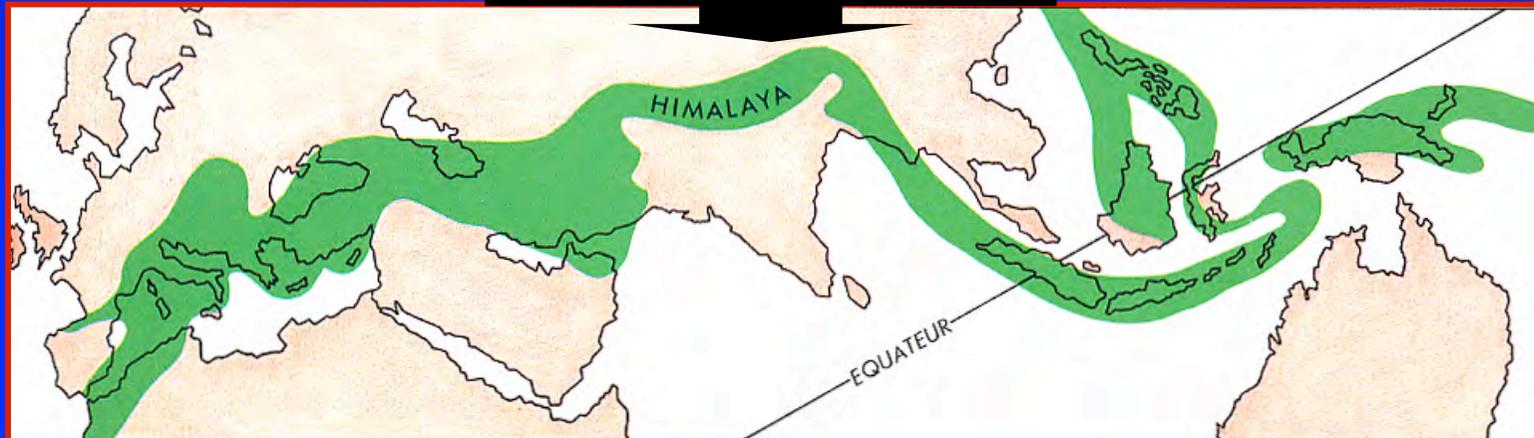
PANGÉE

-240/250
Pmo-T



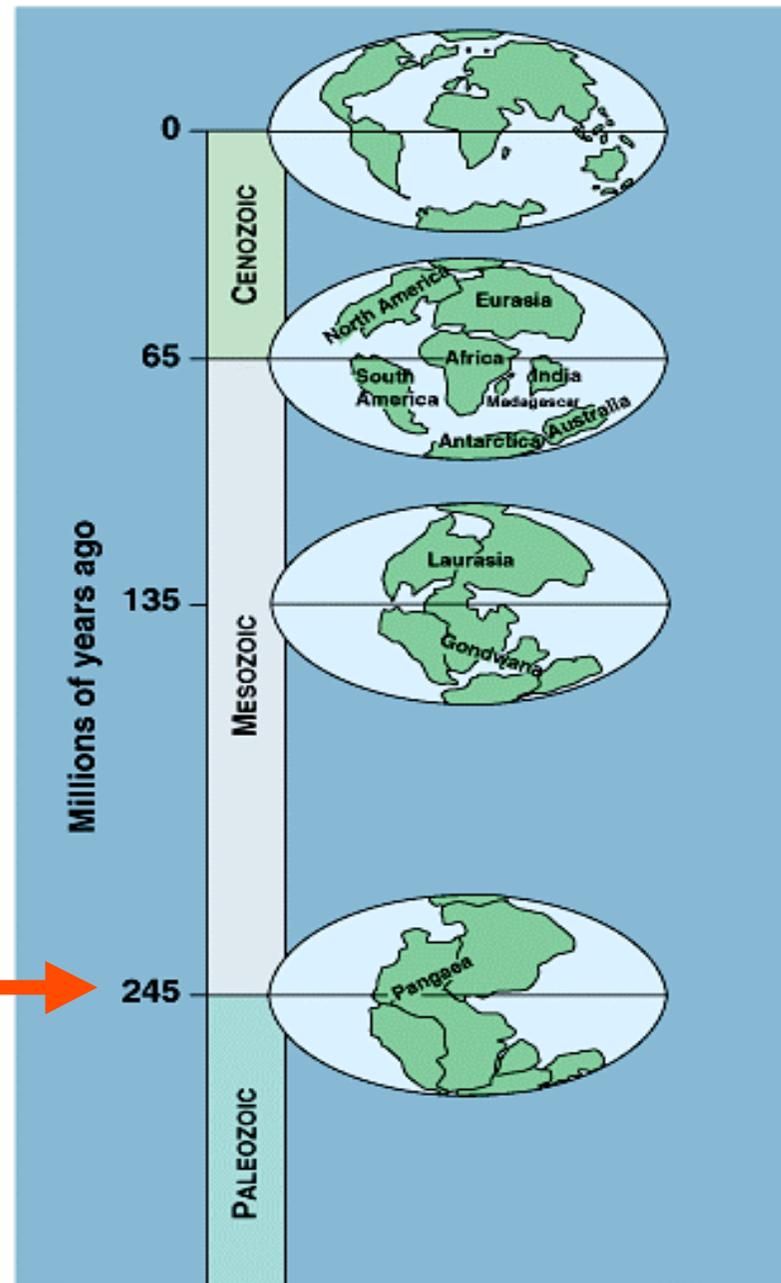
Paléo
Néo
-
TETHYS

Fermeture téthysienne



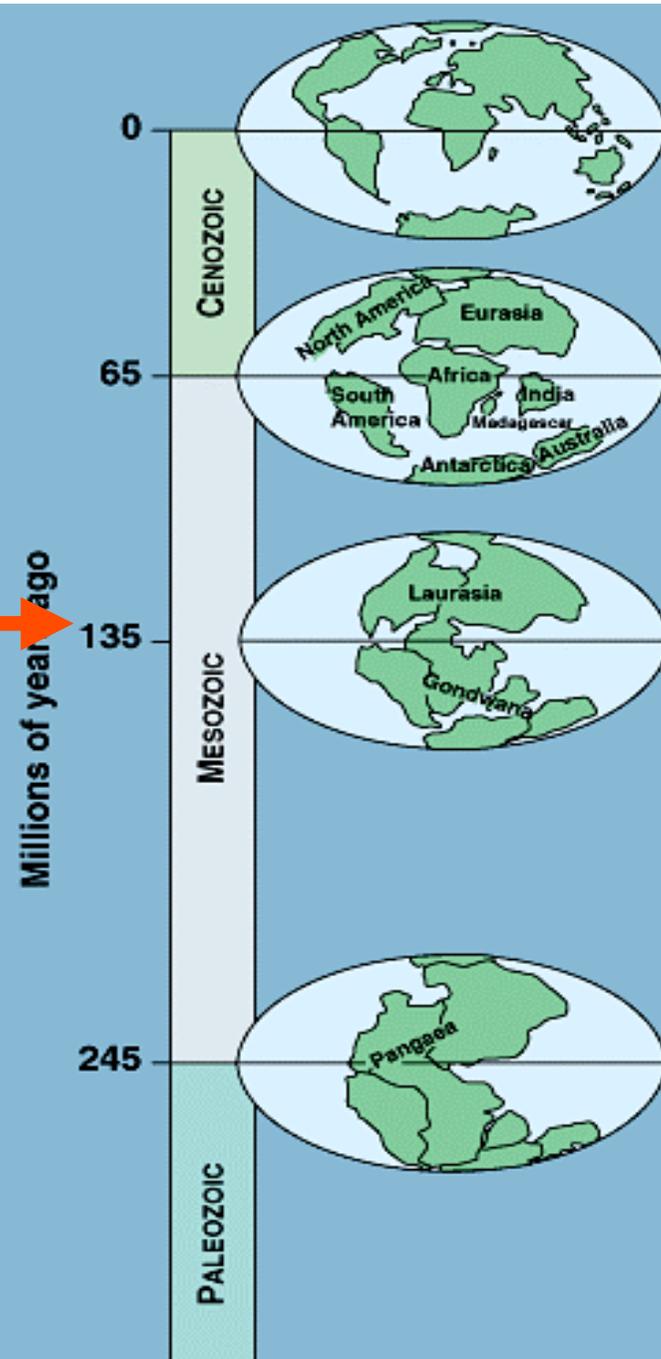
QUELS EFFETS?

**Fin du Permien
La Pangée est formée**



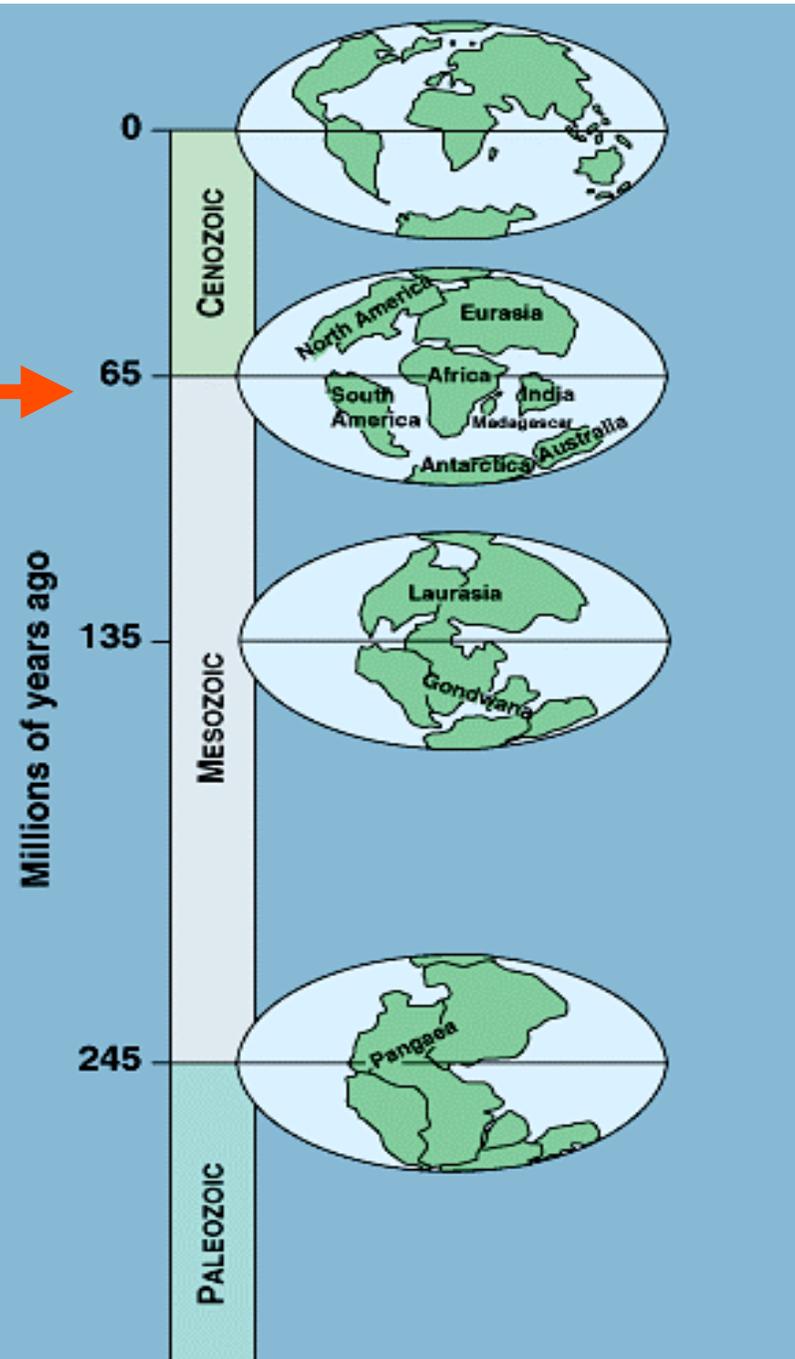
QUELS EFFETS?

Au cours du Jurassique
La Pangée 'éclate'
= se fragmente
dès 180Ma



QUELS EFFETS?

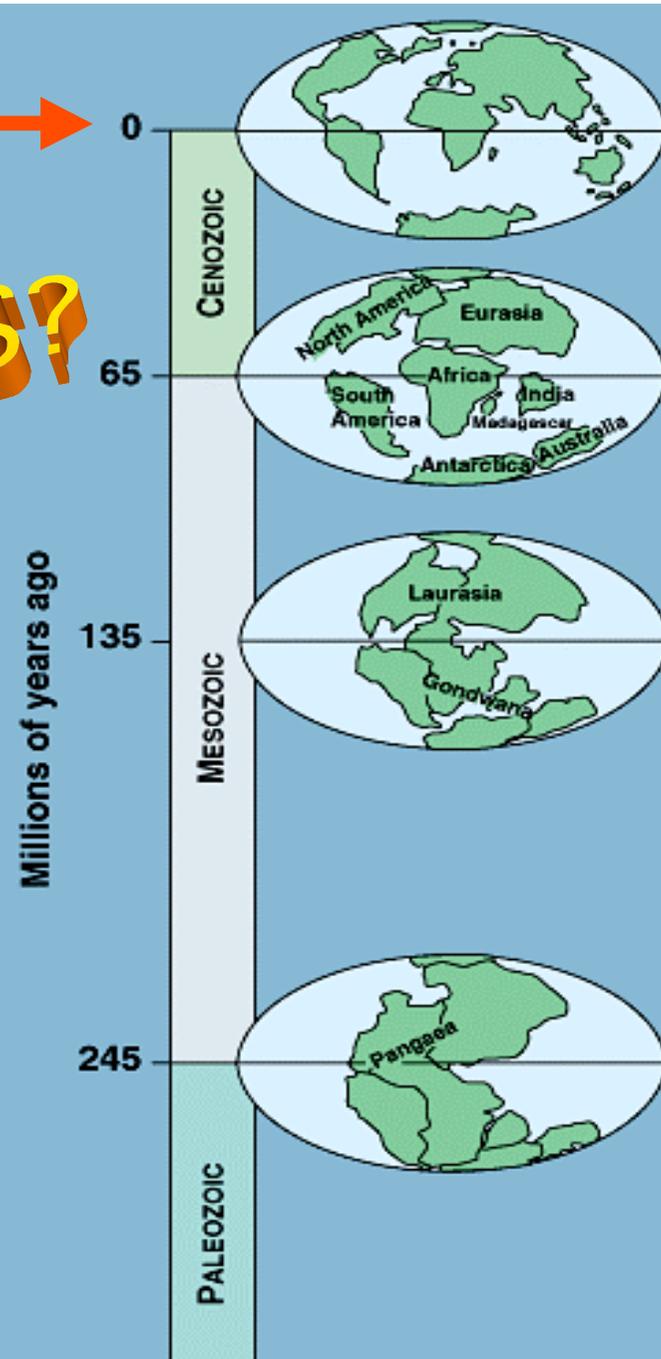
Au Crétacé,
le NM est au plus
haut



Aujourd'hui
=1/2
Cycle de Wilson

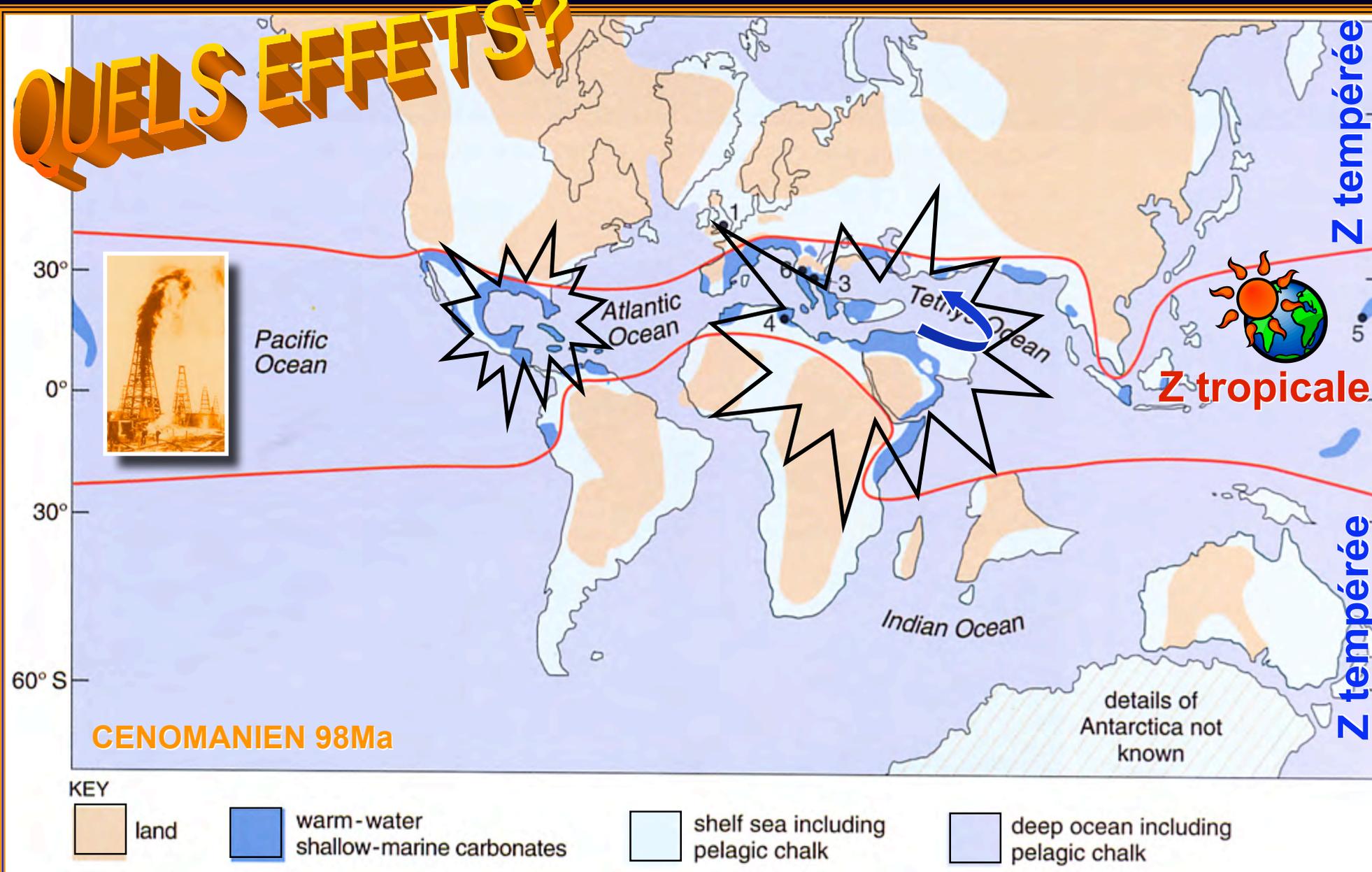
QUELS EFFETS?

- bassins oc
- 'endémies'
- anoxies [RS]
- ...
- 'Alpes'
- climatologie
[érosion Himalaya=
=consommation CO₂
=?entrée en Glaciation]
- ...



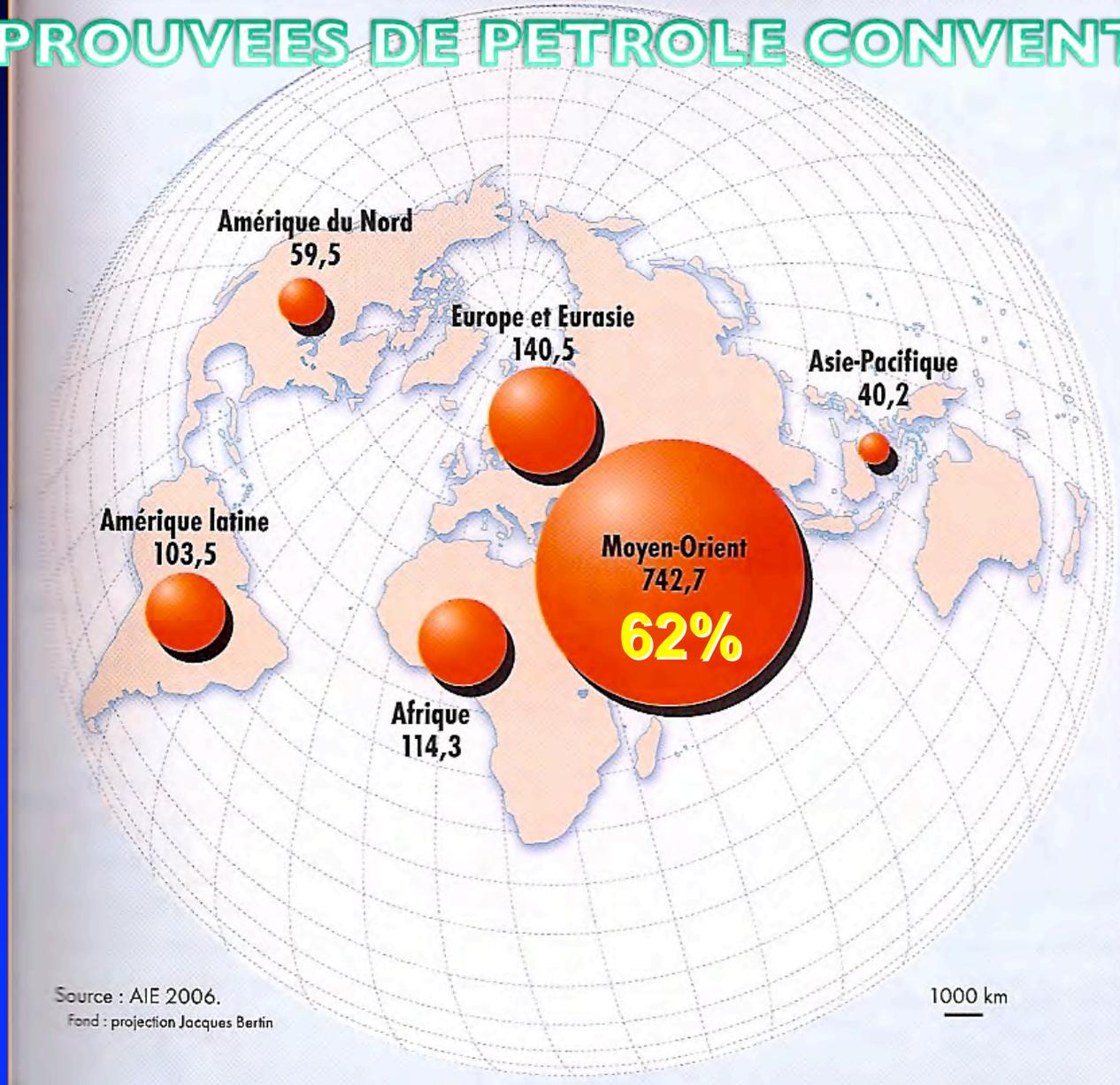
> 80% des HYDROCARBURES pendant 30 Ma

QUELS EFFETS?



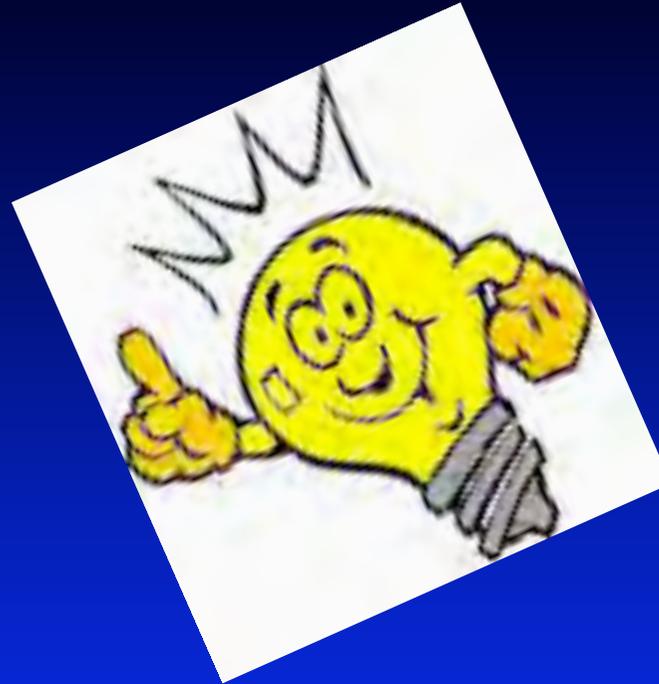
LES RÉSERVES MONDIALES DE PÉTROLE
EN MILIARDS DE BARILS (2005)

RESERVES PROUVEES DE PETROLE CONVENTIONNEL



B Barré 2007

POUR INFO



NE FAIT PAS PARTIE DE LA LECON

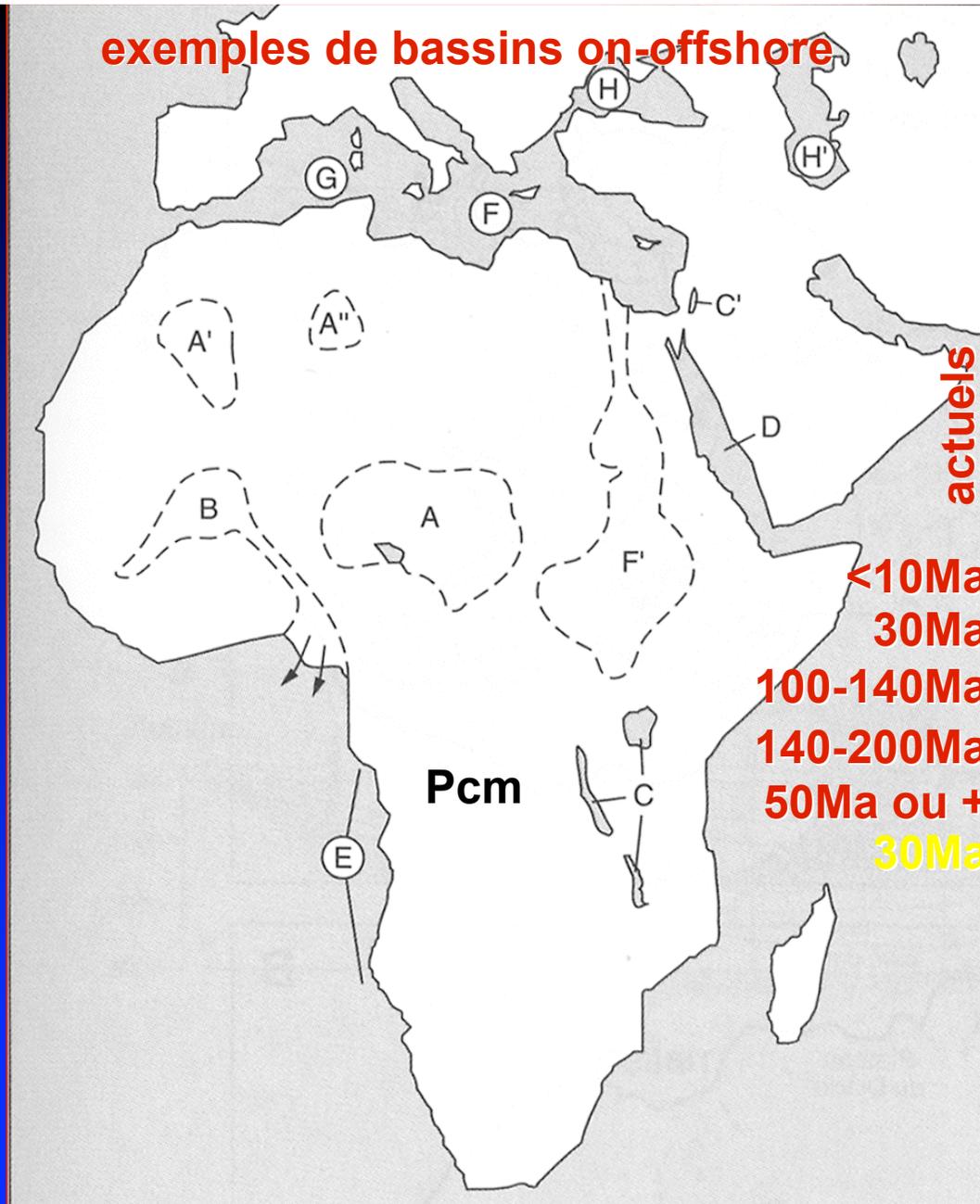
BASSINS SEDIMENTAIRES



FORMES?
DIMENSIONS?

EPAISSEURS
=
REPLISSAGES

exemples de bassins on-offshore

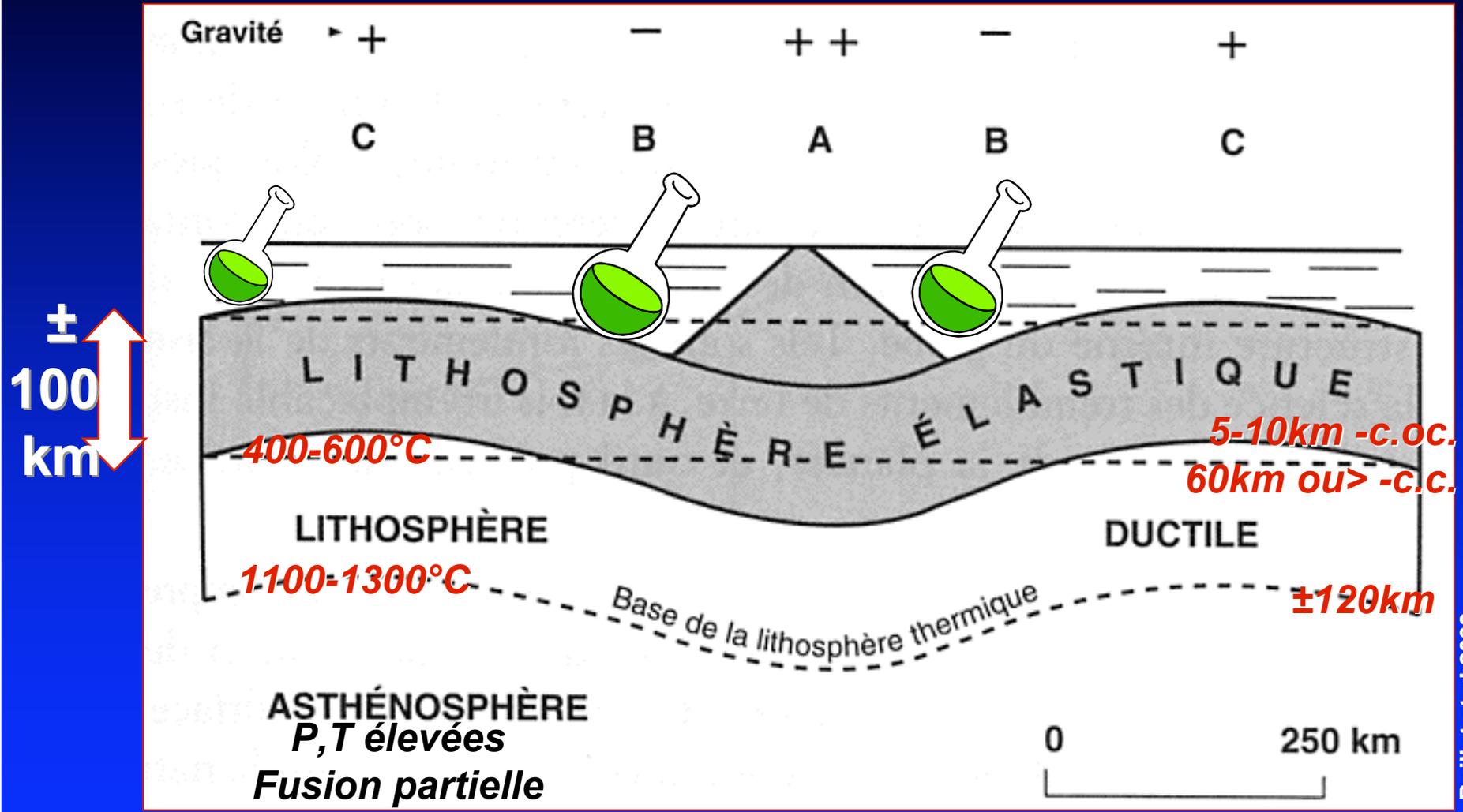


- A Tchad
- A' Saoura
(sur paléozoïque)
- A'' Gd Erg Oriental
- B Cuvette Niger
- C Gds lacs E-Afr
- D Mer Rouge
- E Atl S 'profond'
- F Méditerranée occ
- H Mer Noire
- H' Caspienne

Biju-Duval 1999

LITHOSPHERE ELASTIQUE = DEFORMATION REVERSIBLE

Archipel des îles Hawaii



pois d'un volcan (A) ==> affaissement local (B) compensé par un bombement (C)
à 100 ou 200 km du point d'application de la surcharge

Déformation élastique : retour aux conditions initiales lorsque la contrainte est supprimée

Déformation plastique : est irréversible. Elle se produit quand la contrainte dépasse la 'limite élastique', un seuil qui dépend de la nature de la roche, des conditions de P, T et de la vitesse ou du temps d'application de la déformation

Rupture: fait suite aux déformations élastiques et plastiques

• **Comportement lithosphère FRAGILE**: lorsque la rupture suit presque immédiatement la déformation élastique

==> cassure, faille

==> à la rupture: SEISMES (libération énergie accumulée)

• **Comportement lithosphère DUCTILE**: lorsque se produit une déformation plastique avant la rupture

==> zone de cisaillement, foliation (métamorphique)

ZONES DIVERGENTES: PREMIERS STADES POSSIBLES DES BASSINS SUBSIDENCE

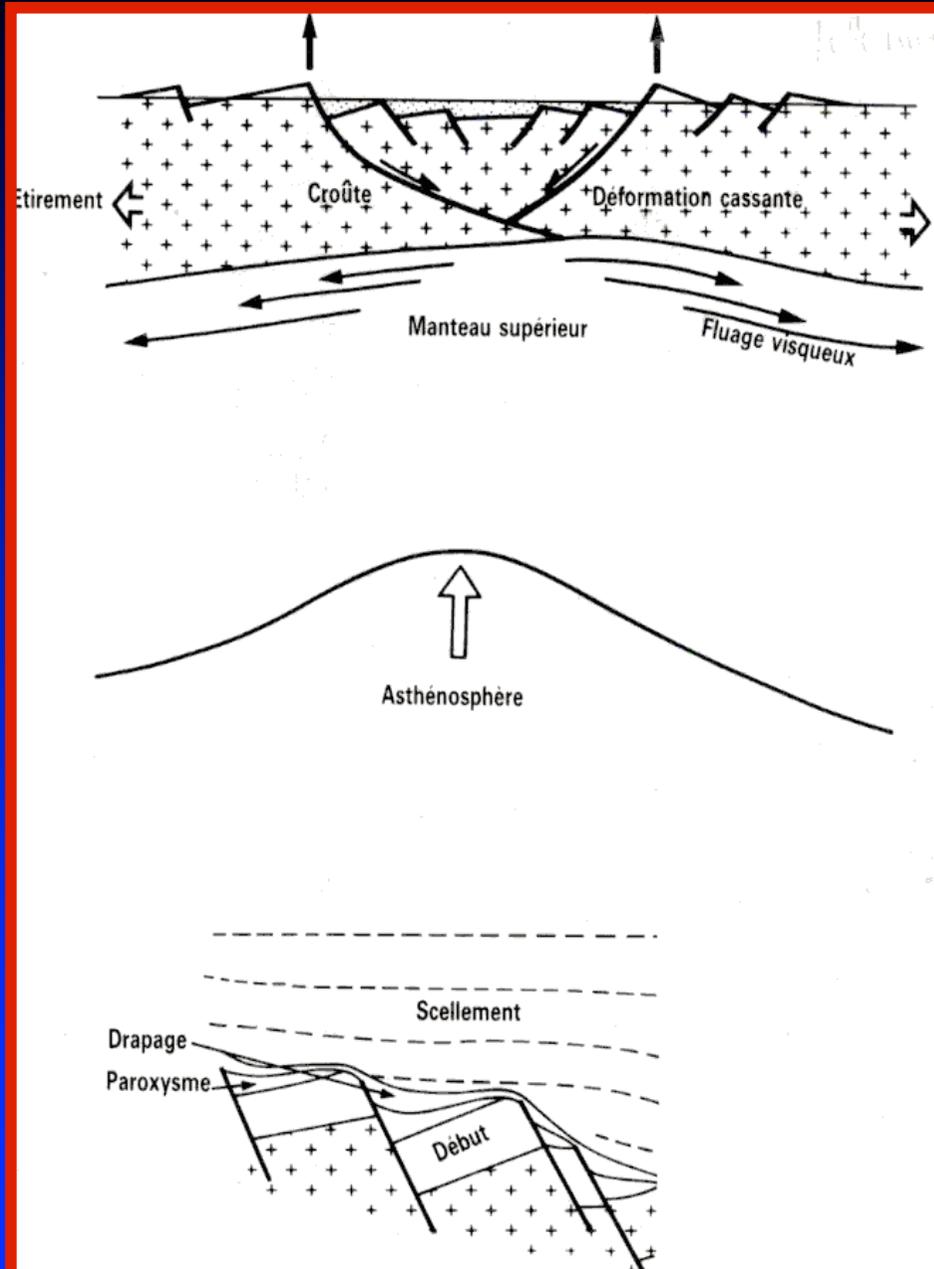


L'étirement peut être considérable

30km de croûte continentale peuvent devenir 5 à 10km

RIFT SYMETRIQUE

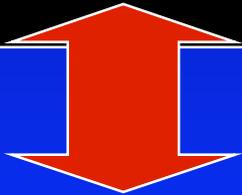
=
*évolution
architecture
des blocs faillés*



C.C.

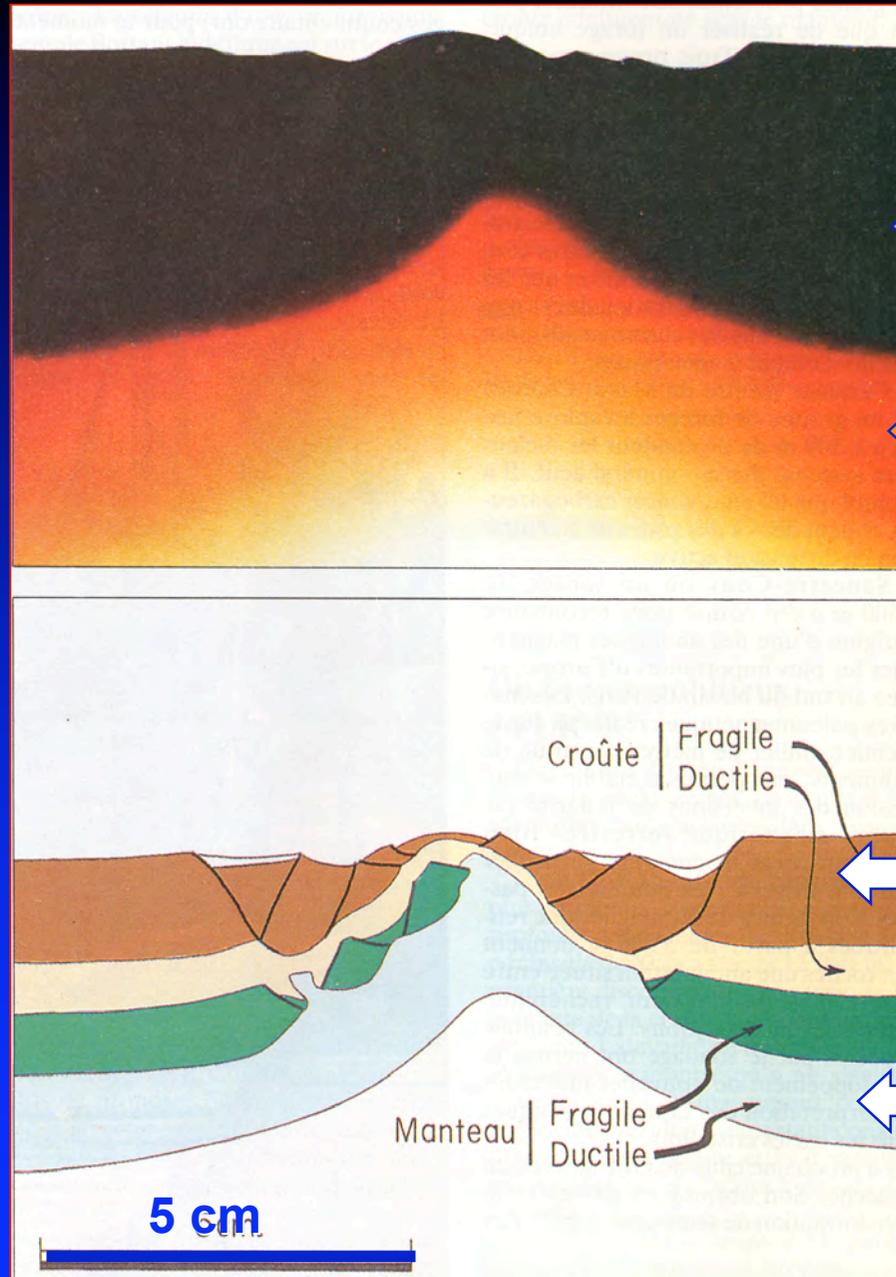
Perrodon 1985

RHEOLOGIE
Expérience
Modèle
quadricouches
= C.C.



Développement
Systèmes de
Failles
=

Bassins Sédimentaires



← lithosphère

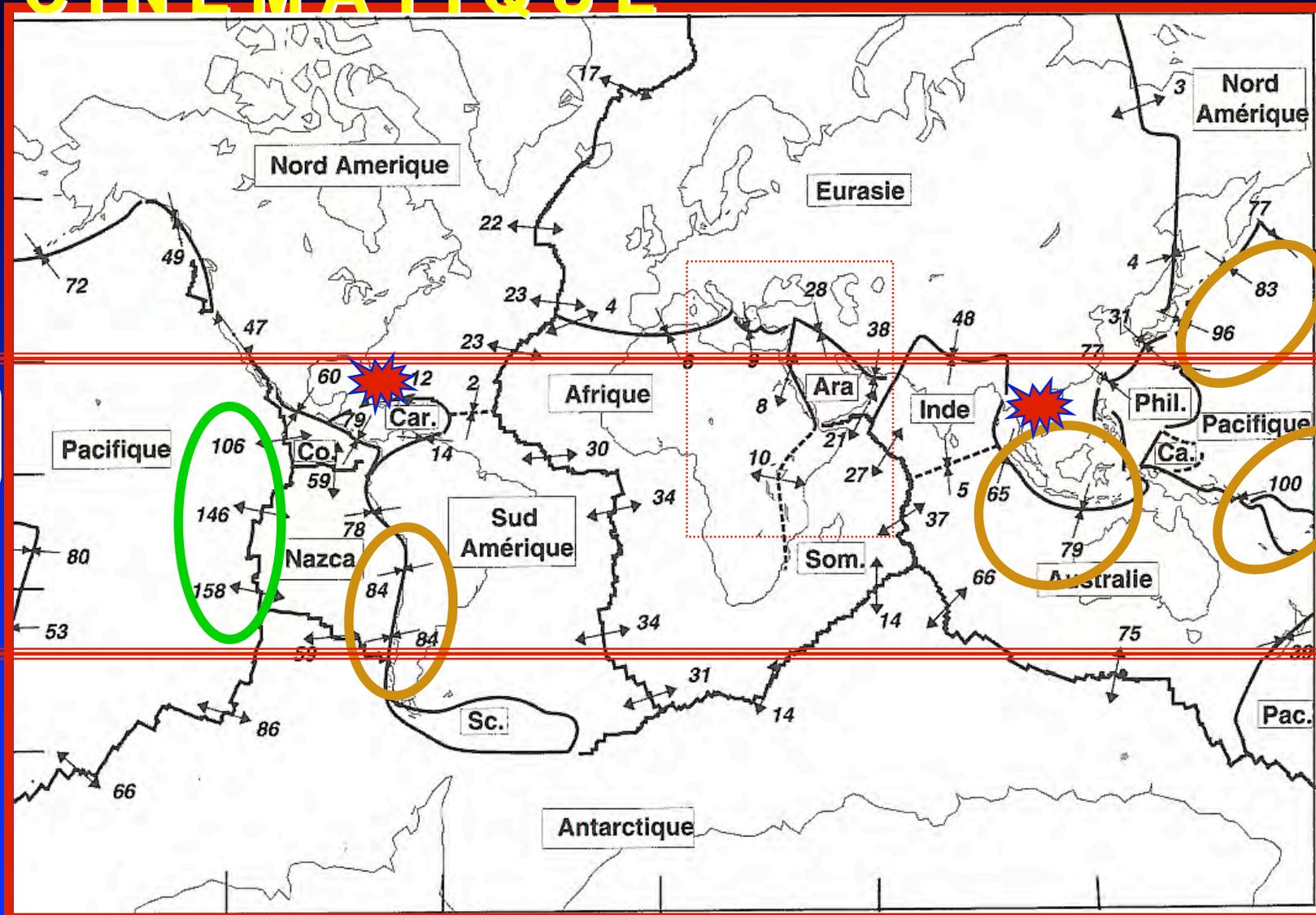
← asthénosphère

← sable
*couches fragiles
à forte résistance*

← silicone
*couches ductiles
à faible résistance*

CINEMATIQUE

mm/an

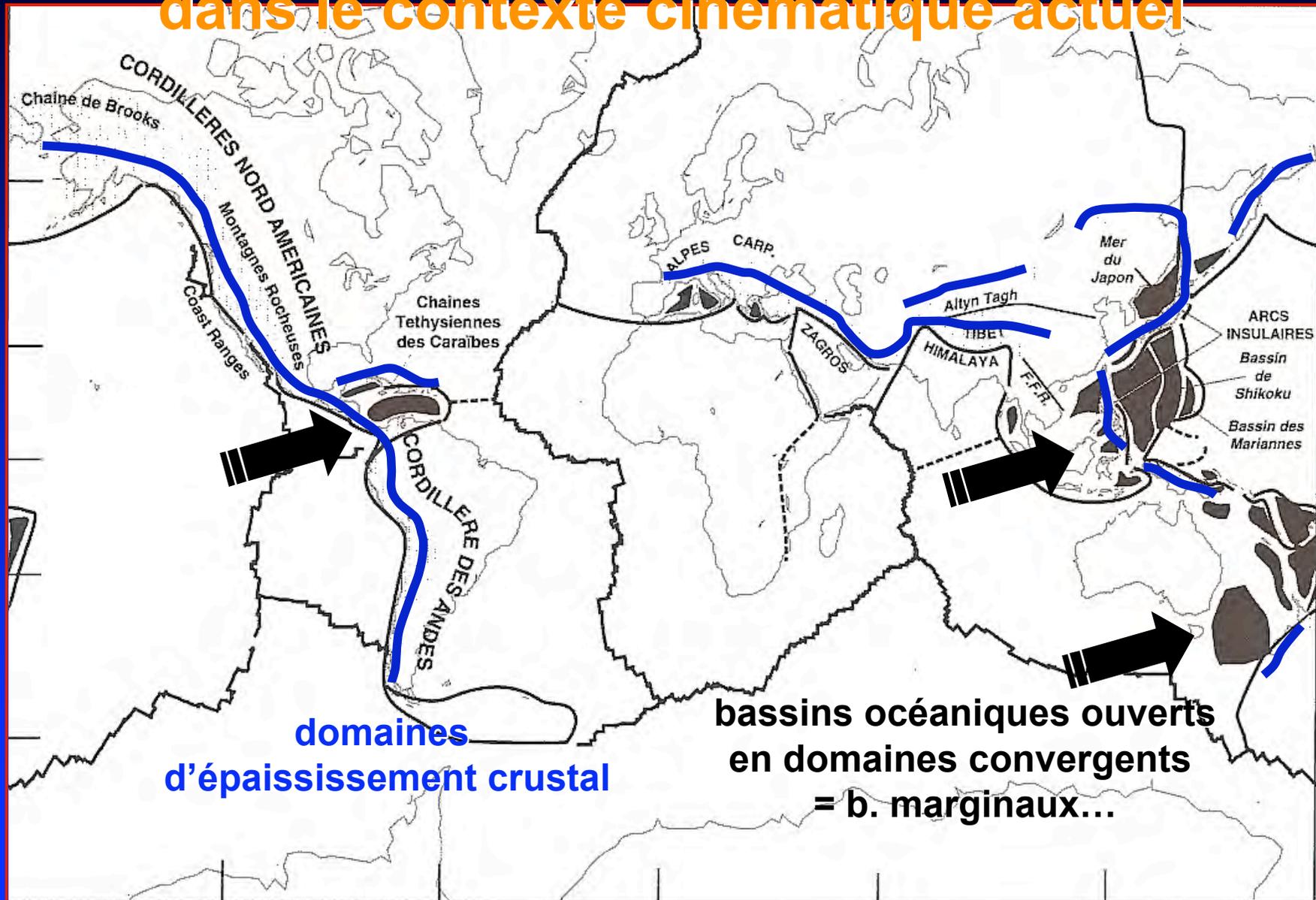


DeMets et al 1990

formation

disparition (collision ou subduction)

Zones de déformations majeures cénozoïques dans le contexte cinématique actuel



domaines
d'épaississement crustal

bassins océaniques ouverts
en domaines convergents
= b. marginaux...