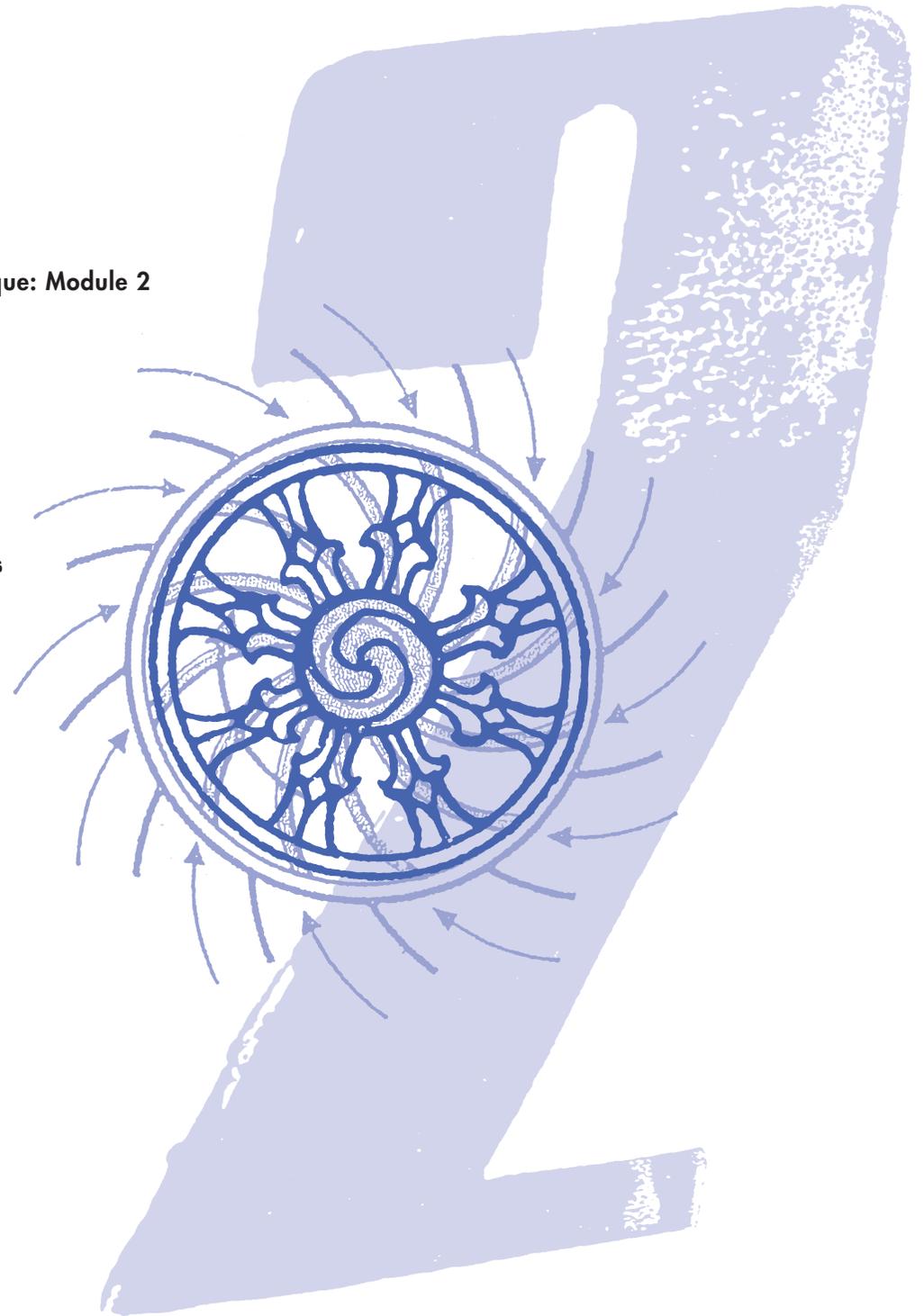


Energie solaire

L'énergie dans l'enseignement professionnel

Modules pour les professions techniques, de l'électricité et de l'informatique: Module 2

- 1 Introduction: de quoi s'agit-il?**
- 2 Objectifs de la formation**
- 3 Eléments proposés pour le plan des leçons**
- 4 Connaissances de base**
 - **Constante solaire, rayonnement incident**
 - **Utilisation passive de l'énergie solaire**
 - **Utilisation indirecte de l'énergie solaire**
 - **Capteurs solaires thermiques**
 - **Photovoltaïque**
- 5 Exercices et solutions proposées**
- 6 Bibliographie**
- 7 Sources**
- 8 Modèles**



1 Introduction: de quoi s'agit-il ?

Toute énergie provient du Soleil

Toute énergie provient du Soleil, où elle est libérée par la fusion de noyaux d'atomes. L'énergie éolienne, la force hydraulique et la chaleur sont issues directement du rayonnement solaire. Cela vaut également pour le pétrole, le gaz naturel et le charbon qui peuvent être considérés comme de l'énergie solaire accumulée depuis des millions d'années. Théoriquement, l'énergie solaire rayonnée en une demi-heure pourrait couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux d'une année. Seule une infime partie est utilisée techniquement aujourd'hui.

Sources d'énergie renouvelables

Energie solaire

Le Soleil est la plus importante de toutes les sources d'énergie renouvelables. L'énergie de son rayonnement peut être utilisée soit directement, soit indirectement, p.ex. par le biais de l'énergie thermique emmagasinée par l'environnement.

Utilisation directe du rayonnement

- Utilisation passive du rayonnement solaire (fenêtres orientées au sud, serres)
- Capteurs solaires à basse température pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage
- Installations photovoltaïques pour la production d'électricité
- Centrale solaire thermique (de la vapeur d'eau produite par l'énergie solaire entraîne une turbine à vapeur qui, à son tour, entraîne une génératrice produisant de l'électricité)

Chaleur de l'environnement

- Installations de pompes à chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

Force hydraulique

- Centrales hydrauliques pour la production d'électricité (autrefois, la force hydraulique était utilisée aussi pour l'entraînement direct)

Vent

- Eoliennes pour la production d'électricité et l'entraînement direct

Biomasse

- Installations de biogaz pour la production de chaleur et d'électricité, le gaz étant issu de l'agriculture, des décharges publiques, des stations d'épuration, etc.
- Chaudières à bois pour la production de chaleur et d'électricité

Géothermie

L'énergie du noyau terrestre chaud peut être récupérée, par exemple, pour le chauffage, grâce à des forages en profondeur. Cette chaleur provient essentiellement des processus naturels de désintégration nucléaire.

Energie des marées

La position relative variable de la Terre, de la Lune et du Soleil est la source de forces d'attraction importantes agissant sur les océans; l'énergie des marées qui en résultent peut être transformée en électricité dans des centrales marémotrices.

Qui conçoit les installations solaires?

Divers corps de métiers prennent part à l'étude et à la construction. Pour la réussite d'une installation, une bonne coopération entre les divers groupes professionnels est indispensable.

Remarque: Pour les installations de production d'eau chaude, il existe aujourd'hui des systèmes compacts (kits ou systèmes clé en main) qui permettent de réduire considérablement les frais d'étude et de montage.

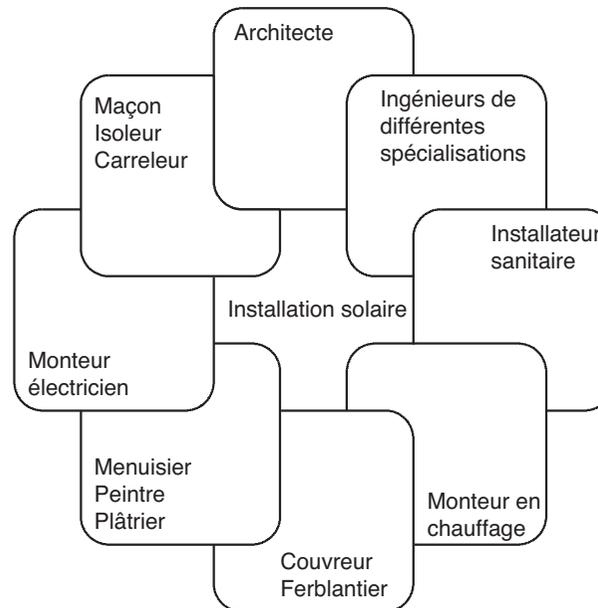


Fig. 1: Les intervenants de l'étude et de la réalisation d'une installation solaire

2 Objectifs de la formation

L'apprentie, l'apprenti ...

- sait donner des exemples de sources d'énergie renouvelables.
- sait décrire des exemples d'utilisations passive et active de l'énergie solaire.
- sait expliquer les schémas de principe des installations solaires thermiques.
- connaît les principes de fonctionnement et les éléments d'une installation solaire photovoltaïque.

Exemples de réponses:

- énergie solaire
- biomasse (bois)
- force hydraulique
- énergie éolienne
- chaleur de l'environnement, mise en valeur par des pompes à chaleur
- géothermie
- énergie des marées

passive: fenêtres orientées plein sud, serres et jardins d'hiver, isolation thermique transparente (ou translucide)

active: capteurs, installations photovoltaïques, pompes à chaleur, installations de biogaz, centrales hydroélectriques, éoliennes, chaudières à bois, turbines à vapeur solaires

L'irradiance solaire, c.-à-d. la puissance rayonnante reçue du Soleil par m^2 , dépend de l'orientation des capteurs, de l'heure de la journée et de la période de l'année.

L'énergie solaire réchauffe l'eau dans les capteurs pour les besoins du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire.

Les modules photovoltaïques transforment l'énergie solaire directement en courant continu.

Dans une installation en îlot, l'énergie est stockée dans une batterie par l'intermédiaire d'un régulateur de charge.

- connaît les prescriptions relatives aux installations et les normes

Dans une installation avec injection dans le réseau, l'énergie est convertie, au moyen d'un onduleur, en courant alternatif adapté en tension, fréquence et phase à celui du réseau, avant d'être finalement injectée dans ce dernier.

Seuls les installateurs compétents sont autorisés à travailler sur la partie électrique d'une installation basse tension.

Pour les installations photovoltaïques raccordées au réseau, il faut une autorisation de raccordement délivrée par le propriétaire du réseau (entreprise électrique).

Seul du matériel d'installation adéquat sera utilisé :

- Les panneaux photovoltaïques doivent être séparés les uns des autres par des diodes et des fusibles (ou coupe-circuits) de sécurité.
- La protection contre la foudre est assurée par des parafoudres et des mises à terre adéquates.
- Les câbles exposés à la lumière du soleil doivent être résistants aux rayons ultraviolets (UV).

- connaît les ordres de grandeur du rendement et de la production d'énergie

Photovoltaïque:

1 W_c → production de 1 kWh/a

1 W_c → surface de 0,01 m²

1 kW_c → surface de 10 m²

Thermique:

1 m² → production: 500 kWh/a
(capteurs avec couverture)

1 m² → production: 300 kWh/a
(capteurs sans couverture)

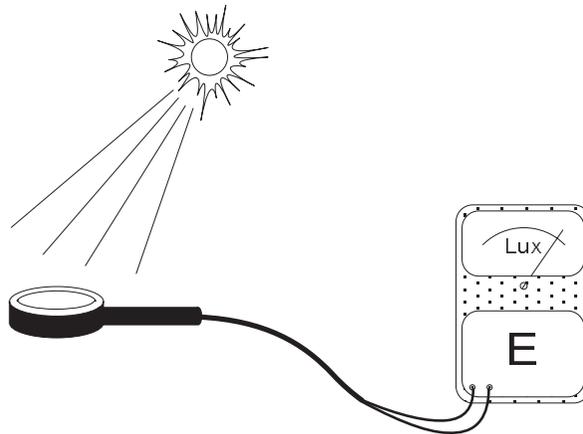
3 Eléments proposés pour le plan des leçons

Vidéo

Pour aborder la matière, les cassettes vidéo suivantes sont recommandées :

- Photovoltaïque:
Introduction pour architectes et maîtres d'ouvrages
- Production de chaleur:
Préchauffage solaire, chauffage et eau chaude
- Utilisation passive:
Soleil et architecture

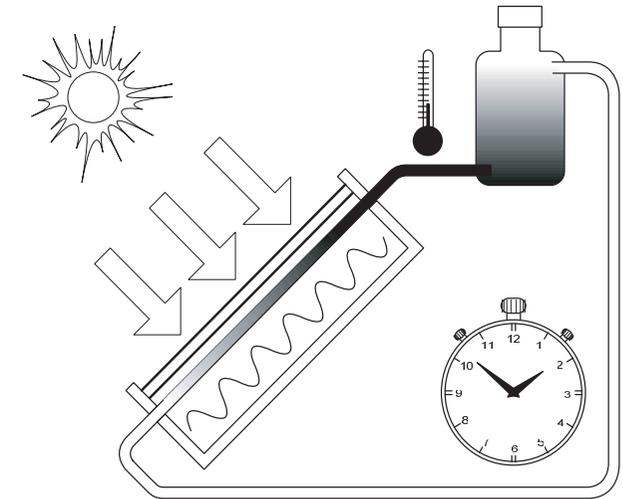
Eclairage lumineux



Comme étape préparatoire au thème, on peut faire à l'avance des mesures de photométrie. La classe mesure avec un luxmètre l'éclairage lumineux en plein air. Au besoin, un appareil de photo avec un posemètre intégré peut aussi faire l'affaire. On mesure:

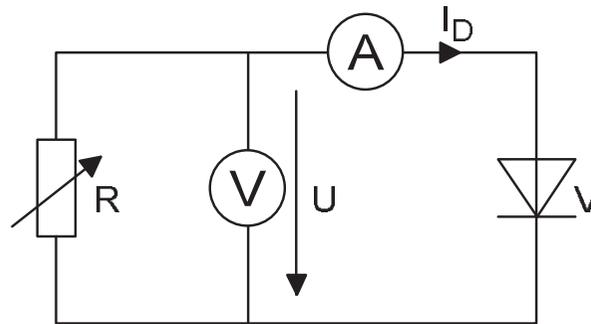
- à divers moments de la journée ou de l'année
- dans différentes conditions atmosphériques ou à l'ombre
- dans plusieurs directions du ciel

Le soleil réchauffe l'eau



Un capteur (p.ex. d'Énergie solaire SA à Sierre) et un réservoir (accumulateur) sont reliés en circuit par des tuyaux. En disposant le réservoir au-dessus du capteur, l'eau circule par gravité et réchauffe l'accumulateur. En mesurant la température du capteur et celle de l'accumulateur, on peut montrer le fonctionnement de l'installation. On peut aussi calculer la production d'énergie par m^2 de capteur.

Les cellules solaires transforment la lumière en énergie électrique



On éclaire un module photovoltaïque avec les rayons du soleil ou avec un projecteur à halogènes. A l'aide d'une résistance variable, on peut tracer la caractéristique U-I. On peut aussi calculer la puissance pour différentes charges. On peut alors déterminer le point de fonctionnement optimal (MPP ou Maximum Power Point).

Un projet d'installation solaire

On demande aux élèves de se rendre fictivement dans divers grands magasins et commerces d'articles solaires (Do it yourself, commerces de matériaux de construction et représentants d'articles solaires) pour faire l'acquisition des composants nécessaires à une installation solaire :

- installation PV en îlot, avec modules solaires, accu, régulateur de charge et lampes pour l'éclairage
- installation PV raccordée au réseau, avec modules solaires et onduleur
- installation pour le préchauffage solaire avec capteurs, tuyauterie, pompes de circulation et accumulateur.

A cette occasion, les élèves doivent être en mesure de répondre à des questions concernant la puissance, la surface nécessaire et les coûts. A titre subsidiaire, on leur demande d'évaluer les coûts énergétiques.

Des prospectus ou des fiches techniques peuvent aussi être distribués aux élèves. Ils en tireront la liste des composants nécessaires à l'installation solaire. Les élèves peuvent demander à leur distributeur d'énergie comment est réglée l'injection de courant photovoltaïque dans le réseau. Ils poseront des questions sur la mesure, la rétribution du courant injecté et les prescriptions spécifiques aux installations solaires.

4 Connaissances de base

4.1 Constante solaire, rayonnement incident

Le rayonnement atteignant l'atmosphère terrestre possède une « intensité » de 1367 watt par mètre carré (W/m^2), qu'on désigne sous le nom de **constante solaire**. En Suisse et par beau temps, 1000 W/m^2 de ce rayonnement atteignent le sol. En haute montagne par contre, les valeurs maximales peuvent atteindre 1500 W/m^2 grâce au rayonnement supplémentaire réfléchi par la neige et les nuages. On appelle rayonnement global le rayonnement solaire incident à la surface de la Terre. Il se compose du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

Influence des conditions atmosphériques

ciel bleu et clair:	1000 W/m^2
soleil perçant juste les nuages:	600 W/m^2
soleil visible comme un disque blanc:	300 W/m^2
jour d'hiver couvert (sombre):	100 W/m^2

L'énergie moyenne du rayonnement solaire reçue annuellement en Suisse est d'environ 1'100 kWh/m^2 .

Sur le territoire suisse, le Soleil dispense environ 200 fois plus d'énergie que la consommation globale du pays (250 milliards de kWh par an).

Le rayonnement solaire atteignant une surface terrestre horizontale subit un cycle diurne suite à la rotation de la Terre autour de son axe et un cycle saisonnier annuel suite à l'inclinaison de 23.5° du plan équatorial par rapport au plan de l'orbite terrestre.

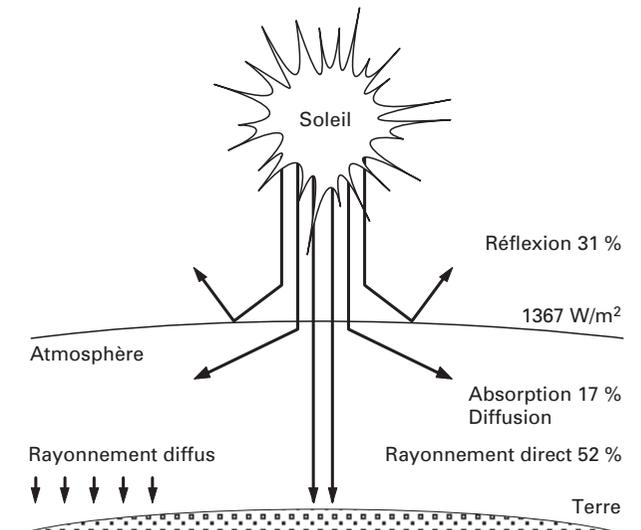


Fig. 2: Répartition du rayonnement solaire

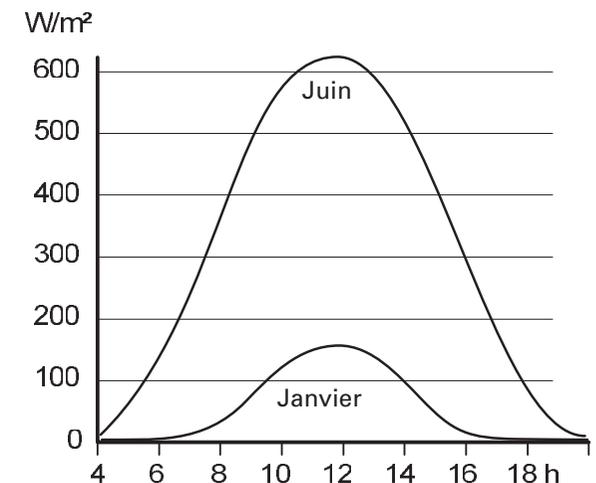


Fig. 3: Variation diurne du rayonnement global moyen à Zurich

A ces deux variations périodiques qui sont calculables mathématiquement se superposent les variations du rayonnement incident dues aux conditions météorologiques. De telles variations se laissent chiffrer seulement statistiquement, par de longues séries de mesures pour un nombre de sites aussi élevé que possible.
 (P. Valko : Données solaires pour la Suisse, Schweizer Baudokumentation, 4249 Blauen)



Fig. 4: Moyenne annuelle du rayonnement global incident sur une surface horizontale en Suisse

Une partie du rayonnement solaire se perd dans l'atmosphère par réflexion, absorption et diffusion. La transparence de l'atmosphère (appelée masse d'air optique, abréviation AM, de l'anglais Air Mass) dépend de sa composition et de son épaisseur. AM1 signifie que les rayons du soleil pénètrent verticalement dans l'atmosphère.

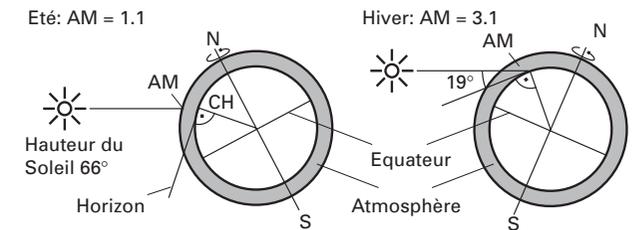


Fig. 5: Distance parcourue par la lumière solaire à travers l'atmosphère en été (21 juin) ou en hiver (21 décembre) pour un observateur situé en Suisse.

4.2 Utilisation passive de l'énergie solaire

L'utilisation passive de l'énergie solaire consiste à remplacer le plus possible d'énergie traditionnelle par de l'énergie solaire grâce à des mesures appropriées au niveau de la construction du bâtiment. On y parvient essentiellement en orientant de grandes surfaces transparentes vers le sud et en disposant judicieusement des masses accumultrices de chaleur (murs, planchers, sols) à l'intérieur du bâtiment.

1. Fenêtre

Le soleil ou le rayonnement diffus réchauffe le local à travers la fenêtre pendant la saison froide. Des parois et un plancher particulièrement épais jouent le rôle de blocs accumulateurs de chaleur. De cette manière, les déperditions de 1 à 2 jours peuvent être couvertes.

En été, l'avant-toit offre l'ombre indispensable. Sans mesures particulières de la part des occupants, il faut compter avec des pertes de chaleur par la fenêtre, la nuit et par mauvais temps, car même avec un bon vitrage, les fenêtres ont toujours un coefficient de transmission de chaleur (valeur U) de 3 à 5 fois plus élevé que les murs.

2. Serre ou jardin d'hiver

Une serre – on dit aussi jardin d'hiver – située devant une fenêtre sert d'espace tampon et tire parti aussi du rayonnement diffus. Les gains en chaleur sont très étroitement liés au comportement des utilisateurs (réglage des éléments de protection solaire et des clapets de ventilation).

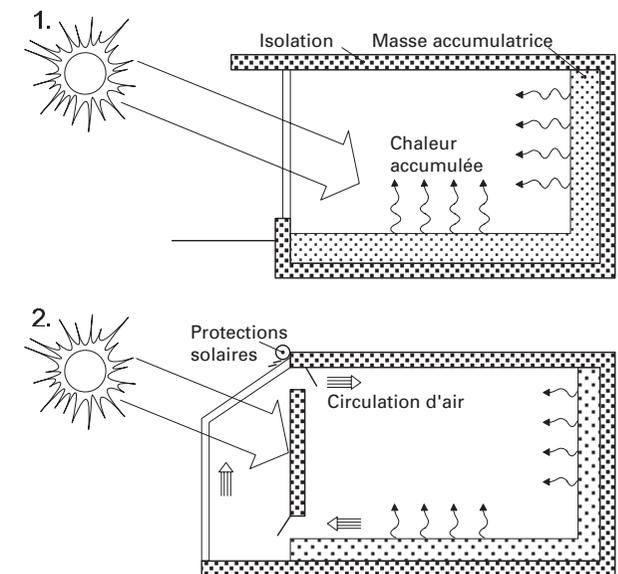


Fig. 6a: Les 4 représentations montrent les possibilités d'exploitation passive de l'énergie solaire.

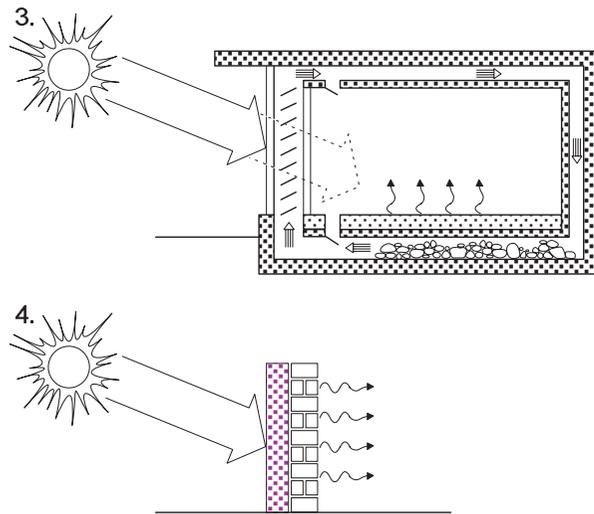


Fig. 6b: Les 4 représentations montrent les possibilités d'exploitation passive de l'énergie solaire.

3. Capteur-fenêtre

Un capteur-fenêtre permet d'obtenir des gains solaires directs ou stockables dans la proportion souhaitée. A cause des ventilateurs, de la régulation et de l'accumulateur de chaleur séparé (p.ex. lit de galets), ce système est très coûteux. Il permet de traverser des périodes de mauvais temps de 4 jours environ sans apport d'énergie de l'extérieur.

4. Isolation transparente

L'isolation transparente convient à toute façade orientée au sud. De jour, le matériau isolant transparent laisse passer les rayons solaires jusqu'à l'accumulateur de chaleur (le mur). La nuit ou par mauvais temps, l'isolation empêche le rayonnement infrarouge de s'échapper vers l'extérieur. Ce principe de l'isolation transparente est approprié également pour les fenêtres et les capteurs solaires. Afin d'éviter les surchauffes en été, les façades munies d'une isolation transparente doivent être protégées (protections solaires, stores).

Isolation

L'exploitation passive de l'énergie solaire est couplée à l'isolation de l'enveloppe du bâtiment. Une des mesures d'économie d'énergie les plus importantes consiste ainsi en une bonne isolation extérieure des parois, des planchers (plafonds) et des fenêtres. En plus, il faut veiller à ce qu'il n'y ait pas de pont thermique.

Une bonne isolation de l'enveloppe est, par conséquent, une condition préalable pour que l'utilisation

passive de l'énergie solaire soit efficace.

La valeur U (coefficient de transmission de chaleur) renseigne sur la qualité d'une isolation.

Les maisons MINERGIE avec une bonne isolation nécessitent annuellement au maximum 45 kWh/m² (surface de plancher) pour le chauffage et l'eau chaude (l'électricité consommée étant comptée double).

Valeur U pour ...	Constructions anciennes	Normes en vigueur	Maison MINERGIE
mur extérieur	1,2	0,3	p. ex. 0,20
fenêtre	3,0	2,0	p. ex. 1,10
toiture	0,8	0,3	p. ex. 0,15
plancher sur cave	1,4	0,4	p. ex. 0,20
valeur U moyenne	1,2	0,4	p. ex. 0,25

Fig. 7: Le tableau montre l'évolution des exigences en matière de protection thermique dans la construction (valeurs U en W/m²K)

4.3 Utilisation indirecte de l'énergie solaire

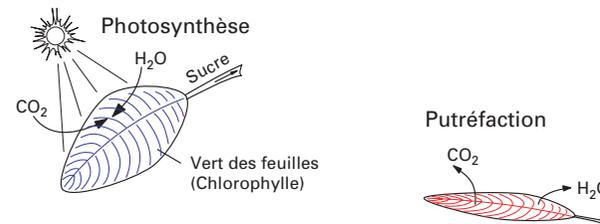
L'énergie solaire incidente peut être exploitée de manière très diverse:

Forme de l'énergie solaire

Application correspondante

Cycle du CO₂

Les plantes vertes sont en mesure de produire des substances biologiques (sucres, glucides) à partir de l'eau H₂O et du gaz carbonique CO₂ grâce à la photosynthèse, en utilisant l'énergie de la lumière solaire. Les plantes ont ainsi la possibilité de stocker l'énergie solaire sous forme chimique (production de substances). Lors de la putréfaction, les bactéries décomposent à nouveau la substance organique, principalement en CO₂ et H₂O. Le cycle est ainsi bouclé.



Biomasse

La biomasse peut être utilisée sous diverses formes: bois, fumier, biogaz provenant des stations d'épuration ou de compostage, déchets végétaux et animaux, tourbe.

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) font aussi partie de la biomasse au sens large.

La biomasse se transporte et se stocke facilement et sans danger; elle peut être utilisée comme combustible et comme carburant.

Cycle de l'eau

Sous l'effet de l'ensoleillement, l'eau s'évapore du sol, des plans d'eau et des rivières ainsi que des plantes. La vapeur d'eau de l'atmosphère retombe plus tard sur la Terre sous forme de précipitations, s'infiltrant partiellement dans le sol ou va se jeter dans la mer.

Aménagements hydrauliques

Centrales hydroélectriques à accumulation ou au fil de l'eau.

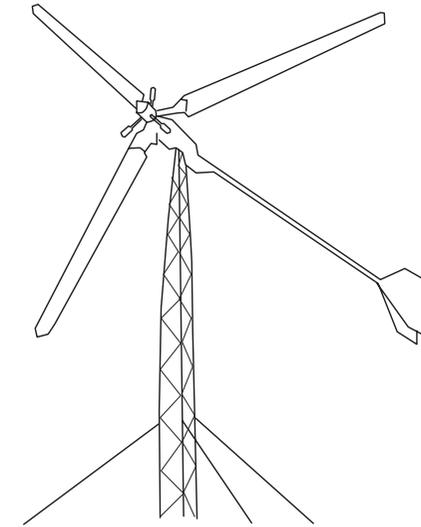
L'eau entraîne le groupe turbine-générateur pour la production de l'énergie électrique.

Vent

Le rayonnement solaire réchauffe la surface du globe terrestre et l'atmosphère. Il en résulte des différences de température d'un endroit à l'autre, et donc des différences de pression. Ce qui donne ensuite naissance aux phénomènes météorologiques et crée en particulier le vent et les vagues.

Eoliennes

Bateaux à voile, éoliennes, moulins à vent. Dans les centrales convertissant l'énergie des vagues, l'énergie de leur mouvement entraîne un mécanisme relié à une génératrice.



Marées

La position relative variable de la Terre, de la Lune et du Soleil est la source de forces d'attraction importantes agissant sur les océans; en conséquence, le niveau de ces derniers est sujet à des fluctuations régulières, les marées. En pleine mer, l'amplitude de ces variations est d'un mètre environ. La topographie des côtes peut cependant causer localement des variations de 20 m et plus.

Centrales marémotrices

La différence du niveau des eaux entre la marée haute et la marée basse peut être exploitée par un barrage et des turbines hydrauliques pour produire de l'électricité.

4.4 Capteurs solaires thermiques

Capteur solaire

La transformation directe du rayonnement solaire en énergie utile s'effectue essentiellement par le réchauffement de l'eau dans des capteurs.

Le capteur solaire est un dispositif qui permet d'absorber l'énergie solaire et d'utiliser la chaleur produite pour préparer de l'eau chaude sanitaire et apporter une contribution au chauffage de locaux.

Le rendement de cette conversion en chaleur est relativement favorable (30-50%).

Avec un tel équipement, 15 à 25% des besoins en chaleur d'un bâtiment situé sur le Plateau suisse peuvent être couverts.

En Suisse, on installera les capteurs solaires de préférence avec une inclinaison de 30 à 60° et une orientation sud-est à sud-ouest.

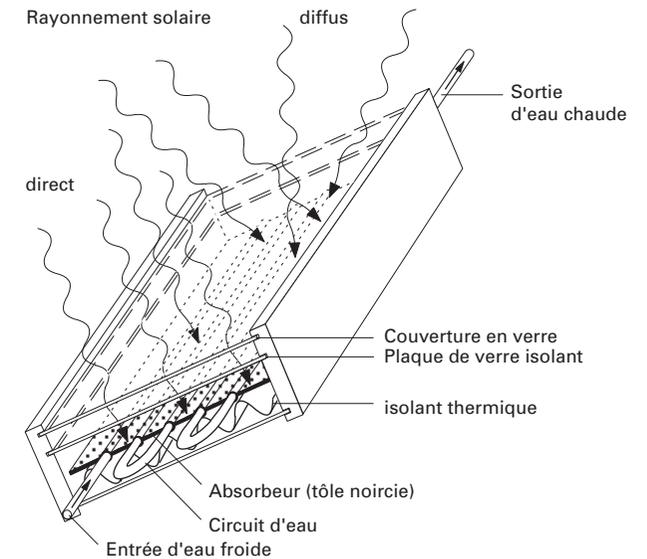


Fig. 8: Représentation en coupe d'un capteur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire

Installations solaires thermiques

Production d'eau chaude

Le fluide caloporteur circulant dans le circuit se réchauffe dans le capteur. Dès que la température dans le capteur est plus élevée que celle dans l'accumulateur, la pompe de circulation se met en marche. L'échangeur de chaleur transmet l'énergie solaire à l'eau.

La pompe s'arrête dès que le capteur est plus froid que le bas de l'accumulateur. Si le soleil ne suffit pas, le chauffage d'appoint (bois, gaz, mazout ou chauffage électrique) réchauffe la partie supérieure de l'accumulateur.

Dans le cas des piscines, on utilise aussi des capteurs en matière plastique sans couverture pour chauffer l'eau du bassin, directement dans les capteurs. Comme cette eau a plus ou moins la température de l'air ambiant, il n'est pas nécessaire d'isoler les conduites ni les absorbeurs-capteurs, ce qui abaisse sensiblement le coût de l'installation.

Exemple de coûts

Pour un ménage de 4 personnes, on installera un accumulateur de 300 à 400 litres avec chauffage d'appoint pour la période froide.

Surface des capteurs: 3-4 m²

Coût: environ Fr. 12'000.-

Avec une telle installation, l'énergie solaire permet de couvrir jusqu'à 50% des besoins en eau chaude sanitaire, voire davantage en altitude et au Sud des Alpes grâce au climat de ces régions, ensoleillé aussi en hiver.

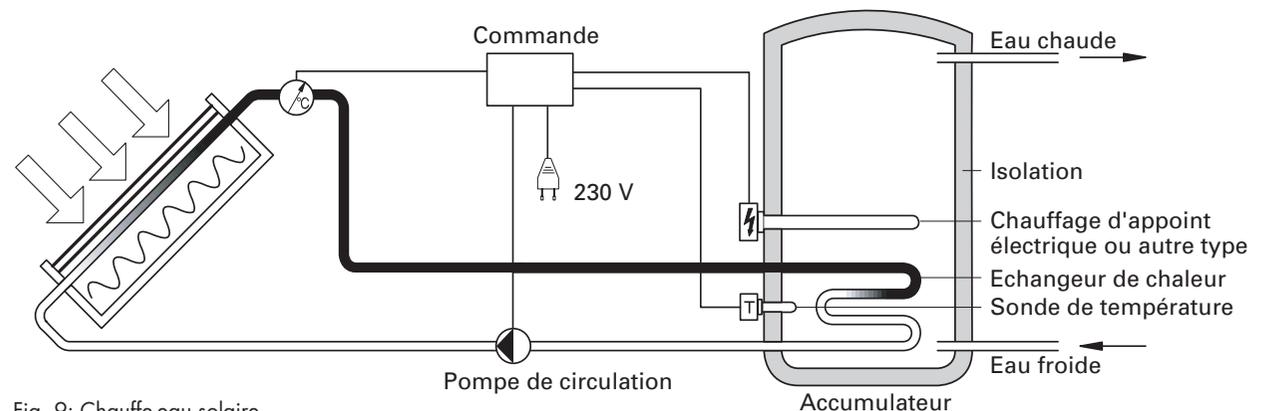


Fig. 9: Chauffe-eau solaire

Installation pour l'eau chaude sanitaire et une contribution au chauffage des locaux

Si en plus, une installation doit servir d'appoint solaire au système de chauffage, il faudra une surface de capteurs 2 à 3 fois plus grande ainsi qu'un accumulateur 3 à 4 fois plus grand avec un ballon d'eau chaude immergé dans l'eau du circuit du chauffage (accumulateur combiné). Dans un immeuble à plusieurs appartements, on se limite le plus souvent au préchauffage de l'eau chaude pour des raisons économiques.

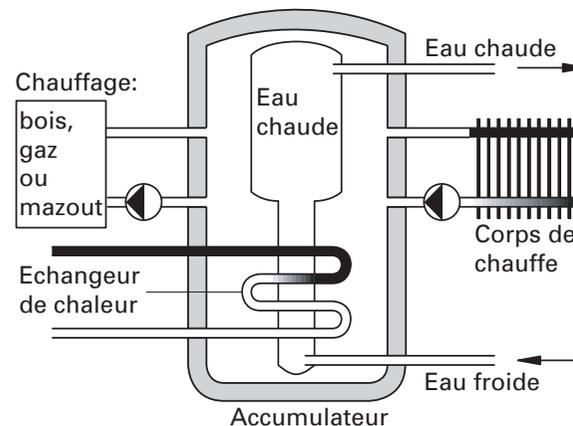


Fig. 10: Installation solaire de production d'eau chaude sanitaire et de chauffage

Exemple de coûts

Surface des capteurs: 15 m²
 Accumulateur combiné de 2000 l
 Pompes et régulation
Coût: environ Fr. 20'000.-

Installations compactes «clé en main» (kits solaires)

Pour la production exclusive d'eau chaude sanitaire, il existe aujourd'hui des kits solaires permettant de réduire considérablement les coûts de l'étude et du montage. Les kits solaires remplacent les chauffe-eau classiques. Ils ont un rendement supérieur, leur durée de vie et leur fiabilité à l'exploitation sont équivalentes à celles des chauffe-eau traditionnels. Un kit solaire se compose d'un capteur de 3 à 5 m² et d'un accumulateur de 300 à 500 litres, avec un chauffage d'appoint, de la tuyauterie, des vannes, une pompe de circulation et une régulation.

Exemple de coûts

Kit complet, toutes prestations comprises (montage, etc.)
Coût: moins de Fr. 12'000.-

4.5 Photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour la production d'électricité, une énergie de haute qualité. Cependant, leur rendement est bien inférieur à celui des capteurs solaires thermiques.

La transformation directe de l'énergie solaire en électricité par des cellules solaires (photovoltaïques) est l'une des options les plus prometteuses, qui devrait permettre à long terme d'abandonner les sources d'énergie exerçant la pression la plus forte sur l'environnement. Les installations photovoltaïques sont faciles à monter, sans parties mobiles; elles ne nécessitent presque pas d'entretien et présentent ainsi une durée de vie extrêmement longue. Comparativement à d'autres installations de production d'énergie, les installations photovoltaïques sont toujours visibles: le rayonnement solaire présentant une faible densité énergétique, les installations photovoltaïques nécessitent des surfaces de captage relativement grandes et visibles. C'est pour cela que les aspects d'esthétique et d'intégration aux structures du bâtiment jouent un rôle important dans le cas des installations photovoltaïques. Actuellement, ces installations ne peuvent pas encore concurrencer les autres modes de production d'électricité du point de vue économique. Dans bien des cas, elles font cependant l'objet d'un soutien de la part des pouvoirs publics, en raison des développements futurs prometteurs.

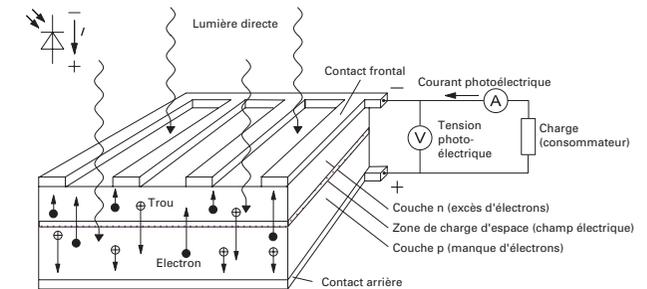


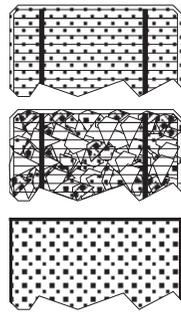
Fig. 11: Représentation d'une cellule solaire avec barrière de potentiel et courant photoélectrique

Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques au silicium consistent en deux couches dopées, de caractéristiques électriques opposées. Dans la zone de charge d'espace (barrière n-p), les électrons "détachés" par la lumière et les "trous" sont poussés dans des directions opposées, générant ainsi une tension électrique continue de l'ordre de 0,6 V. Des couches conductrices ou des bandes de contact sur les faces frontale et arrière permettent de recueillir le courant électrique et de l'utiliser. Les cellules solaires délivrent une tension continue.

Elles ont les propriétés suivantes:

- La tension est pratiquement constante et, de plus, presque indépendante de l'irradiance solaire («intensité du rayonnement»).
- La puissance électrique augmente proportionnellement avec la puissance du rayonnement.



Types de cellules solaires

Pour caractériser la puissance de cellules photovoltaïques, on indique leur puissance de crête en W_c (en anglais W_p ; p=peak). Cette valeur indique la puissance délivrée par le champ de cellules solaires lorsqu'elles sont exposées à un rayonnement incident de 1000 W/m^2 pour une température de cellule de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Selon des considérations théoriques, les cellules solaires devraient pouvoir atteindre en laboratoire un rendement d'environ 40%. Il en va, aujourd'hui encore, autrement dans la pratique. On distingue:

- les **cellules solaires monocristallines**, de surface bleu-gris uniforme et d'un rendement de 14 à 18%. On les obtient en sciant en couches minces un monocristal de silicium fabriqué par tirage. L'énergie nécessaire à leur production (énergie grise) s'élève à 8 kWh/W_c .
- les **cellules solaires polycristallines**, qui ont un éclat brillant nacré bleu-gris (multicolore) et un rendement de 10 à 14%. On les prépare en sciant en couches minces un bloc de silicium coulé.
- les **cellules solaires amorphes**, de surface uniformément sombre, utilisées pour la fourniture de l'énergie dans les petits appareils tels que calculatrices, montres, etc. Leur rendement atteint 6 à 10%. On les obtient en déposant des couches minces de silicium sur un matériau de base (substrat). L'énergie nécessaire à leur production (énergie grise) s'élève à 3 kWh/W_c .

Générateurs solaires

Les générateurs solaires sont des unités prêtes à l'emploi, composées de modules ou panneaux solaires. Un module solaire est obtenu en connectant électriquement plusieurs cellules solaires. Par branchement en parallèle ou en série de plusieurs cellules solaires, on atteint la tension d'exploitation ou le niveau du courant électrique désiré pour les modules. Ceux-ci sont ensuite reliés électriquement les uns aux autres, selon la tension d'exploitation ou la puissance désirée, pour former de grandes unités de production (champs photovoltaïques). Une installation photovoltaïque de 1 m^2 (surface du panneau) fournit une puissance de crête d'environ $100 W_c$, ce qui correspond à une production d'énergie annuelle de 60 à 140 kWh environ. La plus petite de ces valeurs concerne les installations situées sur le Plateau suisse avec une orientation non optimale, tandis que la plus grande est valable pour des installations situées dans la partie méridionale du pays ou les Alpes, avec une orientation optimale.

Installations autonomes ou en îlot

Les installations en îlot, appelées aussi installations autonomes, sont construites plus spécialement là où il n'y a pas de raccordement au réseau public. L'énergie doit être en général stockée dans des batteries. Actuellement, on trouve surtout sur le marché de petites installations de ce type pour les lampes de jardin, l'éclairage des rues, les systèmes d'alarme, etc.

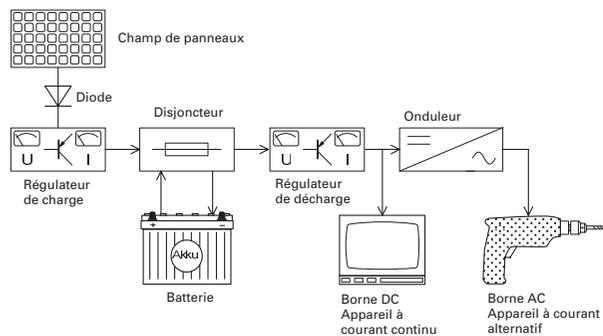


Fig. 12: Les principaux composants d'une installation en îlot.

Exemple de coûts (kits)

Type de construction

- Générateur solaire P = 53 W
Surface du panneau: 0,4 m²
- Régulateur de charge / décharge: 8 A
- Batterie 12 V / 110 Ah avec disjoncteur
- Accessoires, dont câble et matériel de montage
- Consommateurs: luminaires à faible consommation d'énergie: 5 W, 3x11 W
Lampe de lecture à halogènes: 20 W

Coût: environ Fr. 1'800.-

Le régulateur de charge installé en aval du champ de panneaux empêche la surcharge de la batterie. Celle-ci emmagasine l'énergie pour la restituer pendant les heures sans soleil. Elle est protégée contre les courts-circuits par un élément de sécurité (disjoncteur). Les batteries au plomb utilisées normalement ont un rendement de l'ordre de 75%.

Le régulateur de décharge empêche la décharge profonde des batteries par les consommateurs branchés. Les cellules solaires produisent du courant continu; on les utilise donc surtout pour alimenter des appareils à courant continu.

Plusieurs de ces appareils sont disponibles dans le commerce: luminaires, réfrigérateurs, congélateurs, appareils radio et TV, pompes, perceuses, etc. Si certains appareils demandent du courant alternatif, il faut prévoir un onduleur.

Le concept de l'installation dépend du type des consommateurs à raccorder.

Voici les points principaux à préciser dès le début de l'étude de l'installation :

- nombre et type de consommateurs
- durées d'utilisation respectives
- autonomie du système: durée (nombre d'heures) pendant laquelle le consommateur peut utiliser l'énergie des batteries (période sans soleil)
- site ou emplacement de l'installation (pour la détermination de l'ensoleillement local et des effets d'ombrage possibles).
- rythme des services d'entretien de la batterie au plomb

Les bâtiments isolés telles que les cabanes de montagne ou les chalets de vacances ne sont souvent pas raccordés au réseau public. Car, dans ces cas-là, l'installation photovoltaïque est en général nettement plus avantageuse qu'un raccordement au réseau.

Installations raccordées au réseau

Les installations raccordées au réseau sont couplées au réseau électrique public. Il n'y a donc pas de batterie dans ce type d'installation. Dans des installations de plus de 1 kW_c, on peut réaliser des économies par couplage direct du générateur solaire au réseau par l'intermédiaire d'un onduleur approprié. L'excédent d'énergie non utilisé sur place est injecté dans le réseau et consommé par d'autres utilisateurs, ce qui décharge d'autant les autres fournisseurs de courant.

Le champ photovoltaïque est couplé à un convertisseur synchrone (onduleur), lequel transforme le courant continu des panneaux en courant alternatif de tension 230 V. Un compteur mesure l'énergie injectée dans le réseau public.

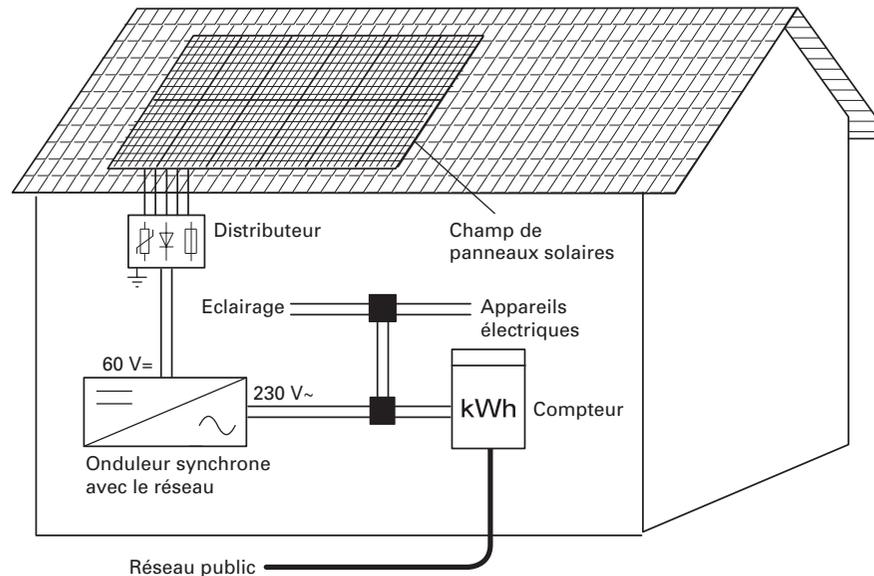


Fig. 13: Les principaux composants d'une installation raccordée au réseau.

Exemple de coûts pour une installation avec injection dans le réseau

La consommation moyenne d'électricité pour une famille de 4 personnes est de l'ordre de 4000 kWh par an. Avec une installation PV d'une puissance nominale de 3 kW_c, on peut produire 3000 kWh pendant cette période.

Surface des panneaux: 24 m²

Coût: environ Fr. 40'000.-

Coût moyen de production du kWh fourni par une installation avec injection dans le réseau:

0,8 à 2 Fr./kWh

La poursuite du développement des installations photovoltaïques dépend, dans une large mesure, du prix payé par les entreprises électriques pour le courant injecté.

Le dimensionnement de l'installation s'aligne le plus souvent sur le coût global admissible. Le coût de l'étude est aujourd'hui relativement bas grâce à la construction modulaire. Le plus important est de dimensionner correctement la puissance du champ de panneaux solaires en fonction de celle de l'onduleur. Puis, lors de l'exécution, il s'agit de garantir un montage conforme aux normes professionnelles, notamment pour les panneaux en toiture et les installations électriques.

On peut toujours subdiviser les installations PV, même les plus grandes, en plusieurs champs partiels de panneaux solaires. Ces derniers peuvent donc être placés aux emplacements les plus divers :

- toitures à pans inclinés
- toitures plates (panneaux sur des supports)
- façades (panneaux intégrés, même en rangées ou sur des protections solaires, etc.)
- infrastructures, par exemple en guise de protection anti-bruit aux abords des voies de circulation
- dans le terrain (sur des supports en hauteur pour éviter les détériorations...)

Onduleurs commandés par le réseau

Les exigences de qualité sont plus sévères pour ces onduleurs que dans le cas des installations en îlot.

Ils doivent garantir :

- la synchronisation avec le réseau
- l'égalité des tensions
- un arrêt automatique en cas de panne du réseau
- l'enclenchement et le déclenchement automatiques en fonctionnement normal

Les éléments semi-conducteurs à électrode de commande (thyristors) découpent la tension continue du champ solaire de nombreuses fois par seconde (hachage). La tension alternative sinusoïdale désirée s'obtient par modulation de la largeur des impulsions (PWM : Pulse Width Modulation). En utilisant une fréquence de commutation élevée, d'environ 20 kHz, on obtient un courant presque parfaitement sinusoïdal. Pendant la demi-alternance positive, les

thyristors V1 et V4 sont activés par les gâchettes G1 et G4. Pendant la demi-alternance négative, les thyristors V2 et V3 sont activés, et ainsi de suite. La tension alternative produite de 50 Hz est finalement adaptée à la tension du réseau par le transformateur T1 et lissée par le condensateur C2 pour l'atténuation des harmoniques.

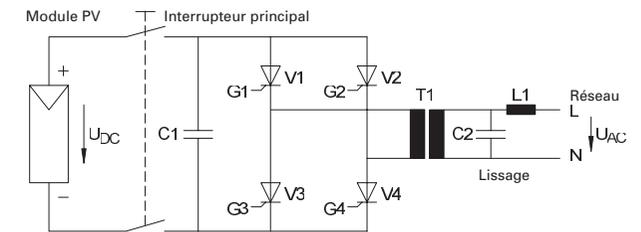


Fig. 14: L'illustration montre de façon simplifiée comment un module photovoltaïque est relié au réseau par le biais d'un onduleur.

Fonctions de l'onduleur:

Adaptation des amplitudes



Adaptation des fréquences



Adaptation des phases



Lissage des harmoniques

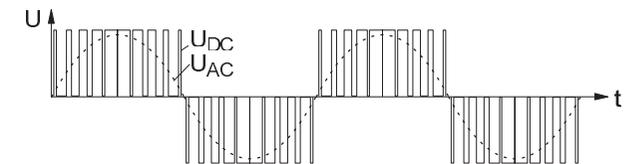
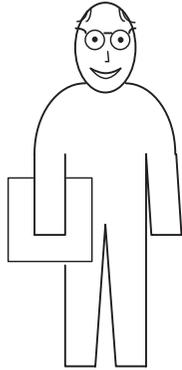


Fig. 15: L'illustration montre la formation d'une tension sinusoïdale à partir d'impulsions successives de tension.

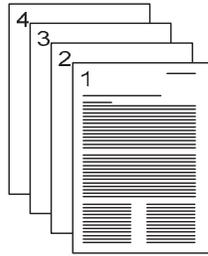


Prescriptions de montage

Le déroulement de la procédure d'autorisation pour les installations PV est similaire à celui applicable à d'autres installations de production d'énergie (IPE). L'autorisation est délivrée par les entreprises électriques.

Selon l'article 2 de l'Ordonnance sur les installations à basse tension (OIBT), le montage ou la modification de la partie électrique des installations PV ne peut être effectué que par des personnes ou des entreprises possédant une autorisation d'installation délivrée par l'entreprise responsable du contrôle ou au bénéfice d'une concession de l'Inspectorat fédéral des installations à courant fort (IFICF).

Procédure



1. L'exploitant doit déposer une demande de raccordement auprès de l'entreprise électrique compétente.
2. Le futur propriétaire de l'installation confie les travaux de montage à un installateur-électricien qui, avant le début des travaux, annonce ceux-ci à l'entreprise électrique.
3. L'entreprise électrique examine l'annonce des travaux faite par l'installateur et, le cas échéant, lui donne des directives complémentaires.
4. Une fois réalisée, l'installation doit être contrôlée.

Dispositifs de protection

En cas de panne du réseau, de variations de la tension (>10%), de fluctuations de la fréquence (>1%) ou de panne dans les circuits de commande, l'installation PV doit être déconnectée automatiquement du réseau.

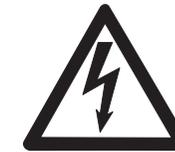
L'onduleur ne doit pas perturber les signaux émis par l'entreprise électrique pour commander à distance divers appareils (blocage des machines à laver, enclenchement des chauffe-eau, etc.). L'ouverture du disjoncteur de couplage (p.ex. le dis-

joncteur de protection des lignes) doit être commandée à la fois par un dispositif thermique de protection contre les surcharges et par un dispositif magnétique de protection contre les courts-circuits. Ce disjoncteur doit, de plus, être en mesure de protéger efficacement l'installation contre les courants de court-circuit en provenance du réseau. L'installation doit disposer d'un sectionneur bien visible pouvant être verrouillé. En cas de danger, l'accessibilité doit être garantie en tout temps aux personnes autorisées et aux pompiers.

Des écriteaux portant la mention «Attention! Installation avec injection dans le réseau» doivent être posés à côté du sectionneur séparant l'installation PV du réseau et près du dispositif de coupure en cas de surintensité.

Attention!
Installation avec injection

Prescriptions de sécurité



La pose d'équipements à courant continu exige beaucoup de précautions: exposés à la lumière, les panneaux sont sous tension. Les champs partiels seront séparés les uns des autres par des diodes et des fusibles.

Les cadres des panneaux doivent être reliés au dispositif de protection contre la foudre ou directement à la terre.

5 Exercices et solutions proposées

Exercice 1

Quel pourcentage du rayonnement solaire global annuel l'hiver représente-t-il?

Solution 1

D'après le diagramme: **environ 25%**

Exercice 2

Quelle doit être la surface d'une installation photovoltaïque pour que sa puissance de crête soit de 3 kW_c ? Quelle partie de la consommation annuelle moyenne d'un ménage cette installation pourra-t-elle couvrir?

Solution 2

Une installation photovoltaïque classique avec une surface de cellules solaires de 25 à 30 m^2 fournit une puissance de crête d'environ 3 kW_c . Par bon ensoleillement, elle produit annuellement de 2400 à 4000 kWh , ce qui représente plus des deux tiers de la consommation moyenne d'un ménage, eau chaude non comprise.

Exercice 3

Enumérer différentes installations destinées à exploiter l'énergie solaire sous les formes suivantes :

a) utilisation directe du rayonnement

- de manière passive

- de manière active

b) chaleur de l'environnement

c) cycle du CO₂

d) énergie hydraulique

e) vent

Solutions 3

a)

fenêtres orientées au sud
serres, jardins d'hiver
isolation transparente

capteurs solaires thermiques
installation photovoltaïque
centrale solaire thermique

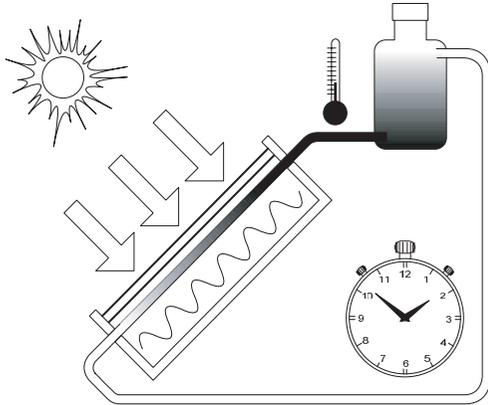
b) installations avec pompes à chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

c) chaudière à bois pour la production de chaleur
installation au biogaz pour la production de chaleur et d'électricité

d) centrale hydroélectrique pour la production d'électricité

e) éoliennes pour la production d'électricité

Manipulation 1:
Etude expérimentale d'un capteur solaire thermique



La température de l'eau est relevée à intervalles réguliers pendant que le capteur la chauffe.

L'accumulateur doit se situer au-dessus du capteur solaire.

Après avoir disposé et orienté le capteur solaire, on peut commencer les mesures:

ϑ_1 = température de l'eau au début de l'expérience (temps t_1)

V = volume total d'eau

t_1 = début des mesures

A = surface du capteur

ϑ_1 =

V =

t_1 =

A =

A la fin du chauffage de l'eau, la température n'augmente presque plus. On mesure alors la température finale de l'eau.

t_2 =

Evolution de la température

Reportez les résultats des mesures dans un tableau et représentez-les graphiquement.

ϑ [°C]	t [min]	
°C		
Température ϑ		
	Temps t	min

Calculs

Energie fournie par le capteur

$W = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$

ou par unité de surface de capteur

$WA = W / A$

Puissance

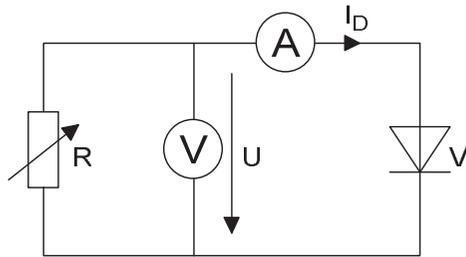
$P = W / \Delta t$

Manipulation 2:

Etude expérimentale d'une cellule solaire

Soumis à un rayonnement lumineux, la cellule produit un courant photoélectrique. Ce courant déplace la caractéristique « diode » de la cellule solaire vers le bas, dans la direction négative; l'amplitude du déplacement est égale au courant photoélectrique.

Schéma de mesure



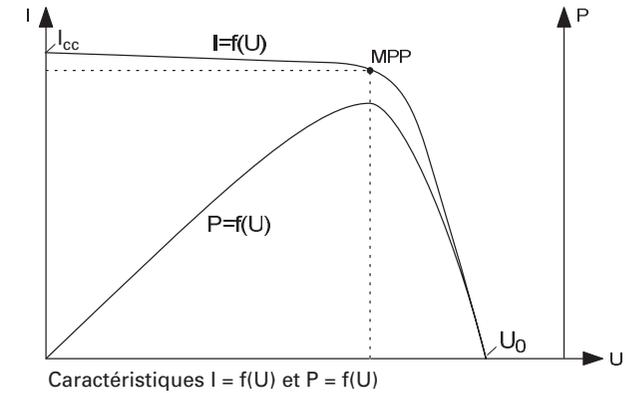
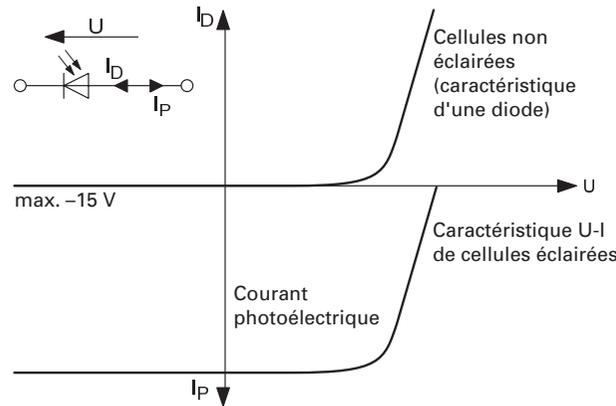
Caractéristiques

Etant donné que la cellule solaire travaille comme un générateur, le courant est compté positivement dans le sens inverse.

Pour la mesure, on fait varier continuellement la résistance de charge R tout en maintenant l'éclairement constant.

Les grandeurs suivantes sont d'un intérêt particulier pour les cellules solaires:

- Courbes**
- I courant
 - U tension
 - P puissance
- Points**
- I_{cc} courant de court-circuit
 - U_0 tension à vide
 - MPP puissance maximum (Maximum Power Point)



Représentation graphique

Reportez les résultats des mesures dans un tableau et représentez-les graphiquement.

	I [A]	U [V]	P [W]	
A				W
Courant I				Puissance P
				Tension U
				V

6 Bibliographie

Vidéo-cassettes VHS-PAL

- «La solution photovoltaïque», PACER 724.241 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1992
- «Soleil et architecture» – Guide pratique pour le projet, PACER 724.212 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1991
- «Les installations solaires thermiques», PACER 724.214 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1993

Publications

- Programmes d'impulsion (RAVEL, PI-BAT, PACER), CD-ROM, avec notamment
- Production d'eau chaude solaire, Dimensionnement, montage, mise en service, entretien, PACER 724.213 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1993
 - Habitat et économies d'énergie; des réponses pratiques, RAVEL 724.386 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1995
 - Centrales photovoltaïques: Outils pour le dimensionnement et la réalisation d'installations autonomes ou raccordées au réseau, PACER 724.243 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1996
 - Générateurs photovoltaïques – Principes de base, technique de montage et injection dans le réseau, PACER 724.242 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1991
 - Installations techniques des bâtiments: situation actuelle, Programme d'impulsion «Installations du bâtiment» 724.601 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1996

Les publications des programmes d'impulsion sur CD-ROM sont à commander auprès de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), case postale, 8039 Zurich.

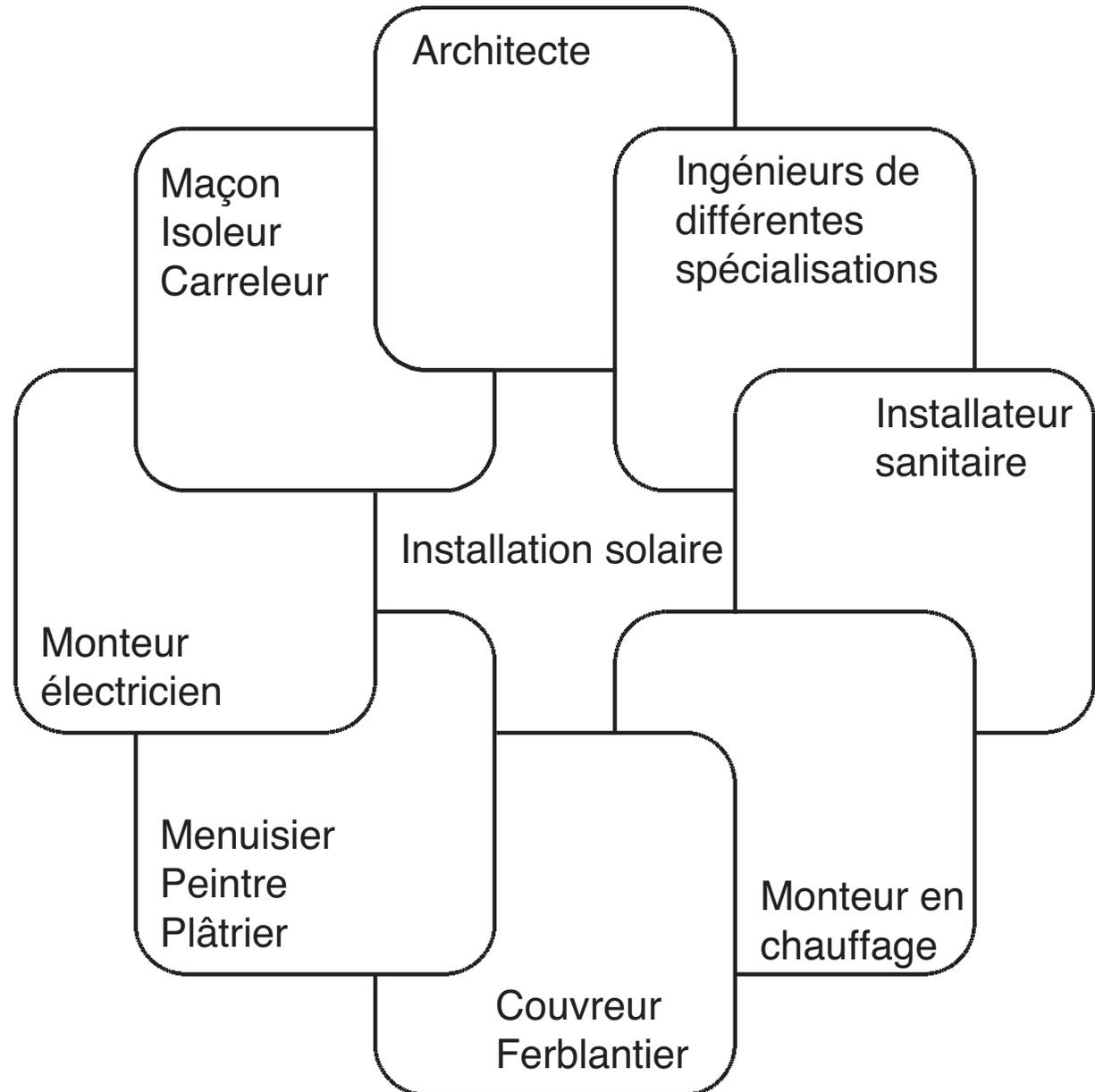
L'énergie - facteur-clé de notre temps: voir page 28

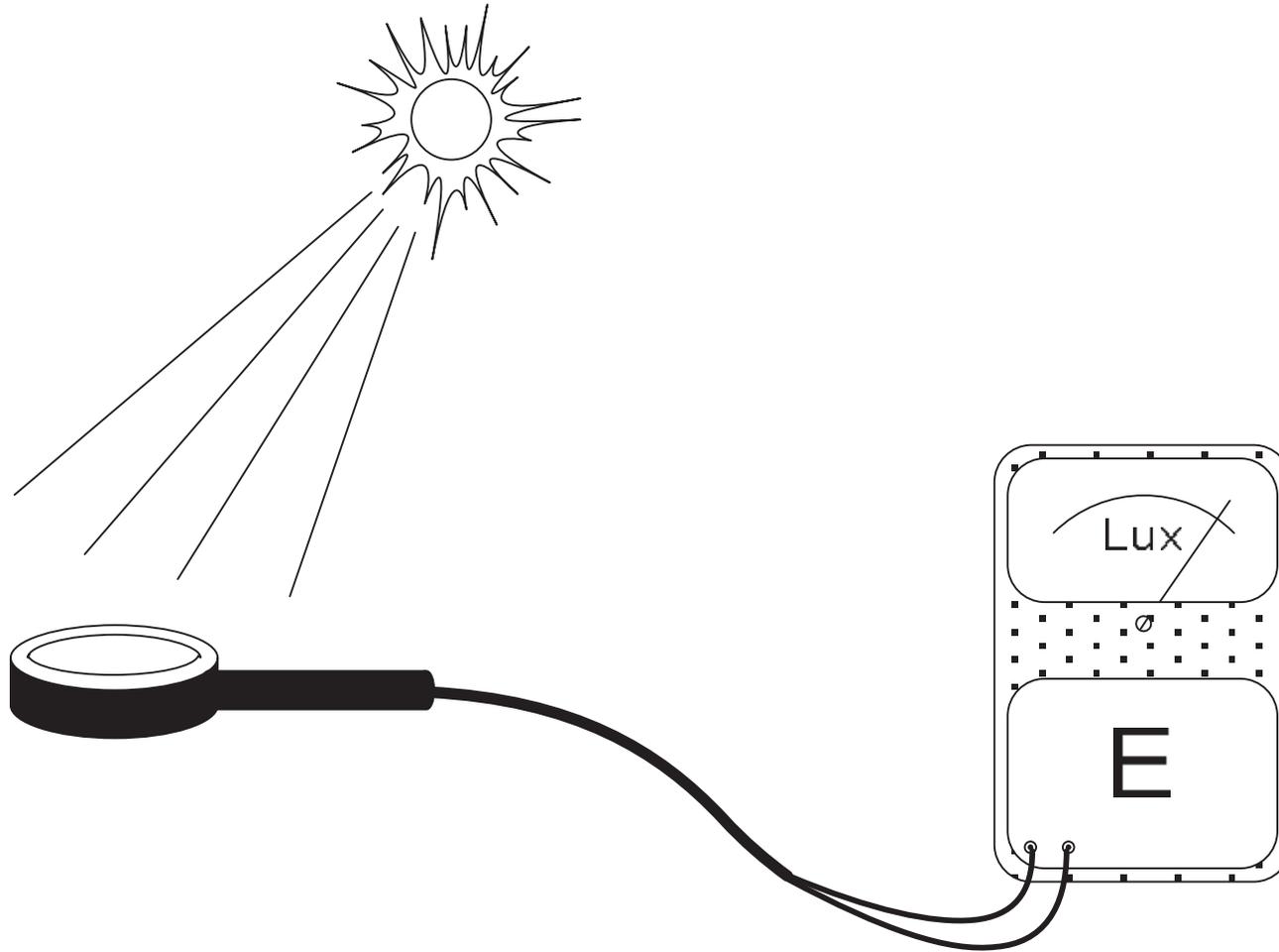
7 Sources

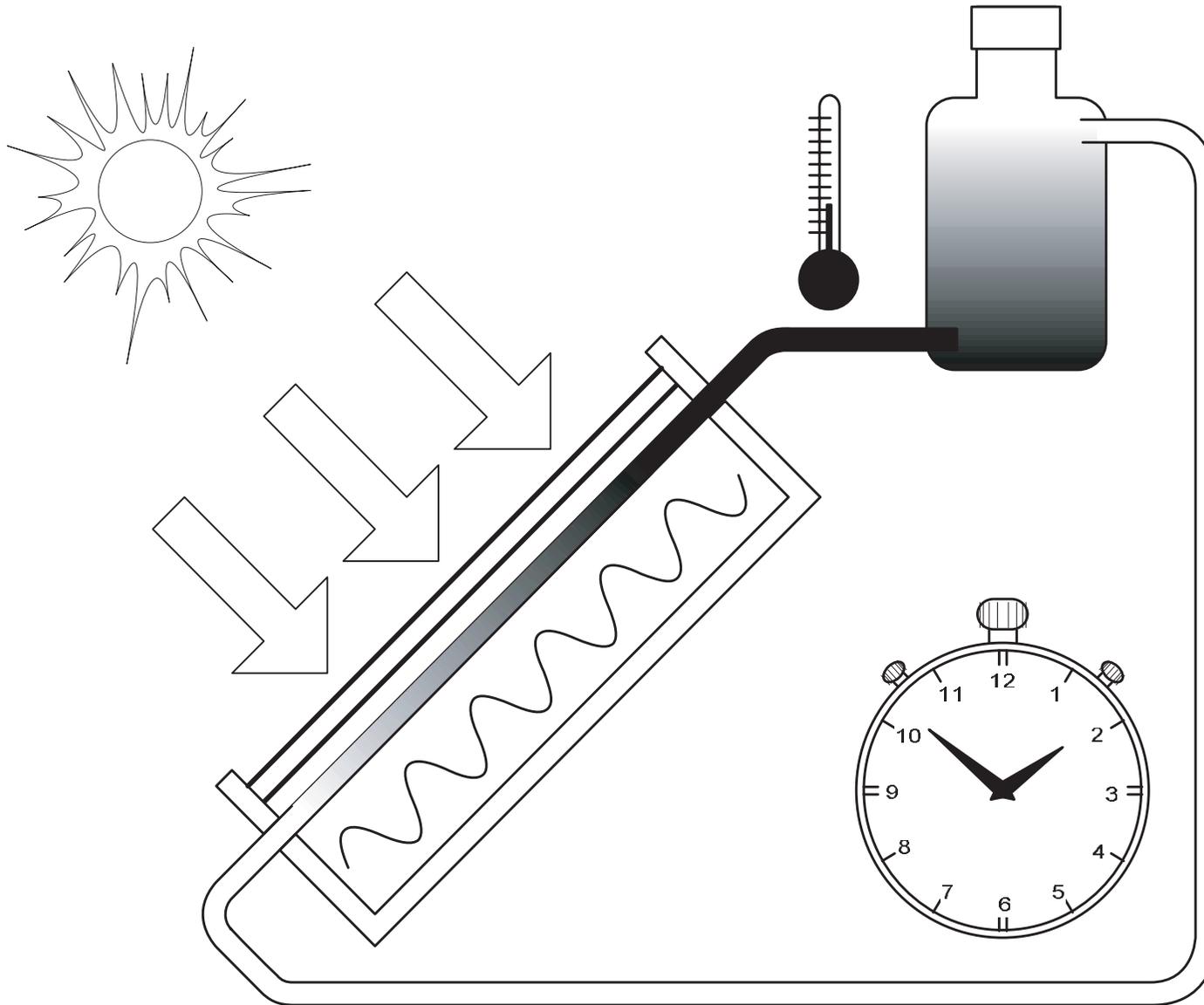
Toutes les illustrations ont été réalisées par Paul-Emile Müller. Les idées de bases ainsi que des passages partiels de textes ont été puisés en partie dans les ouvrages suivants:

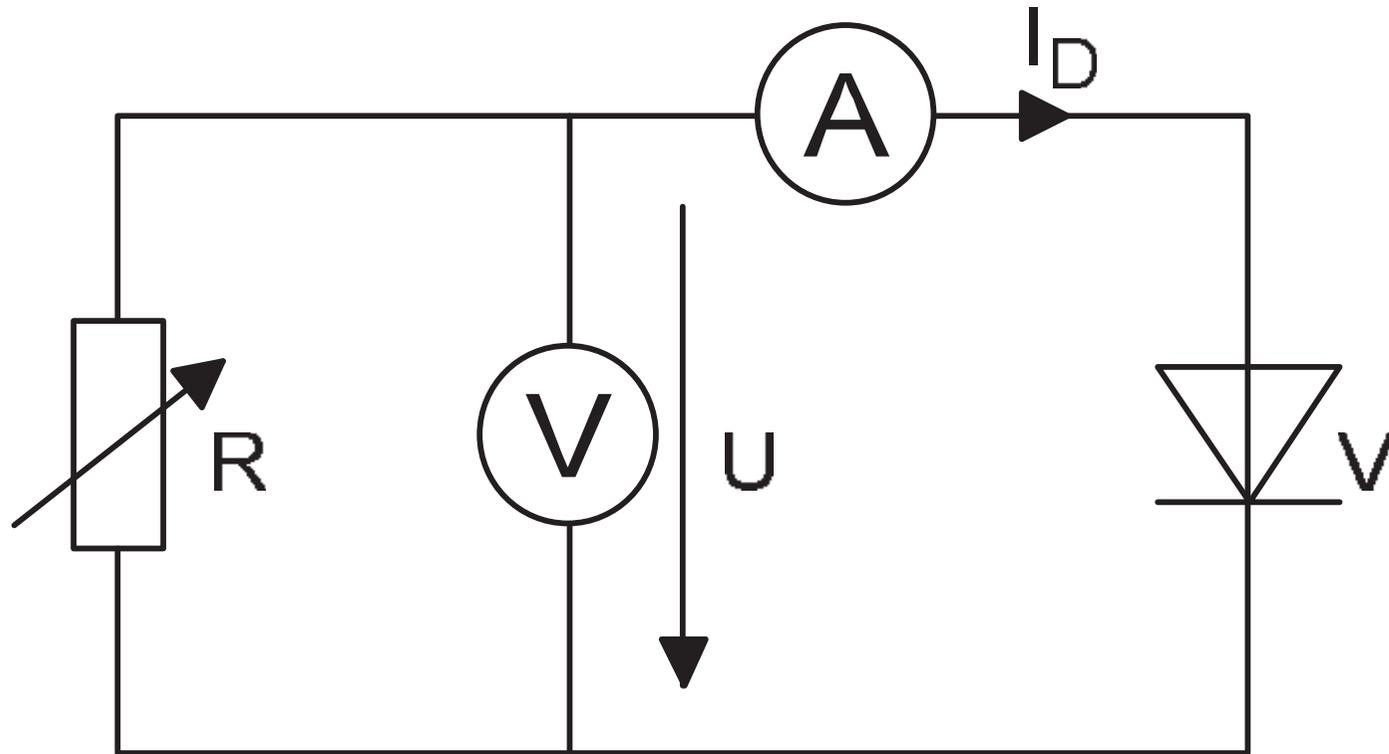
- L'énergie, facteur-clé de notre temps. Maja Messmer et al., Office fédéral des questions conjoncturelles. A commander chez LEP Loisirs et pédagogie, 1052 Le Mont-sur-Lausanne, tél. 021 651 25 70
- Production d'eau chaude solaire, Dimensionnement, montage, mise en service, entretien, PACER 724.213 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1993
- Heinrich Häberlin, Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz, AT Verlag, Aarau, 1991 (épuisé; nouvelle édition: automne 1997)
- Habitat et économies d'énergie; des réponses pratiques, RAVEL 724.386 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1995
- Rudolf Weber, Energie + Umwelt, Fakten, Massnahmen, Zusammenhänge, Olythus Verlag, Vaduz, 1992
- Centrales photovoltaïques: Outils pour le dimensionnement et la réalisation d'installations autonomes ou raccordées au réseau, PACER 724.243 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1996
- Générateurs photovoltaïques – Principes de base, technique de montage et injection dans le réseau, PACER 724.242 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1991
- Othmar Humm, Niedrigenergiehäuser: Theorie und Praxis, ISBN 3-922964-51-6, Oekobuchverlag Staufen, Freiburg i.B., 1990
- Installations techniques des bâtiments: situation actuelle, Programme d'impulsion «Installations du bâtiment» 724.601 f, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1996

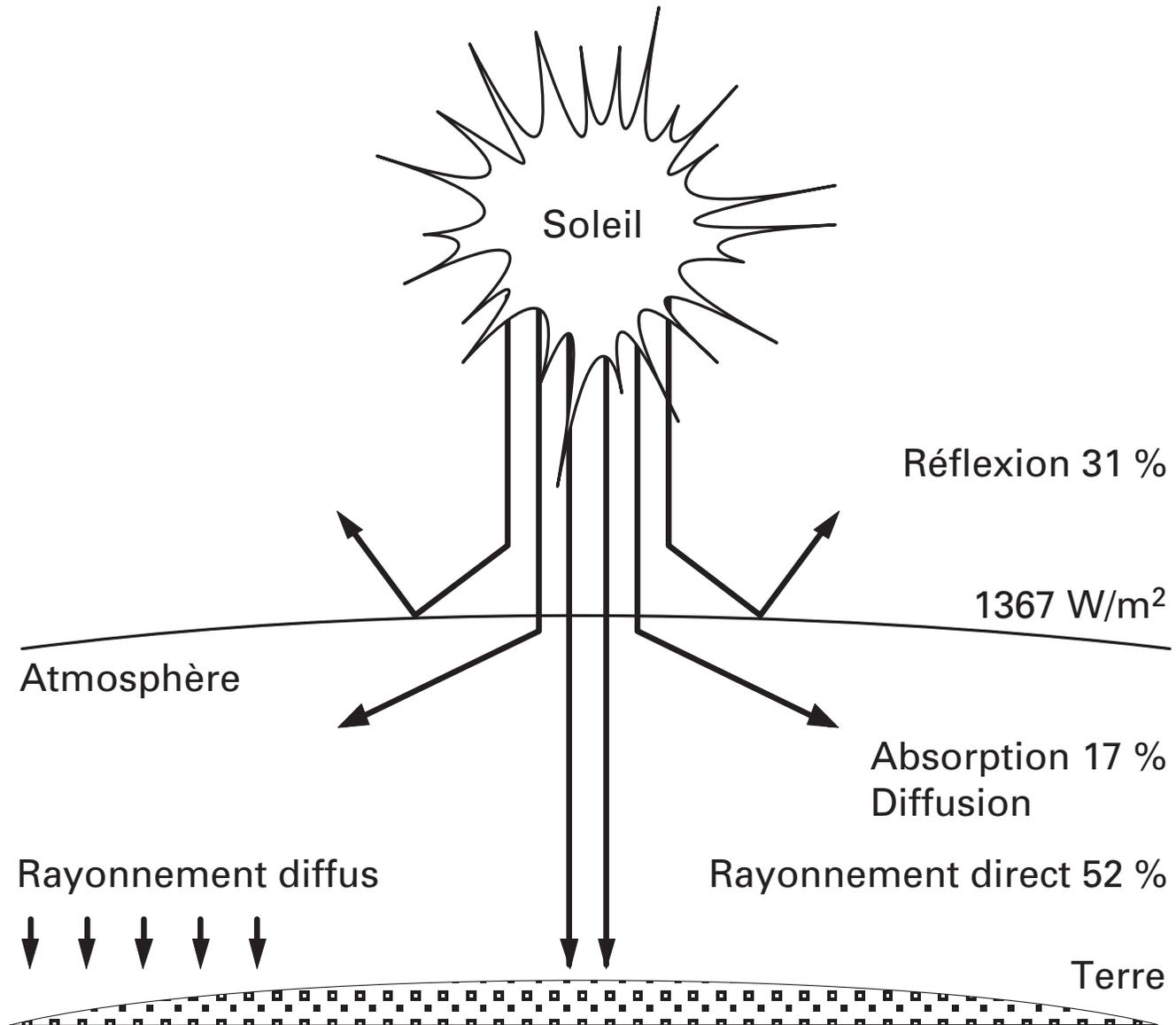
8 Modèles

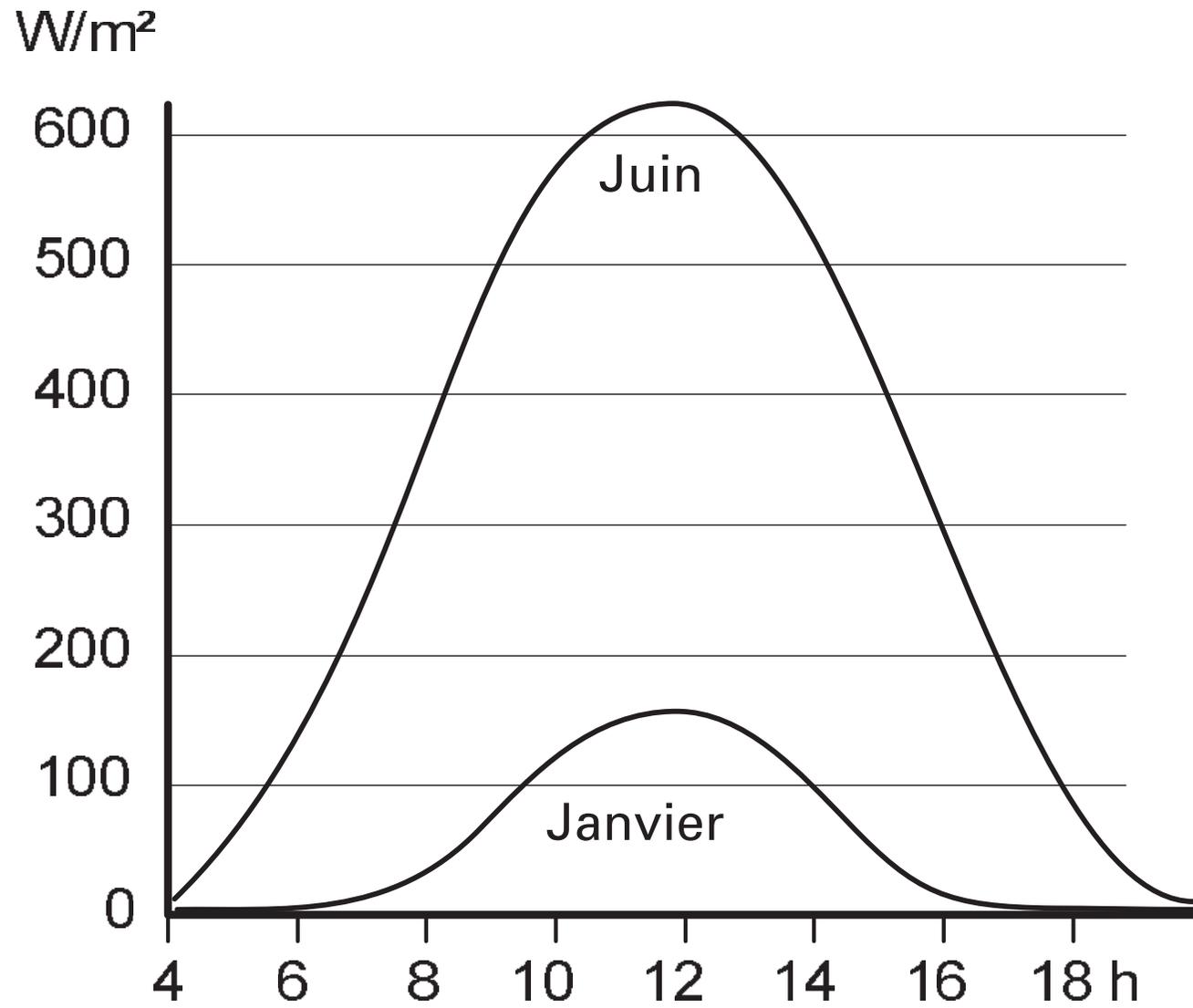


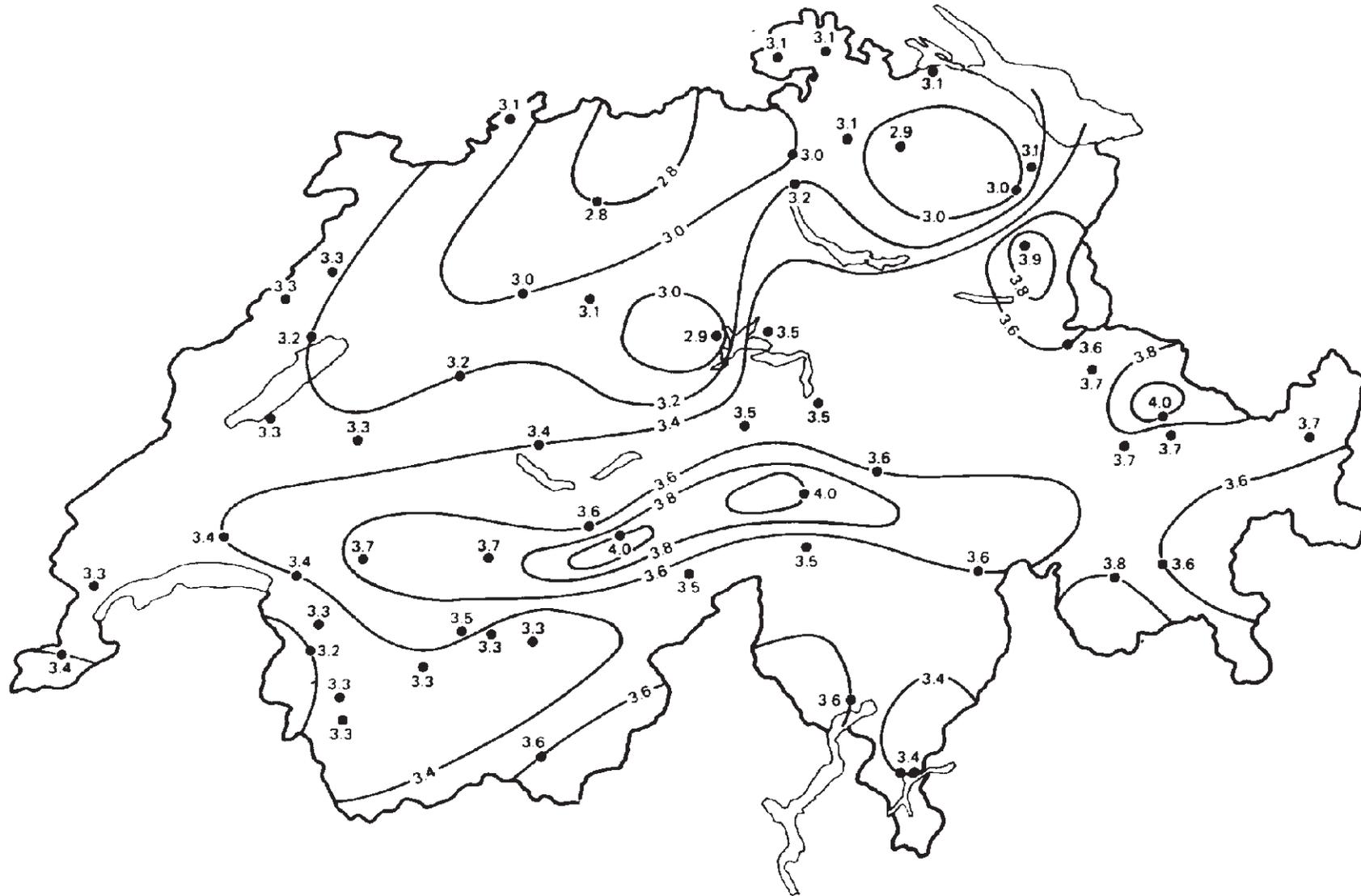






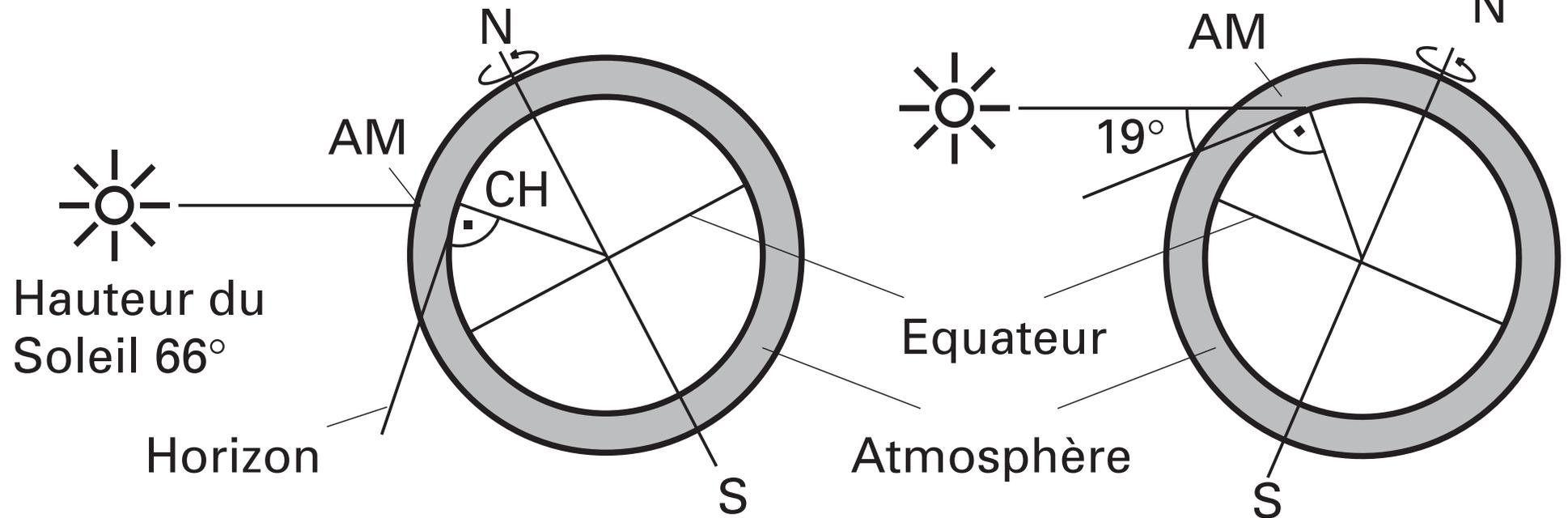


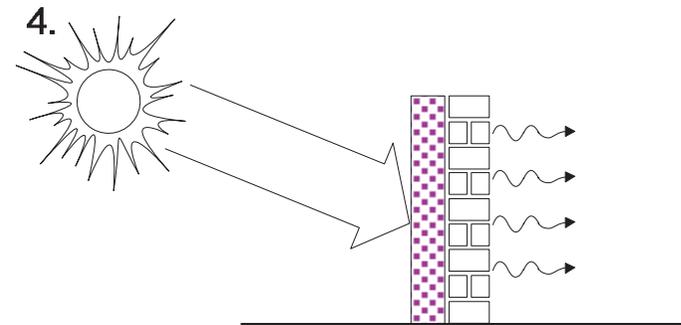
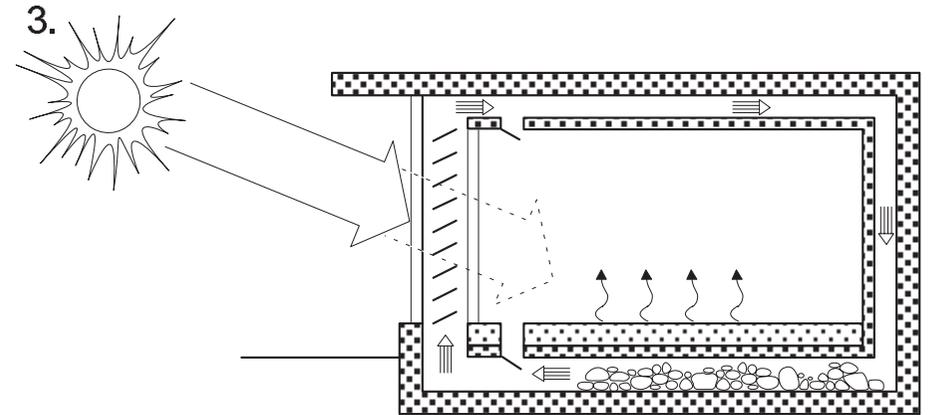
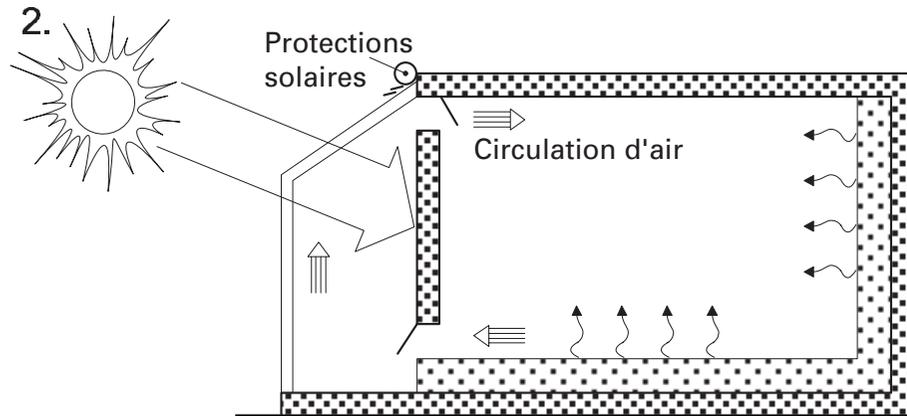
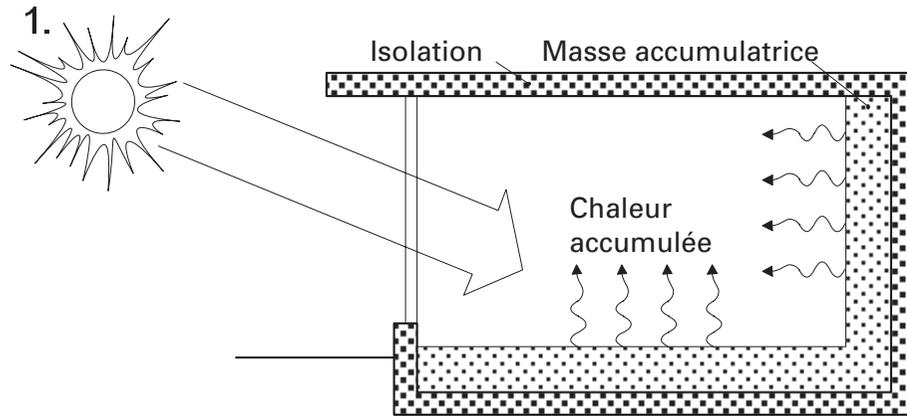




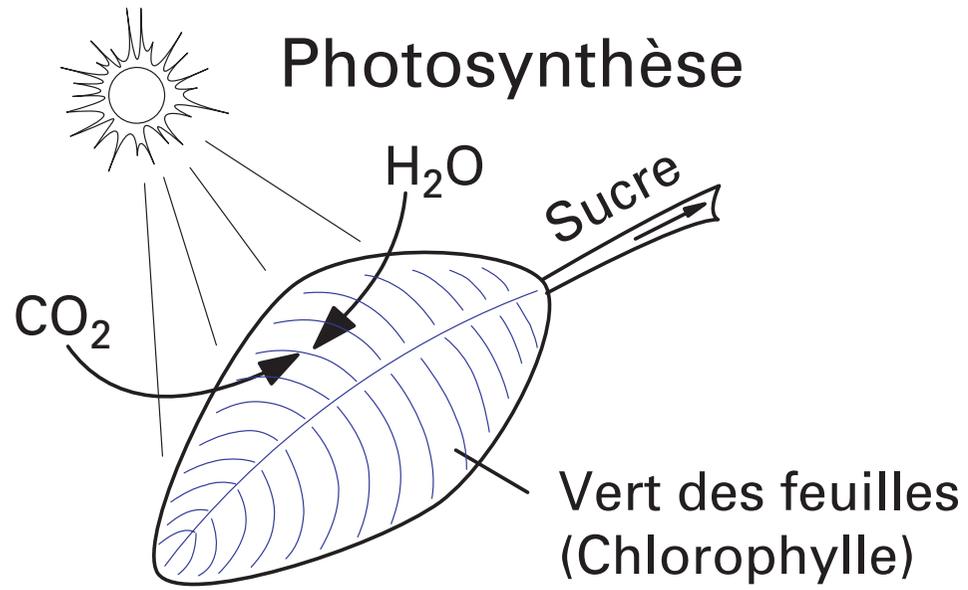
Eté: AM = 1.1

Hiver: AM = 3.1

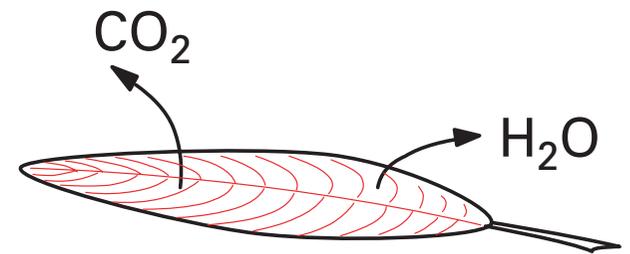


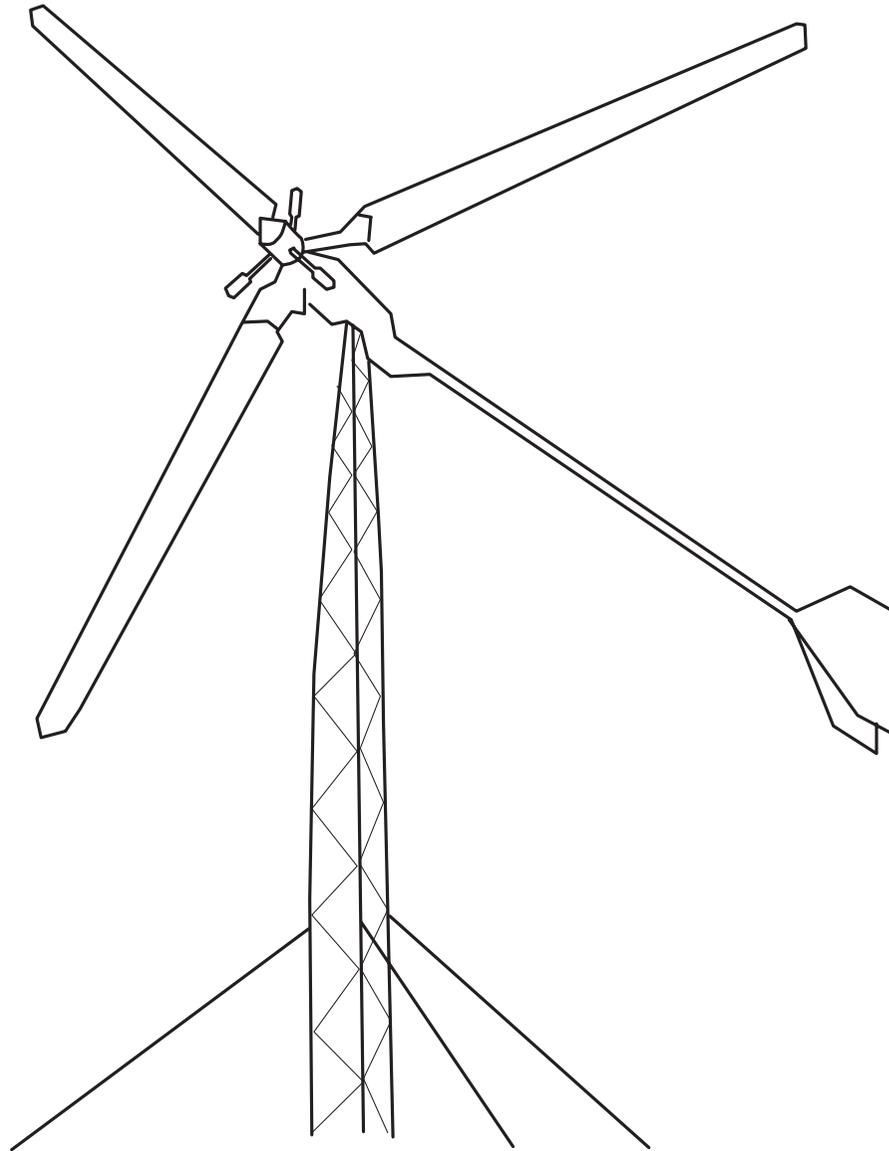


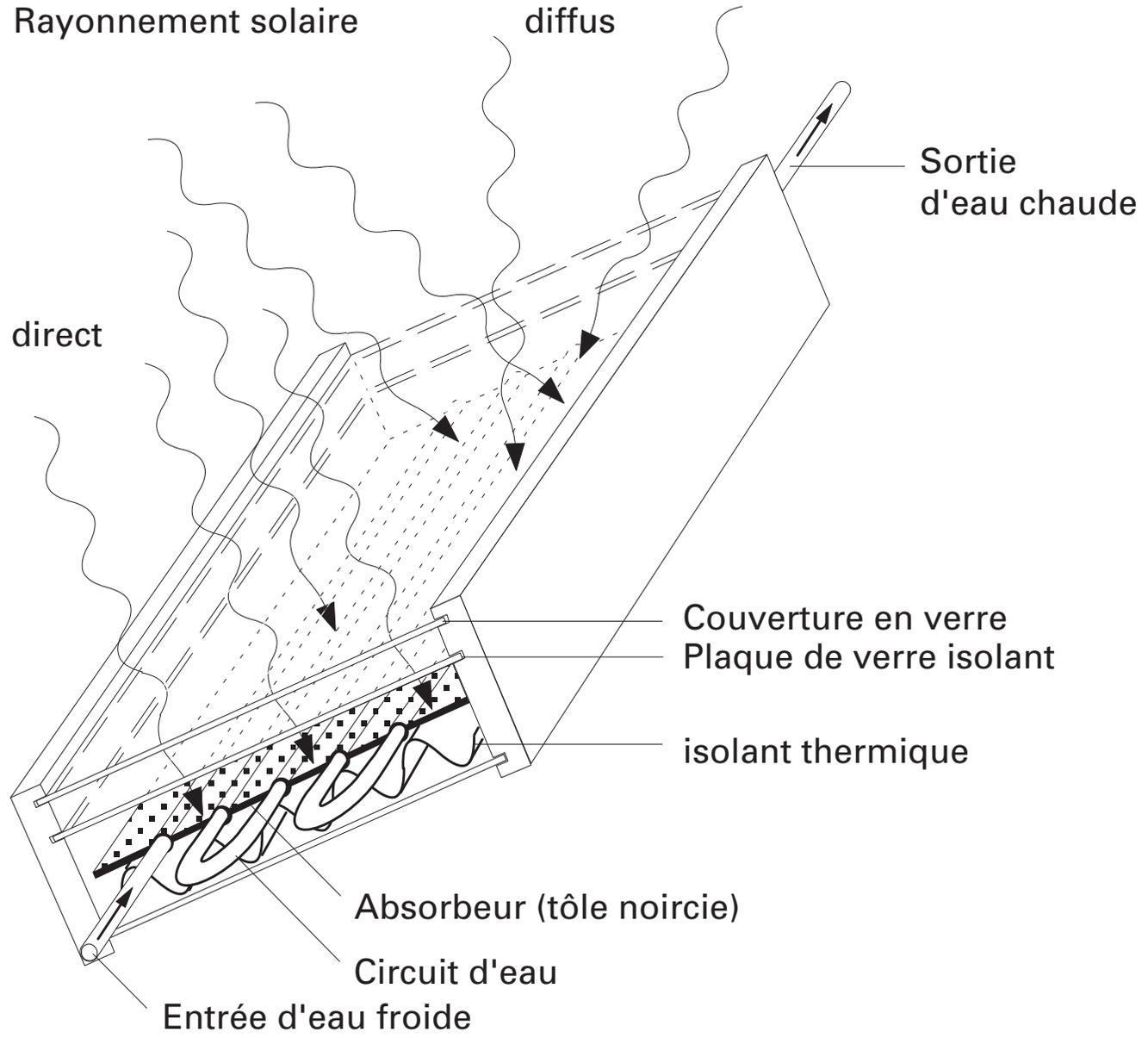
Valeur U pour ...	Constructions anciennes	Normes en vigueur	Maison MINERGIE
mur extérieur	1,2	0,3	p. ex. 0,20
fenêtre	3,0	2,0	p. ex. 1,10
toiture	0,8	0,3	p. ex. 0,15
plancher sur cave	1,4	0,4	p. ex. 0,20
valeur U moyenne	1,2	0,4	p. ex. 0,25

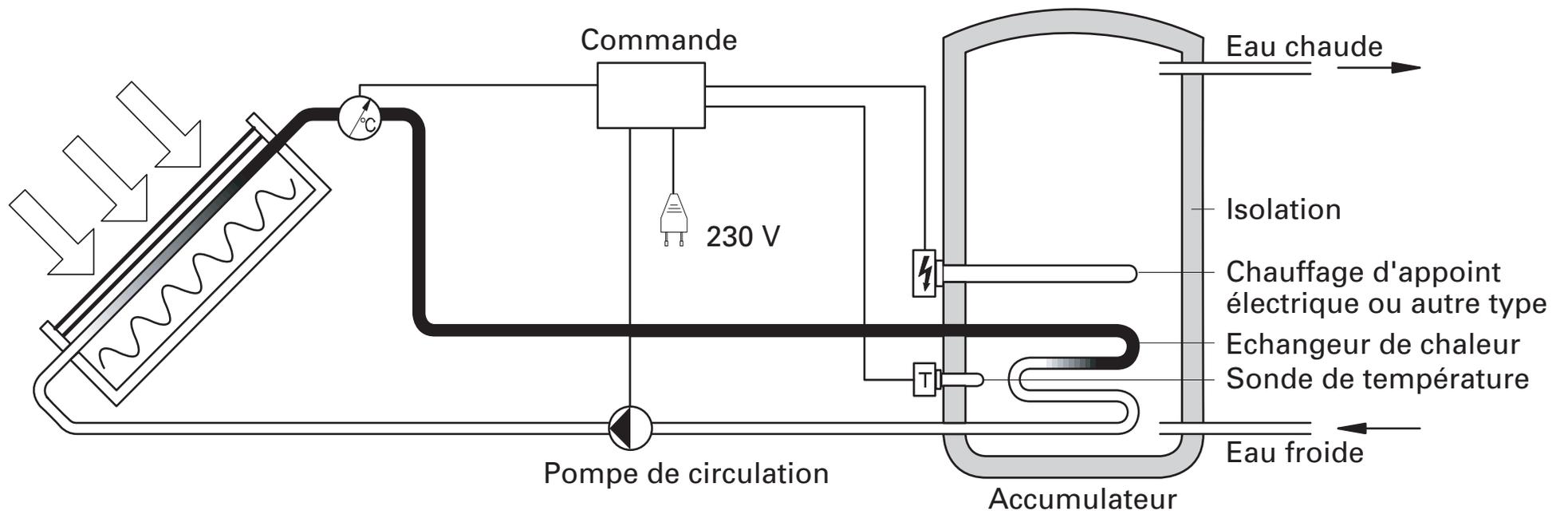


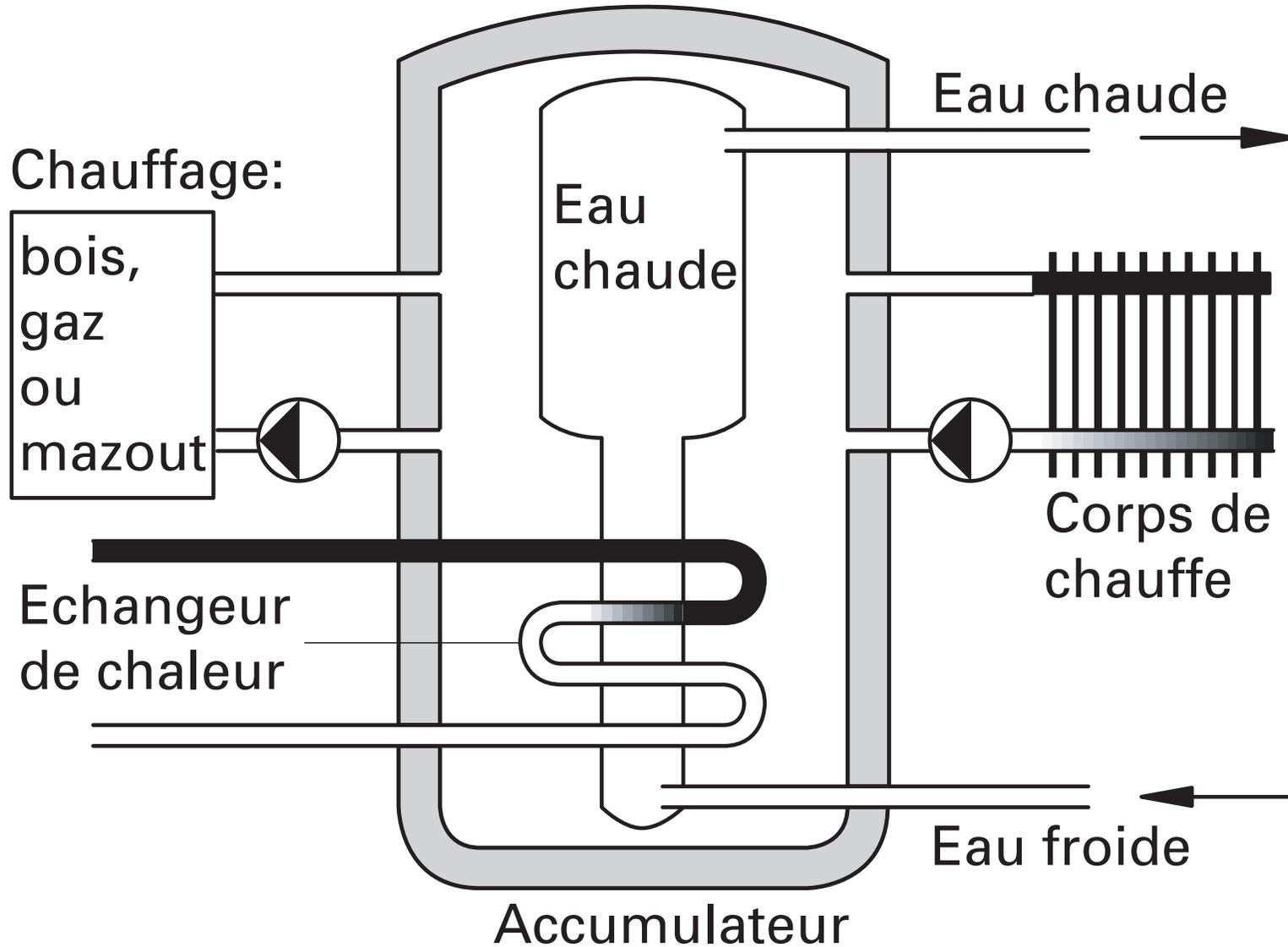
Putréfaction

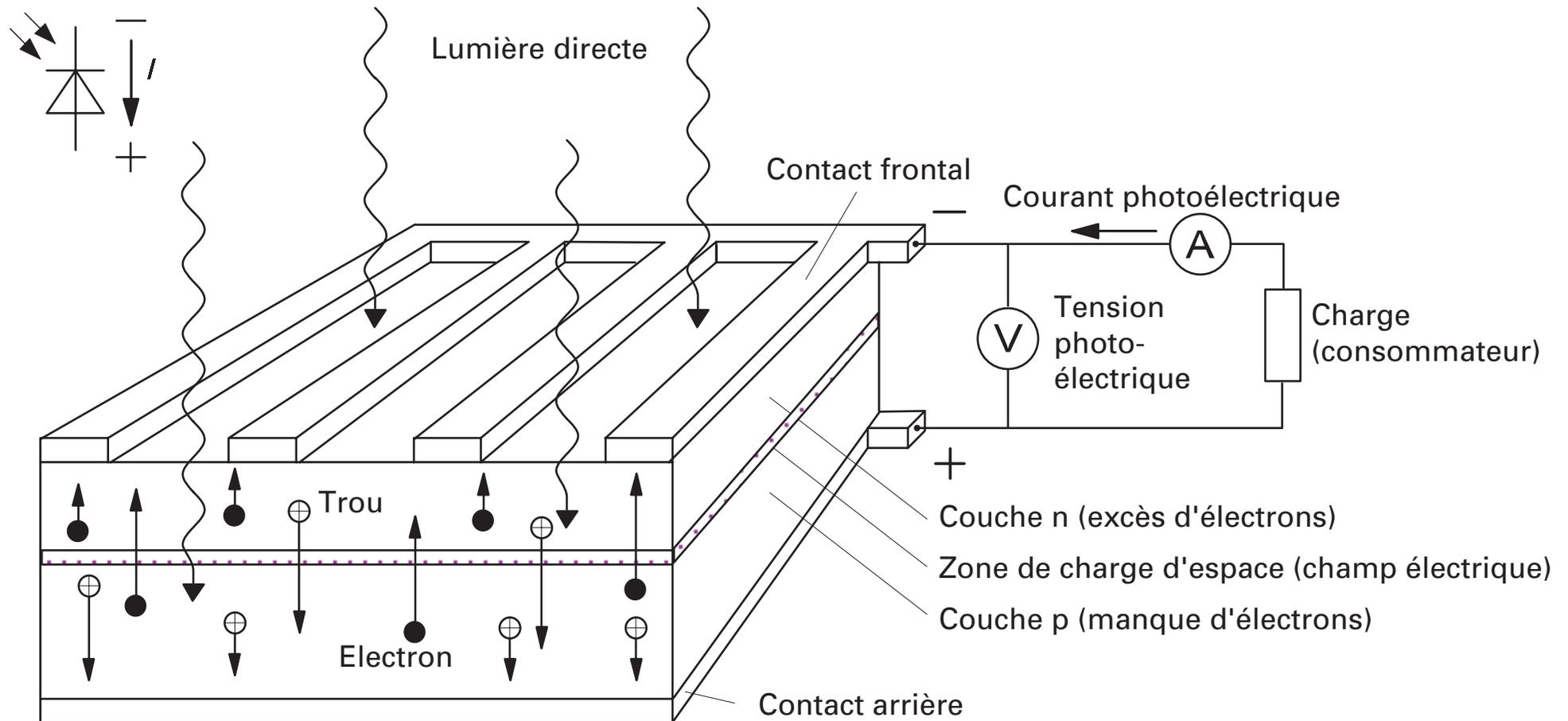


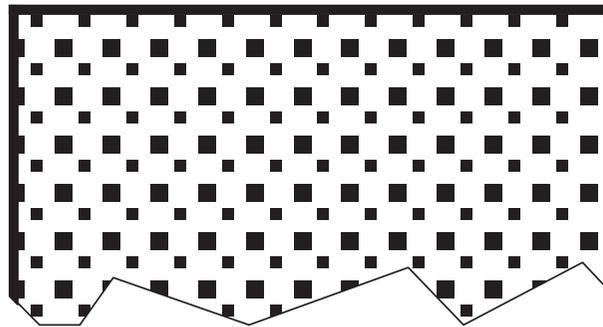
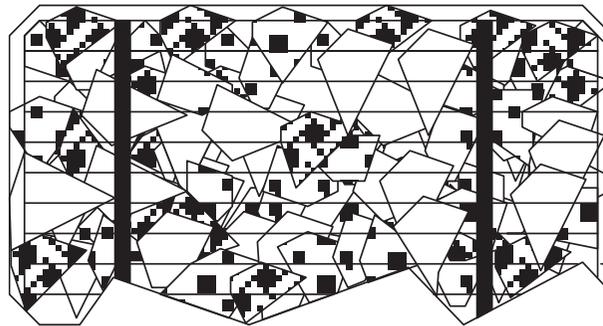
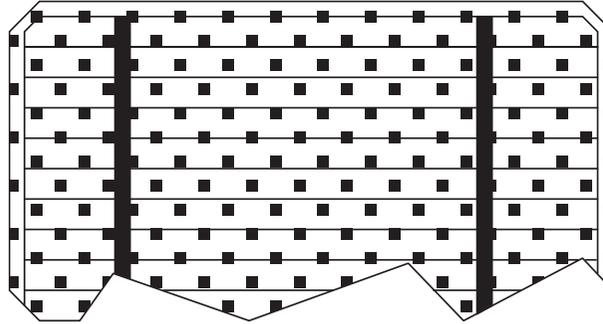


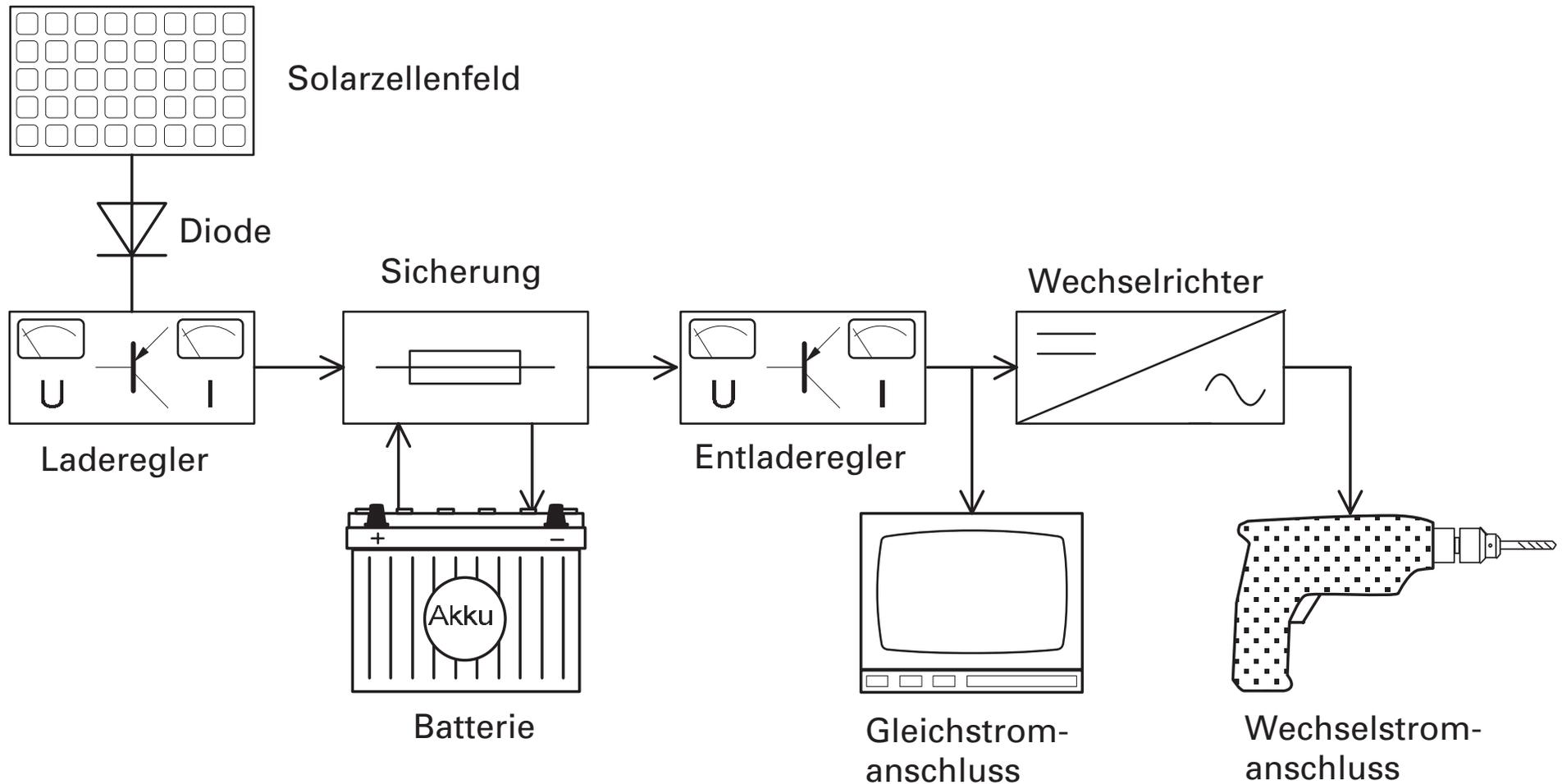


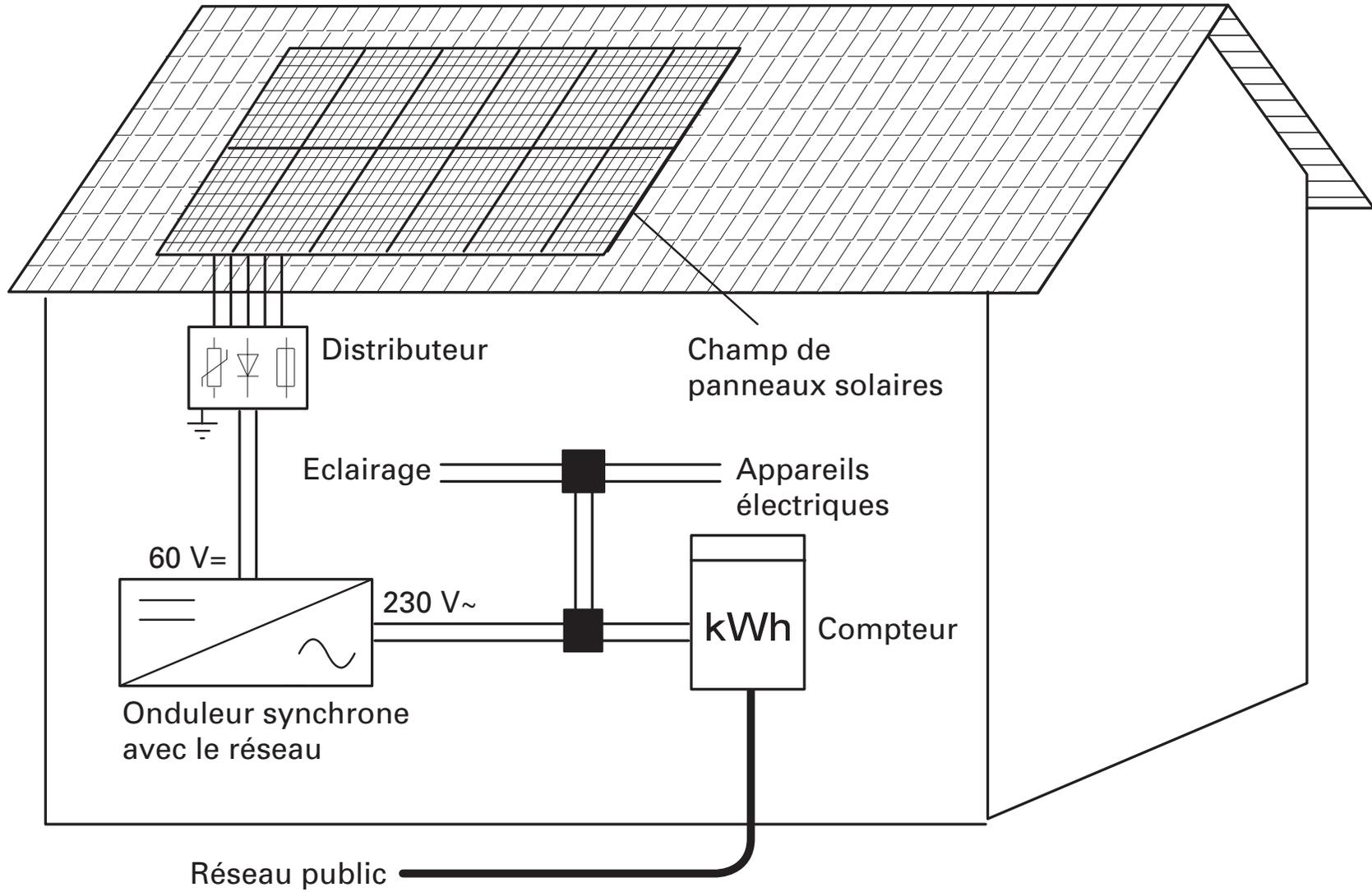




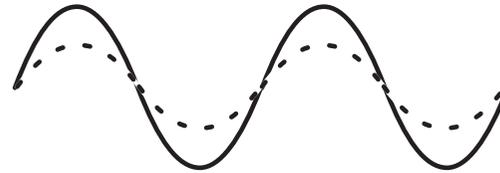




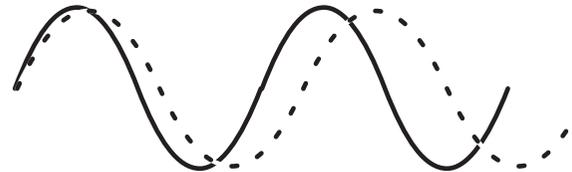




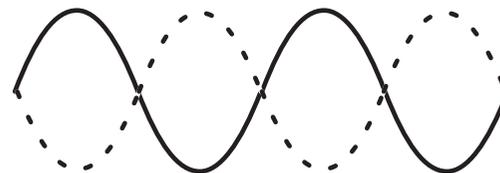
Adaptation des amplitudes



Adaptation des fréquences



Adaptation des phases



Lissage des harmoniques

