



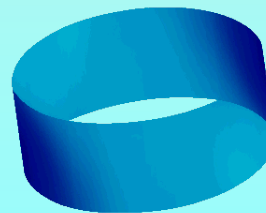
Année internationale de la
CHIMIE
2011

Chimie Prébiotique Vers l'Émergence du Vivant

Quand la Chimie devient Histoire Naturelle

Laurent Boiteau
Chercheur CNRS, Montpellier

Institut des Biomolécules Max Mousseron UMR 5247 – *Dynamique des Systèmes Biomoléculaires Complexes*



IBMM
Institut des
Biomolécules
Max Mousseron



Pourquoi de la Chimie Prébiotique à Fleurance ?

■ 2011 : Année Internationale de la Chimie

- ▷ Centenaire du Prix Nobel de Chimie décerné à Marie Curie (1911, pour la découverte du polonium et du radium)



Année internationale de la
CHIMIE
2011

■ La chimie prébiotique a des accointances avec l'astronomie

- ▷ Pré-Biotique = "avant la vie" :
 - La chimie qui précède / a précédé la biochimie
- ▷ Une chimie aux frontières
 - de la biologie
 - de la géologie
 - du cosmos

■ ➔ La chimie prébiotique est un morceau de l'Exobiologie

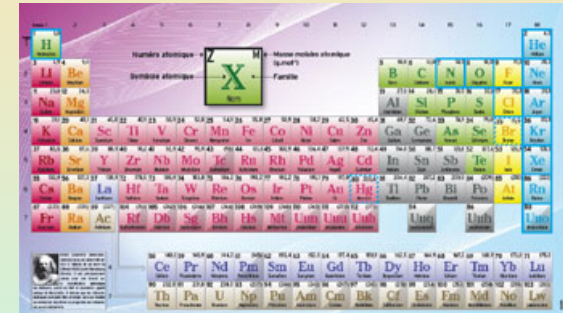
- ▷ (la vie "ailleurs")

Quelques rappels de Chimie

Quelques Rappels de Chimie

■ Chimie : une frontière d'organisation de la matière

- ▷ interactions et liaisons **entre** les atomes
 - via leurs électrons *périphériques*
 - le répertoire de base : *les éléments chimiques*

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté avec une coloration par familles. Les métaux alcalins sont en rose, les métaux alcalino-terreux en orange, les métaux de transition en vert, les métalloïdes en jaune, les non-métaux en bleu, et les gaz nobles en violet. Une case 'X' est mise en évidence dans la colonne des métaux alcalins, à la hauteur du premier élément de la deuxième période.

- ▷ des échelles microscopiques de temps et d'espace
 - objets : 0,1 à 1 nm / événements : 10^{-15} à 10^{-12} s
- ▷ une échelle de densité d'énergie d'interaction
 - liaison chimique : 4,5 eV / liaison \equiv 400 kJ / mole
10 à 1000 fois celle des interactions rencontrées en biologie,
mais beaucoup moins que les interactions nucléaires
- ▷ la structure de l'essentiel de la matière "palpable" qui nous entoure

Quelques définitions rapides

■ Liaison chimique

▷ Covalente (*phénomène quantique*) H—H

• → molécules

▷ Ionique (*électrostatique*) Na⁺•••Cl⁻

▷ Autres : coordination, liaison hydrogène...

■ Réaction chimique

▷ Processus au cours duquel des liaisons chimiques sont créées et/ou détruites H₂ + O → H₂O

■ Catalyseur

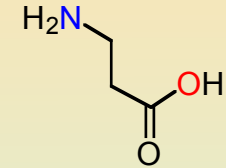
▷ un agent (composé moléculaire ou matériau) qui **accélère** une réaction chimique, et qui est **restitué** à la sortie

La chimie est une science du collectif

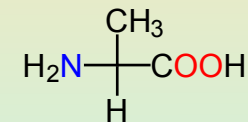
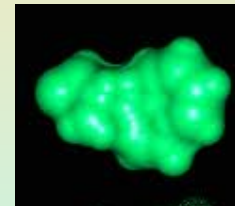
- **l'entité de base : la molécule** ($\approx 0,1$ à 1 nm = 10^{-10} à 10^{-9} m)
 - ▷ jamais observable *directement* ni *individuellement* (ou presque!)
 - ▷ le chimiste ne manipule (presque) *jamais une seule* molécule *mais* une **population** de molécules semblables → **statistique**
 - loi des grands nombres (nombre d'Avogadro : $N_A \approx 6 \times 10^{23}$)
- **observation macroscopique sur une population**
 - ▷ absorption / émission de chaleur / de radiation
 - ▷ changement de pression / de volume
 - ▷ propriétés spectroscopiques (UV / visible / IR, résonance magnétique)
 - ▷ effets électriques...
- **un domaine d'élection pour la thermodynamique...**
- **allers-retours entre niveaux micro- et macroscopique**
 - ▷ molécule / atome \leftrightarrow substance / élément / composé
 - "Substance" comme *classe d'équivalence* d'objets "molécule"

Comment représenter les molécules ?

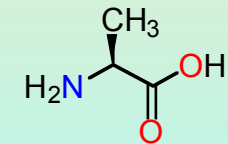
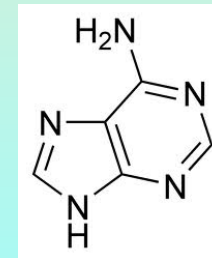
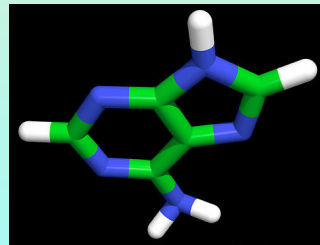
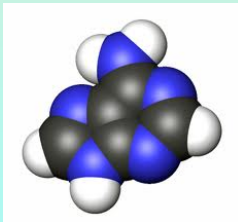
■ formules brutes : H_2O , CH_4 , CO_2 , H_3PO_4 , $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$...



■ espace occupé par une molécule

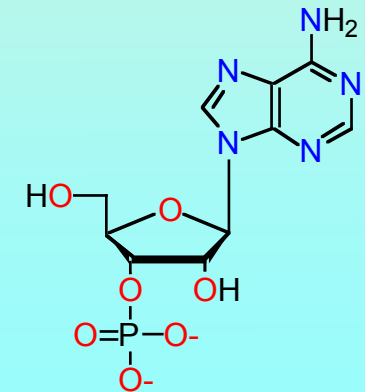


■ information sur la structure moléculaire (modèle)



■ Convention de représentation en chimie organique

▷ formules structurales ("dessin d'architecte")



L'origine de la vie :
Un questionnement multiple

qui dépasse la chimie

Quoi, où, quand, comment : une question multiple

■ Origine

- ▷ Cause, émergence, transition, évolution...?

■ Quoi ?

- ▷ observer / caractériser, définir, expérimenter

■ Où, quand, comment ?

- ▷ une approche chronologique / historique

■ Une approche nécessairement pluridisciplinaire

- physique, astrophysique, planétologie, géologie, chimie, biologie, mathématiques (informatique), épistémologie, philosophie, histoire...

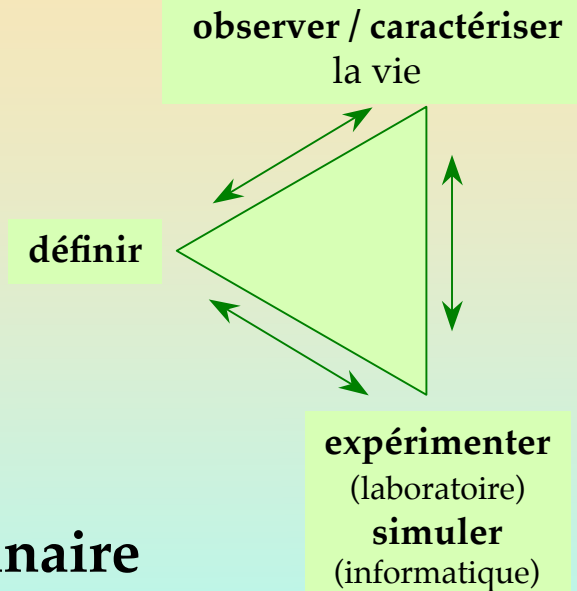
- ▷ **Exobiologie** (ou astrobiologie)

■ Des sociétés savantes

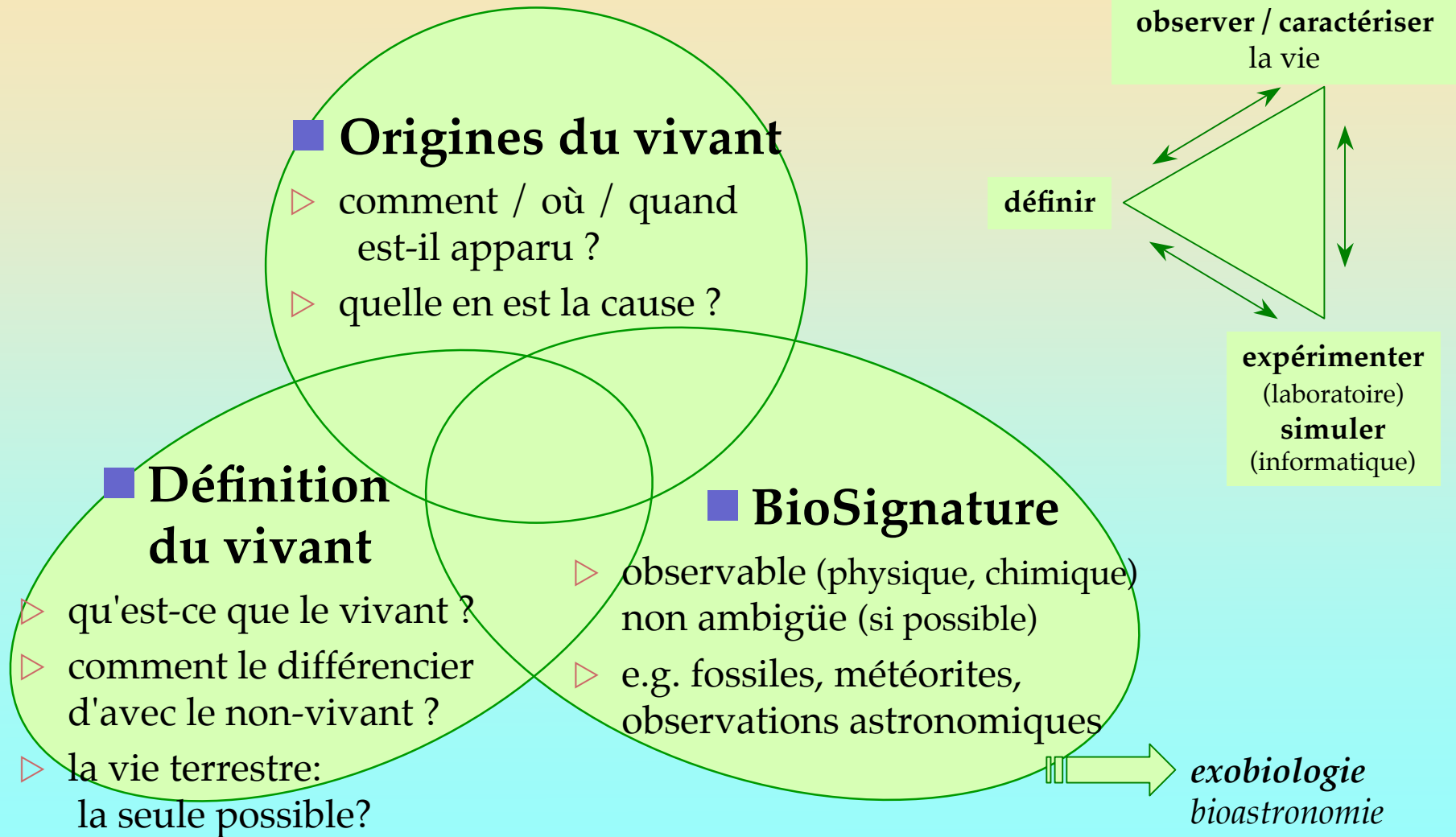
- ▷ *International Society for Studies on Origins of Life (ISSOL)*

- ▷ *Société Française d'Exobiologie (SFE)*

www.exobiologie.fr



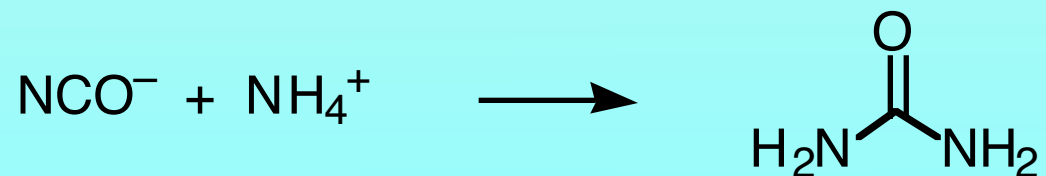
La vie : du *Quoi* au *Comment* des démarches interdépendantes



Histoire des idées sur l'origine de la vie

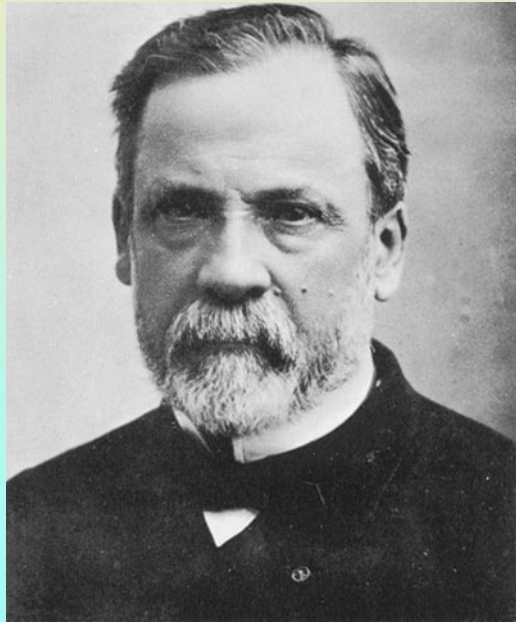
Histoire des idées

- **Avant le XVIII^e s : la question de l'origine n'est pas posée**
 - ▷ la vie a toujours existé
 - ▷ son commencement résulte d'une intervention divine
- **La génération spontanée**
- **Le vitalisme :**
 - ▷ La vie ne se réduit pas aux lois physico-chimiques
 - ▷ La vie est une propriété liée à la matière organique
 - ▷ Mais Friedrich Wöhler synthétise l'urée (1828).



Louis Pasteur

- **La génération spontanée n'existe pas**
 - ▷ le vivant vient du vivant



- **un siècle avant Pasteur : Spallanzani (1729-1799)**

XVIII^e-XIX^e s. : la science est mal à l'aise

■ Pas de génération spontanée

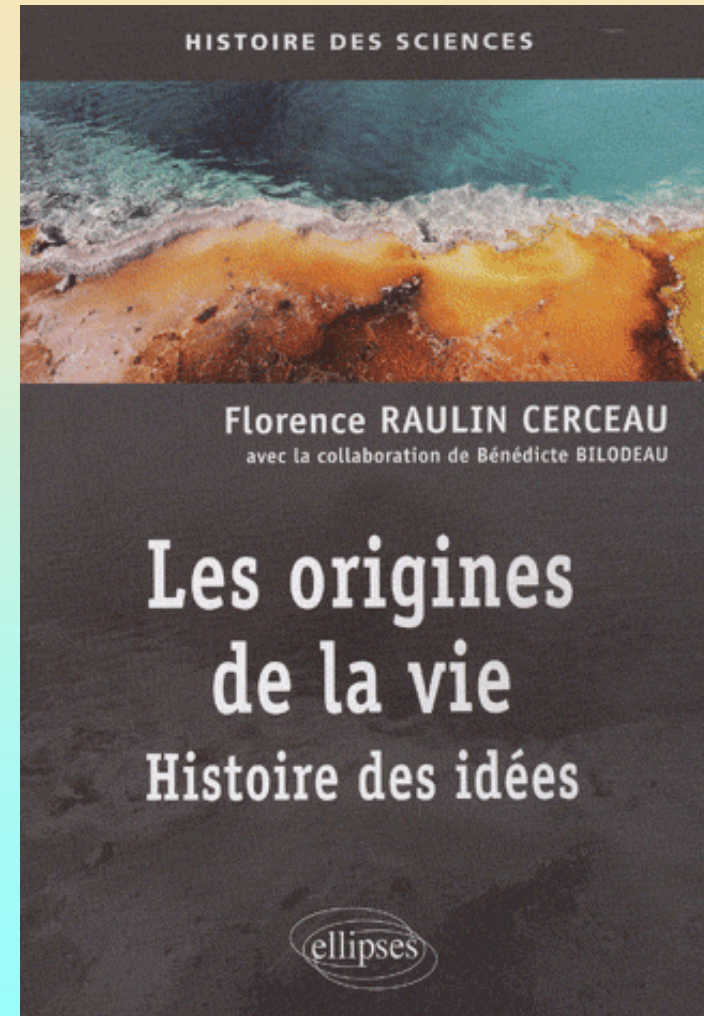


■ Il faut donc une origine à la vie...!

- ▷ (= un commencement)
- ▷ Panspermie ?
 - Berzelius (1779-1848)
 - Thomson (Kelvin) (1824-1907)
 - von Helmholtz (1821-1894)
 - Arrhenius (1859-1927)

■ Les hypothèses vitalistes en question

- ▷ la vie serait-elle "réductible"
à la physique et à la chimie ?



Origines de la Vie : Où, Quand ?

- Sur la Terre ?
- Ailleurs ?
 - ▷ "Panspermie"
 - ▷ déplacer la question de l'origine sans la résoudre



Origines de la Vie : Où, Quand ?

- **Sur la Terre ?**
- **Ailleurs ?**
 - ▷ "Panspermie"
 - ▷ déplacer la question de l'origine sans la résoudre
- **La vie n'a pas toujours existé**
 - ▷ ...au moins sous sa forme actuelle
 - Terre primitive "inhabitable"
 - avec le Big-Bang :
jeune univers (-13 Ga)
homogène, dense, très chaud
⇒ vie a priori impossible à son début

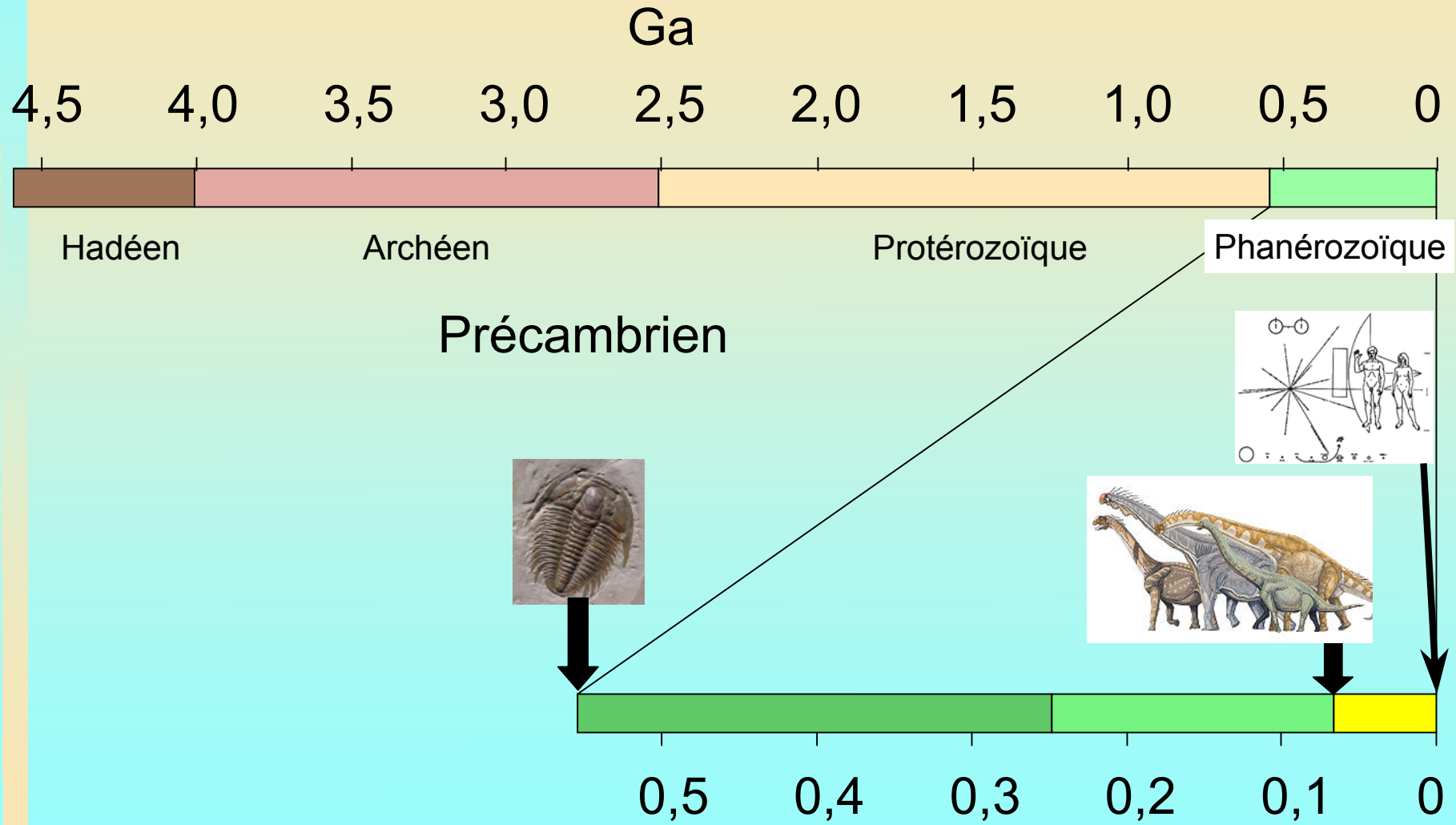


Origines de la vie / la Terre Primitive

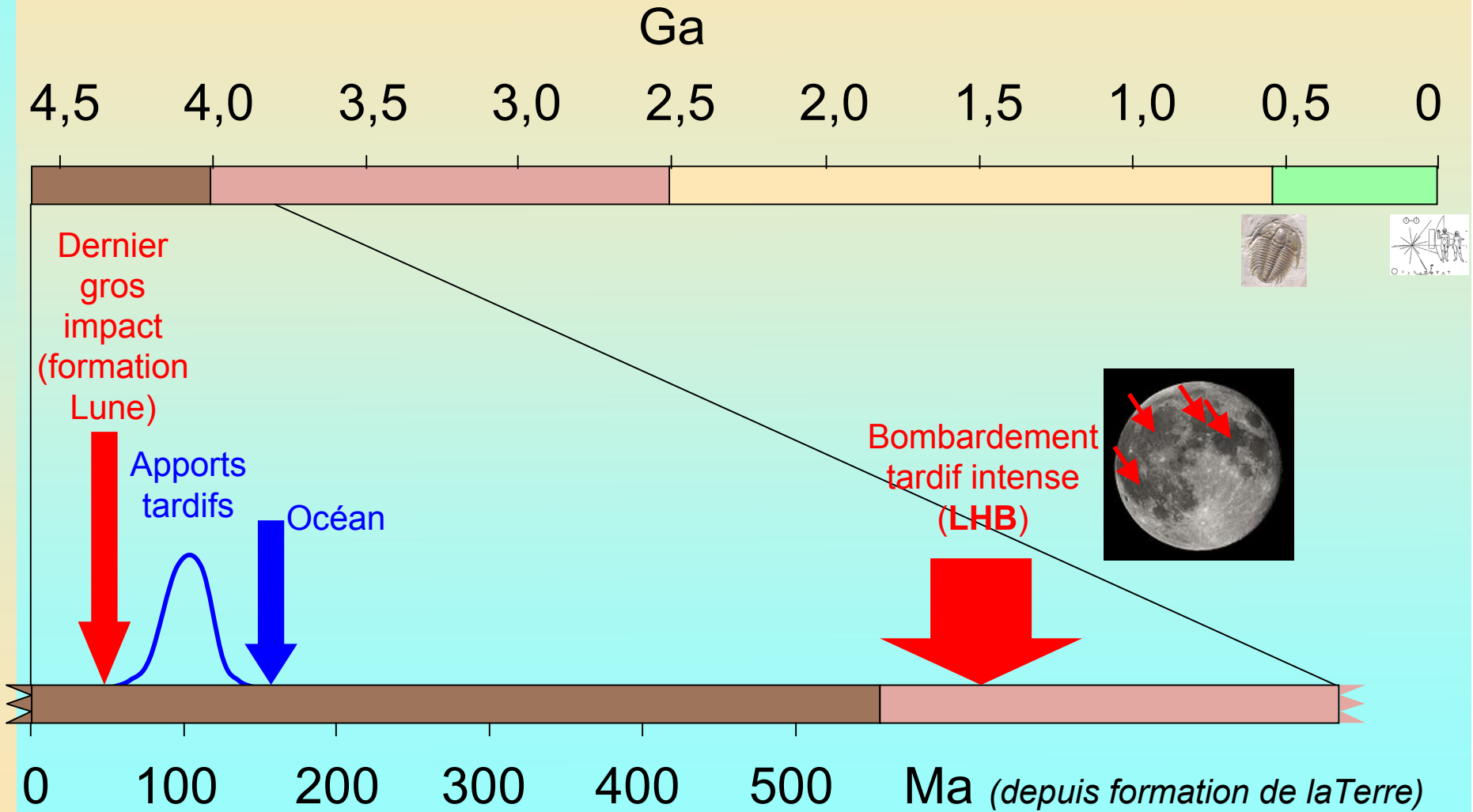
Quand ?

quelques repères chronologiques

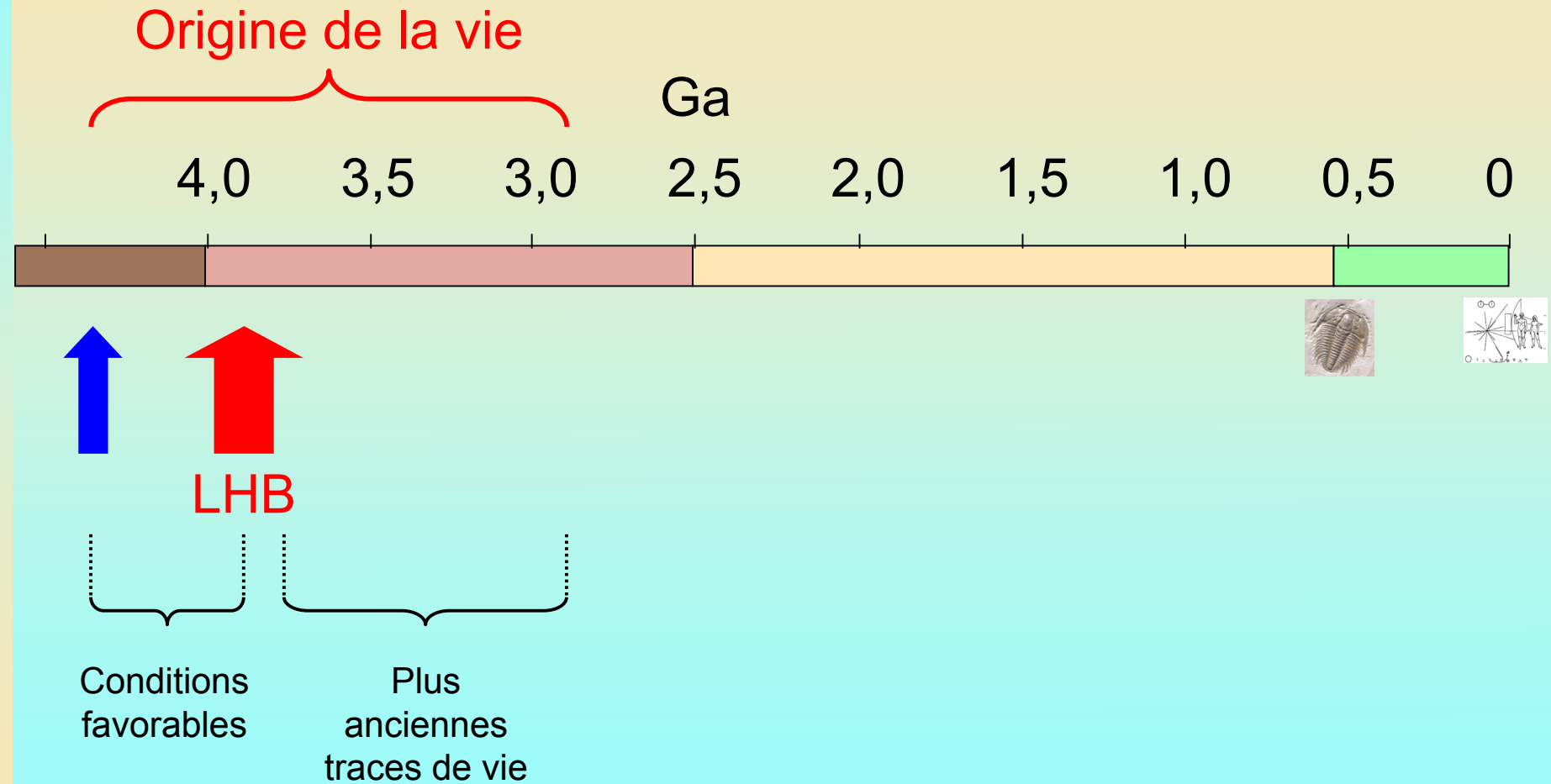
Histoire de la Terre



Formation de la Terre

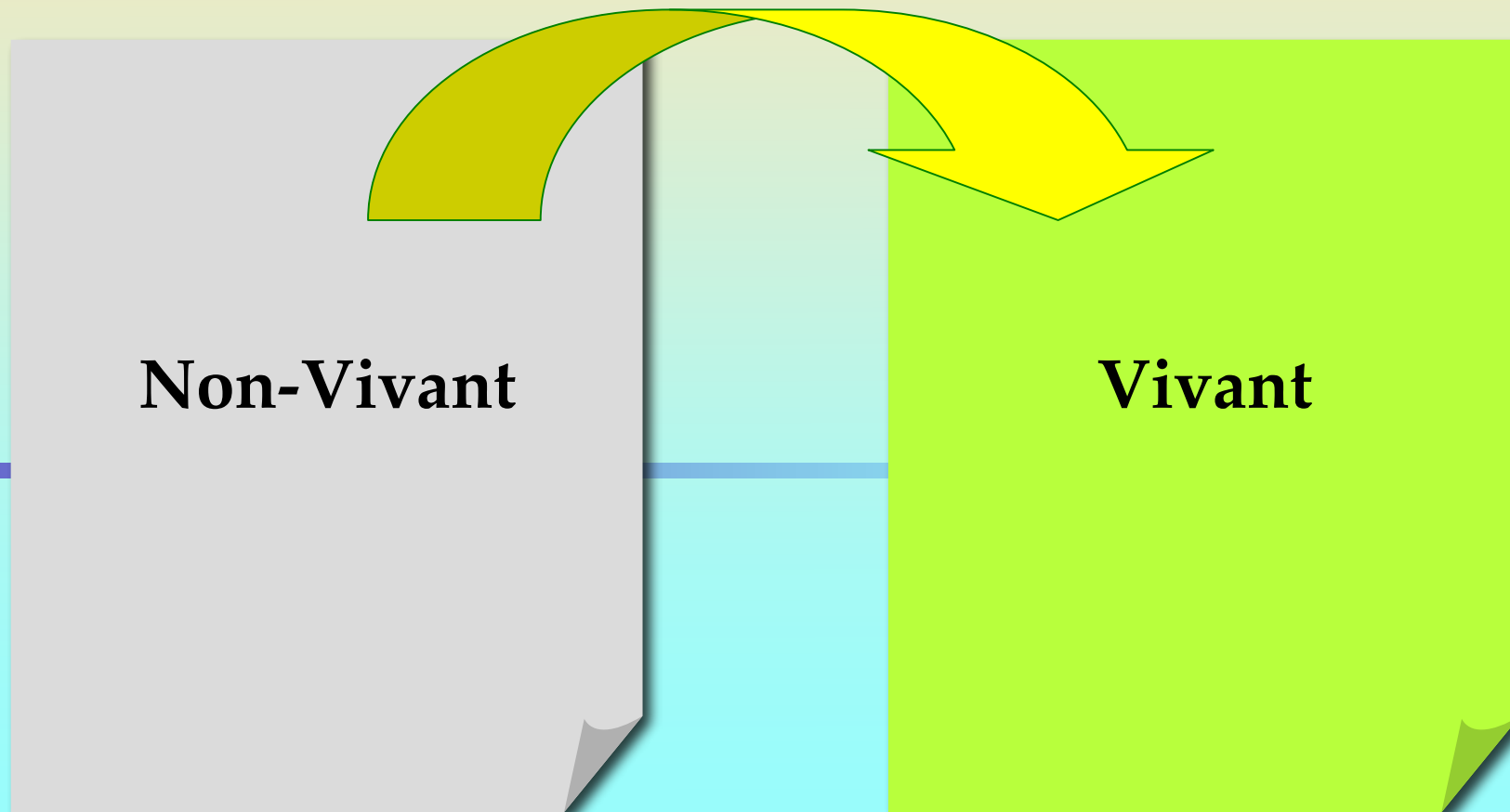


L'origine de la vie : Quand ?



Origines de la vie : Comment ?

La Transition du Non-Vivant au Vivant

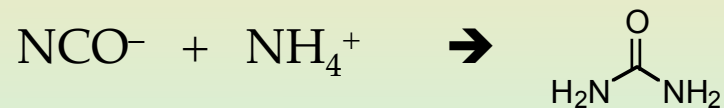


Chercher la matière organique ?



La matière organique

- Première synthèse artificielle d'une substance "organique" à partir de substances inorganiques : l'urée (Wolher, 1828)



- Une définition moderne

- ▷ "organique" \Leftrightarrow composé / chimie contenant carbone ET hydrogène
 - organiques : CH_4 , HCN , H_2CO ... (presque toutes les "biomolécules")
 - inorganiques : N_2 , CO_2 , NH_3 , H_2O , NaCl ...

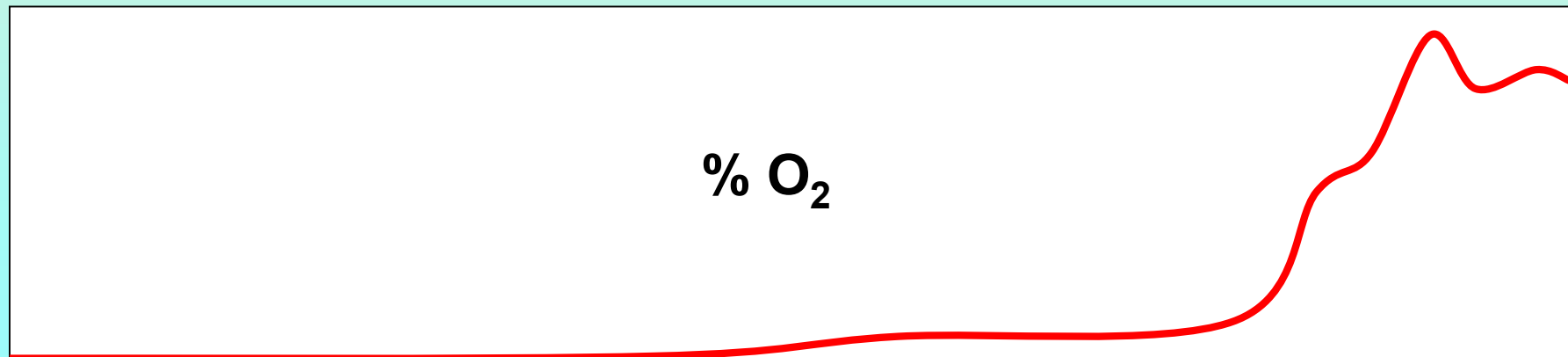
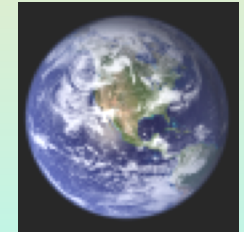
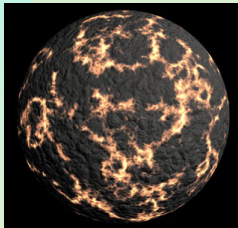
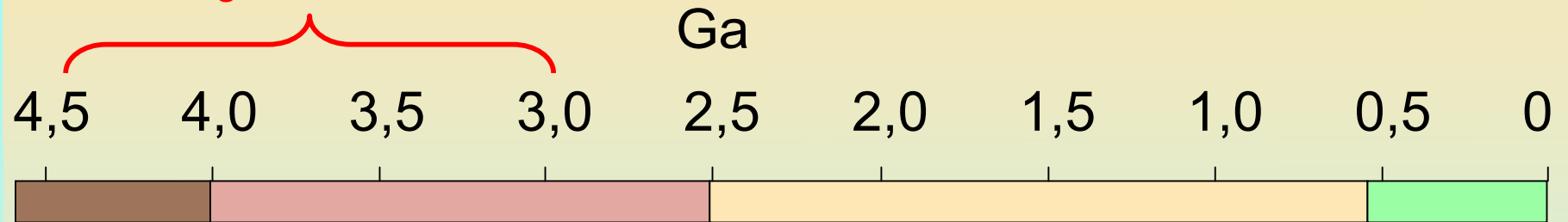
- A la surface de la Terre la matière organique est instable...

- ▷ car il y a de l'oxygène dans l'air
- ▷ qui est conséquence de la présence de vie



L'oxygène dans l'atmosphère terrestre

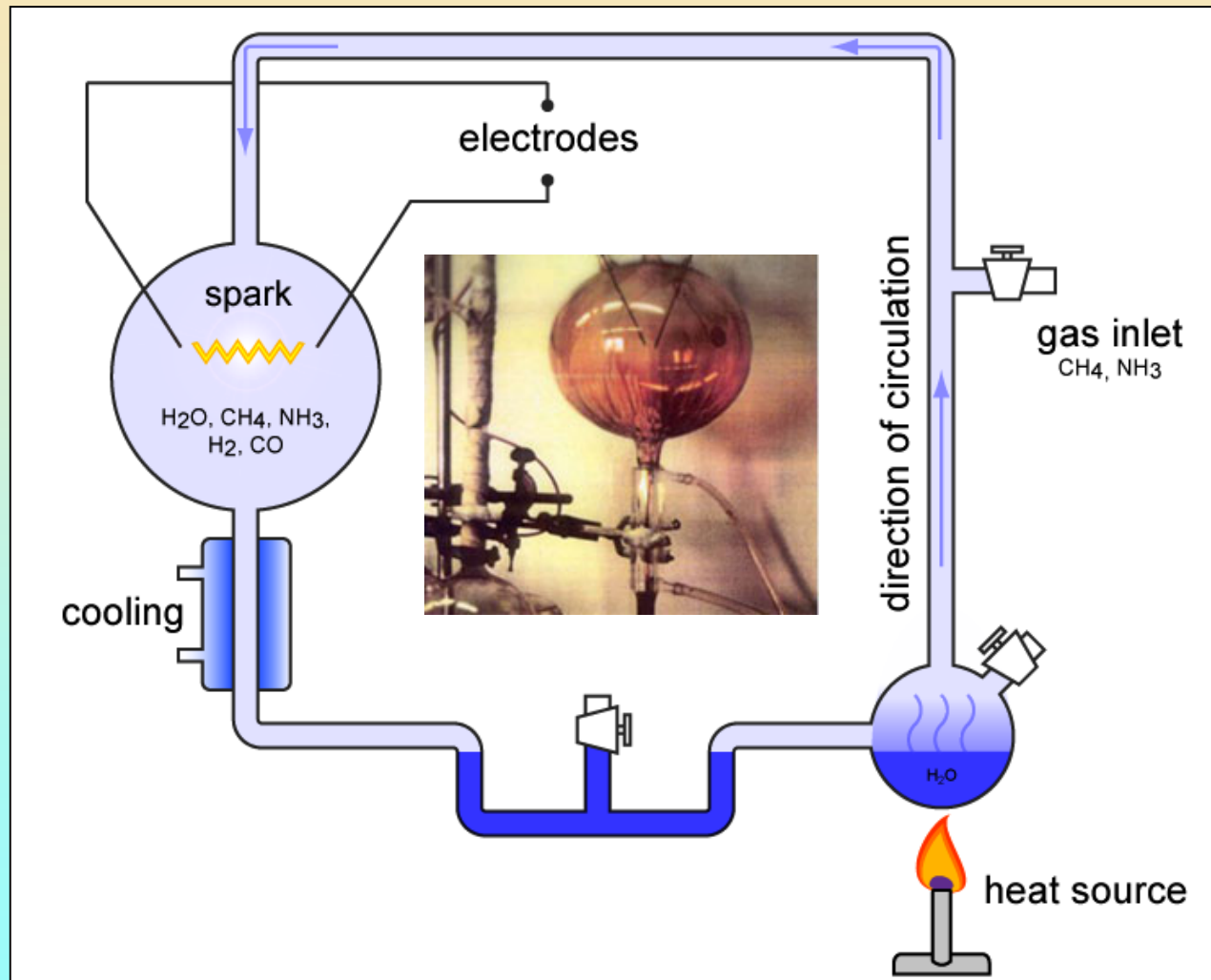
Origine de la vie



La matière organique et l'oxygène

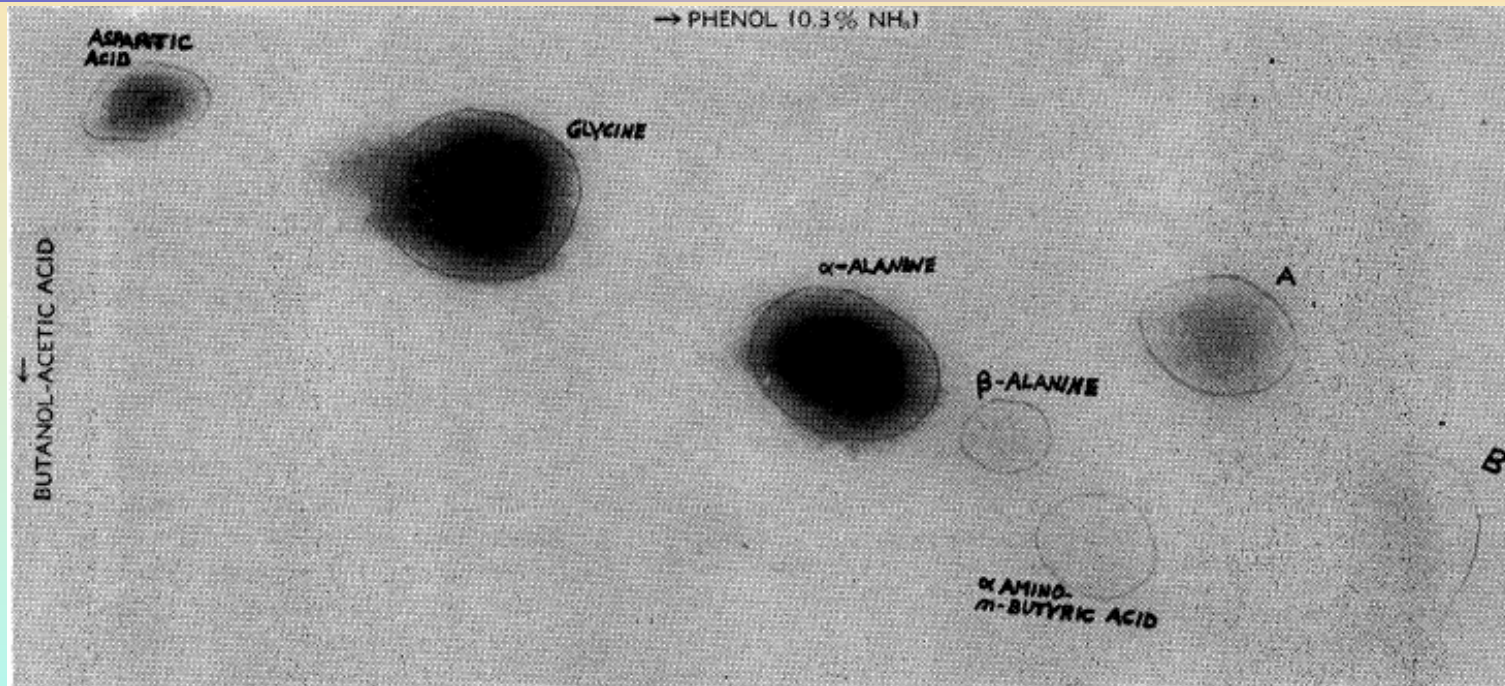
- La matière organique brûle à l'air (contenant O₂).
- Elle est instable en présence d'oxygène.
- La matière organique est moins instable en l'absence d'oxygène.
- **De la matière organique peut être formée sans l'intervention d'êtres vivants ?**

Formation de matière organique par activation d'une atmosphère "simple" : l'expérience Urey-Miller

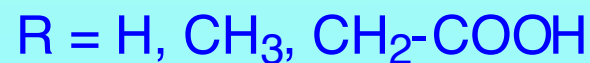
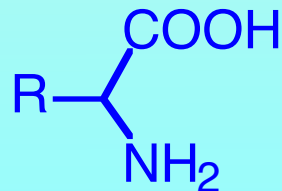


S. Miller Science, 1953

Formation de matière organique par activation d'une atmosphère "simple" : l'expérience Urey-Miller



Des acides α -aminés : glycine, alanine, acide aspartique



Miller Science, 1953

Composition de l'atmosphère primitive

- Atmosphère primitive à base de $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$.
- Mais à partir de mélanges contenant H_2/CH_4 en plus des espèces précédentes, la formation de matière organique devient possible par activation (e.g. décharges électriques).
- On trouve de la matière organique d'origine abiotique presque partout dans l'univers...

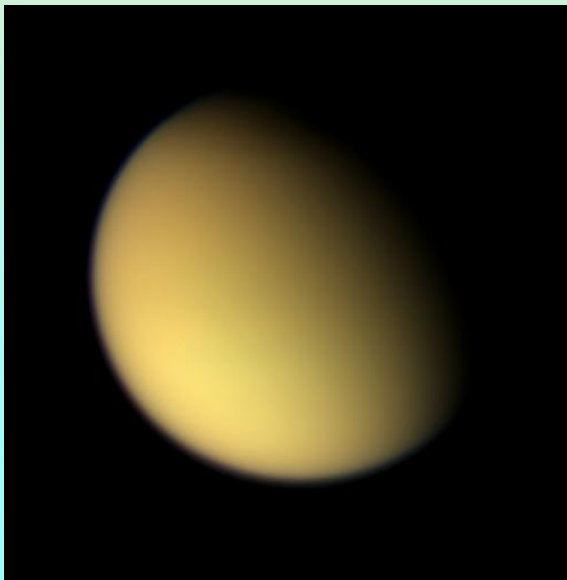
...mais très peu sur la Terre actuelle.



Dans l'espace



Dans les comètes

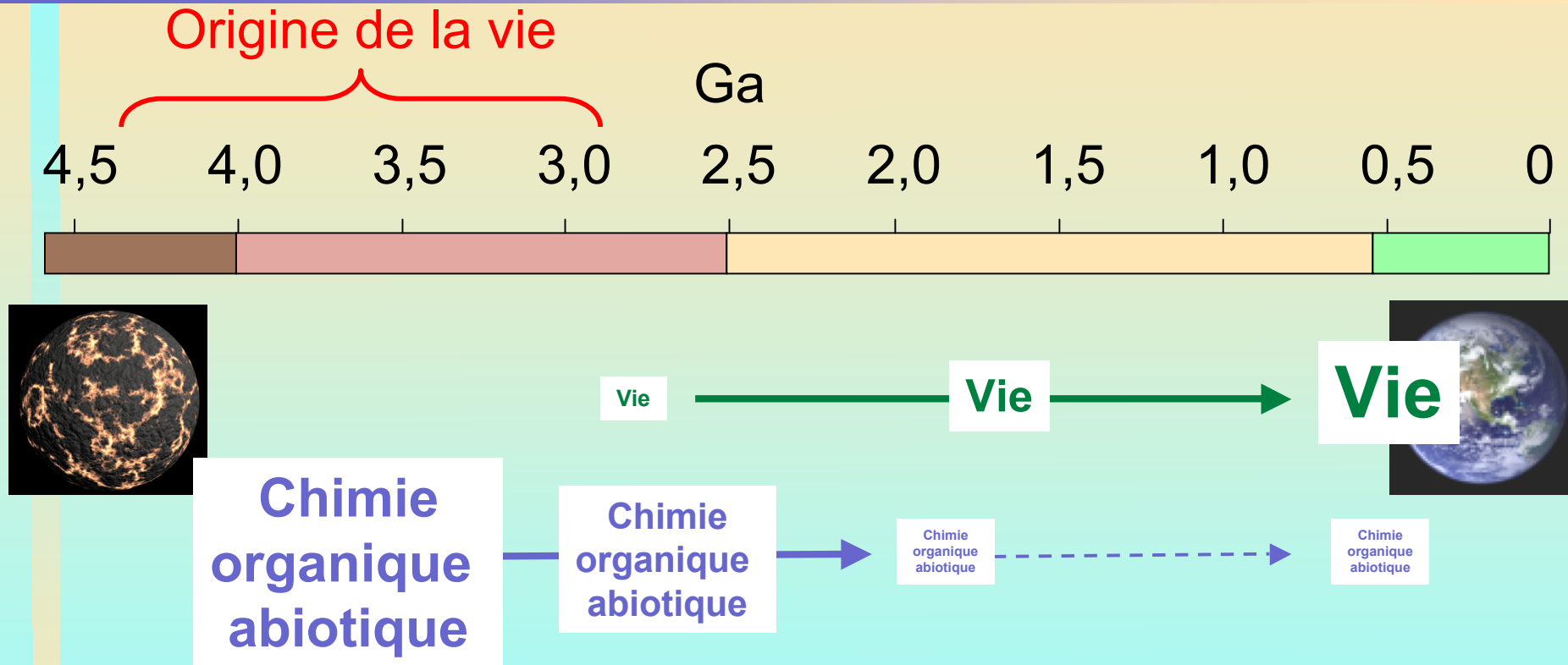


Sur Titan



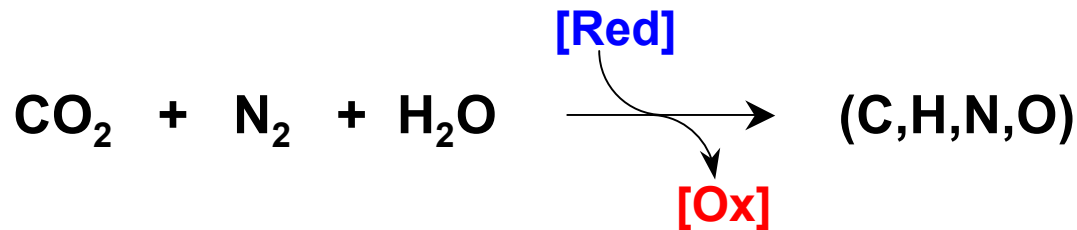
Dans les météorites

De la matière organique sur la Terre

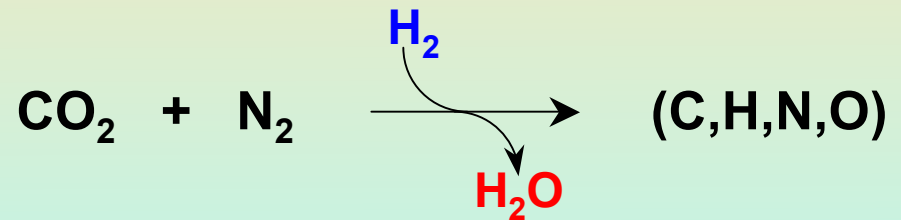


- **On trouve de la matière organique d'origine abiotique presque partout dans l'univers (et beaucoup) ...mais très peu sur la Terre actuelle !**
 - ▷ *...C'est parce que la vie a transformé (oxydé) la surface de la Terre que vivant et matière organique nous semblent associés*

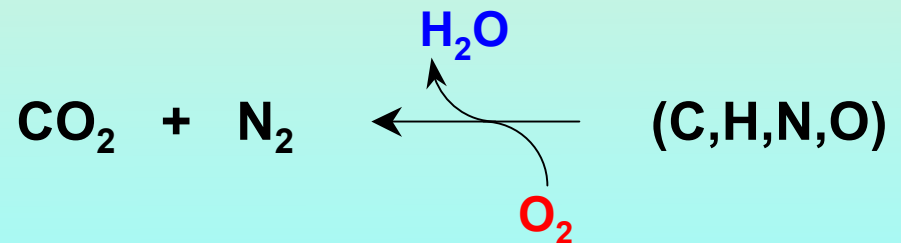
La vie terrestre a rendu les composés organiques instables



- Milieu fortement réduit :



- Milieu fortement oxydant :



$$\Delta_f G^\circ(\text{H}_2\text{O}) = -237 \text{ kJ/mol}$$

De la matière organique "abiotique" sur la Terre

Formation dans
l'atmosphère
primitive

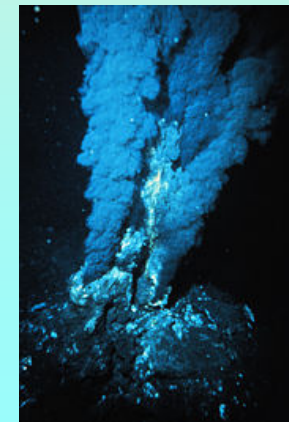


Formation dans
l'espace



Chimie
organique
abiotique

Sources
minérales
d'énergie
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$



Caractéristiques du Vivant

Non-Vivant :

Chimie
Inorganique
(minérale)
+
Chimie Organique

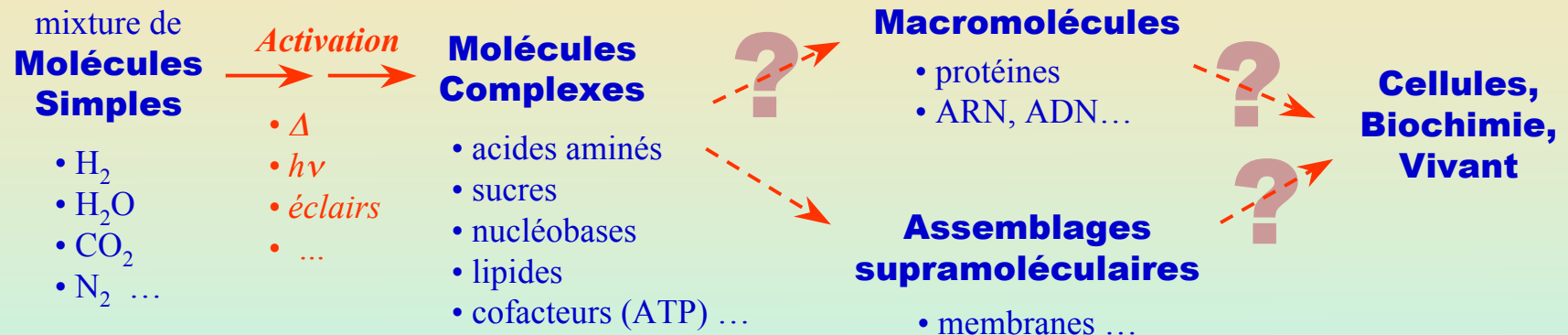
Vivant :

Chimie
Organique
+
Chimie Inorganique
(minérale)

▷ ...La séparation chimie inorganique / chimie organique n'est pas stricte !

Des stades dans l'émergence du vivant ?

L'hypothèse d'évolution chimique prébiotique

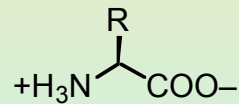


Formation prébiotique des briques du vivant

■ "Soupe primitive" : HCHO, HCN, H₂N-CN, HCC-CN, HNCO...

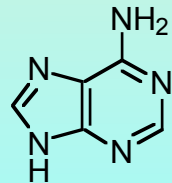
▷ Acide α-aminés

- (réaction de Strecker)



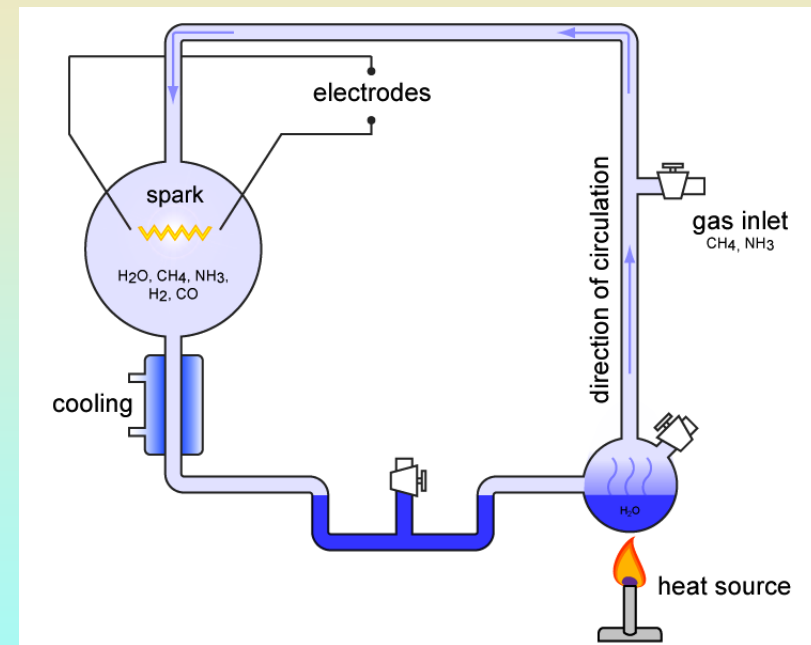
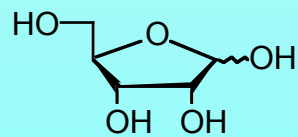
▷ Bases nucléiques

- (oligomérisation d'HCN)



▷ Sucres

- (réaction de Formose)

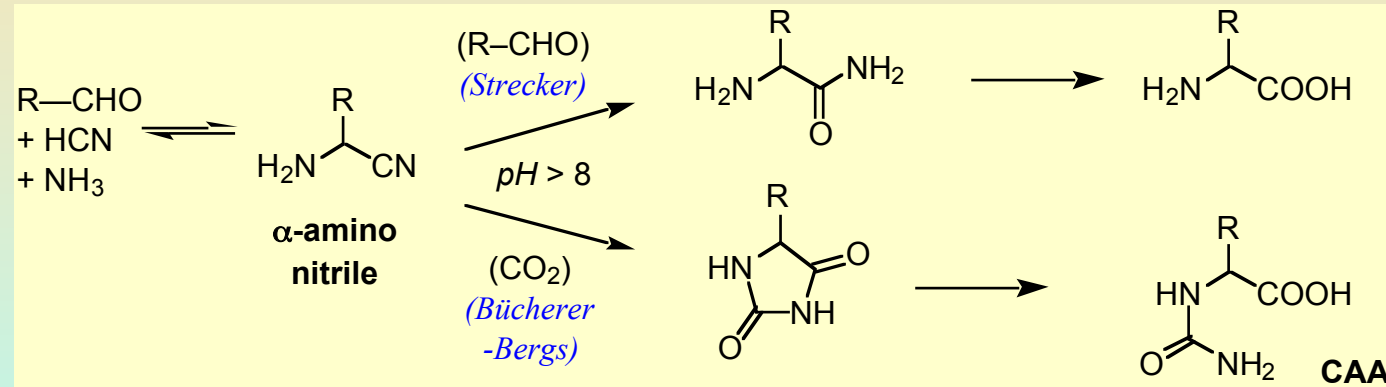


S. Miller (1953)

La formation des briques les acides aminés, vers les peptides

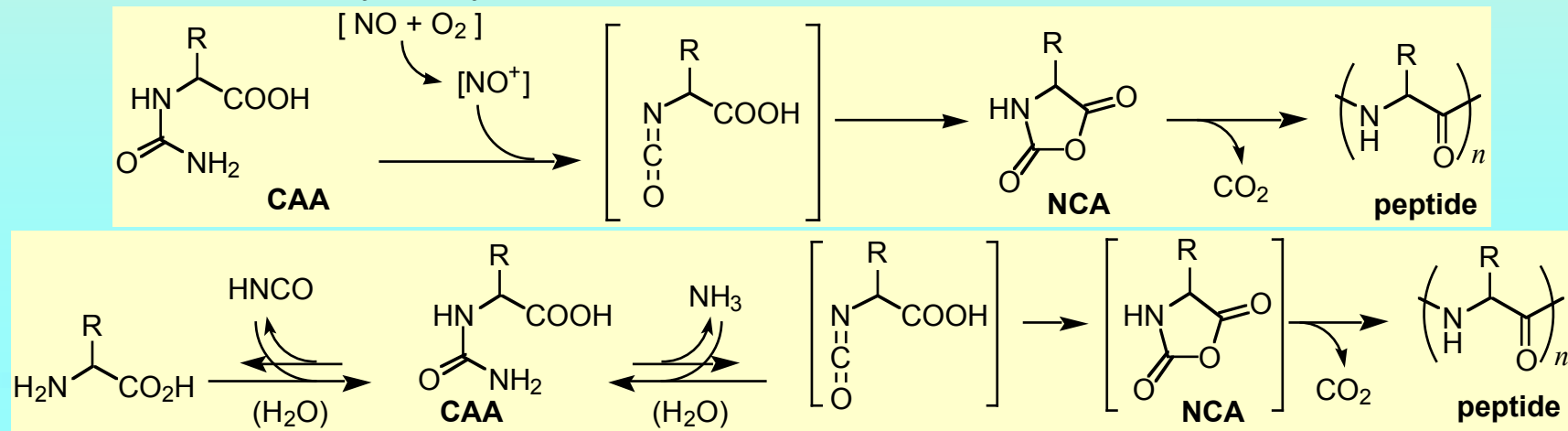
■ Les réactions de Strecker (1850) et de Bücherer-Bergs (1930)

▷ catalyse possible par les composants du milieu : aldehydes / cétone / CO_2

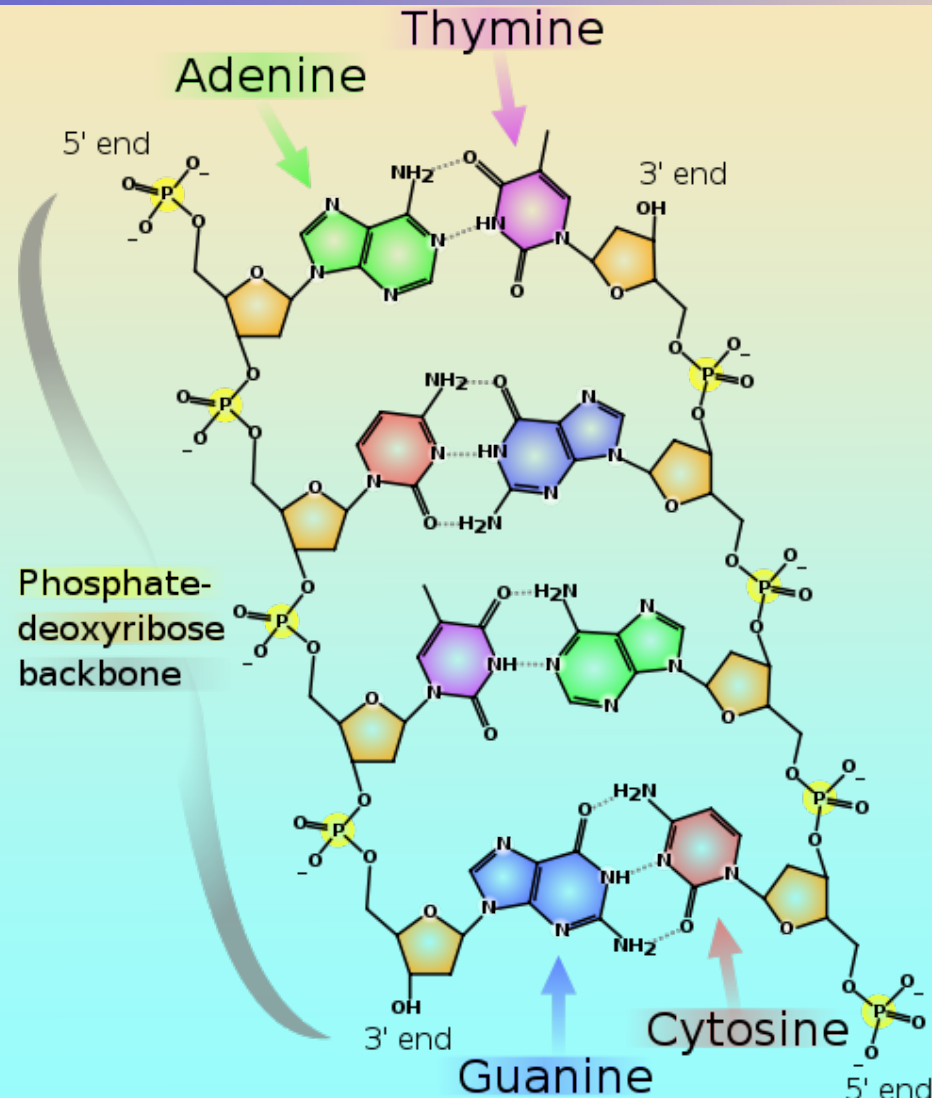


■ Des acides aminés vers les peptides

▷ les *N*-CarboxyAnhydrides d'acides aminés (NCA)



Acides nucléiques : le "Graal" de la chimie prébiotique



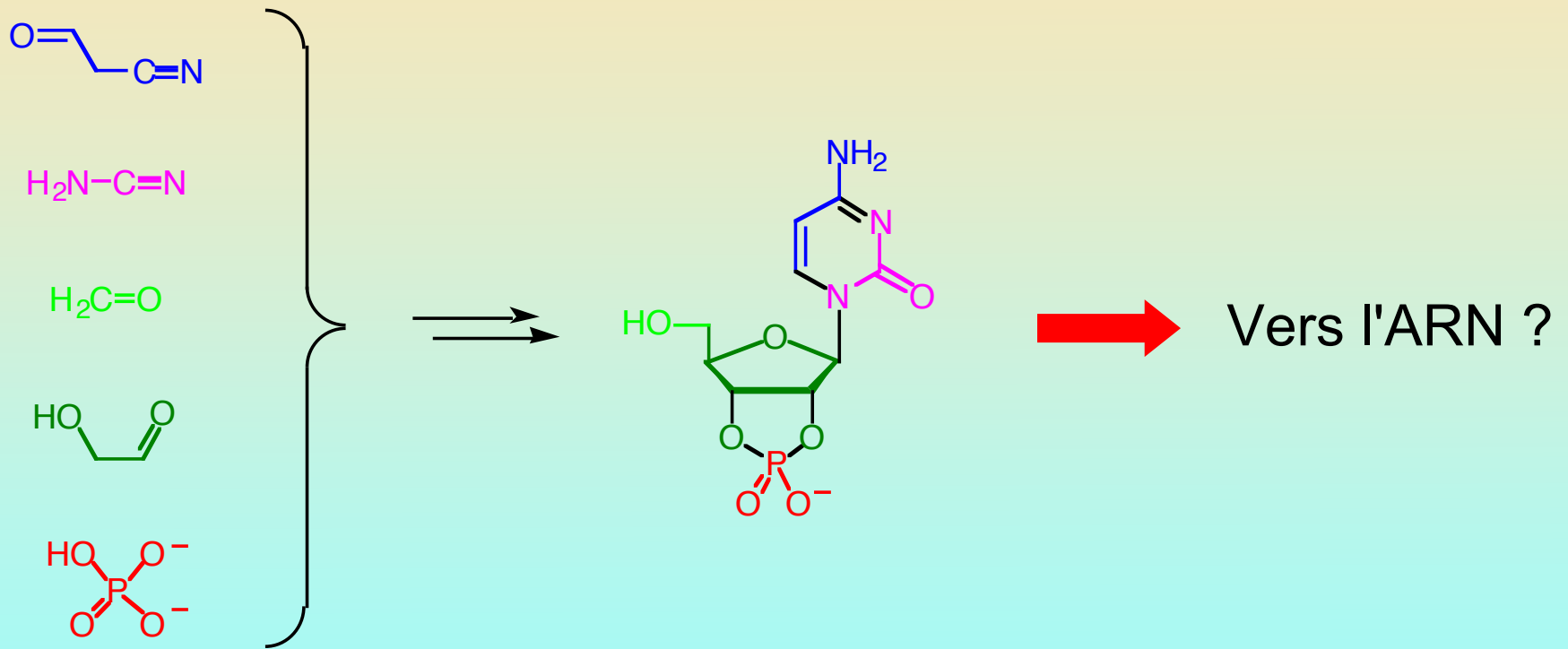
■ En 1987

▷ "Aucune raison d'être optimiste sur une possibilité prochaine de former les acides nucléiques de façon prébiotique."
(G. Joyce, L. Orgel)

■ ...et en 2011 ?

la formation des briques

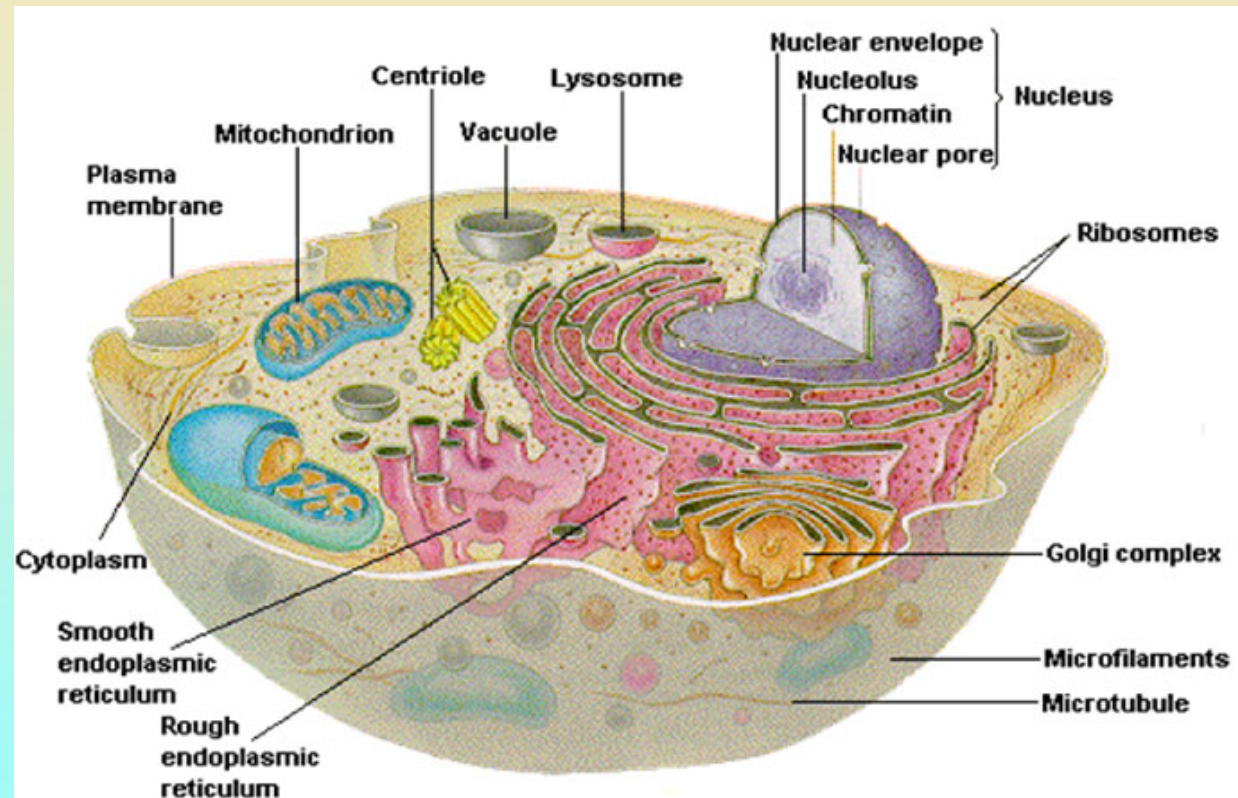
Une avancée récente vers les ribonucléotides



Sutherland et coll. *Nature*, 2009

Caractéristiques du Vivant

- Morphologie : organisation, complexité...



- ...comment traduire cela du point de vue de la chimie ?

D'où vient l'organisation ?

Caractéristiques du Vivant (suite)

Des chimies différentes

Non-Vivant :

- À l'équilibre :
 - ▷ Aucune évolution possible
 - Près de l'équilibre :
 - ▷ Comportement statistique des molécules.
 - ▷ États stationnaires stables
 - Loin de l'équilibre :
 - ▷ Possibilités de comportements non-linéaires, évolution parfois périodique ou chaotique
- ▷ chimie en général a-historique

Vivant :

- Hors-équilibre persistant :
 - ▷ Certaines molécules doivent être considérées **individuellement** (porteurs d'information) et **traitées de manière non statistique**.
 - ▷ Les molécules individuelles se comportent comme dans une collectivité :
 - ▷ partageant un **destin commun**
 - ▷ définissant le **soi** (la collectivité formant l'organisme individuel) et le **non-soi** (le reste) par l'émergence de frontières
- ▷ ...processus historique

Interroger les origines ?

La chimie ne connaît pas l'histoire, mais la statistique

■ Histoire : des destins le plus souvent uniques

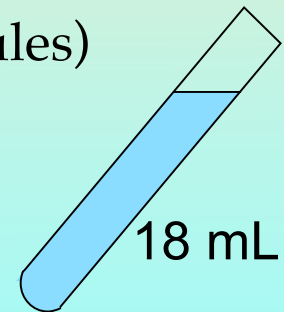
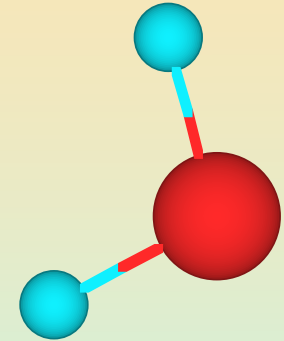
- ▷ difficilement reproduits
- ▷ le rôle souvent important du hasard (*contingence*)

■ Chimie : la loi des grands nombres

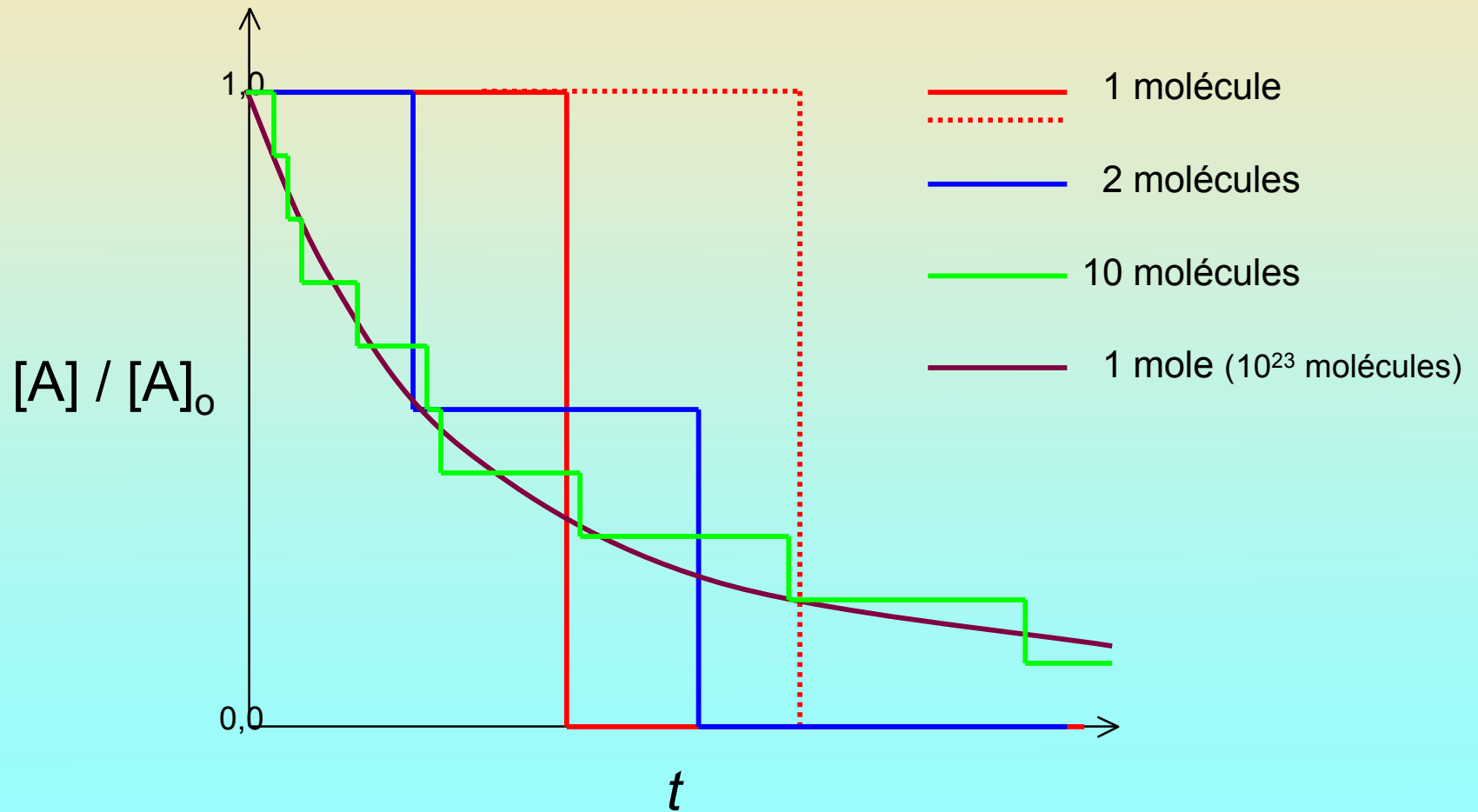
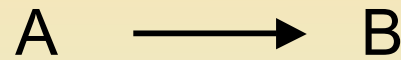
- ▷ échelle de temps des événements individuels **très courte** (10^{-12} s)
- ▷ Pas d'intérêt pour le **destin individuel** d'une molécule, mais pour une **mole** (population de $N_A \approx 6 \times 10^{23}$ molécules)
- ▷ Observe un comportement collectif :
 - prévisible / répétable / reproductible

■ Temps de l'histoire \neq Temps de la réaction chimique

■ ...La chimie n'est pas une science historique !

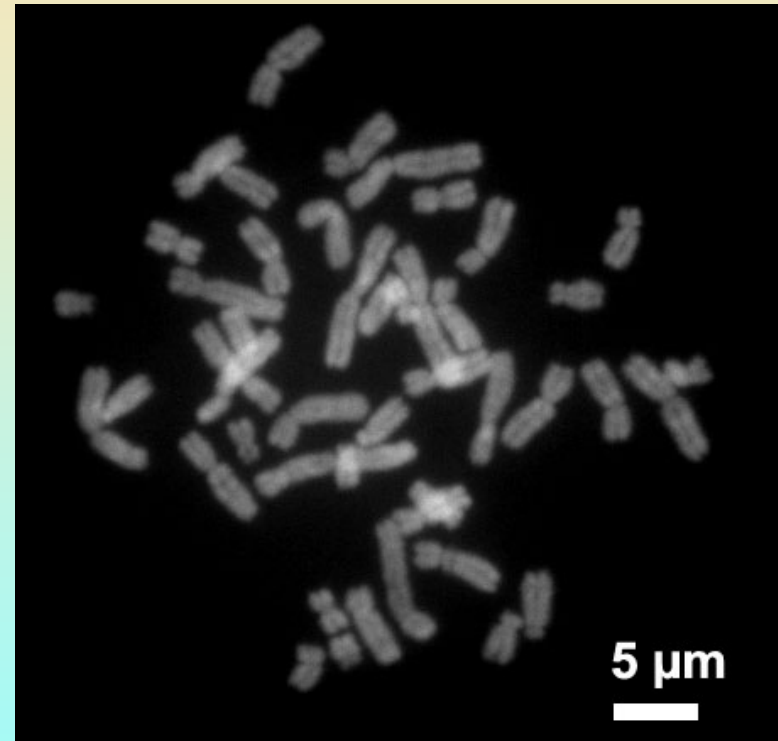


Le déroulement des réactions chimiques



Le vivant échappe à la description statistique

- Un nombre limité pour certaines molécules du vivant.
- Le vivant échappe aux descriptions physico-chimiques traditionnelles.

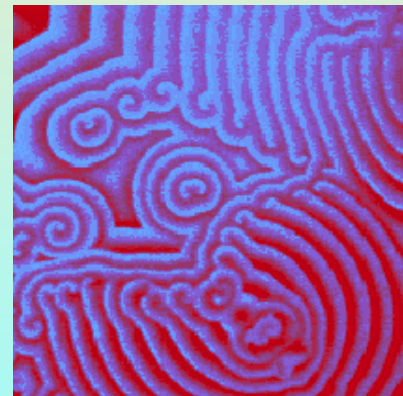
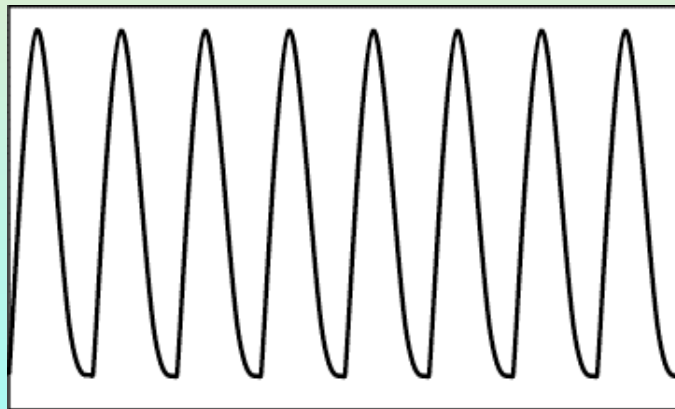


"Quand la chimie est devenue histoire naturelle"

Chimie : des exceptions à la description statistique

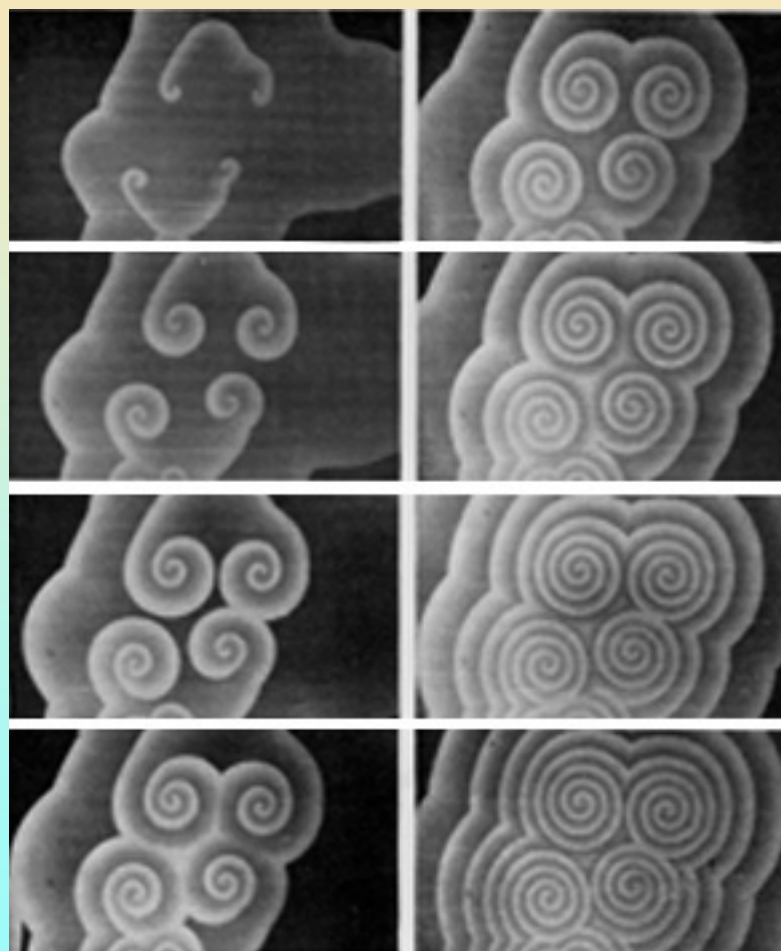
■ Réactions chimiques oscillantes

- ▷ (e.g. Belousov-Zhabotinsky, Briggs-Rauscher)
- ▷ apparition spontanée de comportements chaotiques ou d'inhomogénéités dans l'espace



■ Les êtres vivants

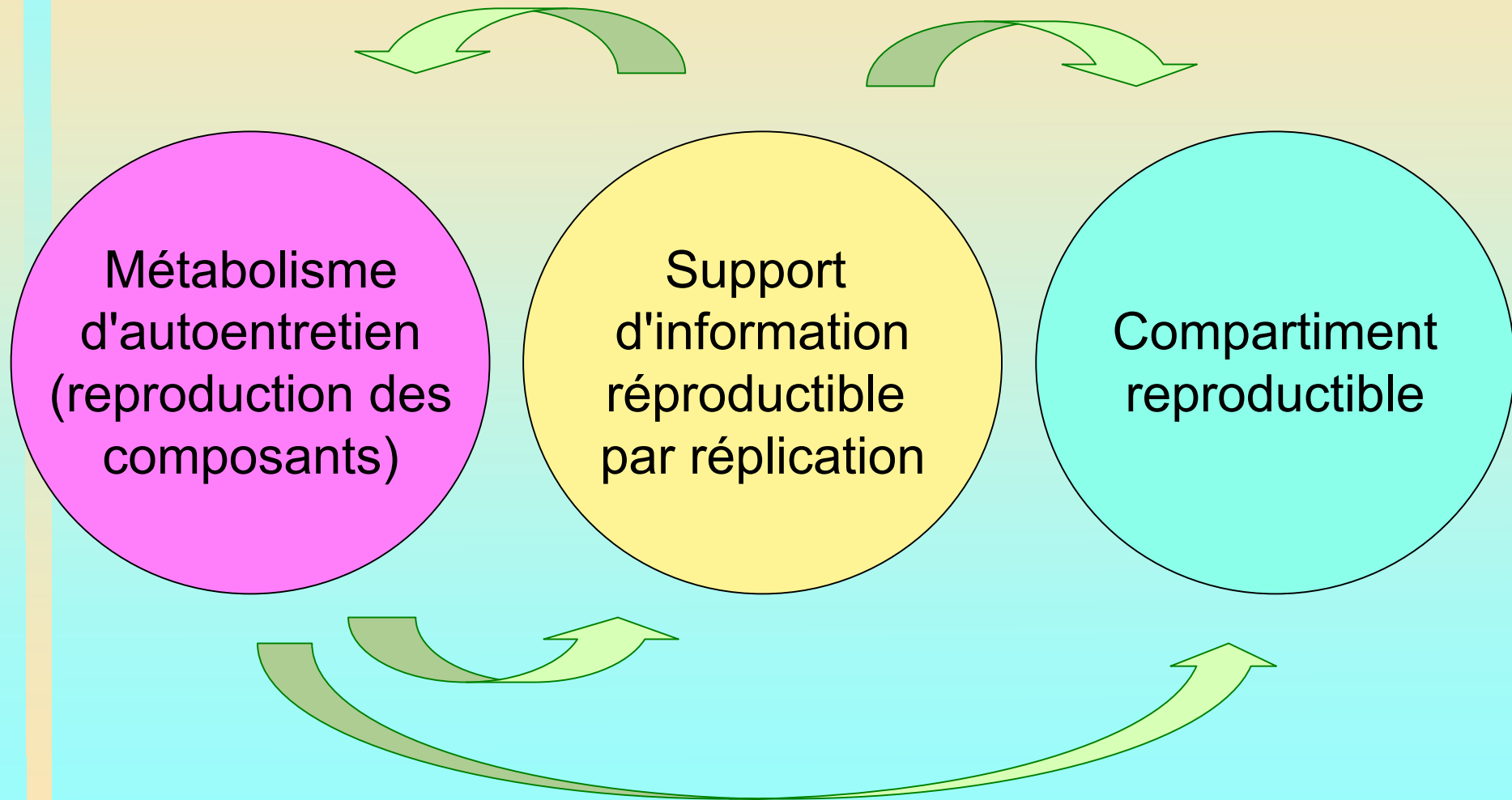
Reactions oscillantes / Vagues chimiques



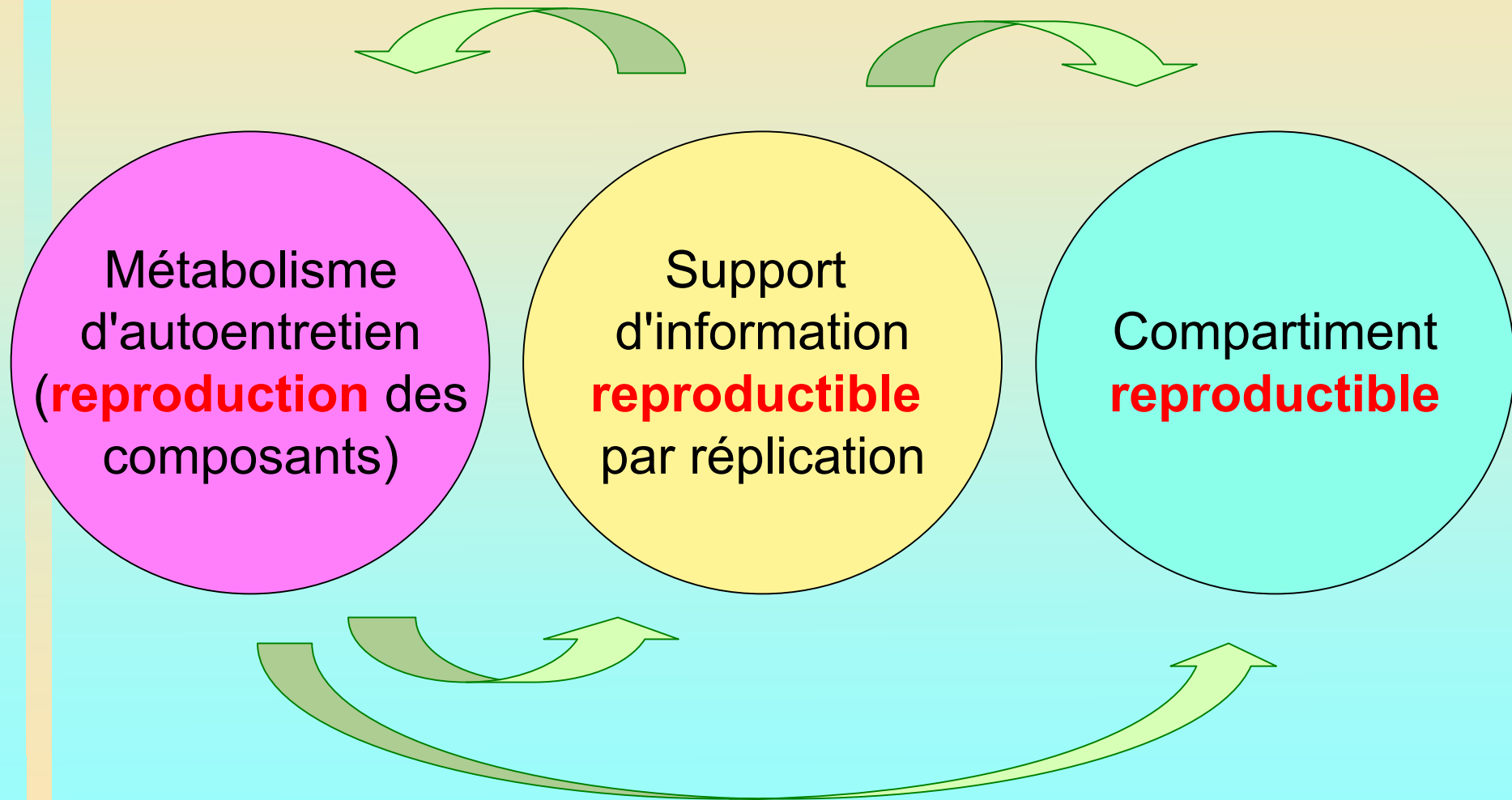
Vers une chimie des systèmes (*systems chemistry*)

- beaucoup de composants → gérer la complexité
- échanges d'énergie et/ou de matière avec l'environnement
 - ▷ "systèmes ouverts"
- plusieurs échelles d'organisation imbriquées (sous-systèmes)
 - ▷ organisation spatiale
 - ▷ plusieurs échelles de temps
- des processus "autocatalytiques"
 - ▷ "reproduction" / "réplication"
- Un "miroir" de la "biologie synthétique"

Caractères Essentiels du Vivant



Caractères Essentiels du Vivant



Le pouvoir de la reproduction



Le pouvoir de la reproduction

0

1

2

...

80

$$1 = 10^0$$

$$10 = 10^1$$

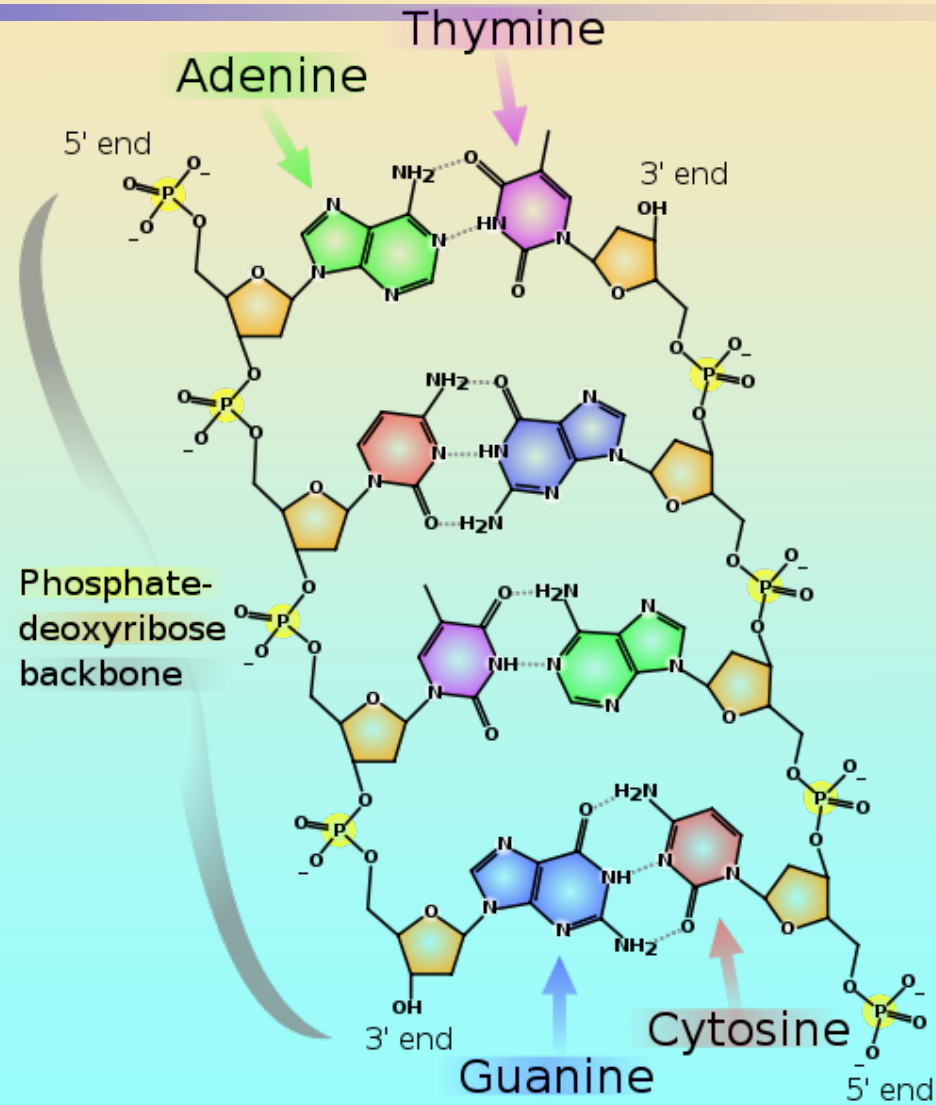
$$100 = 10^2$$

...

$$10^{80}$$



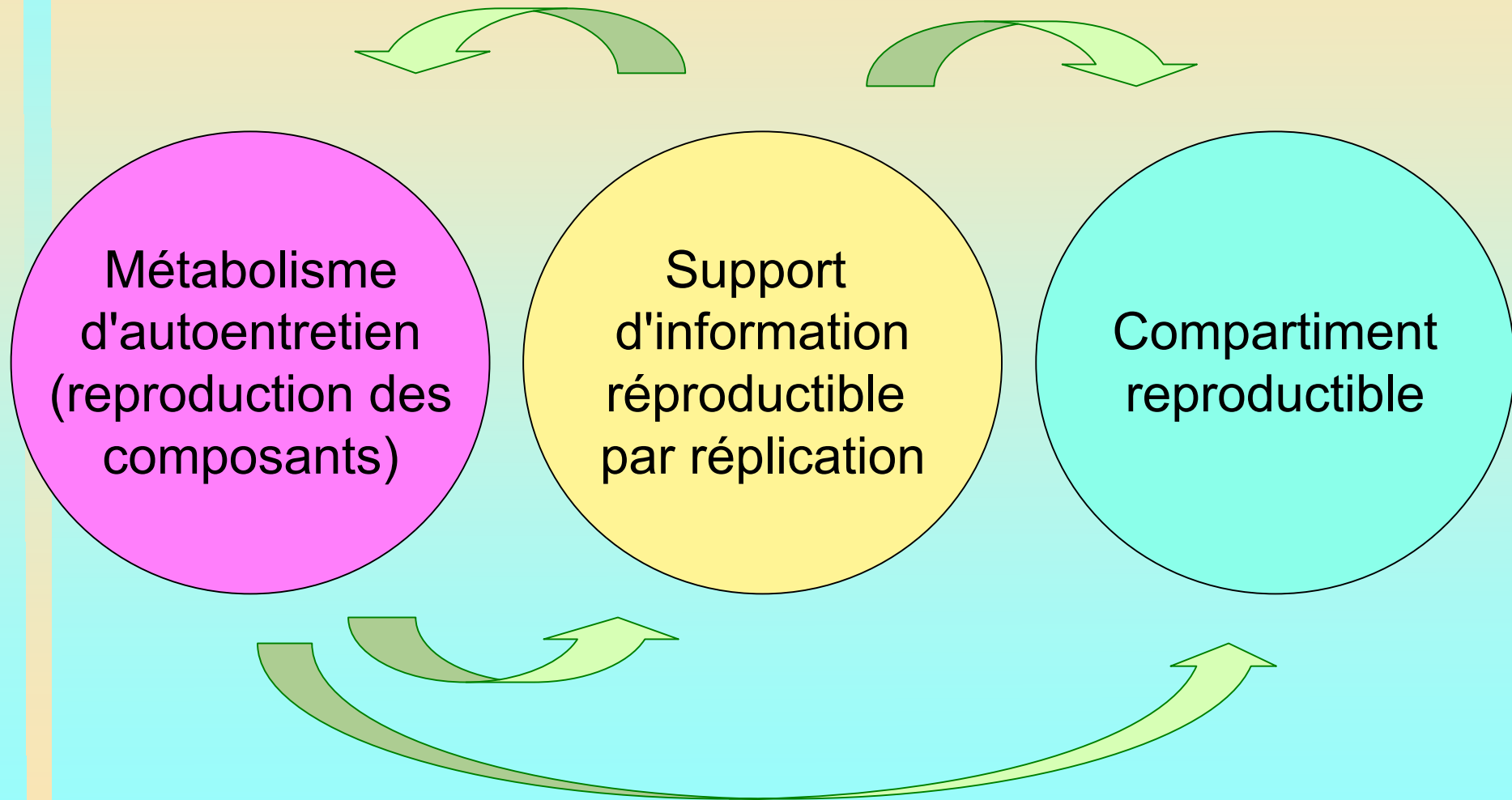
Réplication chimique



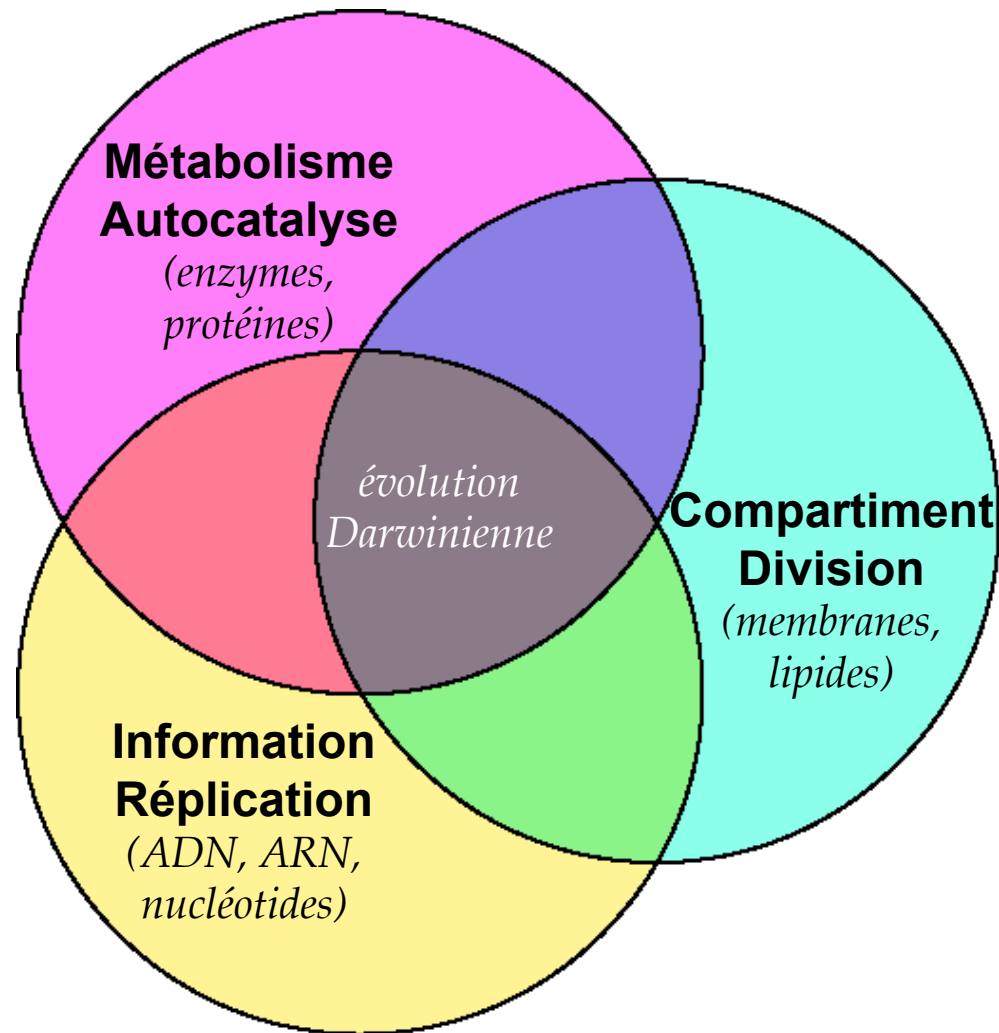
La réplication, c'est de l'auto-catalyse !



Caractères Essentiels du Vivant



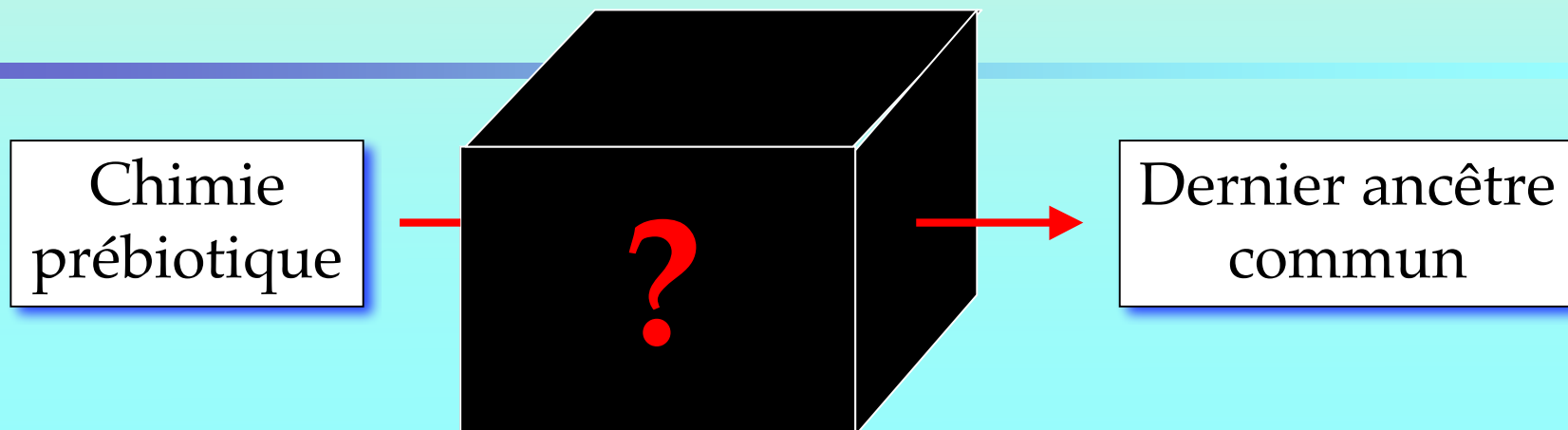
Des scénarios d'émergence du vivant ?



- Métabolisme d'abord ?
- Porteur d'information génétique d'abord ?
- Membrane de confinement d'abord ?
- ...Co-évolution ?

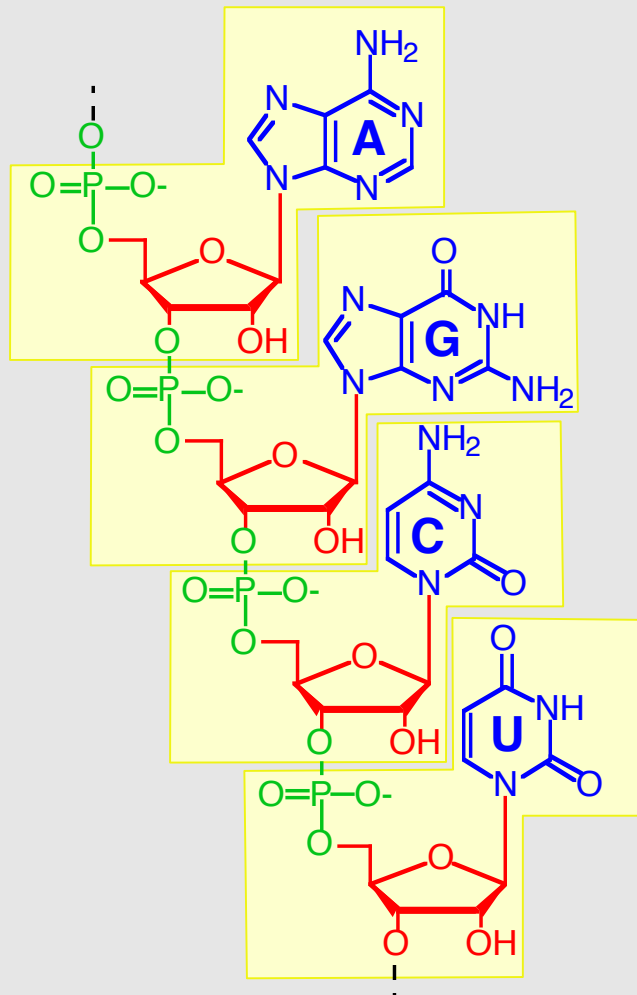
Transition du non-vivant au vivant : Comment ?

Trouver un ou des scénarios crédibles ?
Hasard ou force motrice ?



Un exemple : le scénario du monde d'ARN

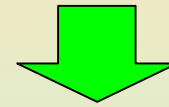
L'hypothèse d'un monde d'ARN



ARN :

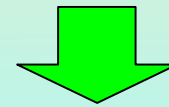
Acide ribonucléique

Nucléotides

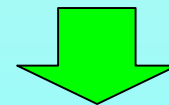


ARN

(polymères de nucléotides)



Apparition de la membrane
et de la traduction



Cellule

Information +
Propriétés catalytiques
=
Sélection + Évolution

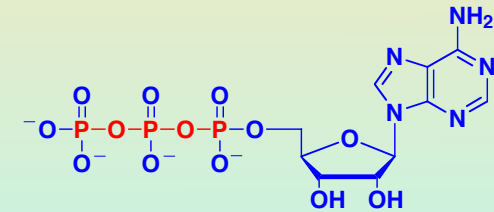
L'hypothèse du monde d'ARN

■ Transfert d'information génétique assuré par la réplication de l'ARN

- ▷ Synthèse plus tardive des désoxyribonucléotides (ADN)

■ Pas de rôle catalytique des protéines codées

- ▷ Nature nucléotidique de nombreux coenzymes
- ▷ ARN catalytiques (ribozymes)
 - Fonctionnement de la machinerie de traduction
 - Le ribosome est un ribozyme (Nissen et al. *Science* 2000)



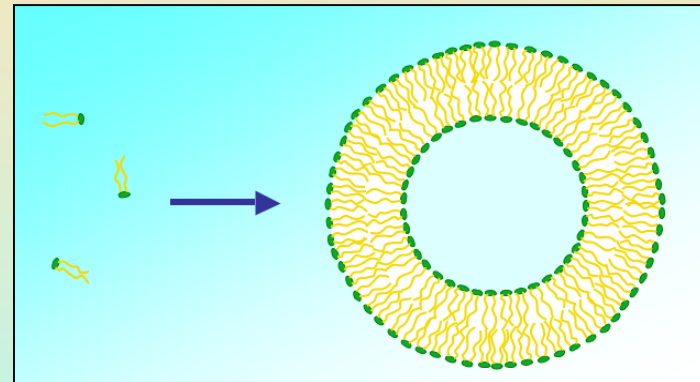
Adénosine triphosphate (ATP)

■ ...Un monde d'ARN seul ?

- ▷ un rêve de biologiste (l'ARN fait tout)
- ▷ un cauchemar de chimiste (précurseurs ? efficacité ?)

Émergence de compartiments

■ Auto-association des composants du système



- Formation spontanée de vésicules (liposomes)
- Formation prébiotique des lipides ?
 - ▷ réaction de type Fischer-Tropsch ?
- Membranes minérales ?
- Métabolisme de surface ?

Énergie et métabolisme

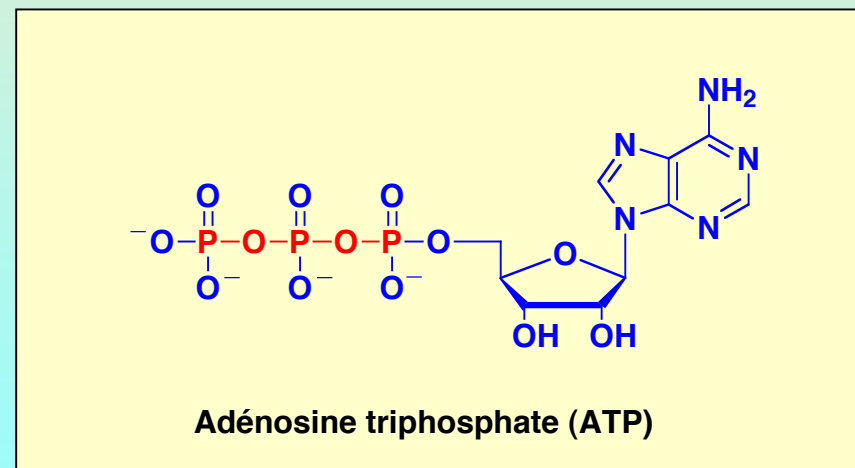
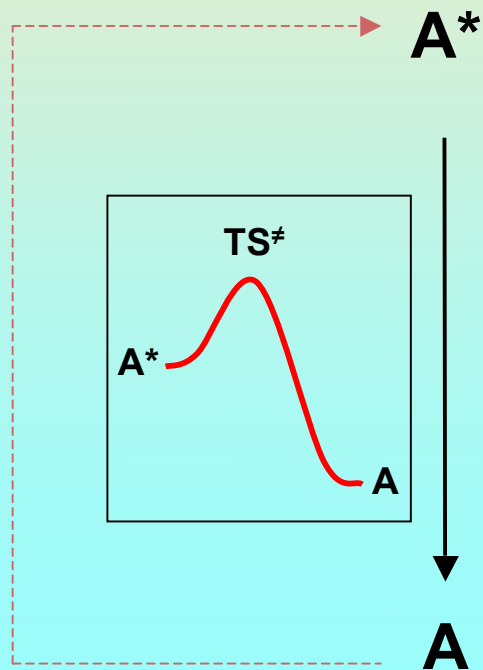
Énergie / Métabolisme

- **Auto-entretien : processus de synthèse et de recyclage des composants de l'organisme**
 - ▷ Le vivant a besoin d'énergie

- **Toute forme de métabolisme requiert :**
 - ▷ La possibilité de transférer de l'énergie depuis une ou des *sources d'énergie* chimique vers des intermédiaires réactionnels
 - *sources* : $h\nu$, potentiel redox, composé activé, chaleur...
 - ▷ La possibilité de distribuer l'énergie à différents processus via des *transporteurs d'énergie*

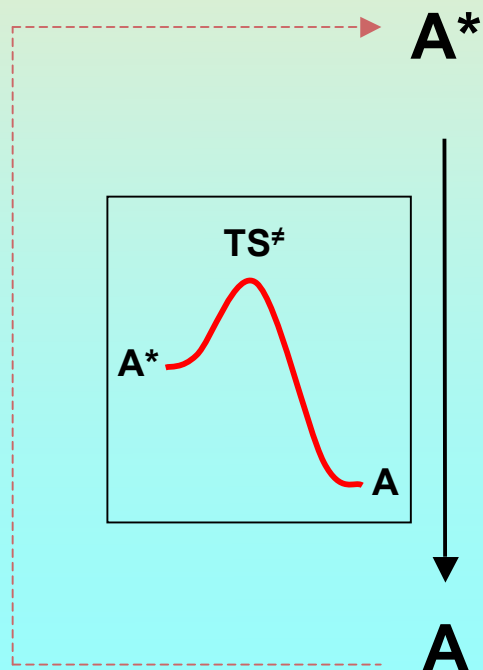
Sources d'Énergie / Transporteurs d'Énergie

- **Transporteur d'énergie** : un réactant (ou système de réactants) dans une concentration loin de l'équilibre par rapport aux produits de réaction **ET** protégé de la désactivation spontanée (séparé des produits) par une barrière cinétique.

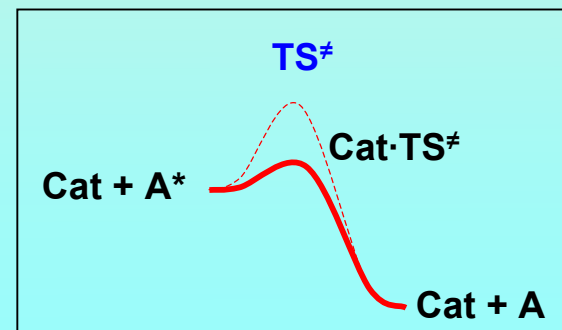


Sources d'Énergie / Transporteurs d'Énergie

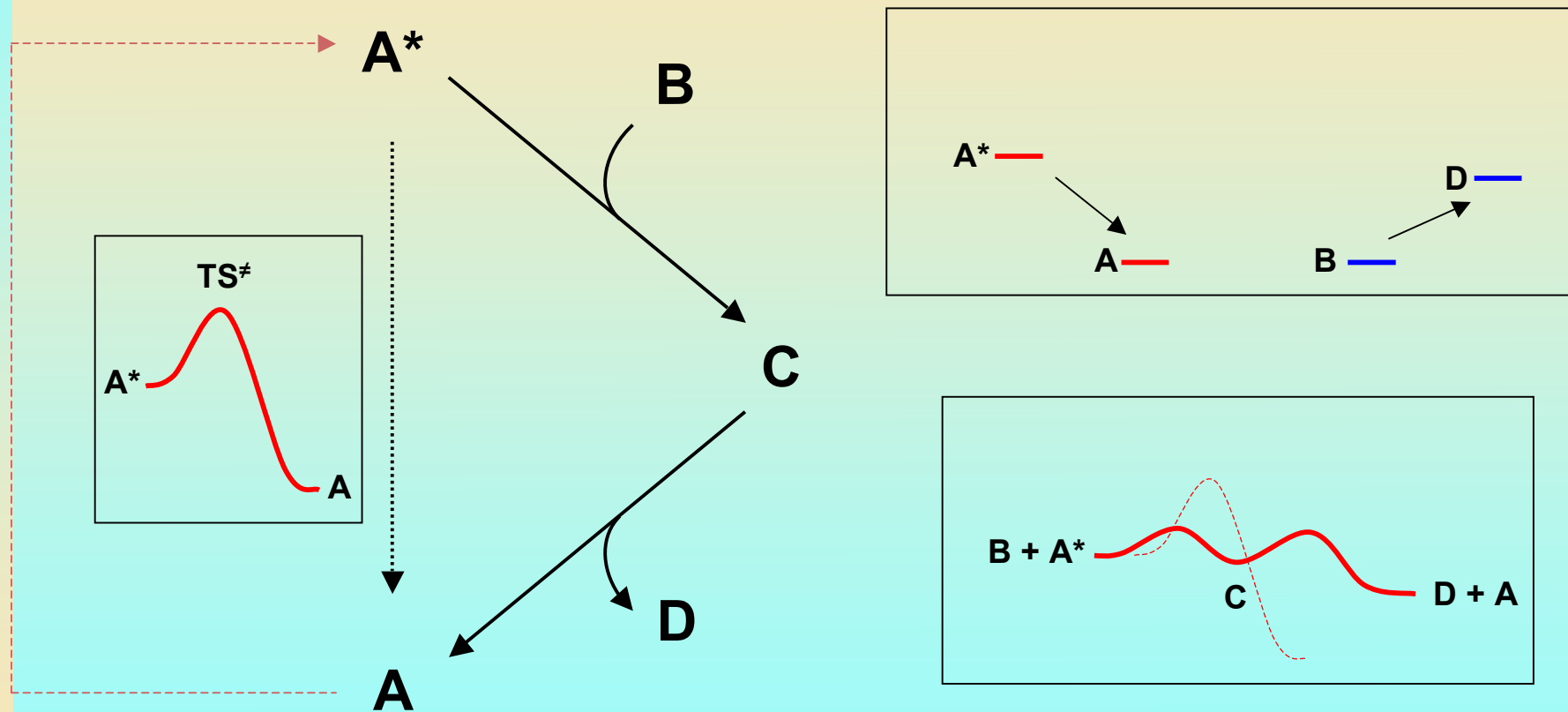
- **Transporteur d'énergie** : un réactant (ou système de réactants) dans une concentration loin de l'équilibre par rapport aux produits de réaction **ET** protégé de la désactivation spontanée (séparé des produits) par une barrière cinétique.



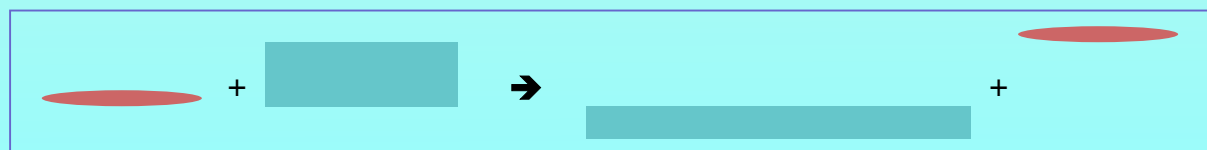
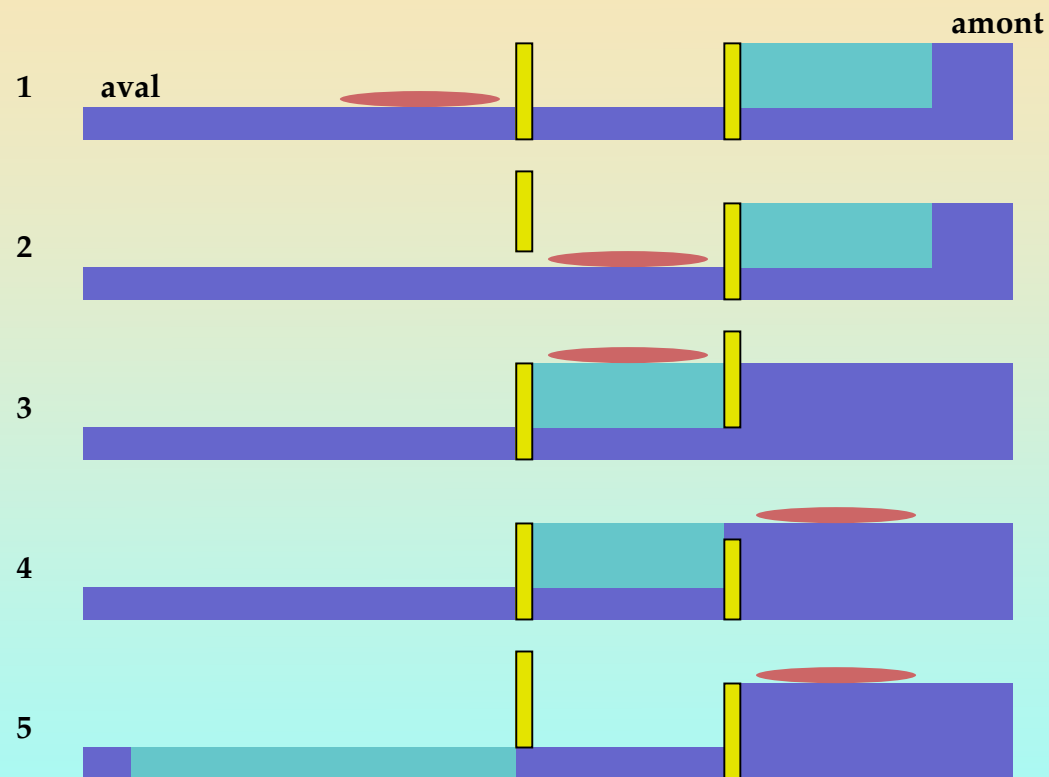
- élévation de température défavorable
- *Catalyse "simple"* défavorable



Réactions Couplées

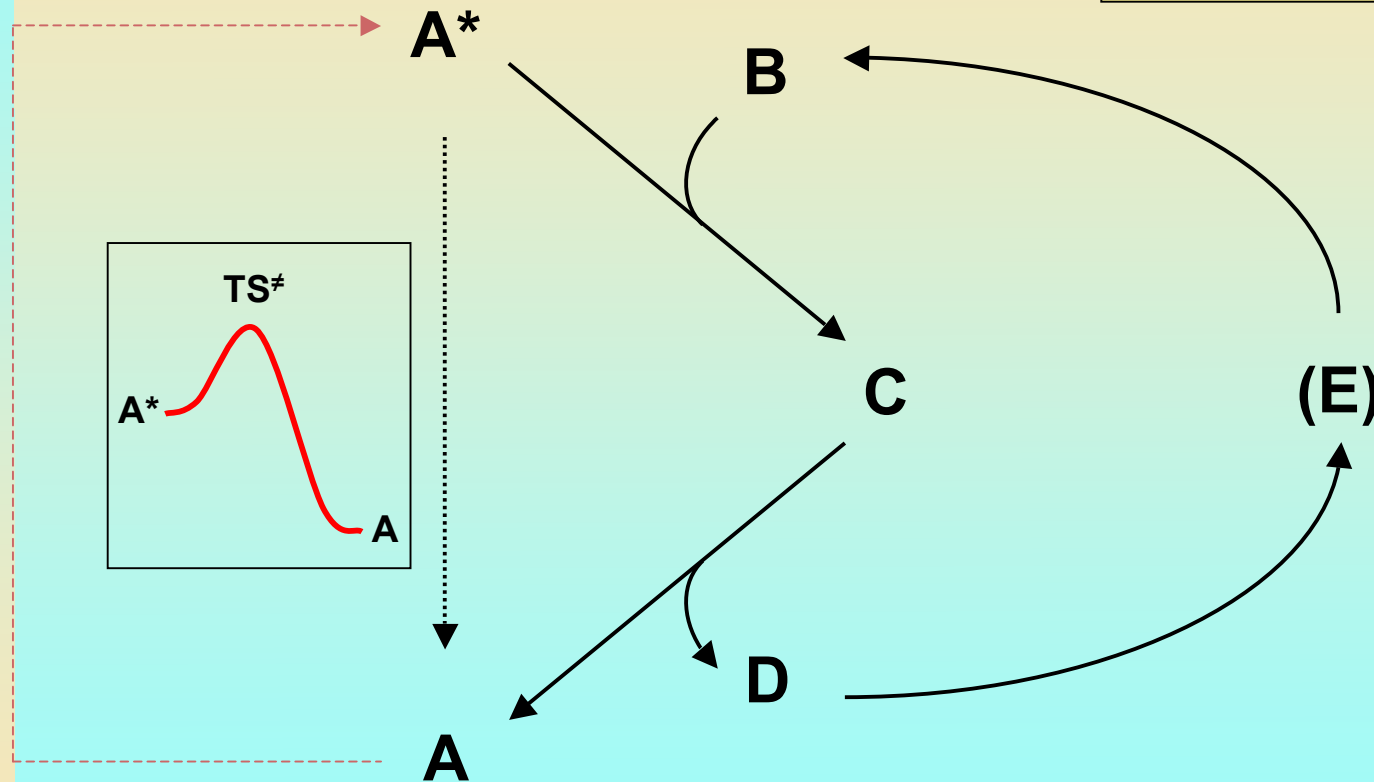


Transférer de l'énergie libre (chimique) : l'analogie de l'écluse

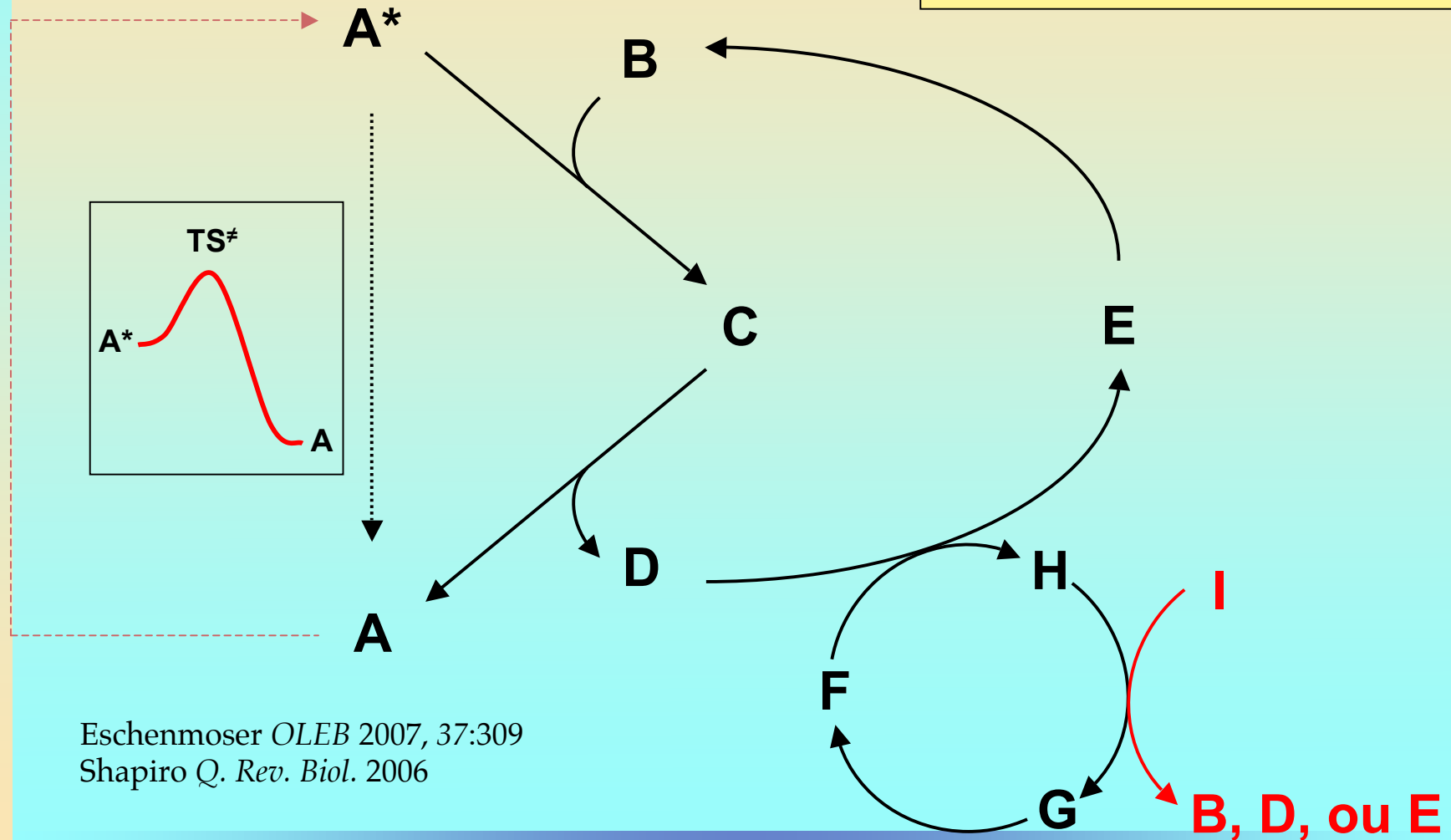


(© Ludovic Jullien)

Émergence d'une boucle catalytique



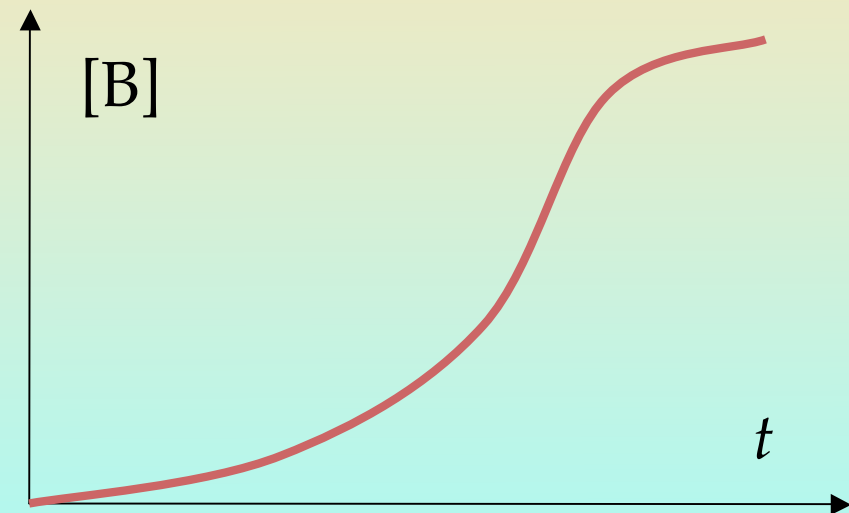
Réseau autocatalytique (réplicateur)



Eschenmoser *OLEB* 2007, 37:309
Shapiro *Q. Rev. Biol.* 2006

La sélection cinétique : une force motrice ?

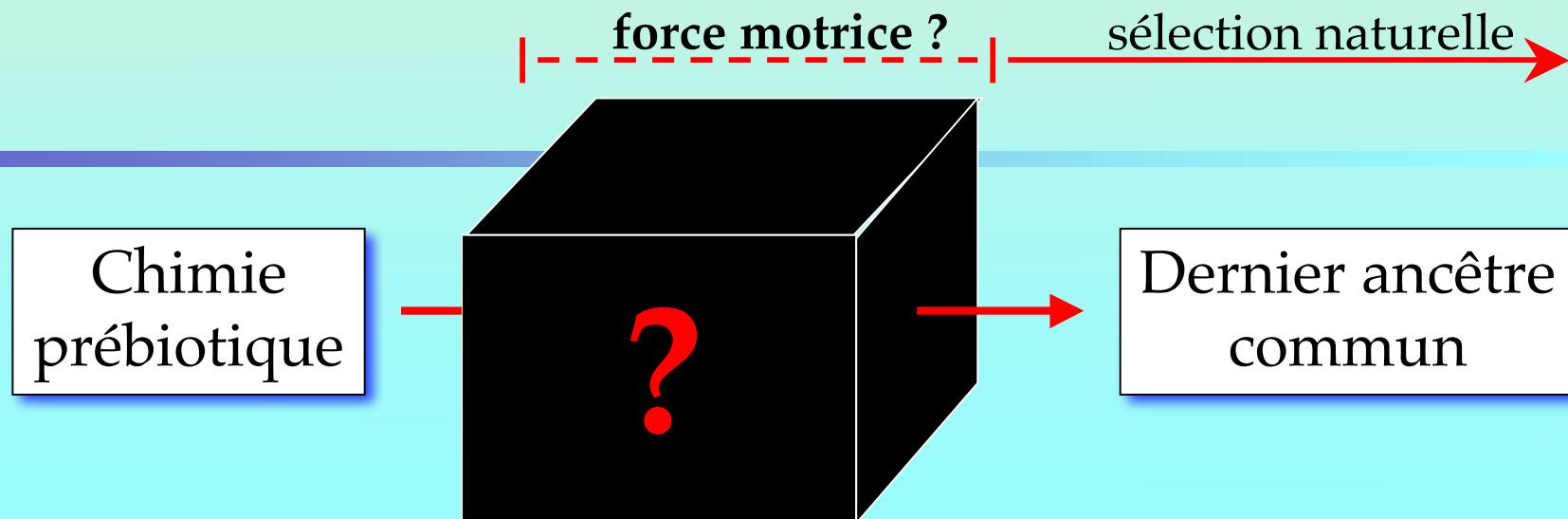
- Compétition entre réseaux autocatalytiques pour consommer l'énergie
- → Sélection du **plus rapide**
- Un impératif cinétique :
 - ▷ Le réplicateur le plus rapide DOIT être sélectionné.
- Une force motrice :
 - ▷ La vitesse de reproduction des systèmes capables de se répliquer



A. Pross, *Journal of Systems Chemistry* (2011)

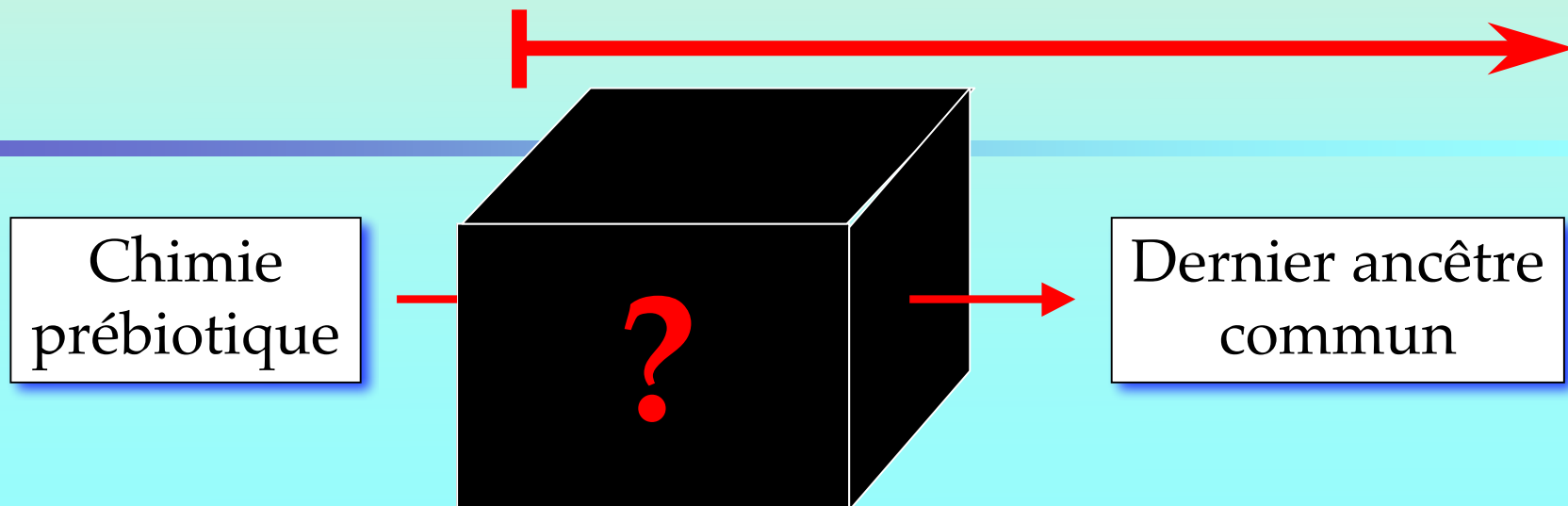
L. Boiteau & R. Pascal, *Origins of Life & Evolution of Biospheres* (2011)

Une force motrice pour l'émergence du vivant ?

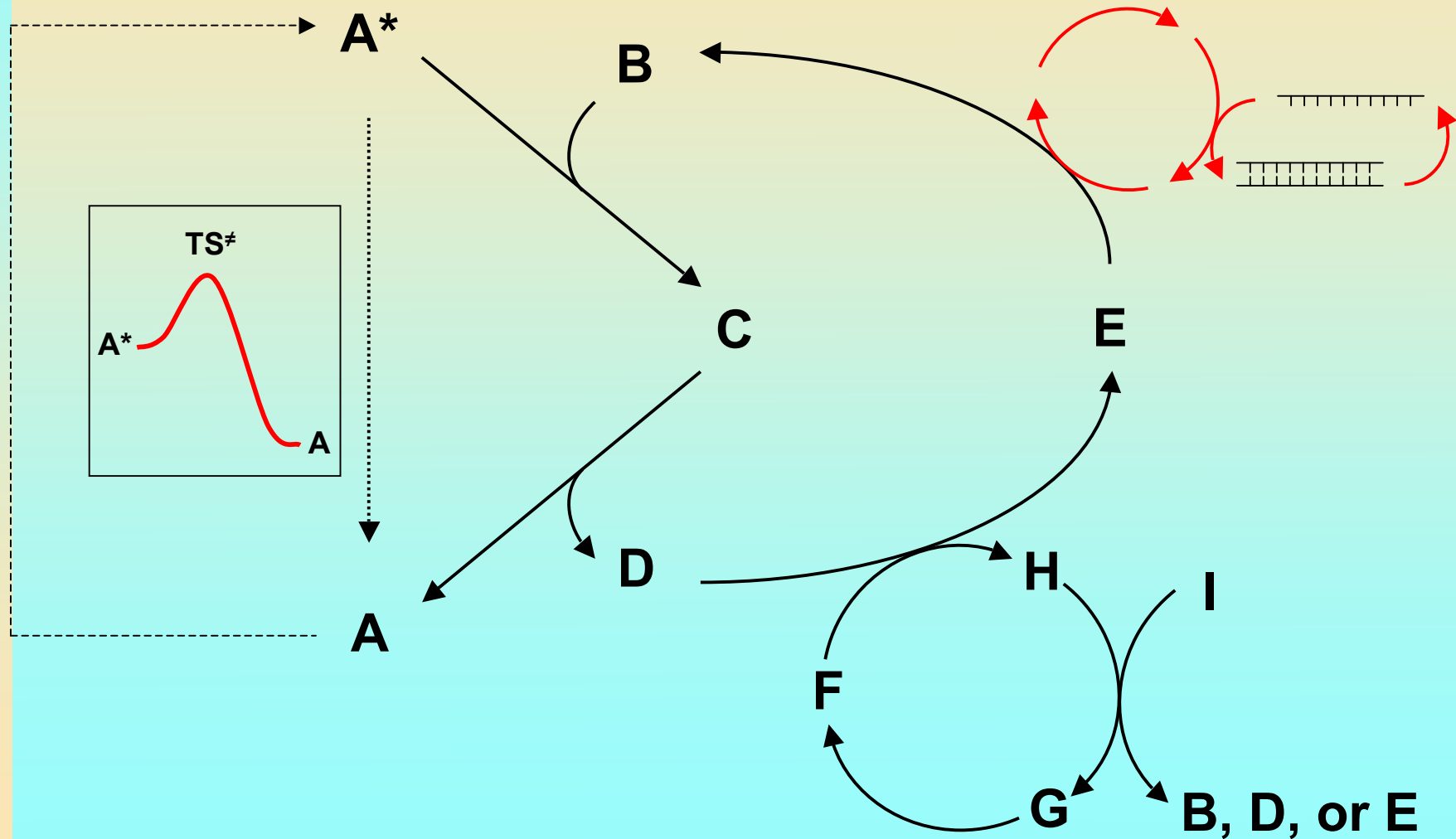


Une force motrice pour l'émergence du vivant ?

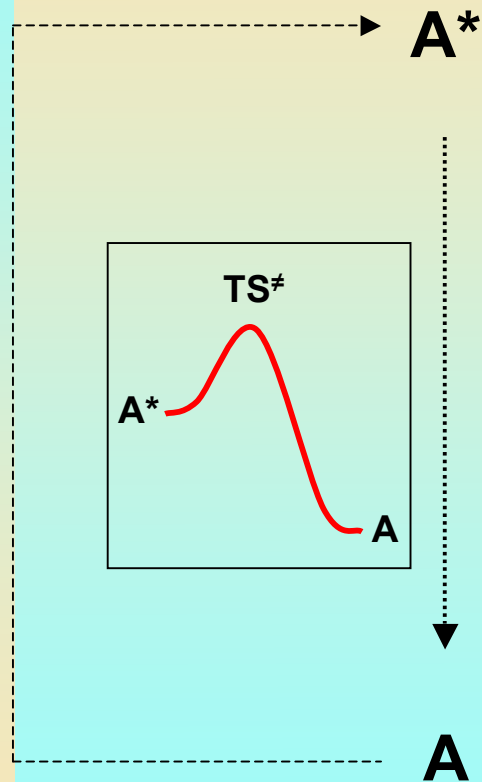
Sélection de l'entité plus rapide à se reproduire



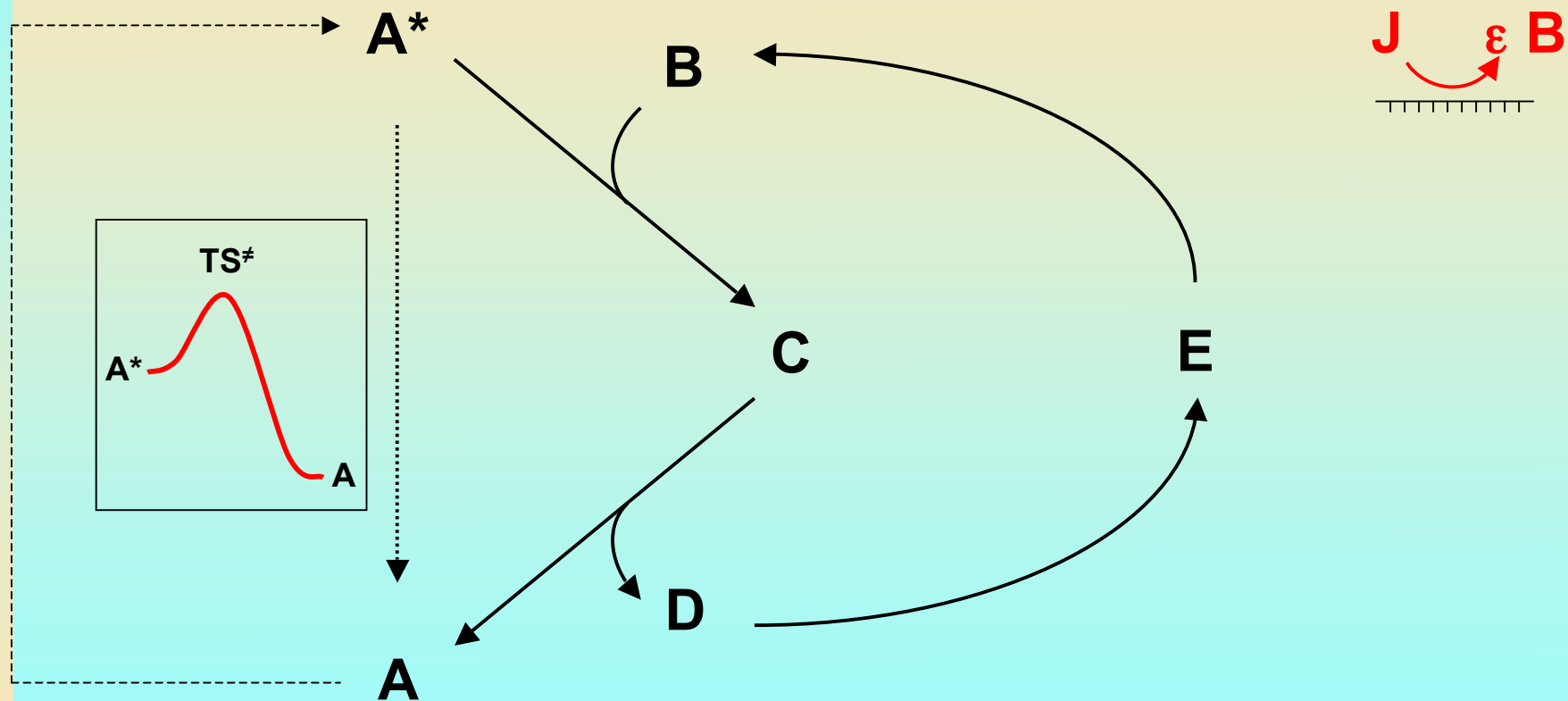
Un polymère porteur d'information stabilise le réseau réactionnel



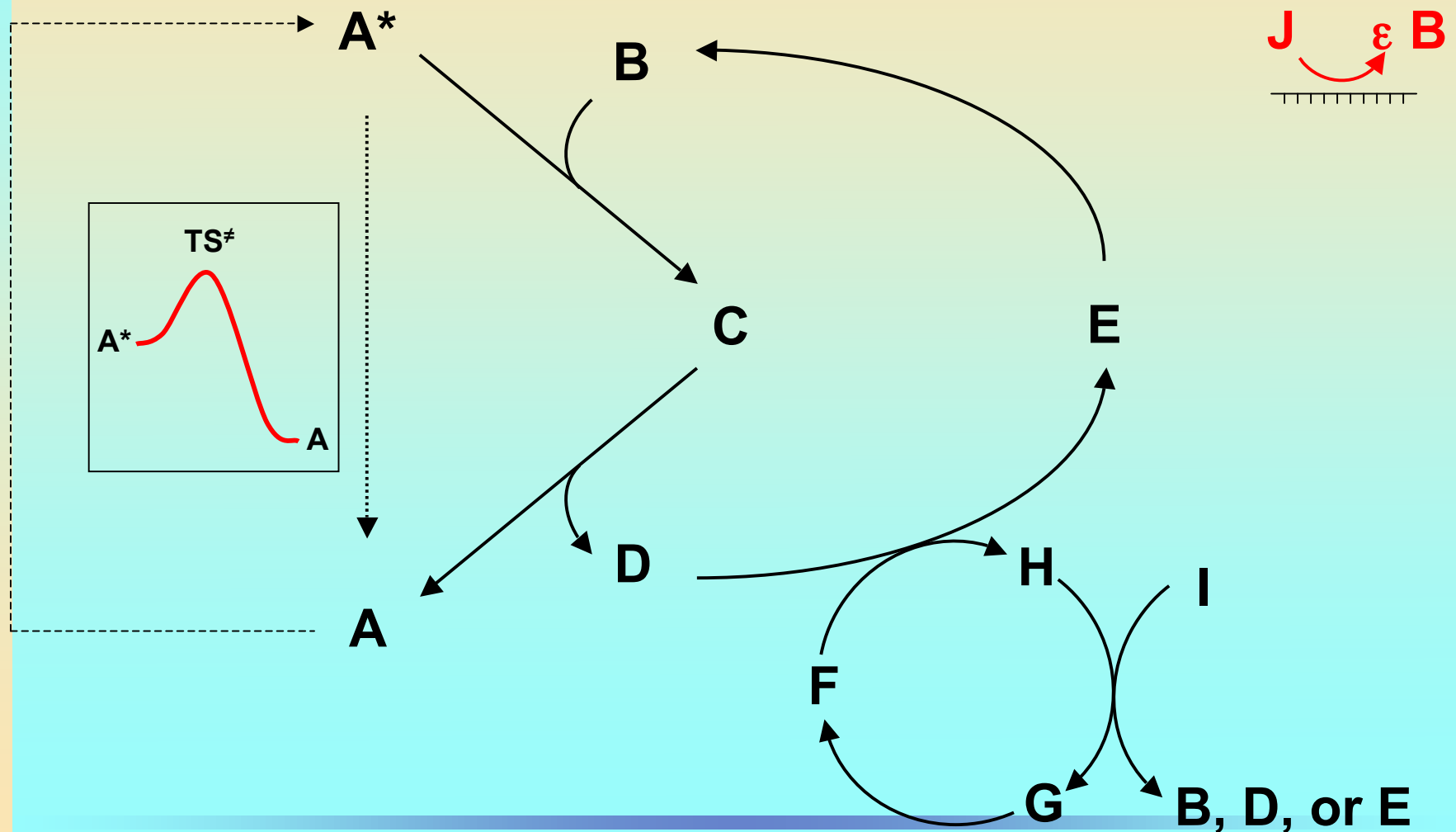
Un polymère porteur d'information stabilise le réseau réactionnel



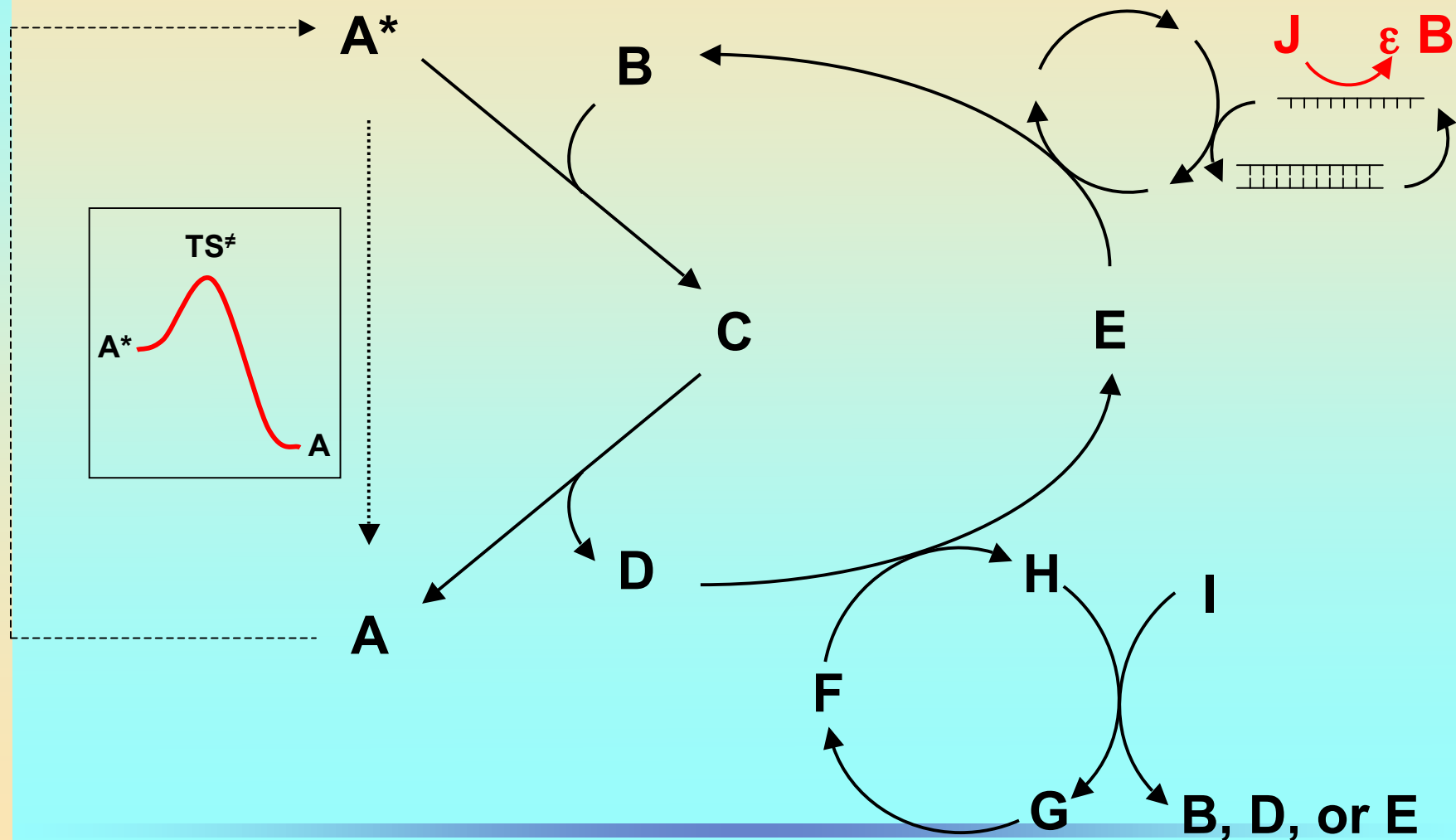
Un polymère porteur d'information stabilise le réseau réactionnel



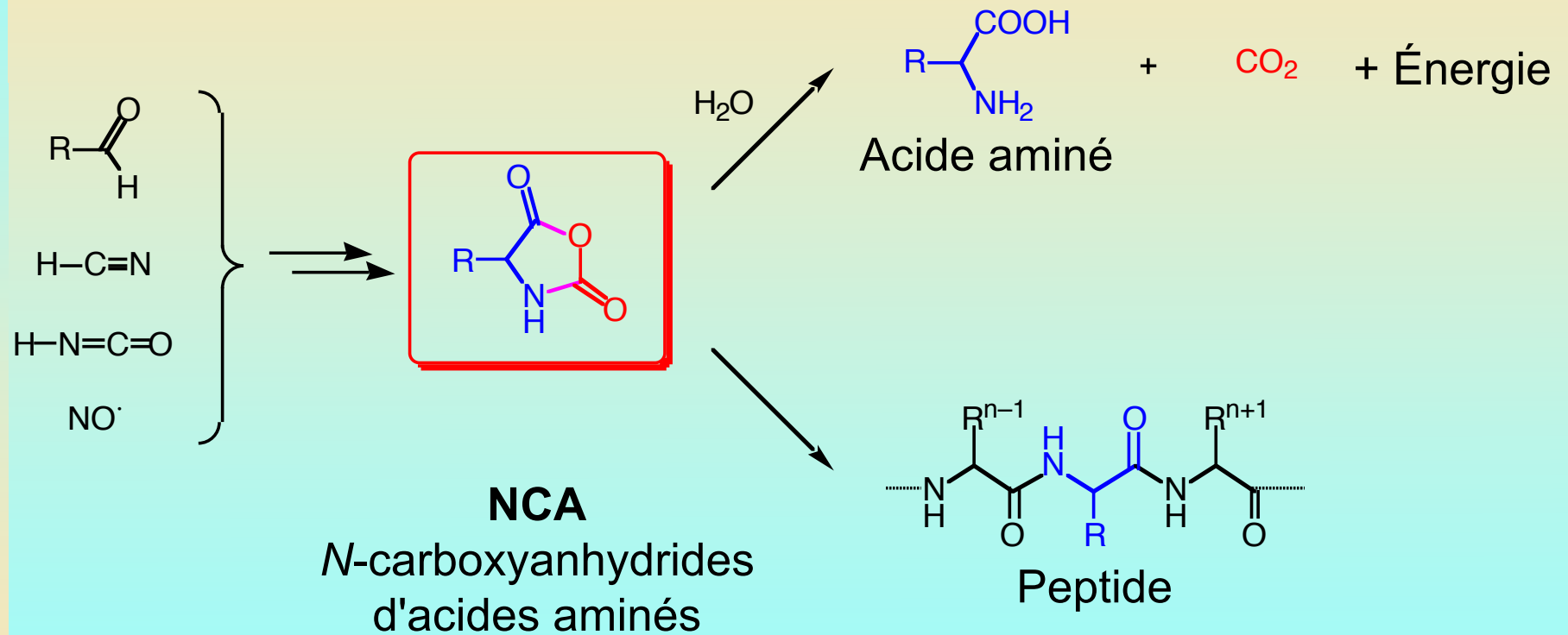
Un polymère porteur d'information stabilise le réseau réactionnel



Un polymère porteur d'information stabilise le réseau réactionnel

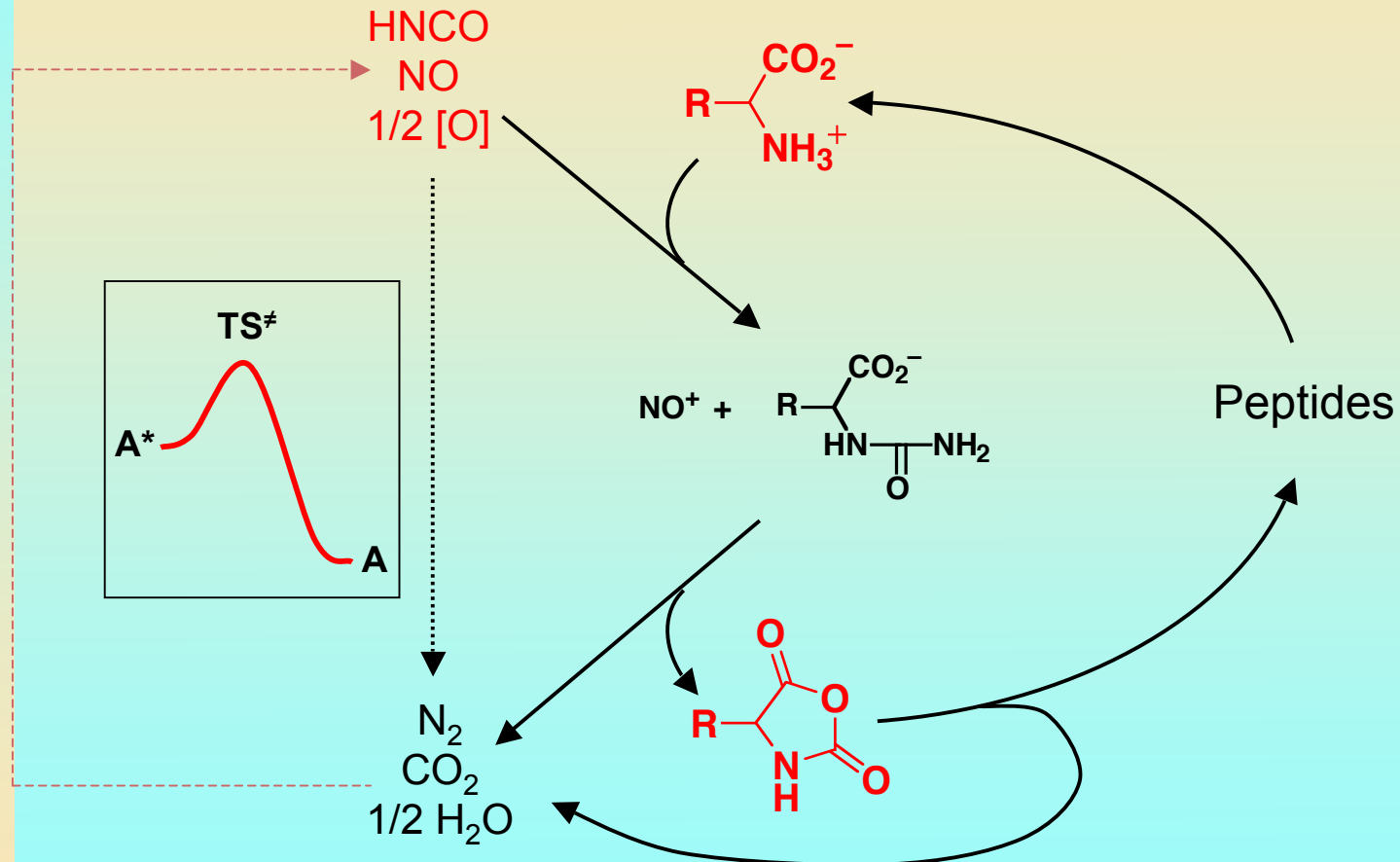


Une piste en chimie prébiotique : des acides aminés activés

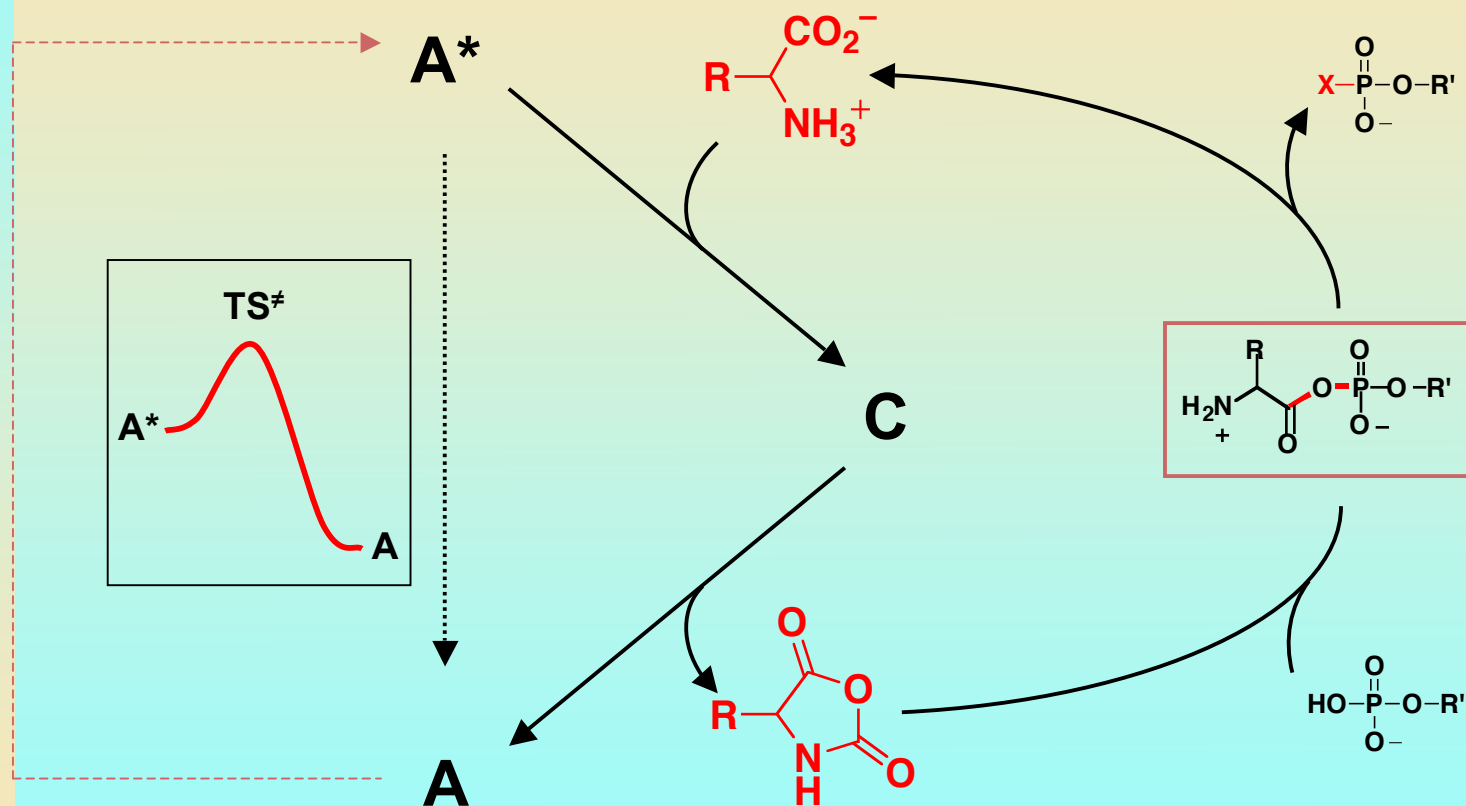


Commeyras & coll., 1996-...

Le NCA, candidat transporteur d'énergie primitif

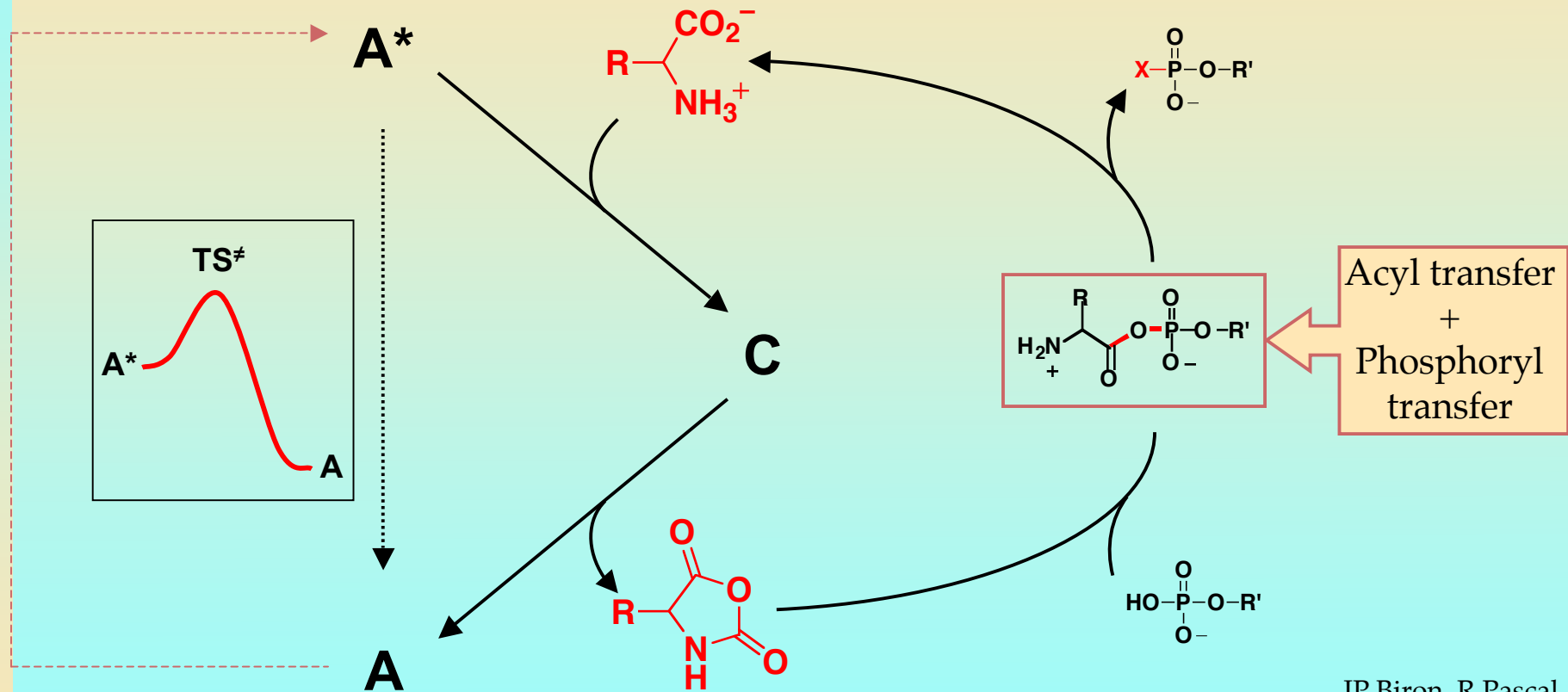


Le NCA comme transporteur d'énergie (2)



JP Biron, R Pascal,
JACS 2004, 126: 9198

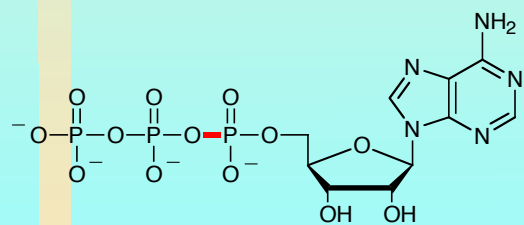
Le NCA comme transporteur d'énergie (2)



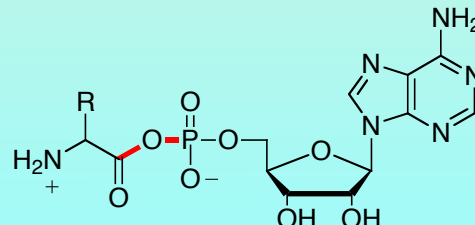
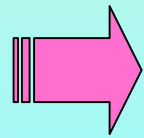
JP Biron, R Pascal,
JACS 2004, 126: 9198

*jonction entre chimies prébiotiques des peptides et des nucleotides
 ...scénarios de co-émergence / co-évolution*

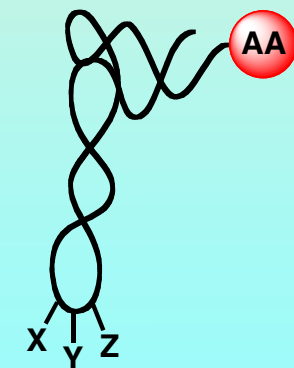
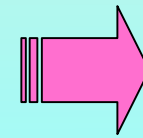
NCA et (pré)biosynthèse des peptides : aux origines de l'appareil de traduction...?



ATP -32 kJ/mol

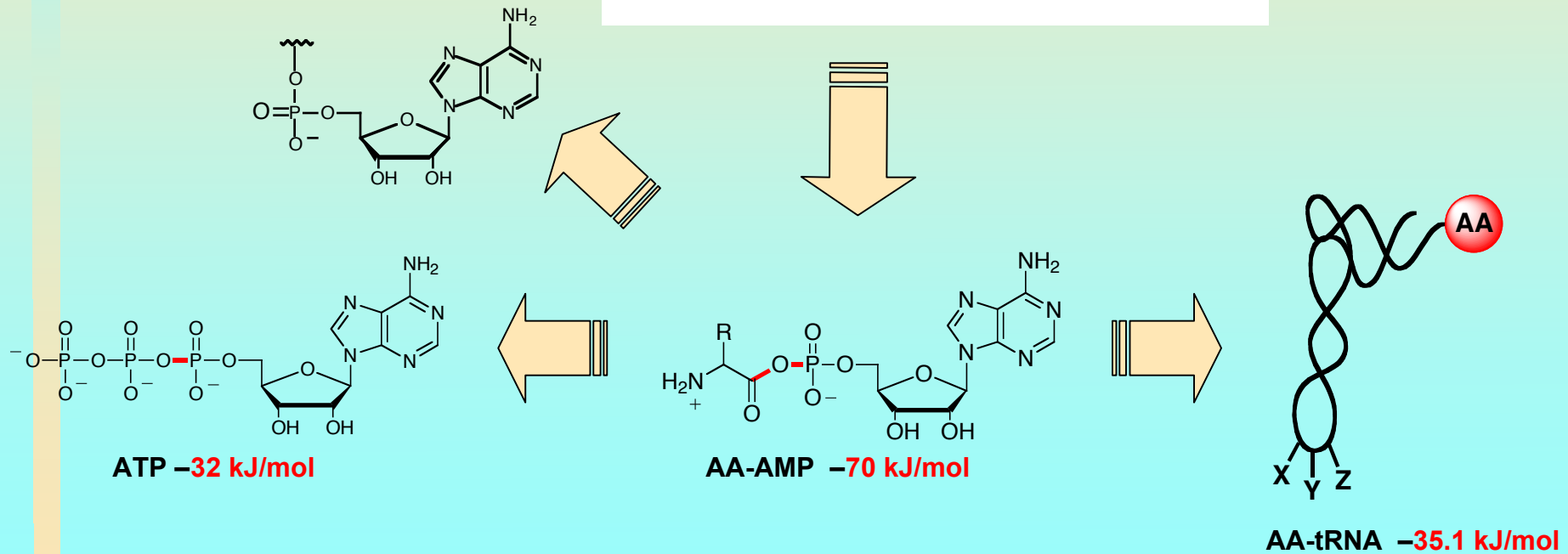
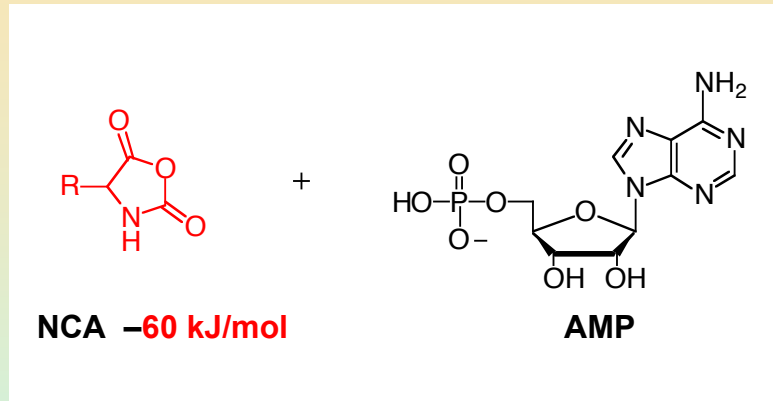


AA-AMP -70 kJ/mol



AA-tRNA -35.1 kJ/mol

NCA et (pré)biosynthèse des peptides : aux origines de l'appareil de traduction...?



Approche chronologique : pour en savoir plus...



paru fin 2009

Pour aller plus loin en exobiologie...

■ La Société Française d'Exobiologie (SFE)

- <http://www.exobiologie.fr>
- la SFE accepte *aussi* des membres associés (sans activité de recherche)



■ Des cours et conférences en ligne sur le www

▷ Congrès international *Origins 2011* (Montpellier, juillet 2011)

- <http://www.origins2011.univ-montp2.fr/videos-and-slides/> (*en anglais*)

▷ Rencontres Exobiologiques du Teich (bassin d'Arcachon)

- <http://www.u-bordeaux1.fr/red08/videos.htm>
- <http://www.u-bordeaux1.fr/red09/videos.htm>

▷ Colloque CNRS d'octobre 2008 à l'ENS Paris :

Origines de la vie : auto-organisation et/ou évolution biologique ?

- <http://www.diffusion.ens.fr/index.php?res=cycles&idcycle=389>
(*sous réserve : site en restructuration*)



Merci !

■ Dr. Robert Pascal



■ Dr. Muriel Gargaud (Bordeaux)

■ Prof. Hervé Martin (Clermont-Fd)

■ Dr. Thierry Montmerle (Grenoble)

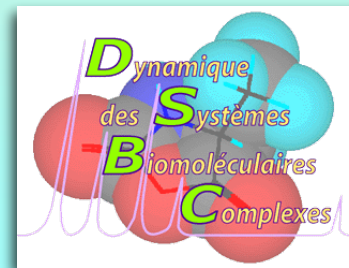
■ Dr. Puri Lopez-Garcia (Orsay)

■ Prof. François Raulin (Créteil)

■ Prof. Em. Auguste Commeyras



■ Toute l'équipe *Dynamique des Systèmes Biomoléculaires Complexes* à Montpellier



€€ Programmes InterDisciplinaires CNRS
OPV: *Origine des planètes & de la Vie*
EPOV: *Environnements Planétaires & Origines de la Vie*

