Énergies renouvelables, stockage et vecteurs énergétiques

Résumé

Cette partie analyse l'origine et la conversion des flux renouvelables, leur variabilité, leur densité de puissance ainsi que les principales solutions de stockage et le rôle de l'hydrogène.

Mots-clés

solaire • éolien • hydroélectricité • biomasse • stockage • hydrogène • facteur de charge • rendement

Plan de la partie

CM 6	**Flux renouvelables et conversion de l'énergie** Origine des flux énergétiques renouvelables à la surface de la Terre • Rayonnement solaire : constante solaire, géométrie et bilan radiatif • Atmosphère, effet de serre et flux solaire reçu au sol • Énergie solaire photovoltaïque : principe physique et rendement • Énergie solaire thermique • Énergie éolienne : origine des vents et puissance disponible • Hydroélectricité : énergie potentielle, débit et hauteur de chute • Photosynthèse, biomasse et productivité primaire • Combustion, méthanisation et biocarburants • Diagramme C-H-O et transformations thermochimiques • Gazéification, Fischer-Tropsch, réaction de Sabatier, charbon de bois, coke et biochar • Hydrogène : vecteur énergétique, électrolyse et pile à combustible • Stockage de l'énergie : STEP, batteries, hydrogène et stockage thermique • Intermittence, facteur de charge et adéquation entre production et demande • Densité de puissance, emprise au sol et ordres de grandeur	**Lundi 12 octobre** 14h45-16h15 · B008
TD 4	**Bilans et dimensionnement de systèmes renouvelables** QCM sur les notions de puissance, énergie, rendement et facteur de charge • Barrage hydroélectrique : calcul de puissance et d'énergie produite • Éolienne : puissance du vent et énergie annuelle • Installation photovoltaïque : puissance crête, productible et facteur de charge • Comparaison d'installations renouvelables à production annuelle identique • Méthanisation : bilan de matière et potentiel énergétique • Électrolyse de l'eau : rendement et production d'hydrogène • Chaîne hydrogène : électricité, stockage et restitution • Analyse critique d'un scénario simple de mix électrique	**Jeudi 15 octobre** 9h30-11h00 · B104

Fig. 1 **Formes d'énergies renouvelables issues du rayonnement solaire**

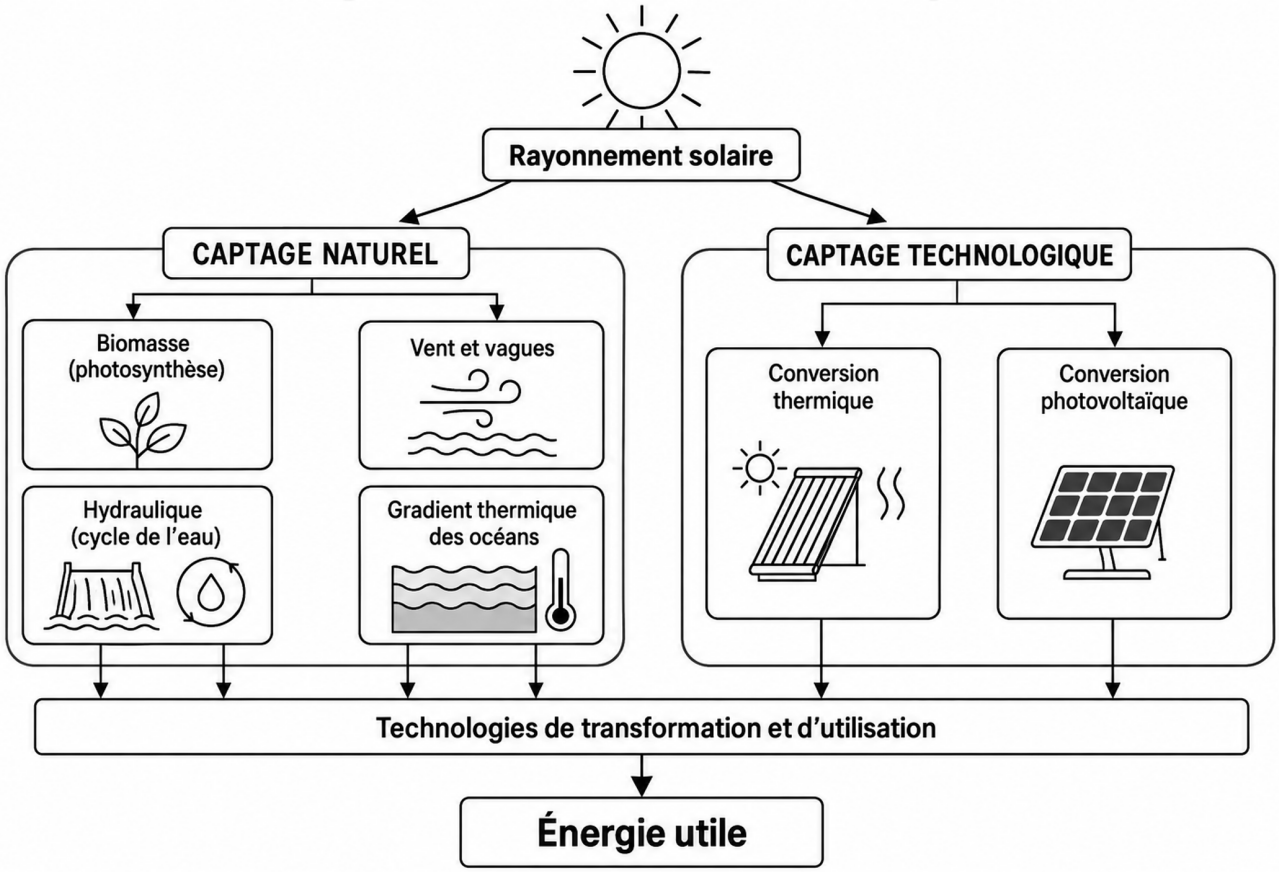
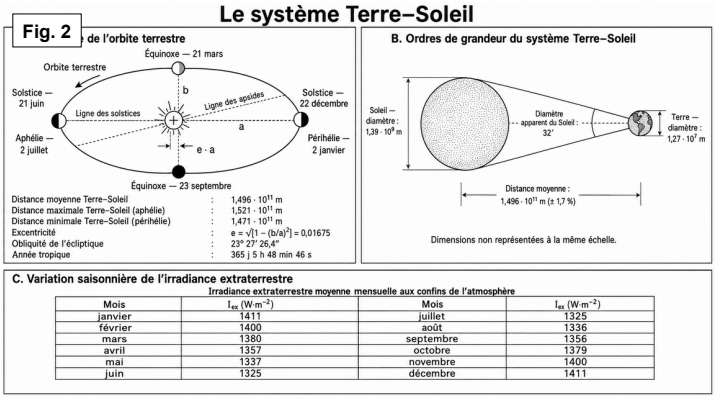


Fig. 2



Le système Terre–Soleil

de l'orbite terrestre

Équinoxe — 21 mars
Orbite terrestre
Solstice — 21 juin
Solstice — 22 décembre
Ligne des solstices
Ligne des apsides
Aphélie — 2 juillet
Périhélie — 2 janvier
Équinoxe — 23 septembre

Distance moyenne Terre–Soleil	:	$1{,}496 \cdot 10^{11}$ m
Distance maximale Terre–Soleil (aphélie)	:	$1{,}521 \cdot 10^{11}$ m
Distance minimale Terre–Soleil (périhélie)	:	$1{,}471 \cdot 10^{11}$ m
Excentricité	:	$e = \sqrt{[1 - (b/a)^2]} = 0{,}01675$
Obliquité de l'écliptique	:	23° 27′ 26,4″
Année tropique	:	365 j 5 h 48 min 46 s

B. Ordres de grandeur du système Terre–Soleil

Soleil — diamètre : $1{,}39 \cdot 10^9$ m
Diamètre apparent du Soleil : 32′
Terre — diamètre : $1{,}27 \cdot 10^7$ m
Distance moyenne : $1{,}496 \cdot 10^{11}$ m (± 1,7 %)
Dimensions non représentées à la même échelle.

C. Variation saisonnière de l'irradiance extraterrestre

Irradiance extraterrestre moyenne mensuelle aux confins de l'atmosphère

Mois	I_{ex} (W·m^{-2})	Mois	I_{ex} (W·m^{-2})
janvier	1411	juillet	1325
février	1400	août	1336
mars	1380	septembre	1356
avril	1357	octobre	1379
mai	1337	novembre	1400
juin	1325	décembre	1411

Fig. 3

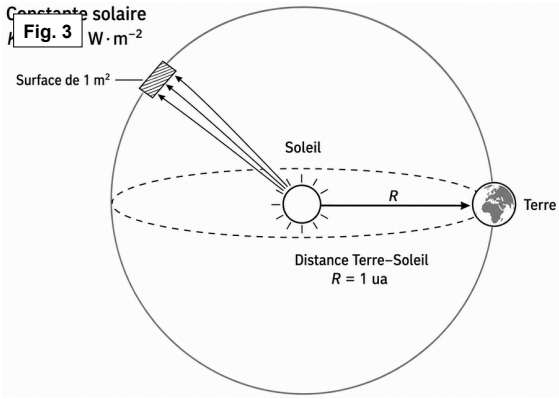
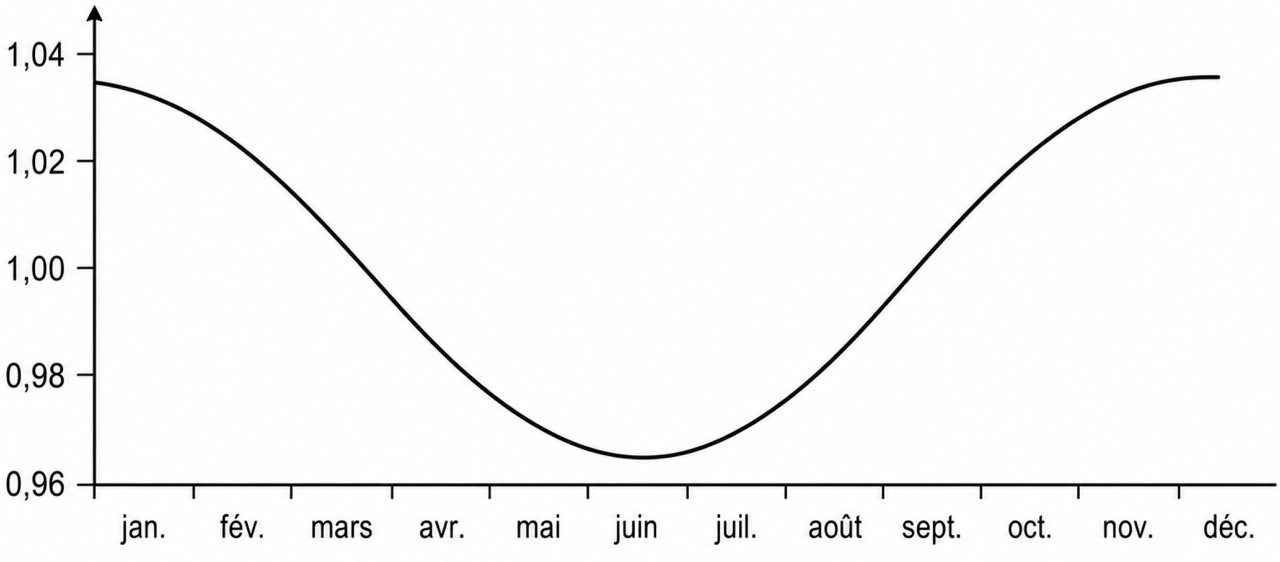
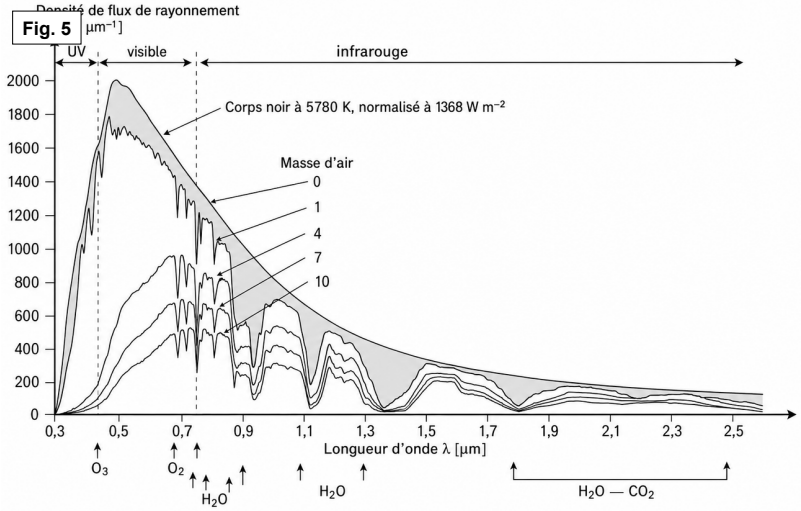


Fig. 4



Variation relative du rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère.

Fig. 5



Distribution spectrale du rayonnement solaire, en dehors de l'atmosphère et au sol.

Fig. 6

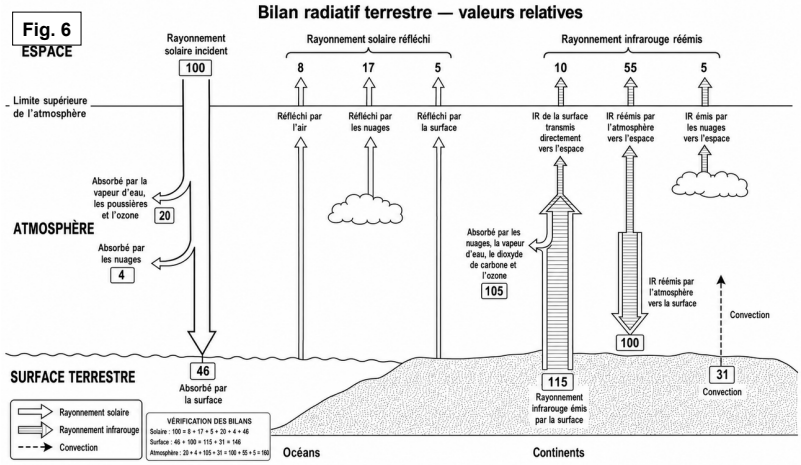
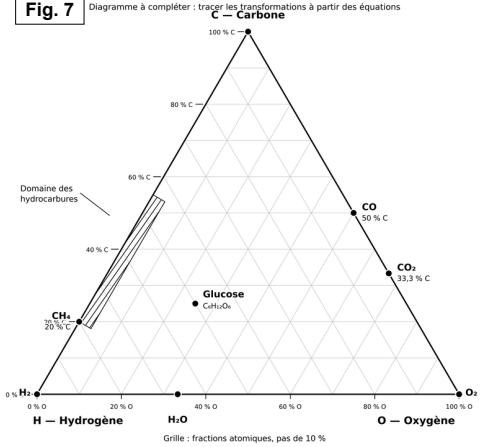


Fig. 7

Principales transformations dans le système C-H-O

Diagramme à compléter : tracer les transformations à partir des équations



Grille : fractions atomiques, pas de 10 %

Processus biologiques — traits pleins

1. **Photosynthèse / respiration**
   $6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightleftarrows C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$
2. **Fermentation sombre / méthanogenèse**
   $C_6H_{12}O_6 + 6\ H_2O \rightarrow 12\ H_2 + 6\ CO_2$
   $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3\ CO_2 + 3\ CH_4$
3. **Biophotolyse de l'eau**
   $H_2O + photons \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}\ O_2$

Processus thermochimiques — traits tiretés

4. **Pyrolyse et maturation thermique**
   Matière organique → $H_2O + CO_2 + CH_4$ + hydrocarbures + C
5. **Gazéification**
   $C + CO_2 \rightleftarrows 2\ CO$; $C + H_2O \rightleftarrows CO + H_2$
6. **Réaction du gaz à l'eau**
   $CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2$
7. **Méthanation de Sabatier**
   $CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$
8. **Synthèse de Fischer-Tropsch**
   $(2n + 1)\ H_2 + n\ CO \rightarrow C_nH_{2n+2} + n\ H_2O$

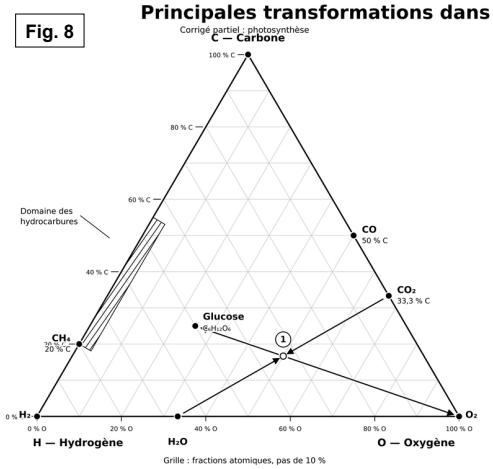
À compléter par l'étudiant
Réactifs convergents • produits divergents

Diagramme ternaire C-H-O à compléter.

Fig. 8

Principales transformations dans le système C-H-O

Corrigé partiel : photosynthèse



Grille : fractions atomiques, pas de 10 %

Processus biologiques — traits pleins

1. **Photosynthèse — corrigé**
   $6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$
2. **Fermentation sombre / méthanogenèse**
   $C_6H_{12}O_6 + 6\ H_2O \rightarrow 12\ H_2 + 6\ CO_2$
   $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3\ CO_2 + 3\ CH_4$
3. **Biophotolyse de l'eau**
   $H_2O + photons \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}\ O_2$

Processus thermochimiques — traits tiretés

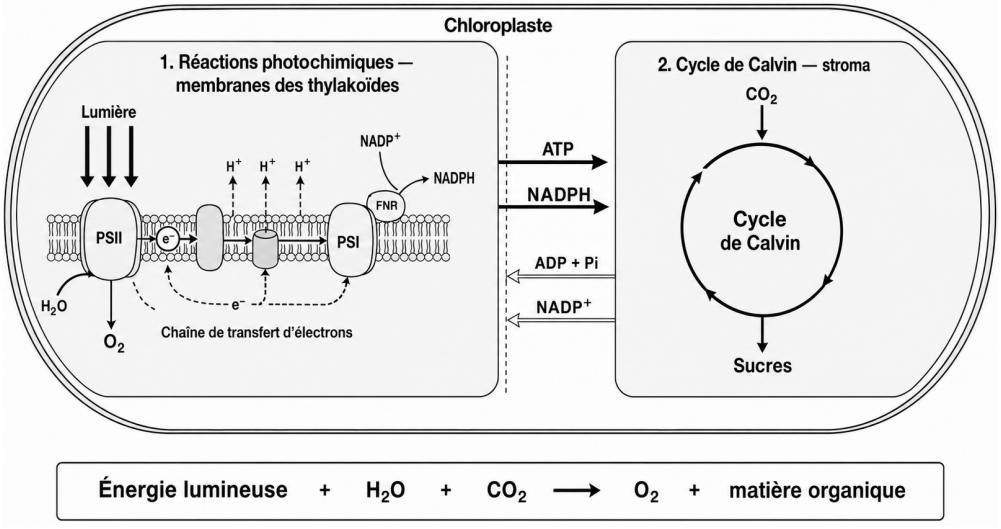
4. **Pyrolyse et maturation thermique**
   Matière organique → $H_2O + CO_2 + CH_4$ + hydrocarbures + C
5. **Gazéification**
   $C + CO_2 \rightleftarrows 2\ CO$; $C + H_2O \rightleftarrows CO + H_2$
6. **Réaction du gaz à l'eau**
   $CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2$
7. **Méthanation de Sabatier**
   $CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$
8. **Synthèse de Fischer-Tropsch**
   $(2n + 1)\ H_2 + n\ CO \rightarrow C_nH_{2n+2} + n\ H_2O$

CO_2 et H_2O : flèches convergentes
Glucose et O_2 : flèches divergentes

Corrigé partiel du diagramme ternaire C-H-O : photosynthèse.

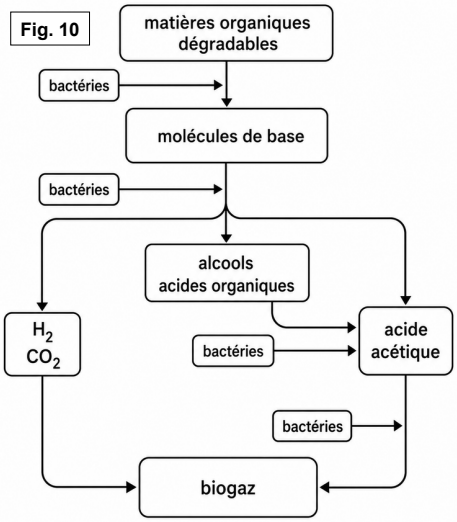
Fig. 9

Les deux étapes de la photosynthèse



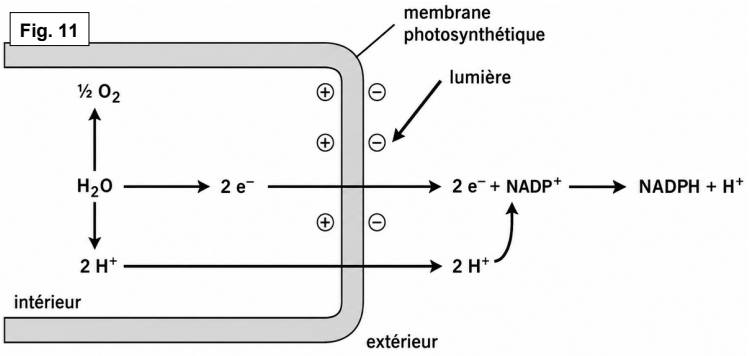
Énergie lumineuse + H_2O + CO_2 ⟶ O_2 + matière organique

Fig. 10



Digestion anaérobie des matières organiques.

Fig. 11



Séparation des charges électriques au travers de la membrane photosynthétique.

Fig. 12

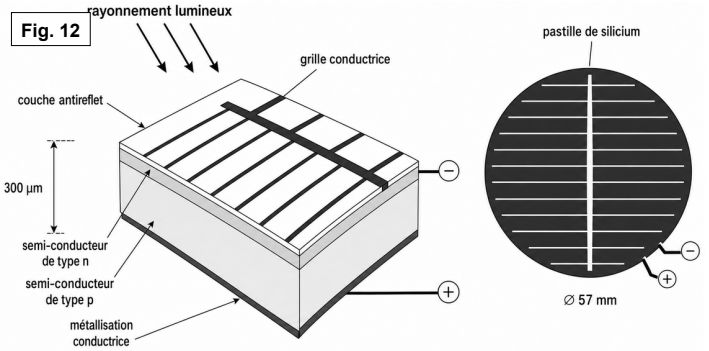
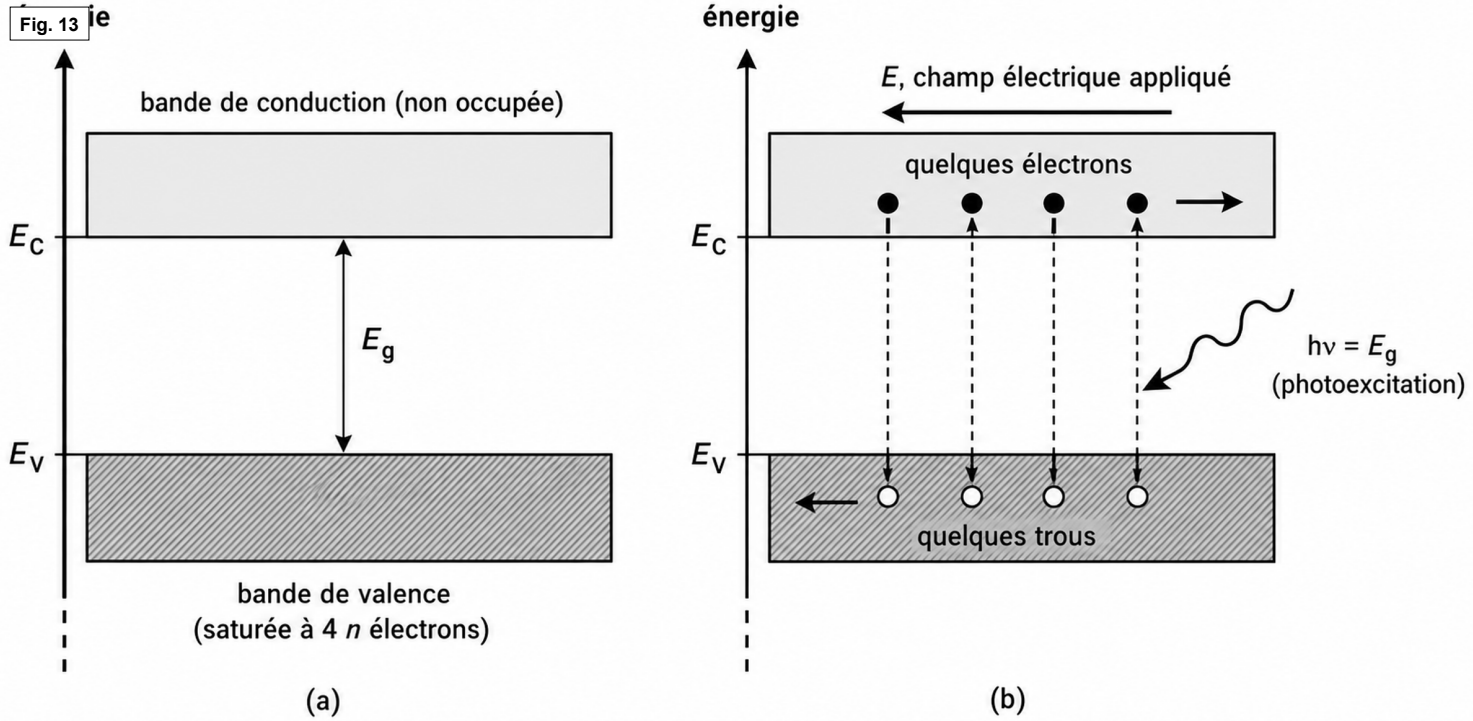


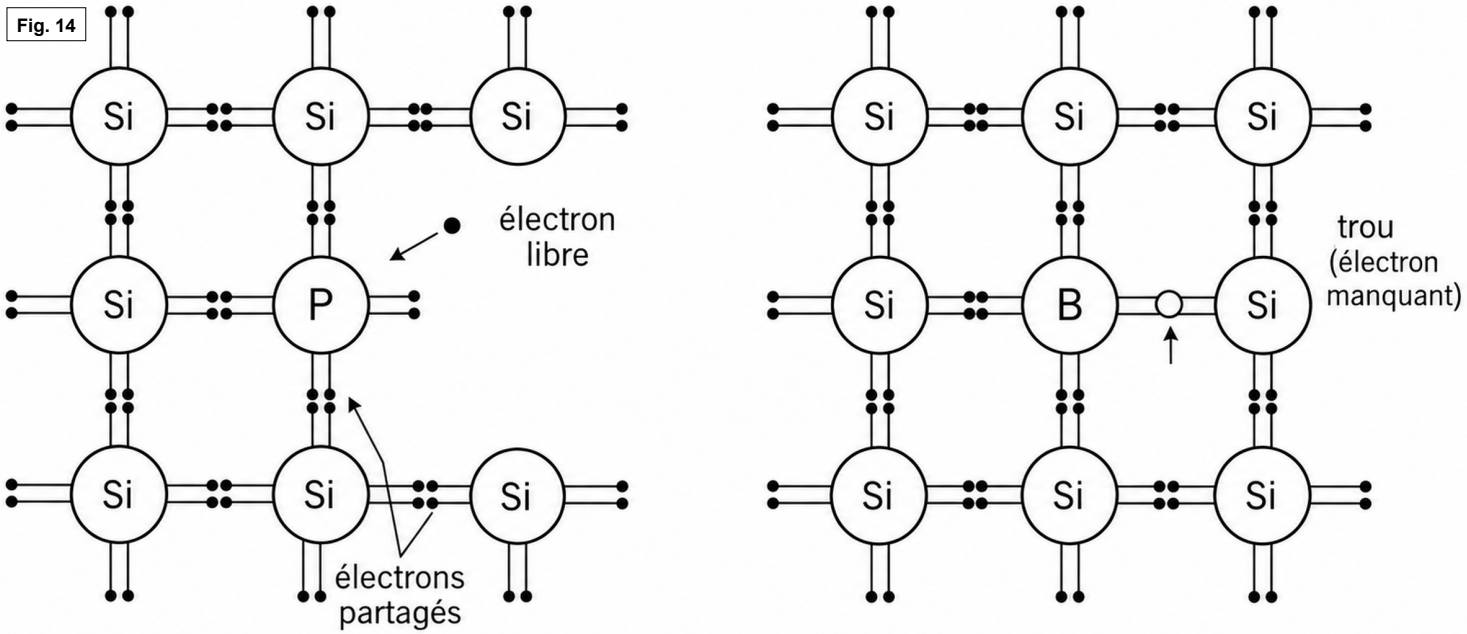
Schéma de la structure physique d'une cellule photovoltaïque.

Fig. 13



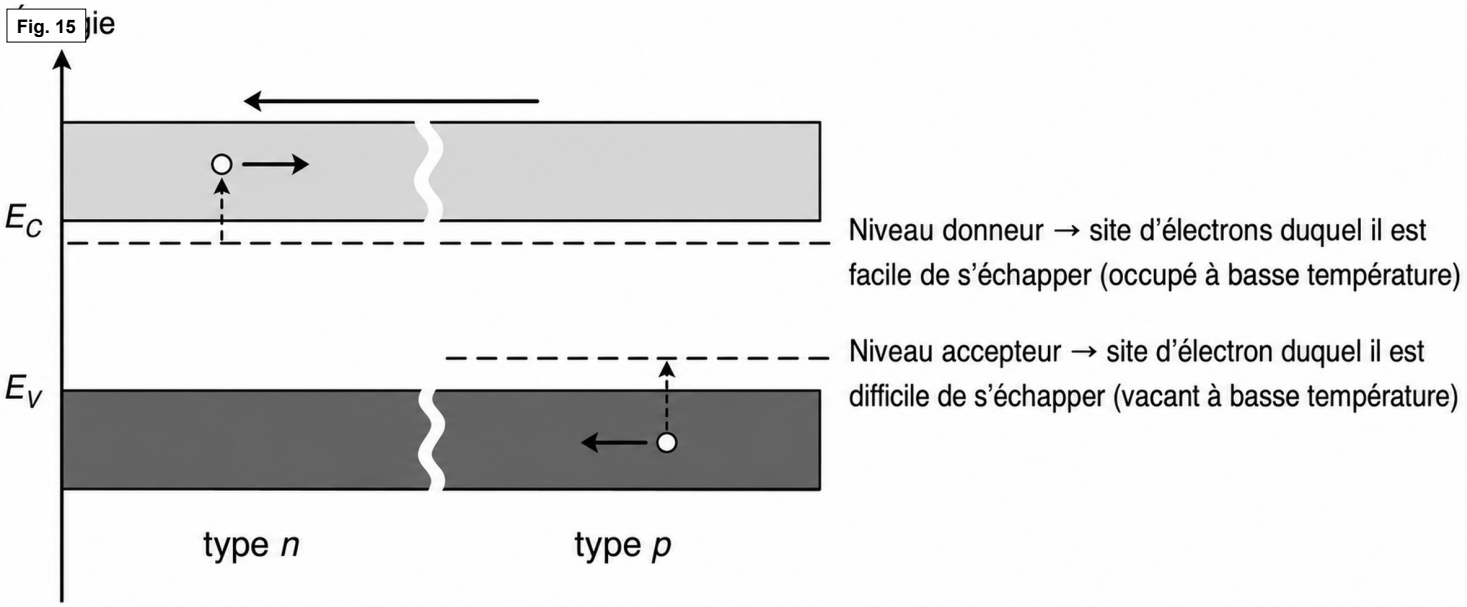
Bandes énergétiques au sein d'un semi-conducteur intrinsèque

Fig. 14



Dopage *n* et *p* d'un semi-conducteur

Fig. 15



Semiconducteurs de type *n* et de type *p* isolés l'un de l'autre.

Fig. 16

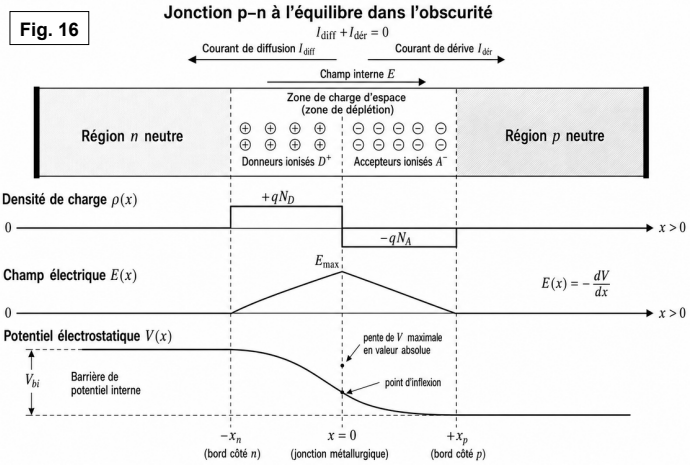
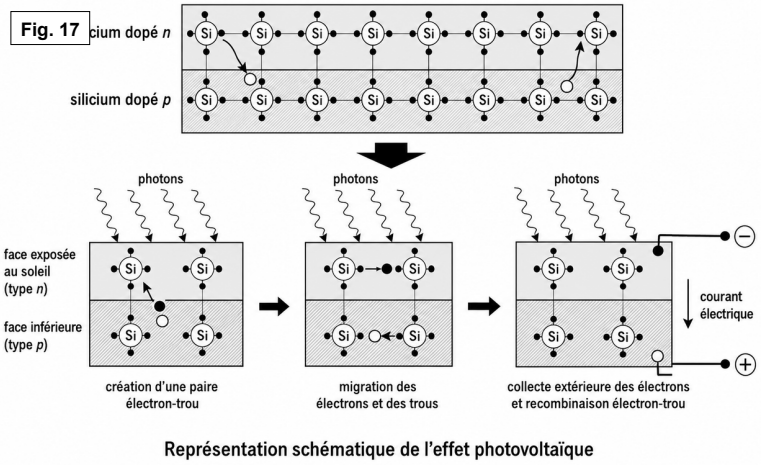


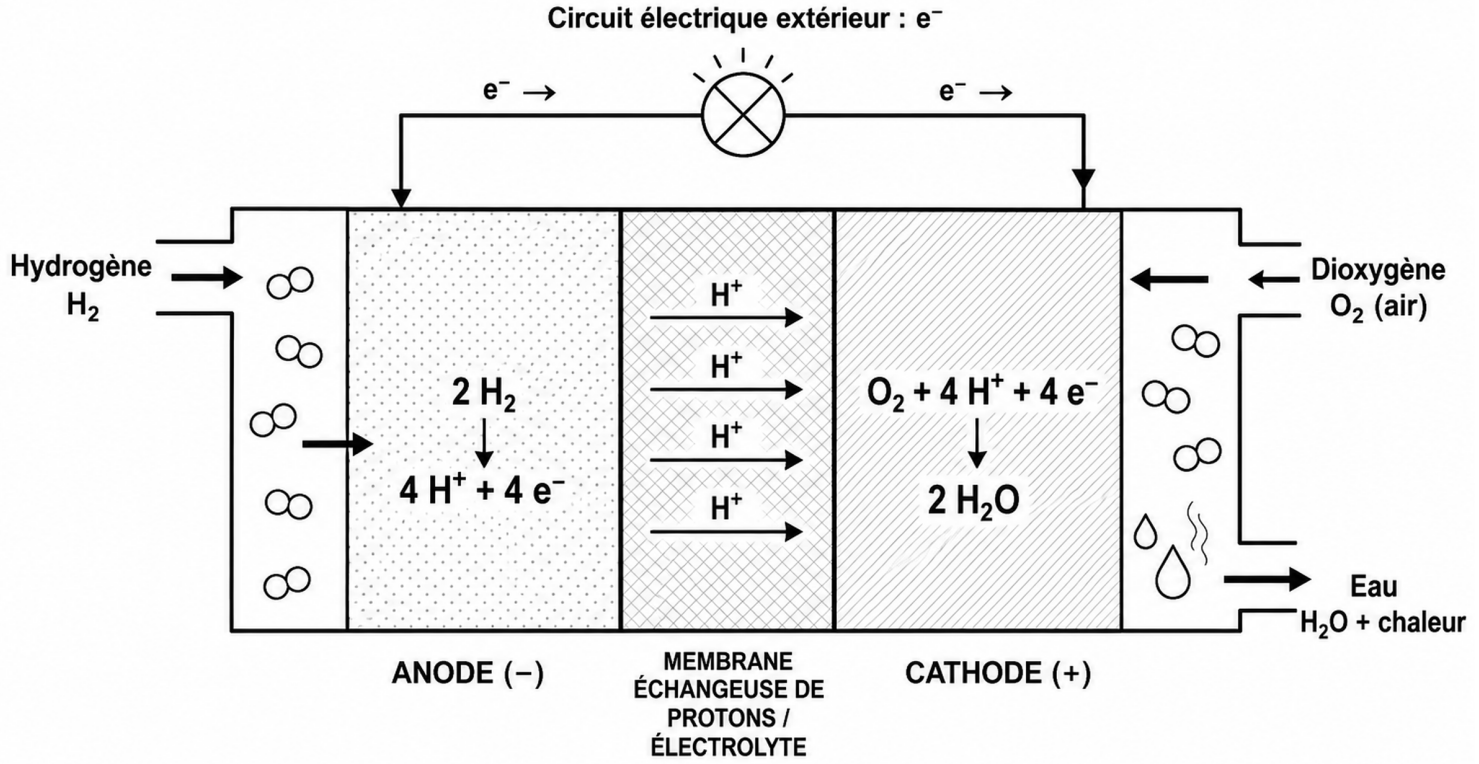
Fig. 17



Représentation schématique de l'effet photovoltaïque

Fig. 18

Pile à combustible à hydrogène (type PEM)



$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O + \text{énergie électrique} + \text{chaleur}$$

Fig. 19

Pile à combustible à oxyde solide (SOFC)

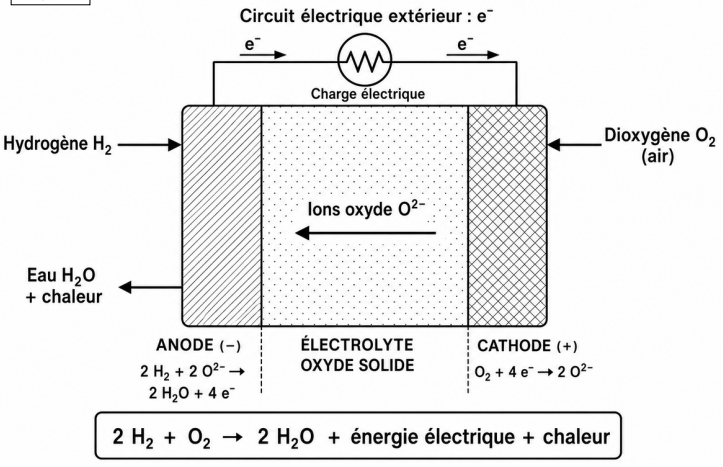


Fig. 20

L'hydrogène au cœur du système énergétique

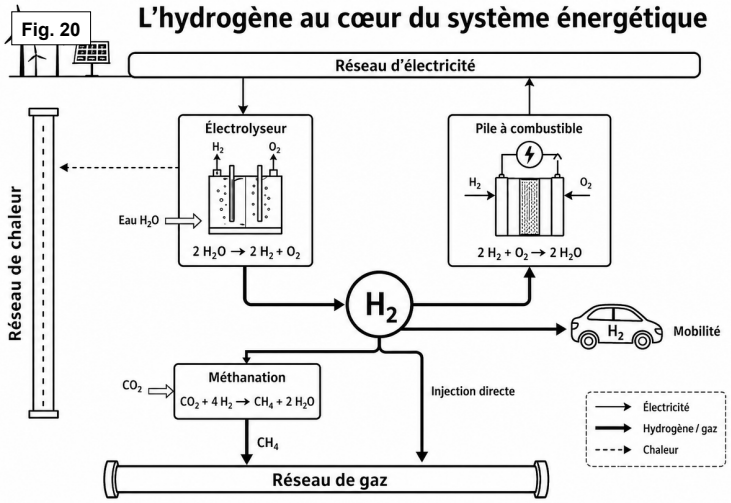
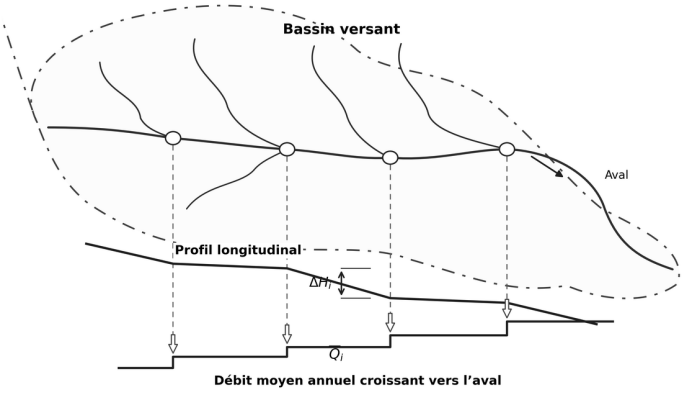


Fig. 21

Détermination du potentiel hydroélectrique sauvage

Découpage du réseau hydrographique en tronçons homogènes



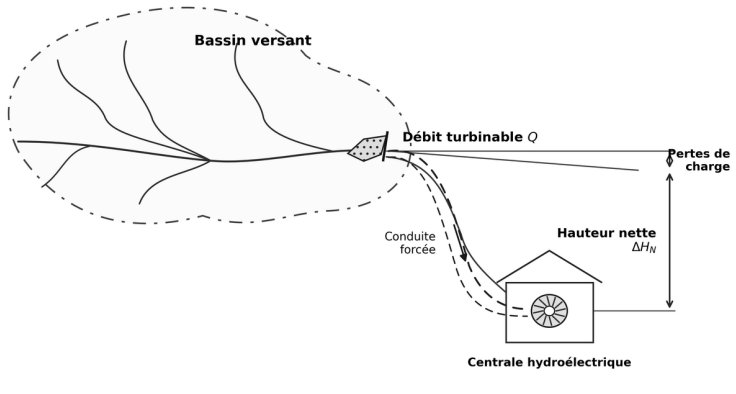
Pour chaque tronçon i : $P_i = \rho g \overline{Q}_i \Delta H_i$ (sans pertes ni rendement).

Figure 5.6 — Détermination du potentiel sauvage sur un bassin versant.

Fig. 22

Potentiel hydroélectrique techniquement réalisable

Du débit collecté par le bassin versant à la hauteur de chute nette



Le potentiel technique dépend du débit turbinable Q et de la hauteur nette ΔH_N.

Figure 5.8 — Détermination du potentiel hydroélectrique techniquement réalisable.