

# Energies renouvelables dans l'agriculture

## Exemples d'applications



## **Energies renouvelables dans l'agriculture**

Depuis toujours l'agriculteur a su tirer profit du soleil: il l'utilise soit directement pour produire les aliments nécessaires aux hommes et au bétail, soit indirectement pour sécher le foin et conserver le fourrage. Jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, le paysan consacrait environ le quart de ses surfaces cultivables à la production de l'énergie et des aliments dont il avait besoin.

C'est alors que l'utilisation massive d'agents fossiles, non renouvelables, est venu rompre le cycle traditionnel, rendant l'agriculture dépendante et causant de graves atteintes à notre environnement. Aujourd'hui, l'utilisation d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque, le solaire thermique, l'énergie éolienne, ou la biomasse (biogaz, bois, matières végétales) peut contribuer à la sauvegarde de l'environnement, l'agriculture se prêtant particulièrement bien à ce type d'applications.

Les enseignants d'aujourd'hui forment les agriculteurs de demain, aussi leur appartient-il d'éveiller les consciences et de développer les vraies valeurs. Cette documentation, ainsi que la vidéo qui l'accompagne, s'adresse donc en priorité aux enseignants, bien qu'elle concerne également un public beaucoup plus large, intéressé par ces questions.

Pour cette raison, le document a été conçu de manière à répondre au mieux aux besoins des enseignants: il contient des schémas qui peuvent être reproduits, ainsi que des résumés qui constituent des aides pédagogiques précieuses. Les textes centraux développent chacun des thèmes traités, permettant ainsi aux enseignants d'approfondir le sujet. Le vidéofilm: «Energies renouvelables dans l'agriculture» (VHS-PAL, N° de commande OCFIM 724.222 f, d'un coût de Fr. 25.–) constitue une très bonne introduction à ce domaine.

Cette documentation traite de la production de biogaz, du séchage de foin à l'aide de capteurs solaires, des installations photovoltaïques, des microcentrales hydroélectriques, ainsi que de la production de biodiesel. Elle porte aussi bien sur les principes de base que sur l'état actuel de ces technologies. Elle présente chacun des éléments des installations et donne des méthodes de calcul simples. Des installations existantes sont décrites et analysées, tant du point de vue des performances que de la rentabilité économique. Les points essentiels, développés dans les textes, sont repris en fin de chapitre sous forme de schémas. Ceux-ci se prêtent particulièrement bien à la duplication ainsi qu'à la réalisation de transparents.

1992 724.222.1 f 76 pages  
ISBN 3-905232-13-8

Fr. 17.–

# **Energies renouvelables dans l'agriculture**

## **Exemples d'applications**

## **Conception, rédaction et réalisation de l'édition originale allemande**

Dr Urs Baserga, INFOENERGIE, 8356 Tänikon  
Franz Nydegger, FAT, 8356 Tänikon  
Pierre Renaud, Planair, 2314 La Sagne

## **Conseils techniques pour le vidéofilm**

Dr Urs Baserga, INFOENERGIE, 8356 Tänikon  
Franz Nydegger, FAT, 8356 Tänikon  
Dr Arthur Wellinger, INFOENERGIE, 8356 Tänikon

## **Adaptation pour l'édition française**

### **Traduction**

Pierre Renaud, Planair, 2314 La Sagne

### **Rédaction finale**

Jean-Bernard Gay, EPFL-LESO, 1015 Lausanne

### **Mise en page et photocomposition**

Consortium DAC/City Comp SA  
Lausanne et Morges

ISBN 3-905232-13-8

Copyright © 1992 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, août 1992.

Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la source.

Diffusion: Coordination romande du programme d'action «Construction et énergie» EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (N° de commande 724.222.1 f)

Form 724.222.1 f 7.92 500 60729

---

# Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le programme d'action «Construction et énergie» se compose des trois programmes d'impulsions suivants:

PI-BAT – entretien et rénovation des constructions  
RAVEL – utilisation rationnelle de l'électricité  
PACER – énergies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Ils doivent favoriser une croissance économique qualitative et, par là, conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Jusqu'ici, si l'on fait abstraction du potentiel hydro-électrique, la contribution des énergies renouvelables à notre bilan énergétique est négligeable. Aussi le programme PACER a-t-il été mis sur pied afin de remédier à cette situation. Dans ce but le programme cherche:

- à favoriser les applications dont le rapport prix/performance est le plus intéressant;
- à apporter les connaissances nécessaires aux ingénieurs, aux architectes et aux installateurs;
- à proposer une approche économique nouvelle qui prenne en compte les coûts externes;
- à informer les autorités, ainsi que les maîtres de l'ouvrage.

## Cours, manifestations, publications, vidéos, etc...

Le programme PACER se consacre, en priorité, à la formation continue et à l'information. Le transfert de connaissances est basé sur les besoins de la pratique. Il s'appuie essentiellement sur des publications, des cours et d'autres manifestations. Les ingénieurs, architectes, installateurs, ainsi que les représentants de certaines branches spécialisées, en constituent le public cible. La diffusion plus large d'informations plus générales est également un élément important du programme. Elle vise les maîtres de l'ouvrage, les architectes, les ingénieurs et les autorités.

Le **bulletin «Construction et énergie»**, qui paraît deux à trois fois par an fournit tous les détails sur ces activités. Ce bulletin peut être obtenu gra-

tuitement sur simple demande. Chaque participant à un cours ou autre manifestation du programme reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action «Construction et énergie» EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

## Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont également les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités. Pour la préparation de ces activités une direction de programme a été mise en place; elle se compose du Dr Jean-Bernard GAY, du Dr Charles FILLEUX, de M. Jean GRAF, du Dr Arthur WELLINGER ainsi que de Mme Irène WUILLEMIN et de M. Eric MOSIMANN de l'OFQC. La préparation des différentes activités se fait au travers de groupes de travail; ceux-ci sont responsables du contenu de même que du maintien des délais et des budgets.

## Particularités de ce document

Ce document, qui s'adresse en premier lieu aux enseignants, constitue un complément au film vidéo «Les énergies renouvelables dans l'agriculture». Il apporte aux intéressés non seulement des informations techniques, mais également des graphiques illustratifs qui peuvent soit être distribués aux élèves, soit servir de base à la préparation de transparents.

Les colonnes centrales de la présente brochure décrivent de manière détaillée les diverses applications présentées dans le film, alors que les colonnes extérieures résument les points forts de ces techniques.

A la fin de chaque chapitre, on trouvera les figures et tableaux destinés à être copiés.

Comme de bien entendu, l'intérêt de cette publication ne se limite pas à l'enseignement, elle s'adresse également à tous ceux qui sont concernés ou intéressés par le sujet.

Le présent document a fait l'objet d'une procédure de consultation il a également été soumis à l'appréciation des participants au premier cours pilote. Ceci a permis aux auteurs d'effectuer les corrections nécessaires, ceux-ci étant toutefois libres de décider des corrections qu'ils souhaitaient apporter à leur texte. Dans ce sens ils assurent l'entière responsabilité de leurs textes. Des améliorations sont encore possibles et des suggestions éventuelles peuvent être adressées soit au directeur du cours, soit directement auprès de l'Office fédéral des questions conjoncturelles.

Pour terminer nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de la présente publication.

Dr. Heinz Kneubühler  
Directeur-suppléant de l'Office fédéral  
des questions conjoncturelles

---

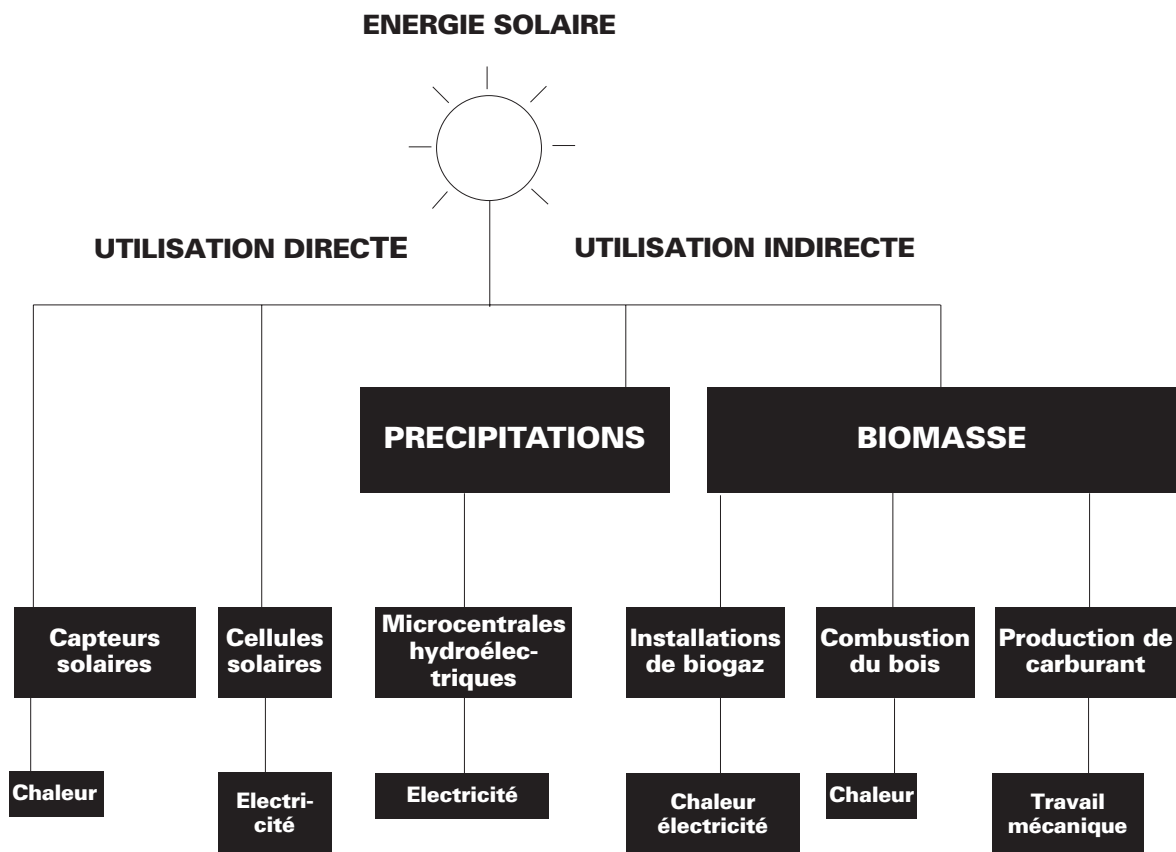
# Table des matières

---

	page
<b>Introduction</b>	7
Energies renouvelables	9
Energie solaire	9
Energie et environnement	9
<hr/>	
<b>Installations de production de biogaz</b>	13
La fermentation méthanique	15
Composants d'une installation de biogaz	16
Le digesteur	16
Le réseau de gaz	17
Utilisation du gaz	19
Avantages	19
<hr/>	
<b>Capteurs solaires pour le séchage du foin</b>	25
Fonctionnement du capteur solaire	27
Capteur solaire pour le séchage du foin	29
Grandeurs caractéristiques pour la planification	29
Acheminement idéal de l'air	30
Montage de la face arrière du capteur	32
<hr/>	
<b>Installations photovoltaïques</b>	39
Rayonnement global	41
Cellules solaires	41
Composants d'une installation photovoltaïque	44
Exemple pratique	45
<hr/>	
<b>Microcentrales hydroélectriques</b>	51
Principe de fonctionnement	53
La turbine	53
Le générateur	54
Composants d'une installation	55
Besoins d'énergie dans les alpages	55
Coûts	57
<hr/>	
<b>Matières premières renouvelables</b>	63
Les plantes comme ressource d'énergie	65
Utilisation de l'huile de colza comme carburant	66
Production d'ester méthylique de colza	67
Mesures comparatives	67
Bilan énergétique	68
Rentabilité économique	68
<hr/>	
<b>Publications PACER</b>	75

---

# Introduction




---

Energies renouvelables	9
<hr/>	
Energie solaire	9
<hr/>	
Energie et environnement	9
<hr/>	



# Introduction

## Energies renouvelables

Le terme «Energies renouvelables» regroupe toutes les formes d'énergies provenant directement ou indirectement du rayonnement solaire: énergie solaire directe (captage actif ou passif, photovoltaïque), énergie éolienne, énergie de la biomasse (biogaz, bois, carburants provenant de matières premières végétales), énergie hydraulique. Dans un sens plus large, on inclut également à cette liste l'énergie géothermique, ainsi que la force des marées.

A l'opposé, le charbon, la lignite, la tourbe, les hydrocarbures, le gaz naturel ainsi que l'uranium ne sont pas des énergies renouvelables.

## Energie solaire

Le soleil constitue une gigantesque centrale thermonucléaire dont la surface rayonne une énergie qui atteint 60 mégawatt par mètre carré! Cette énergie est rayonnée dans tout l'espace, pour atteindre encore 1400 W/m<sup>2</sup> aux confins de notre atmosphère. Au niveau du sol, et selon l'état du ciel, le rayonnement reçu varie de 0 à 1000 W/m<sup>2</sup>. Cumulé sur une journée, le rayonnement solaire peut ainsi atteindre 6.5 kWh/m<sup>2</sup> dans le plateau suisse (de mai à septembre).

## Energie et environnement

La très forte croissance économique qu'ont connue, durant ces dernières décennies, les pays industrialisés a conduit à une très forte augmentation de la consommation d'énergie. Celle-ci résulte de besoins nouveaux: mobilité, communications, processus de fabrication, mais également de prestations souvent superflues.

Aujourd'hui, on se rend compte que l'augmentation constante de la consommation d'énergie conduit à une impasse. L'emploi unilatéral de combustibles fossiles, non renouvelables, provoque une dégradation inacceptable de notre environnement: effet de serre, diminution de la couche d'ozone, pollution de l'air et de l'eau. Aussi, en plus des économies d'énergie, seule une utilisation massive des énergies renouvelables permettra de préserver notre environnement, et d'assurer, à long terme, nos besoins vitaux en énergie.

### Energies renouvelables

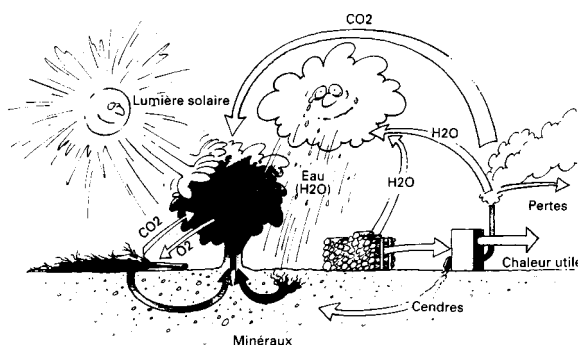
Sont considérées comme renouvelables:

- l'énergie solaire
- l'énergie hydraulique
- l'énergie éolienne
- l'énergie de la biomasse

ainsi que dans un sens plus large:

- l'énergie des marées
- l'énergie géothermique

### Cycle fermé du CO<sub>2</sub>



Considérons l'exemple de la combustion du bois: durant leur croissance, les arbres des forêts consomment autant de CO<sub>2</sub> qu'ils en libèrent lorsqu'on les brûle. La combustion du bois ne conduit donc pas à une augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

### Application de l'énergie solaire à l'agriculture

En pratique, on compte déjà plus de 150 **installations de biogaz** dans notre pays. Par rapport aux quelques 20 000 exploitations potentielles, ce chiffre est toutefois encore bien modeste.

Les **séchoirs en grange faisant usage de capteurs à air** constituent aussi un exemple intéressant d'utilisation de l'énergie solaire dans l'agriculture. Actuellement, plus de 1500 installations de ce type ont été réalisées en Suisse.

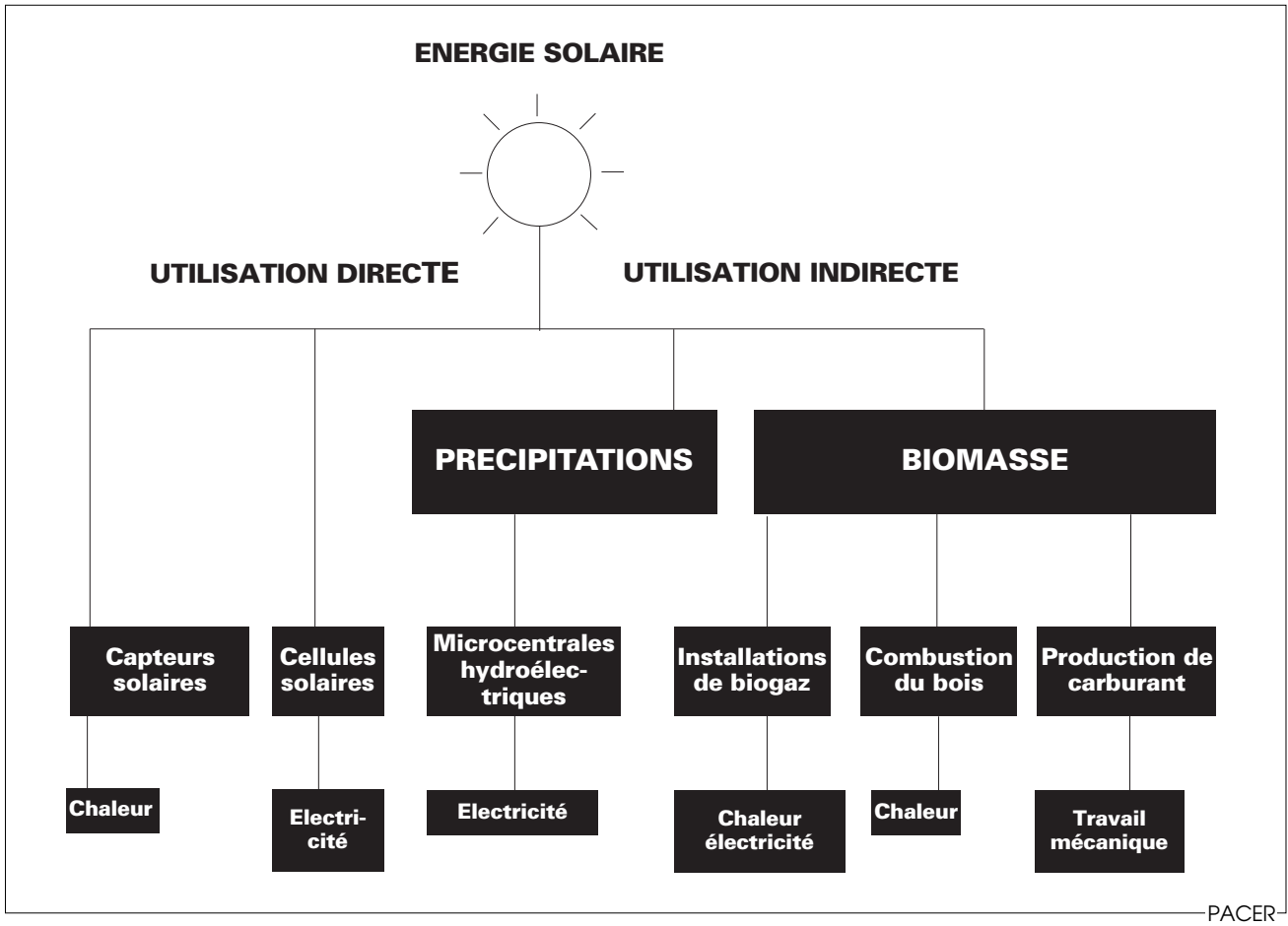
La production d'électricité à l'aide de **panneaux photovoltaïques**, ou grâce à des **microcentrales hydroélectriques**, constitue également une possibilité intéressante lorsque les exploitations agricoles ne sont pas raccordées au réseau électrique.

Enfin la transformation de **l'huile de colza en carburant diesel** représente une illustration intéressante de production d'énergie à partir de matières premières renouvelables. La production d'alcool à partir des betteraves sucrières en est un autre exemple.

## Applications à l'agriculture

L'agriculteur n'utilise pas seulement l'énergie solaire dans le but de produire des denrées alimentaires, il en utilise également pour la préparation et la conservation du fourrage (séchage de foin). D'autres applications des énergies renouvelables trouvent également leur place dans les exploitations agricoles.

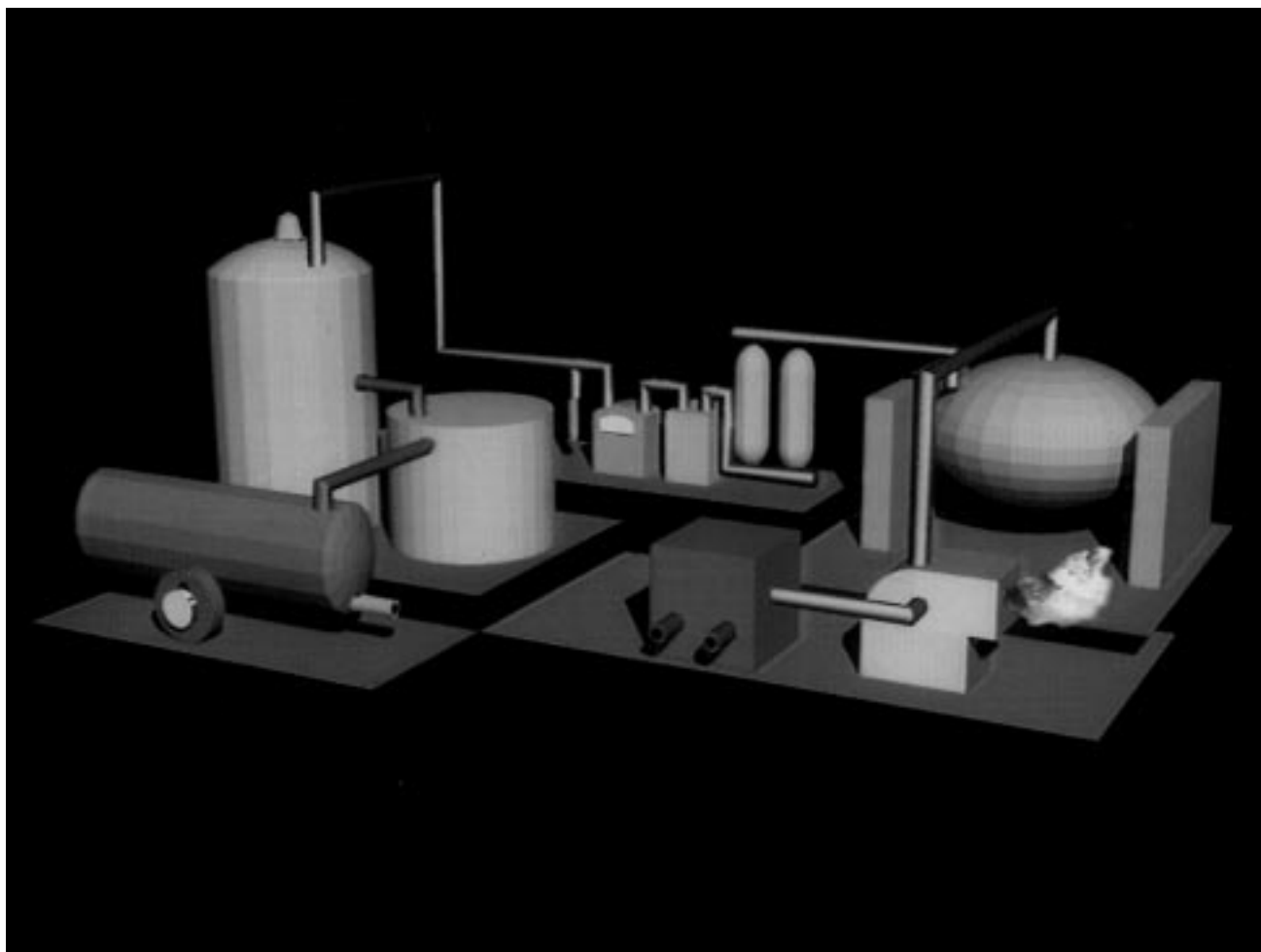
Ces applications comprennent aussi bien la production d'électricité, par effet photovoltaïque, que l'utilisation de la force hydraulique ou de la biomasse pour produire de l'énergie.



PACER

**Possibilités d'utilisation de l'énergie solaire dans l'agriculture**

# Installations de production de biogaz



---

La fermentation méthanique	15
Composants d'une installation de biogaz	16
Le digesteur	16
Le réseau de gaz	17
Utilisation du gaz	19
Avantages	19

---

# Installations de production de biogaz

La production de biogaz, à partir d'excréments animaux ou de déchets végétaux, constitue une des formes les plus logiques d'utilisation indirecte de l'énergie solaire. Actuellement, en Suisse, on dénombre plus de 150 installations de ce type.

## La fermentation méthanique

Une à trois semaines après avoir épandu du purin sur un champ, on ne le remarque plus. Durant cette période, le purin doit se décomposer en gaz, ou dans toute autre forme qui soit assimilable par les plantes. Cette transformation est possible sous l'action des micro-organismes qui se trouvent dans le purin ou dans le sol. Cette réaction ayant lieu à l'air libre, on l'appelle «aérobie». Si, au lieu d'épandre ce purin sur le champ, on le met dans une installation de biogaz, la réaction microbienne a alors lieu en l'absence d'air, on parle alors de transformation «anaérobie». Dans les deux cas ce ne sont pas les mêmes bactéries qui sont responsables de la transformation. Aussi, par analogie appelle-t-on «bactéries aérobies» celles qui agissent en présence d'air, et «bactéries anaérobies» celles qui interviennent lors de la production de biogaz.

Dans le processus de fermentation anaérobie, des molécules organiques complexes se transforment, sous l'influence des bactéries, en molécules plus simples qui constituent le biogaz: un mélange de 60 à 70% de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de 30 à 35% de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ). A l'opposé, lors d'une décomposition à l'air libre, l'énergie stockée dans la biomasse est alors perdue sous forme de chaleur (auto-réchauffement d'un compost).

Le biogaz existe également à l'état naturel, il résulte alors de la fermentation dans des marais (les feux follets proviennent du biogaz), dans des sédiments, ou dans la panse des ruminants.

La fermentation méthanique contribue à l'épuration des eaux usées chargées de matières organiques, ainsi qu'à la stabilisation des boues qui en résultent. L'agriculture est un milieu particulièrement favorable à la production et à l'utilisation de cette forme d'énergie: en brûlant du biogaz dans un module chaleur-force, on obtient simultanément de l'électricité et de la chaleur à un niveau de température plus élevée que ce ne serait le cas par simple fermentation aérobie. Naturellement du gaz méthane est produit lorsque la température est comprise

### Décomposition aérobie

L'énergie contenue dans la biomasse est libérée sous forme de chaleur à basse température (autoréchauffement du compost).

### Décomposition anaérobie

Environ 90% de l'énergie contenue dans la biomasse reste stockée dans le biogaz. La combustion de ce biogaz permet alors soit de produire de l'électricité, soit de la chaleur à un niveau de température élevé.

### Caractéristiques du biogaz

Le biogaz résulte de la décomposition anaérobie de matières organiques. Il se compose d'un mélange des éléments suivants:

60-70% de méthane ( $\text{CH}_4$ )  
30-35% de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ )  
1-5% de vapeur d'eau

ainsi que des traces de:

Hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ )  
Azote ( $\text{N}_2$ )  
Hydrogène ( $\text{H}_2$ )

Valeur calorifique: 21.5 MJ/m<sup>3</sup>  
1m<sup>3</sup> de biogaz équivaut à environ 0.6 l de mazout

Mélangé à l'air, le biogaz est explosif. Le domaine d'inflammabilité se situe entre 5 et 12% de méthane dans l'air.

### Composants du digesteur

Le digesteur constitue l'élément principal d'une installation de biogaz, c'est là que se produit la fermentation anaérobie avec dégagement de gaz. Un digesteur comprend les éléments suivants:

- réacteur
- brasseur
- système de chauffage.

entre 0 et 100°C. A des températures plus basses, la production de méthane est très faible. Les réactions biochimiques étant beaucoup plus rapides lorsque la température est plus élevée, les digesteurs de biogaz sont généralement chauffés, afin d'augmenter la production de gaz.

## Composants d'une installation de biogaz

Une installation de production de biogaz comprend les éléments suivants: production (un digesteur), stock et sécurité d'approvisionnement (réseau de gaz), et utilisation (transformation du gaz en chaleur ou/et électricité).

## Le digesteur

### Le réacteur

Le réacteur constitue l'élément principal d'une installation de biogaz, c'est à l'intérieur de celui-ci que se fait la fermentation anaérobie. On distingue deux catégories principales de réacteurs: les réacteurs apparents et les réacteurs enterrés. Ils peuvent être fabriqués en béton, en acier, en fibres de verre ou en bois. Toutes ces matières sont possibles pour des installations apparentes; pour des installations enterrées, en raison de la protection des eaux, seul le béton peut être envisagé.

### Installations à flux continu

La plupart des installations sont réalisées sur le principe du flux continu: dès que le réacteur est plein, le purin entrant chasse la même quantité de purin fermenté. Ces installations fonctionnent presque toujours à une température mésophile, c'est-à-dire à une température comprise entre 26 et 35°C. Selon l'installation, le purin séjourne dans le réacteur entre 20 et 25 jours.

### Installations à stockage

Certaines installations fonctionnent sur le principe du stockage, la fosse à purin faisant office de digesteur. Le purin est amené, à intervalles réguliers, comme dans les installations à flux continu. L'évacuation, par contre, ne se fait qu'au moment de l'épandage. Dans ces conditions, le niveau de température peut être maintenu assez bas, la durée de stockage étant beaucoup plus longue que dans les installations à flux continu. De telles installations

### Valeurs indicatives des durées de traitement et de la production de gaz

	Installation à flux continu Température de fermentation 30°C	Installation à stockage Température de fermentation 22°C
Purin de bovins		
Durée de traitement:	20 jours	40 jours
Production de gaz:	210 l/kg MO	210 l/kg MO
Purin de bovins avec paille		
Durée du traitement:	23-25 jours	46-50 jours
Production de gaz:	270 l/kg MO	270 l/kg MO
Purin de bovidés		
Durée de séjour:	18 jours	36 jours
Production de gaz:	350 l/kg MO	400 l/kg MO
Lisier de porcs		
Durée de séjour:	15 jours	30 jours
Production de gaz:	430 l/kg MO	480 l/kg MO

(MO = matière organique)

fonctionnent à des températures comprises entre 16 et 22 °C, et la durée de stockage va de 40 à 150 jours.

### Production de gaz et rendement

La production de gaz dépend: des apports journaliers de purin, de sa composition et des autres paramètres liés au procédé de fermentation (température, durée de séjour dans le digesteur, etc...). La durée de stockage est obtenue en divisant le volume du digesteur par le volume journalier des apports de purin. Afin d'évaluer le potentiel en biogaz d'une exploitation agricole, il faut prendre en compte la quantité disponible de matière organique, ainsi que le rendement en gaz. Par rendement en gaz, on entend la quantité de biogaz que l'on obtient à partir d'un kilogramme de matière organique. Comme on l'a vu, ce rendement dépend essentiellement du type de purin et des paramètres caractéristiques de l'installation.

### Le brasseur

Le brasseur a pour but de mélanger le contenu du digesteur (mélange du purin frais au liquide fermenté), il doit empêcher la formation de croûte ou de sédiments. Dans des installations agricoles de biogaz, les systèmes lents, à tourniquets ou à pagaies, s'avèrent efficaces; on les fait fonctionner à intervalles réguliers. L'intensité et la fréquence des brassages dépendent de la propension de la matière à surnager ou à former des substrats.

### Le système de chauffage

Dans la plupart des installations, un chauffage du digesteur s'avère nécessaire, afin de porter la matière à la température optimale de fermentation et à compenser les pertes thermiques. Ce chauffage se fait soit à l'aide de parois chauffantes à l'intérieur de la cuve, soit à l'aide de tuyaux de plastique.

Dans les systèmes à flux continu, le chauffage du digesteur consomme environ le tiers du biogaz produit; les 2/3 de la production brute de biogaz sont ainsi disponibles pour les autres utilisations.

### Le réseau de gaz

Le biogaz est constitué essentiellement de 60% de méthane et de 35% de gaz carbonique. En outre, selon la composition de la masse, on trouve également des traces d'hydrogène sulfuré nocif, et un peu d'azote. Le gaz qui quitte la cuve de fermentation est

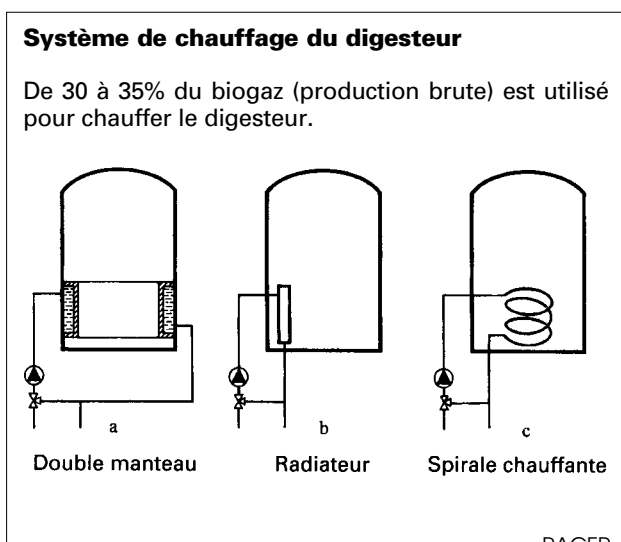
#### Production journalière moyenne de purin et de matières organiques de quelques animaux domestiques

	Quantité de purin	Matières organiques (MO)
<b>Bovins</b>		
Vache laitière (625 kg)	60 l	4.8 kg
Boeuf d'élevage (320 - 500 kg)	25 l	2.2 kg
Veau d'élevage (45 - 135 kg)	12l	0.1kg
<b>Porcs d'élevage</b>		
15 - 27 kg	3 0 - 4.5 l	0.22 kg
27 - 68 kg	3.9 - 7.5 l	0.22 kg
68 - 100 kg	5.8 - 8.6 l	0.22 kg
<b>Volaille</b>		
Leghorn (2.3 kg)	0.14 kg	0.025 kg

#### Fonction du brasseur

Le brasseur a deux fonctions:

- mélanger le purin frais avec le purin en fermentation
- empêcher la formation de croûte ou de sédiments.



saturé d'eau, selon la température de fermentation il contient ainsi de 1 à 5% de vapeur d'eau. L'utilisation sans problème du biogaz dans des moteurs fixes ou dans des installations de chauffage nécessite l'installation de systèmes de sécurité entre le digesteur et l'utilisateur, dans certains cas, des systèmes d'épuration des gaz doivent également être prévus.

### Dispositifs de sécurité

Afin d'éviter toute surcharge du digesteur, la cuve de fermentation doit être munie d'une sécurité contre les surpressions ou les sous-pressions. Un plongeur, un siphon ou une soupape de sécurité assurent cette fonction. A côté de cela, un dispositif anti-retour de flamme doit être monté. Les filtres à gravier utilisés dans ce but servent également de séparateur des condensats et de filtre grossier.

### Désulfuration du gaz

De plus en plus souvent, les installations de production de biogaz comprennent un dispositif de désulfuration du gaz. Selon le type d'utilisation, la présence de soufre dans le gaz peut en effet avoir des suites peu agréables: production de dioxyde de soufre, lorsque le gaz est utilisé pour la cuisson, corrosion par formation d'acide sulfurique, lorsque le gaz est utilisé pour le chauffage.

Les installations les plus courantes de désulfuration fonctionnent sur le principe de l'adsorption à sec par de l'oxyde de fer. Lors de ce processus chimique l'hydrogène sulfuré se combine avec l'oxyde de fer pour former du sulfure de fer. Par apport d'air, l'oxygène réoxyde le fer et le soufre natif se dépose. Après de nombreux cycles, il est nécessaire de remplacer l'oxyde de fer. Ce remplacement a lieu normalement une fois par an.

### Le stockage du gaz

Lors d'une alimentation régulière de l'installation, le gaz est produit de manière régulière, alors que la consommation peut varier très fortement. Aussi, afin de pouvoir utiliser tout le gaz produit, un stockage est-il indispensable. Le pouvoir énergétique du biogaz étant faible: 1 litre de mazout équivaut à 1500 litres de biogaz, le stock suffira à compenser les variations à court terme. La taille du stock dépendra donc des différences entre la production et la consommation. Normalement, le volume de stockage équivaut à 1 à 2 jours de production. Pour les installations agricoles, on utilise presque exclusivement des réservoirs à basse pression, les installations

### Eléments du réseau de gaz

#### Dispositifs de sécurité et de mesure:

- Sécurité de sur- ou de sous-pression
- Dispositif anti-retour de flamme
- Compteur de gaz

#### Préparation du gaz:

- Précipitation des condensats
- Désulfuriseur

#### Stockage du gaz:

- Réservoir à gaz



à haute pression étant trop coûteuses. Le stock le plus courant est un réservoir en matière synthétique renforcée. On trouve de tels réservoirs dans pratiquement toutes les tailles, jusqu'à 300 m<sup>3</sup>. Dans la majorité des cas, ces réservoirs sont posés, sans semelle de béton, sur du gravier; ils y sont maintenus à l'aide de tubes métalliques.

## Utilisation du gaz

Le gaz produit peut être utilisé de diverses manières et pour des buts différents. L'utilisation la plus courante est certainement la production directe de chaleur. Dans ce cas, le biogaz produit est généralement utilisé pour chauffer l'habitation ou l'étable, ou pour produire de l'eau chaude sanitaire. Le biogaz peut également être utilisé pour la cuisson des aliments, pour la stérilisation de la porcherie ou pour la production de vapeur dans une fromagerie. A l'aide d'une centrale chaleur-force, le biogaz peut également servir à produire de l'électricité et de la chaleur. A côté de ces applications, le biogaz peut également être utilisé comme carburant.

### Appareils de chauffage

Les brûleurs destinés au gaz naturel peuvent être également utilisés pour le biogaz. Moyennant de petites adaptations, l'efficacité du biogaz est comparable à celle du gaz naturel.

### Couplage chaleur-force

Plus récemment, des centrales chaleur-force ont été actionnées avec du biogaz. Il s'agit de moteurs à explosion qui ont été adaptés afin d'accepter le biogaz; ils permettent de produire efficacement électricité et chaleur. De telles installations présentent l'avantage de pouvoir utiliser efficacement le biogaz produit, tout au long de l'année. En été, l'électricité produite peut soit être consommée localement, soit être injectée dans le réseau électrique.

## Avantages

En faisant fermenter le purin, non seulement on valorise son utilisation, mais on élimine également certains problèmes liés à l'utilisation du purin frais:

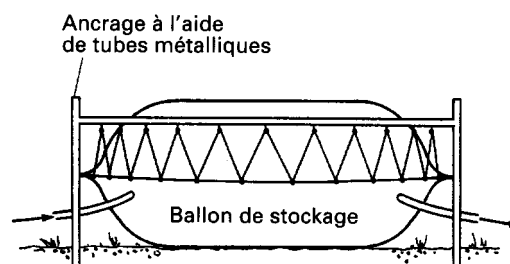
### Odeur

Après fermentation anaérobie, les odeurs sont non seulement atténuées, mais elles disparaissent

### Capacité calorifique de divers combustibles

Mazout extra léger	42.7	MJ/kg
Gaz naturel	33.8	MJ/m <sup>3</sup>
Propane, butane	46.0	MJ/m <sup>3</sup>
Biogaz (60% de méthane)	21.5	MJ/m <sup>3</sup>
Feuillus (15% d'humidité)	7190	MJ/stère
Résineux (15% d'humidité)	5420	MJ/stère
Copeaux de bois (35% d'humidité)	3725	MJ/m <sup>3</sup>

### Le stock de gaz



PACER

### Transformation et utilisation du gaz

En utilisant divers systèmes de transformation, le biogaz peut être utilisé pour produire de la chaleur, pour produire de l'électricité, ou comme carburant.

#### Chauffage et production d'eau chaude:

- Combustion du biogaz pour produire de la chaleur ou de l'eau chaude.

#### Couplage chaleur-force:

- Production simultanée de courant électrique et de chaleur à l'aide d'une centrale chaleur-force (TOTEM).

#### Carburant:

- Utilisation du biogaz comme carburant pour des moteurs à essence ou diesel après adaptation de ceux-ci.

**Exemple pratique**

Dans une exploitation de 25 vaches laitières, la quantité de purin atteint 1.5 m<sup>3</sup> par jour (soit 25 x 60 l/jour). Pour une durée de rétention de 24 jours, le volume fermenté atteint ainsi 36 m<sup>3</sup>. La production de biogaz se calcule en multipliant la quantité de matière organique disponible par le rendement de production de gaz (25 x 4.8 kg MO x 0.27 m<sup>3</sup>/kg MO). La production journalière brute de biogaz s'élève ainsi à 32.4 m<sup>3</sup>. Après déduction de la quantité de gaz nécessaire au chauffage du digesteur (30 à 35% de la production brute), il reste une production annuelle nette d'environ 8000 m<sup>3</sup> de gaz, soit l'équivalent de 4800 l de mazout.

quasiment. L'utilisation de lisier fermenté se fait ainsi sans dégagement d'odeurs nauséabondes.

**Hygiène**

Lorsque l'on utilise du purin frais comme engrais, on est toujours confronté au risque de transfert de germes pathogènes, ce risque disparaît quasiment après fermentation.

**Homogénéisation**

Suite à la désintégration des substances organiques, le purin fermenté présente une structure fine et homogène; de ce fait, il se prête particulièrement bien à l'épandage.

**Éléments nutritifs**

A l'exception du soufre, qui disparaît avec le biogaz sous forme d'hydrogène sulfuré, tous les autres éléments nutritifs du purin demeurent après fermentation. De plus, par minéralisation des éléments organiques, ils sont mieux absorbés par les plantes. Au moment de l'épandage, seul l'azote est partiellement perdu, en raison de la volatilité de l'ammoniac. Ces pertes sont un peu plus élevées que lorsque l'on utilise du fumier frais.

On constate donc que la fermentation anaérobie du purin n'a pas d'effet négatif sur la qualité du produit en tant qu'engrais. L'utilisation du purin fermenté est toutefois liée aux mêmes exigences que pour le purin frais en ce qui concerne la protection de l'environnement.

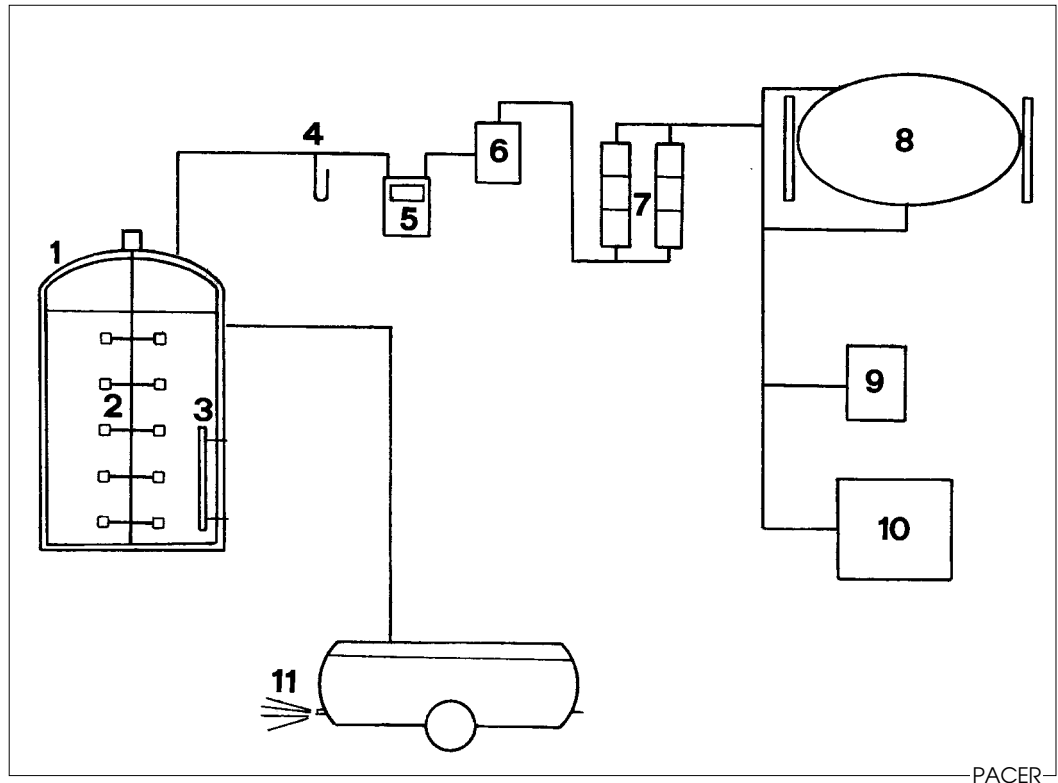
**Pour en savoir plus:**

Biogas Handbuch, 2. Auflage, Wirz AG, Aarau 1991

Güllegrube als Biosanlage, FAT-Bericht Nr 304, 1987

Biogaz, capteurs solaires et récupération d'énergie dans l'agriculture.  
Manuel PACER (OFQC) 123 p., 1992 (N°. de commande OCFIM 724.221.f)

## Composants d'une installation de biogaz



### Digesteur:

- 1 Réacteur
- 2 Brasseur
- 3 Chauffage

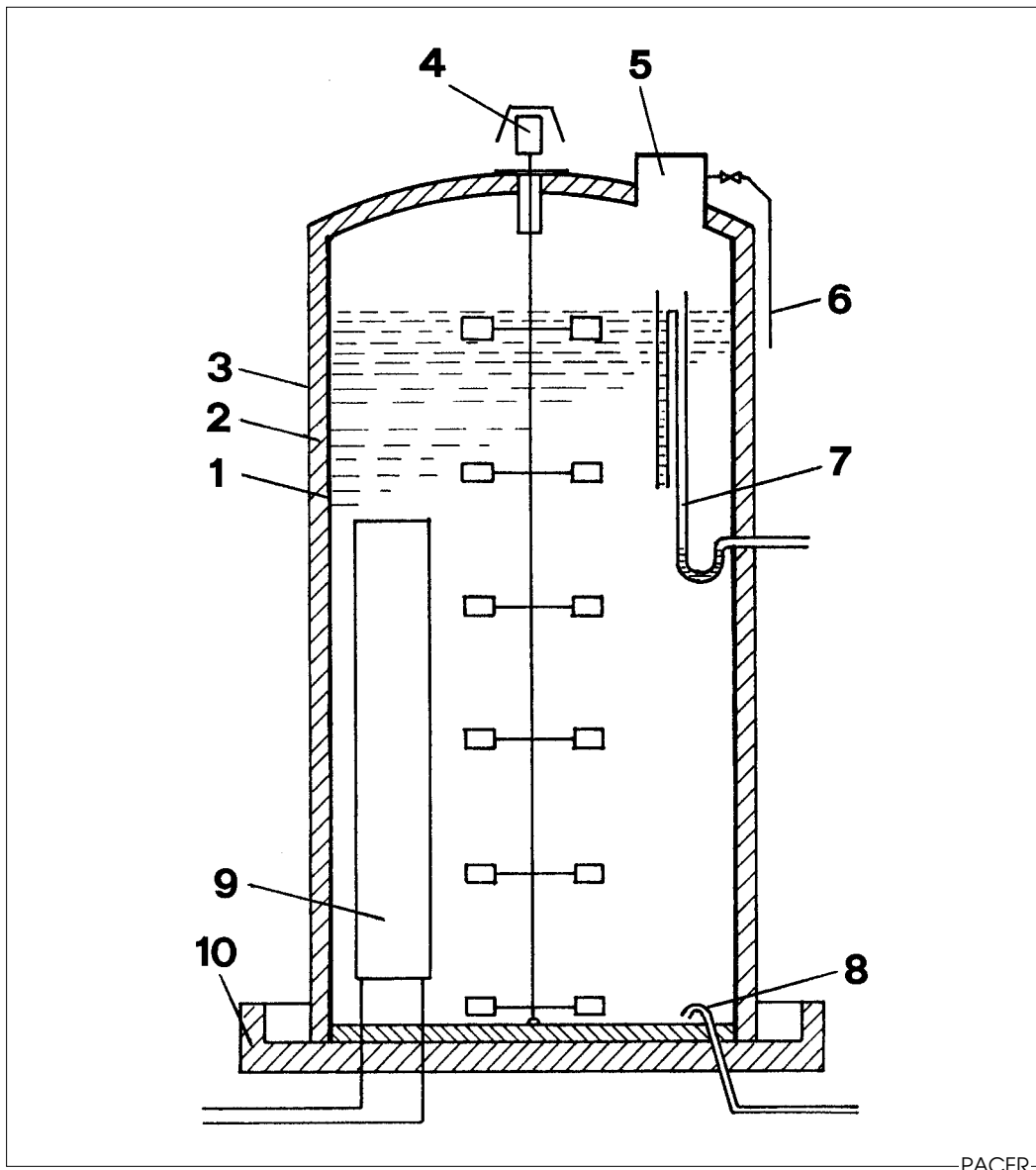
### Utilisation:

- 9 Chaudière à gaz
- 10 Centrale chaleur-force
- 11 Purin fermenté

### Réseau de gaz:

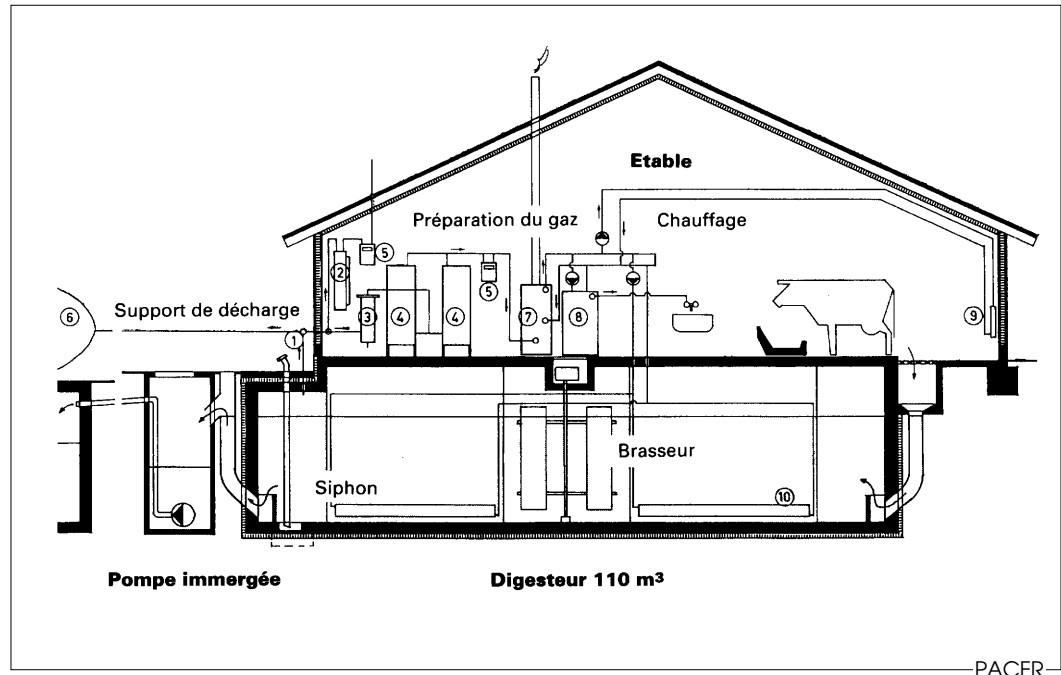
- 4 Soupape de surpression
- 5 Compteur de gaz
- 6 Filtre de gravier
- 7 Système de désulfuration
- 8 Ballon de stockage

## Exemple d'une installation à flux continu



- 1 Digesteur
- 2 Isolation thermique
- 3 Paroi extérieure
- 4 Brasseur à tourniquet
- 5 Dôme de collection du gaz
- 6 Conduite du gaz
- 7 Conduite de trop-plein
- 8 Conduit d'entrée
- 9 Chauffage du digesteur
- 10 Fondation

## Exemple d'une installation de stockage



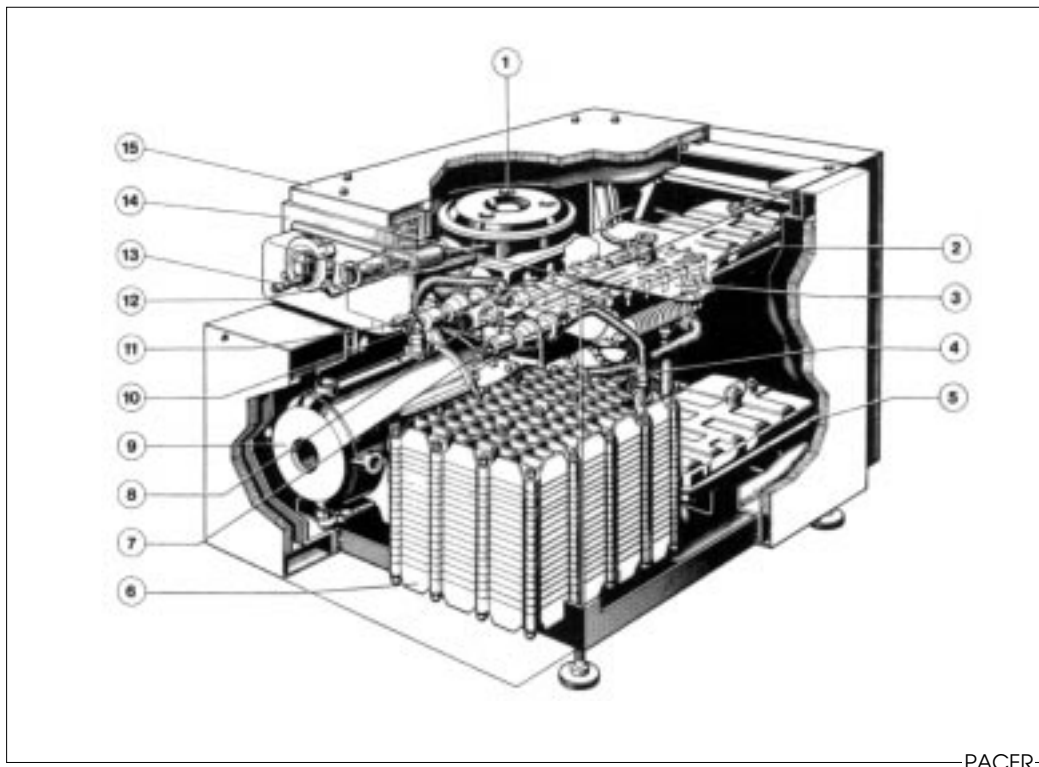
### Préparation du gaz

- 1 Reprise du gaz
- 2 Soupape de surpression
- 3 Dispositif anti-retour de flamme
- 4 Dispositif de désulfuration
- 5 Compteur de gaz

### Chauffage:

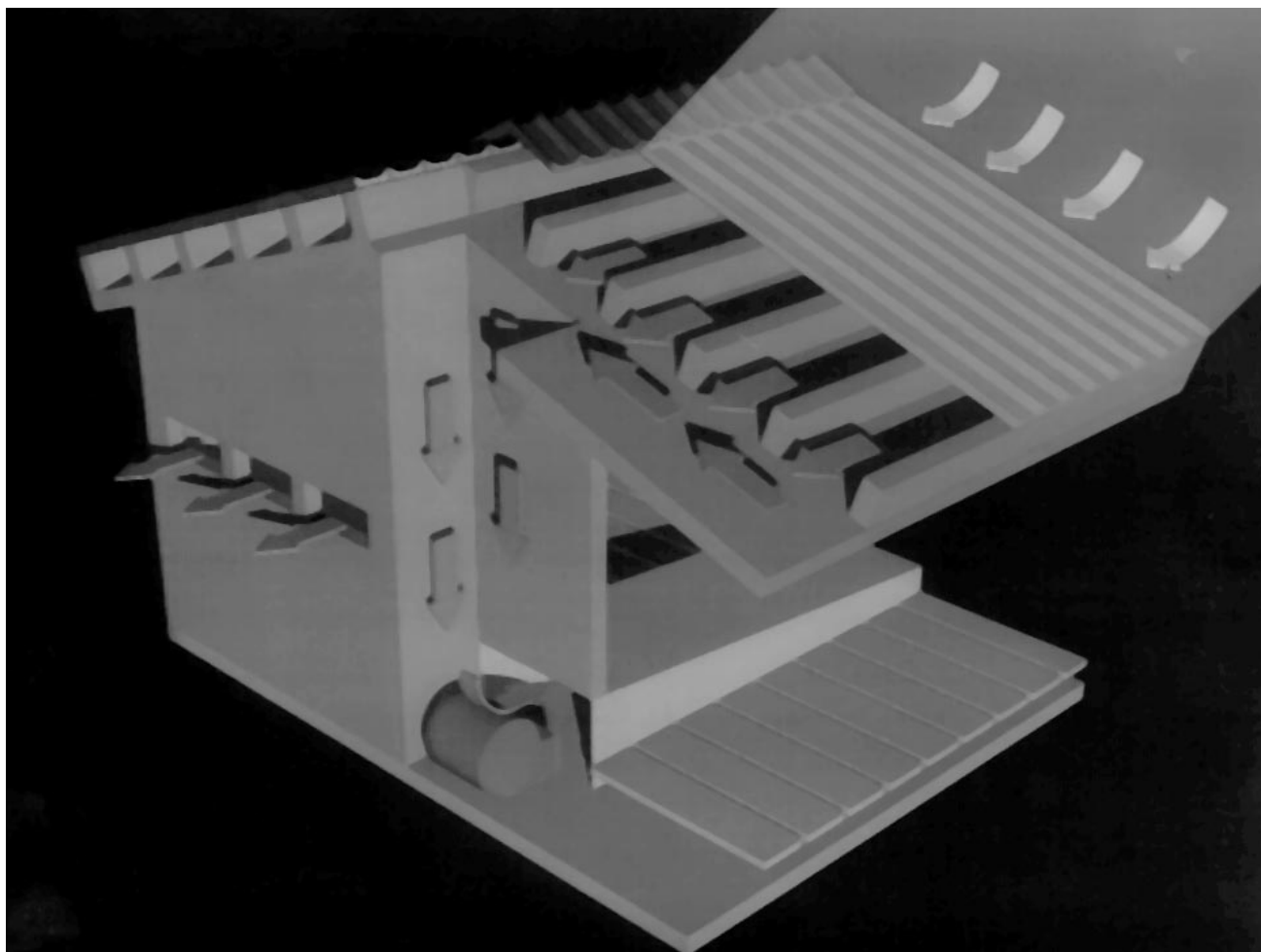
- 7 Chauffage à gaz
- 8 Boiler avec raccordement au chauffage
- 9 Chauffage de l'étable
- 10 Chauffage du digesteur

## Couplage chaleur-force (TOTEM)



- 1 Moteur à explosion
- 2 Réservoir d'eau
- 3 Echangeur de chaleur gaz-eau
- 4 Echangeur de chaleur huile-eau
- 5 Réservoir d'huile
- 6 Echangeur de chaleur eau-eau
- 7 Sortie de l'eau chaude
- 8 Pot d'échappement
- 9 Génératrice électrique
- 10 Circuit d'eau froide
- 11 Connection au réseau électrique
- 12 Entrée d'air
- 13 Amenée du gaz
- 14 Châssis
- 15 Panneaux isolants

# Capteurs solaires pour le séchage du foin



---

Fonctionnement du capteur solaire	27
Capteur solaire pour le séchage du foin	29
Grandeurs caractéristiques pour la planification	29
Acheminement idéal de l'air	30
Montage de la face arrière du capteur	32

---

# Capteurs solaires pour le séchage du foin

Le séchage de foin en grange offre l'énorme avantage d'avoir lieu en période estivale, saison où le rayonnement solaire est abondant. Contrairement aux installations à mazout de séchage en grange, ou à celles utilisant des pompes à chaleur, le séchage en grange, à l'aide de capteurs solaires, ne nécessite presque pas d'énergie auxiliaire.

## Fonctionnement du capteur solaire

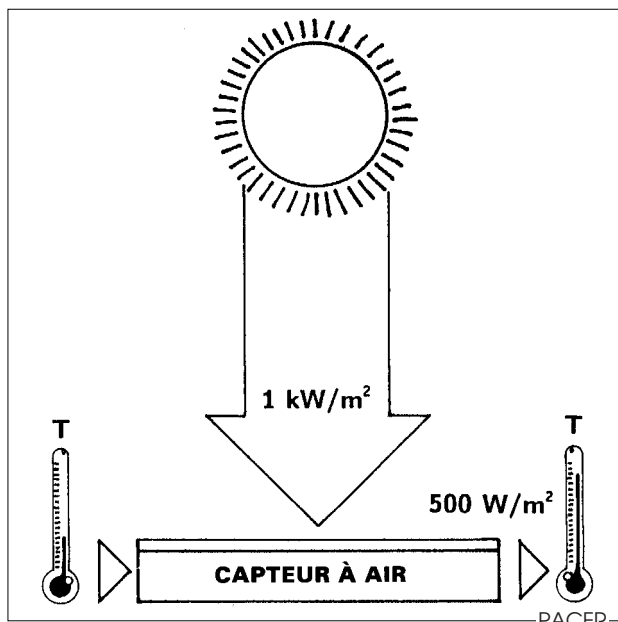
Toute surface sombre absorbe le rayonnement solaire de faible longueur d'onde, pour le transformer en chaleur. C'est ce qui se passe dans un capteur solaire: l'absorbeur est chauffé par le soleil, il cède alors sa chaleur au fluide caloporteur: soit de l'eau (capteurs pour la préparation d'eau chaude), soit de l'air (capteurs à air). On distingue deux types principaux de capteurs à air: les capteurs à couverture transparente et les capteurs à couverture opaque.

### Capteur à couverture transparente

Ce type de capteur fonctionne sur le principe de l'effet serre: le rayonnement solaire de faible longueur d'onde traverse la couverture transparente pour être capté par l'absorbeur, le rayonnement thermique (de plus grande longueur d'onde) qui en résulte ne peut traverser la couverture transparente, de ce fait il est piégé. L'énergie ainsi captée peut être utilisée, les pertes étant faibles.

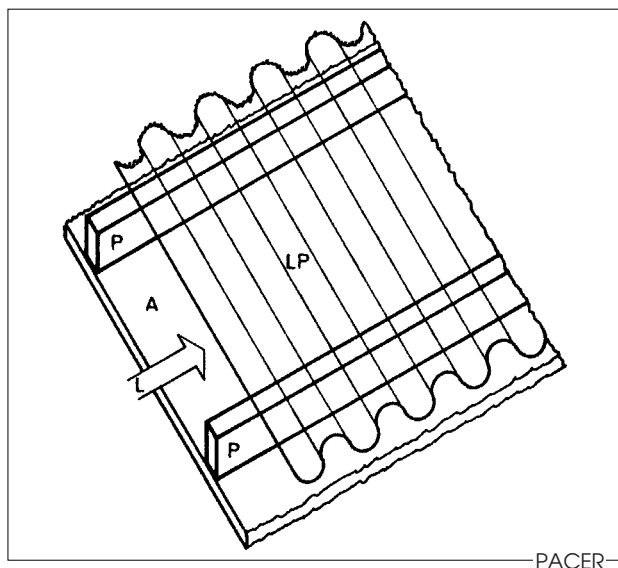
### Capteur à couverture opaque

Si la couverture est opaque, elle fait, elle-même, office d'absorbeur. Le rayonnement incident est également capté, mais les pertes de chaleur sont plus importantes, car une partie de l'énergie captée repart sous forme de rayonnement à grande longueur d'onde. La partie utile de la chaleur captée est transmise à l'air qui circule dans la face arrière de l'absorbeur. L'échange de chaleur entre l'absorbeur et l'air se fait essentiellement par convection. C'est pourquoi, il est très important d'avoir une bonne turbulence dans l'air des canaux du capteur. Plus grande est la vitesse de l'air dans le capteur, meilleur sera son rendement. Mais, en contrepartie, les pertes de pression à l'intérieur des gaines et du capteur seront également plus élevées. Aussi, lors de la planification d'une installation, un compromis doit-il être trouvé entre le rendement et les pertes de charges.



### Puissance d'un capteur solaire

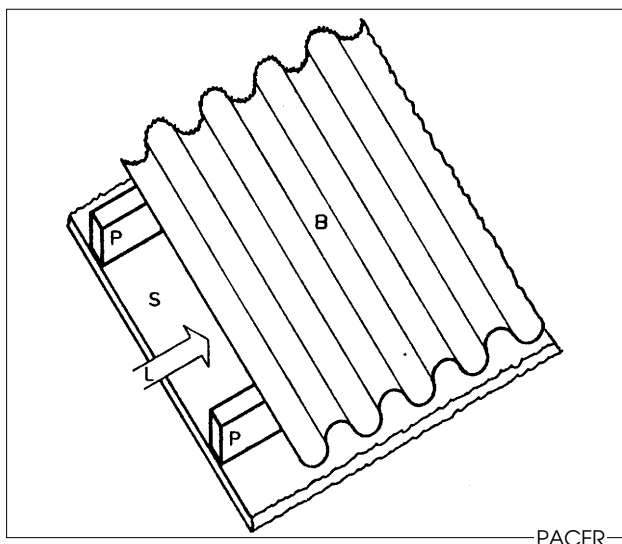
La puissance spécifique d'un capteur solaire est d'environ  $500 \text{ W/m}^2$ , ce qui correspond à un rendement de 50%.



### Capteur transparent

- P: Poutres
- LP: Couverture transparente
- A: Absorbeur
- L: Air





**Capteur opaque**

- P: Poutres
- B: Couverture (Eternit ou tôle)
- S: Face arrière du capteur
- L: Air

Type et direction de l'air par rapport aux ondulations de la couverture	Espace correspondant à une perte de charge de 1 mbar	Rendement en %	Élévation de température K
Eternit, en travers	10 cm	44	7.1
Tôle, en travers	8 cm	52	8.5
Polycarbonate transparent, en travers	8 cm	58	9.5
Eternit, en long	12 cm	42	6.9
Tuiles, en long	10 cm	37	6.1

Capteur de 250 m<sup>2</sup>, pour une aire de séchage d'environ 100 m<sup>2</sup>, rayonnement solaire de 800 W/m<sup>2</sup>, altitude 500 m, longueur de canal 10 m. Dans ces conditions, un capteur en Eternit atteint un rendement de 44% avec un échauffement de l'air d'environ 7°C. Avec un capteur en tôle, l'échauffement de l'air atteint 8.5°C. Si l'on se contente d'une échauffement de 7°C, une surface de captage de 180 m<sup>2</sup> est suffisante pour autant que l'on utilise un capteur à couverture transparente. On voit donc que si le capteur a un rendement plus faible, ce handicap peut être compensé par une augmentation de la surface de captage. Une différence du même ordre de grandeur existe entre le capteur en Eternit et celui en tuiles, mais dans ce cas la différence de rendement ne peut que partiellement être compensée par une augmentation de surface de captage. Ces toits ont en effet des surfaces et des proportions qui limitent les débits d'air possibles.

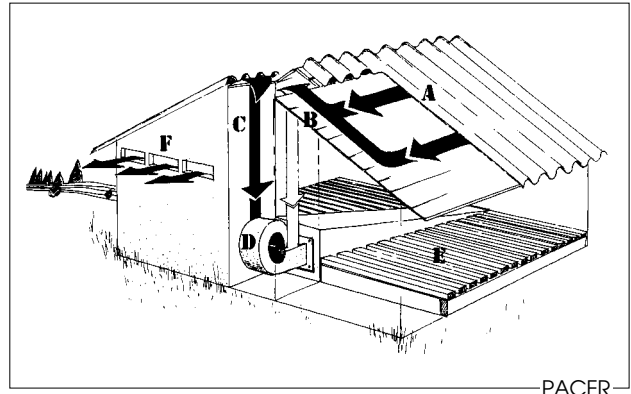
**Comparaison des performances de capteurs**

## Capteur solaire pour le séchage du foin

Du fait des règlements de la police du feu, de questions d'esthétique et de coûts, les capteurs transparents ne sont pratiquement jamais utilisés pour le séchage du foin. On leur préfère des absorbeurs opaques, généralement en Eternit.

### Éléments d'une installation pour le séchage du foin

Le capteur se compose de la couverture du toit (A) et d'une partie arrière (panneaux agglomérés). Le ventilateur (D) aspire l'air au travers du capteur. Celui-ci s'y chauffe pour être ensuite amené dans un canal de collection (B), puis dans un canal d'amenée (C). De là, il traverse le ventilateur pour être enfin pulsé, au travers d'une grille (E) dans l'herbe humide. L'air humide s'échappe alors de la grange au travers d'ouvrants (F).



### Installation de séchage en grange à l'aide de capteurs solaires

- A: Capteur
- B: Canal collecteur
- C: Canal d'amenée d'air
- D: Ventilateur
- E: Grille

## Grandeurs caractéristiques pour la planification

### Taille du capteur solaire

Pour un rayonnement incident de  $800 \text{ W/m}^2$ , le capteur solaire doit conduire à un échauffement de l'air d'environ  $6^\circ\text{C}$ . Cette condition est remplie lorsque la taille du capteur atteint environ:

**Surface du capteur d'Eternit = 2.5 x surface de séchage du foin**

### Distance entre couverture et sous-couverture

L'entrée de l'air de l'extérieur, ainsi que les turbulences induites par la surface interne du toit, souvent ondulé, génèrent des pertes de pression qui augmentent avec la vitesse de l'air. Pour cette raison, la distance entre la couverture et la sous-couverture doit être telle que la perte totale de pression au travers du capteur ne dépasse pas 1 mbar. Si les pertes de pressions dépassent cette valeur, le rendement du capteur diminue. Une perte de charge de 1 mbar est parfaitement supportable par le ventilateur, on l'inclut dans les nouvelles planifications.

### Sections des gaines collectrices et principales

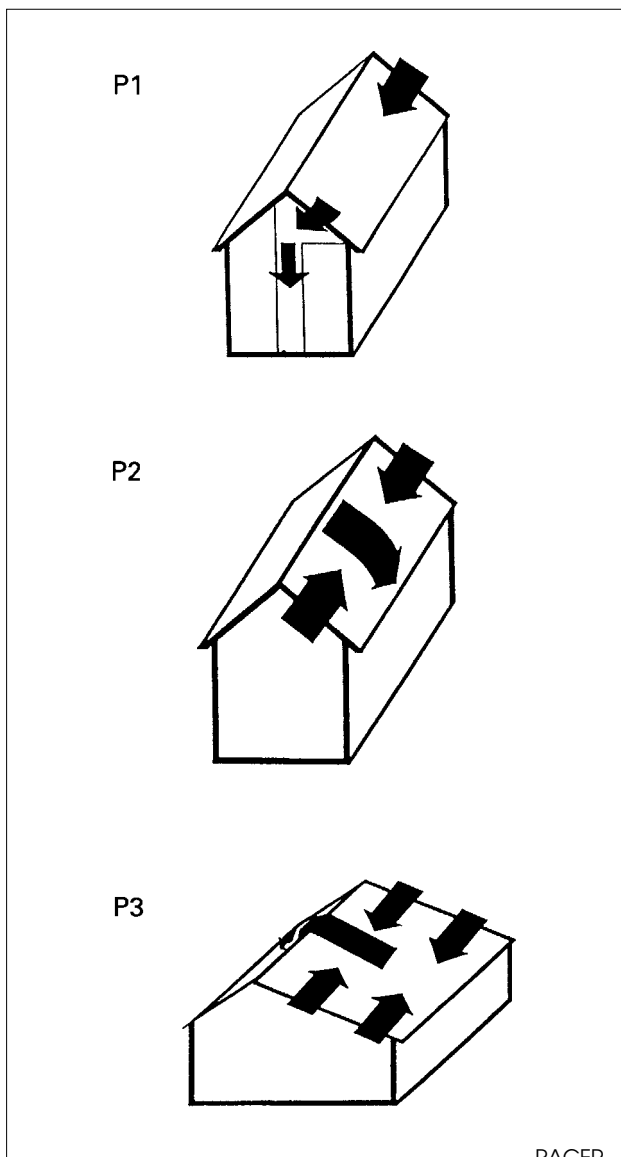
La vitesse de l'air qui circule dans les gaines ne doit pas dépasser 5 m/s. On dimensionne généralement les gaines de manière à ce que la vitesse moyenne de l'air atteigne 4 m/s.

Surface de séchage:  $100 \text{ m}^2$   
 Hauteur du tas: 5 m  
 Volume du tas:  $500 \text{ m}^3$   
 Type de capteur: Eternit  
 Longueur du capteur: 20 m  
 Largeur du capteur: 12.5 m  
 Débit d'air:  $11 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Hauteur du canal: 22 cm  
 Altitude du lieu: 500 m

Hauteur du canal de captage (cm)	22	21	20	19	18	17
Vitesse de l'air (m/s)	4.0	4.2	4.4	4.6	4.9	5.2
Perte de charge (mbar)	0.44	0.50	0.58	0.67	0.78	0.92
Rendement (%)	40	41	41	42	43	44
Élévation de température* (K)	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	7.1

\* pour un rayonnement solaire de  $800 \text{ W/m}^2$

### Exemple de dimensionnement



**Cheminement de l'air dans les toits à pannes**

## Acheminement idéal de l'air

L'intégration du capteur à air et de ses conduits dépend fortement de la forme de la grange. Une distinction nette doit être faite entre les toitures à pannes et les toitures à chevrons. Les exemples sont donc regroupés en deux catégories: dans les toits à pannes les poutres qui soutiennent la toiture sont placées horizontalement; dans les toitures à chevrons, ces poutres vont du faite du toit à la gouttière.

### Toit à pannes

Les toits à pannes contiennent des canaux collecteurs disposés horizontalement, dans l'axe du toit.

**P1:** Solution simple pour un pan de toit, l'aspiration de l'air est sur un côté, le canal collecteur sur l'autre.

**P2:** Disposition fréquente lorsque les granges sont situées au-dessus des étables. L'air est aspiré des deux côtés, puis amené au ventilateur au travers d'un collecteur central. Dans cette variante, le canal collecteur, suspendu sous le toit, fait partie intégrante du capteur.

**P3:** Variante souvent choisie dans les bâtiments de grande taille, comme les stabulations libres à loggettes. L'étable est le plus souvent orientée au sud et recouverte d'un toit à faible pente. Le tas de foin se trouve dans la partie nord du bâtiment. Les ventilateurs sont installés au nord, contre la paroi froide, solution déconseillée dans le cas de séchoirs à air froid. La longueur des canaux constitue un désavantage supplémentaire; par contre, en présence de capteurs à air, cet arrangement a l'avantage de permettre l'aspiration de l'air en un point optimal.

### Toit à chevrons

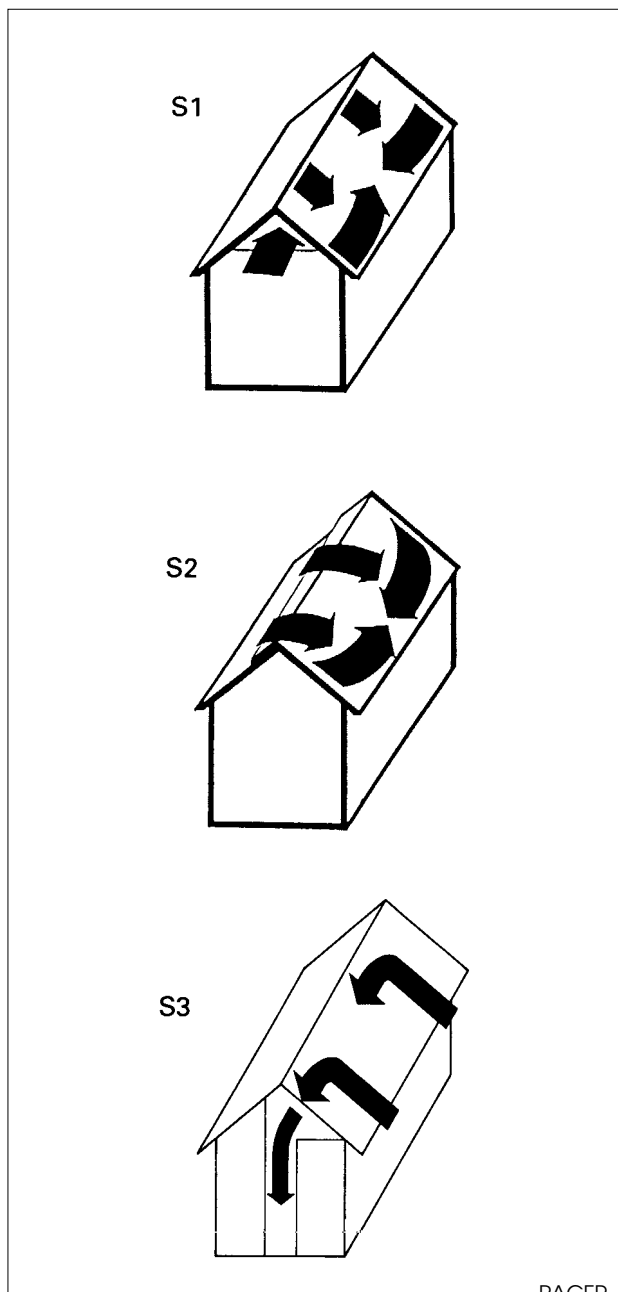
Lorsque le canal est situé au faîte du toit, l'air monte depuis la gouttière. De ce fait lorsque le toit est orienté au sud, il n'est pas possible d'aspirer l'air de l'est ou de l'ouest.

**S1:** Dans ce cas, un canal conduit l'air du faîte du toit jusqu'aux canaux du capteur, alors que le canal collecteur, situé le long de la gouttière, ramène l'air chaud au ventilateur.

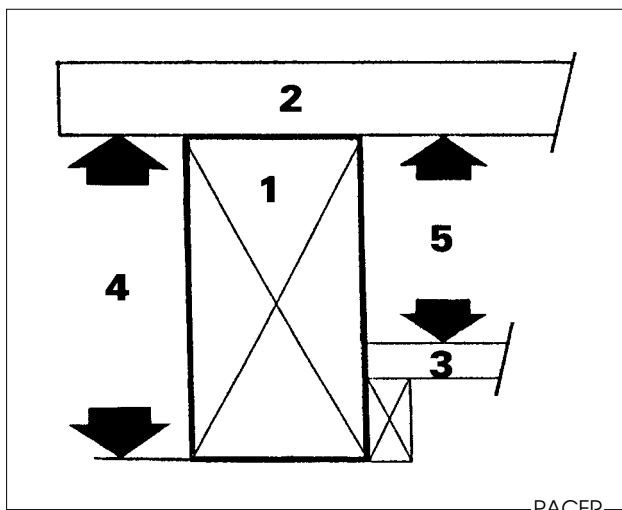
**S2:** Si un pan du toit dépasse le faîte, l'air peut y être aspiré au travers d'une admission en métal plié.

**S3:** Dans cet exemple, l'air est aspiré dans des canaux le long de la gouttière. Le canal collecteur est installé au faîte du toit, alors qu'un canal vertical conduit l'air au ventilateur.

Lorsque l'air circule à partir du faîte du toit, il y a lieu de prévoir des entrées latérales si une ouverture au faîte n'est pas possible.



**Cheminement de l'air dans les toits à chevrons**



**Coupe du capteur**

- 1 Poutre
- 2 Couverture
- 3 Face arrière du capteur
- 4 Hauteur de la poutre
- 5 Hauteur du canal

**Montage de la face arrière du capteur**

Lors de constructions neuves, il est recommandé de poser les panneaux qui constituent la face arrière du capteur juste avant la couverture du toit. Le charpentier préparera à l'avance, dans son atelier, les panneaux et les lattes, en vue de leur mise en place entre les poutres. De cette manière, les panneaux prédécoupés, d'une épaisseur d'environ 19 mm, pourront être posés rapidement à partir du dessus du toit. Un montage ultérieur, dans une construction terminée, rend le travail plus pénible et plus coûteux. Les panneaux rainés-crêtés sont assemblés facilement. Si les panneaux sont montés depuis l'intérieur, la sous-couverture peut se faire ultérieurement.

Pour la sous-couverture, on peut utiliser d'autres matériaux: tôles profilées, plaques en fibres, ou feuilles synthétiques). Lorsque la hauteur du capteur est équivalente ou légèrement inférieure à la dimension des poutres, il est possible d'utiliser des toiles de polyéthylène renforcé (Bigroflex, Nissan, Sarnafil). Celles-ci sont relativement faciles à monter, mais elles doivent être bien tendues au moment de la fixation. Ceci peut se faire à l'aide de lattes enroulées et d'un palan. Si l'on ne prend pas ces précautions, on risque des déformations en été, ce qui modifierait la section des conduits d'air. Il est également possible d'acheter des bâches préfabriquées et de les adapter. Les bâches sont faciles à monter, mais elles sont délicates et peuvent être endommagées lorsque des pierres ou d'autres objets solides sont entraînés par la soufflerie.

### Modes de montage

La distance entre la couverture et la face arrière du capteur (hauteur du canal d'air) est la grandeur déterminante lors du montage.

De grosses poutres (18 à 24 cm) et une hauteur de canal peu élevée (par exemple 12 cm) conduisent à la solution A: le panneau repose sur une latte fixée latéralement. La pose se fait à partir du toit, avant qu'il ne soit couvert.

La variante B convient dès que la hauteur du canal est de peu inférieure à l'épaisseur de la poutre.

La variante C s'impose lorsque la hauteur du canal est voisine de celle de la poutre. Le panneau est alors fixé depuis dessous et consolidé par une planche.

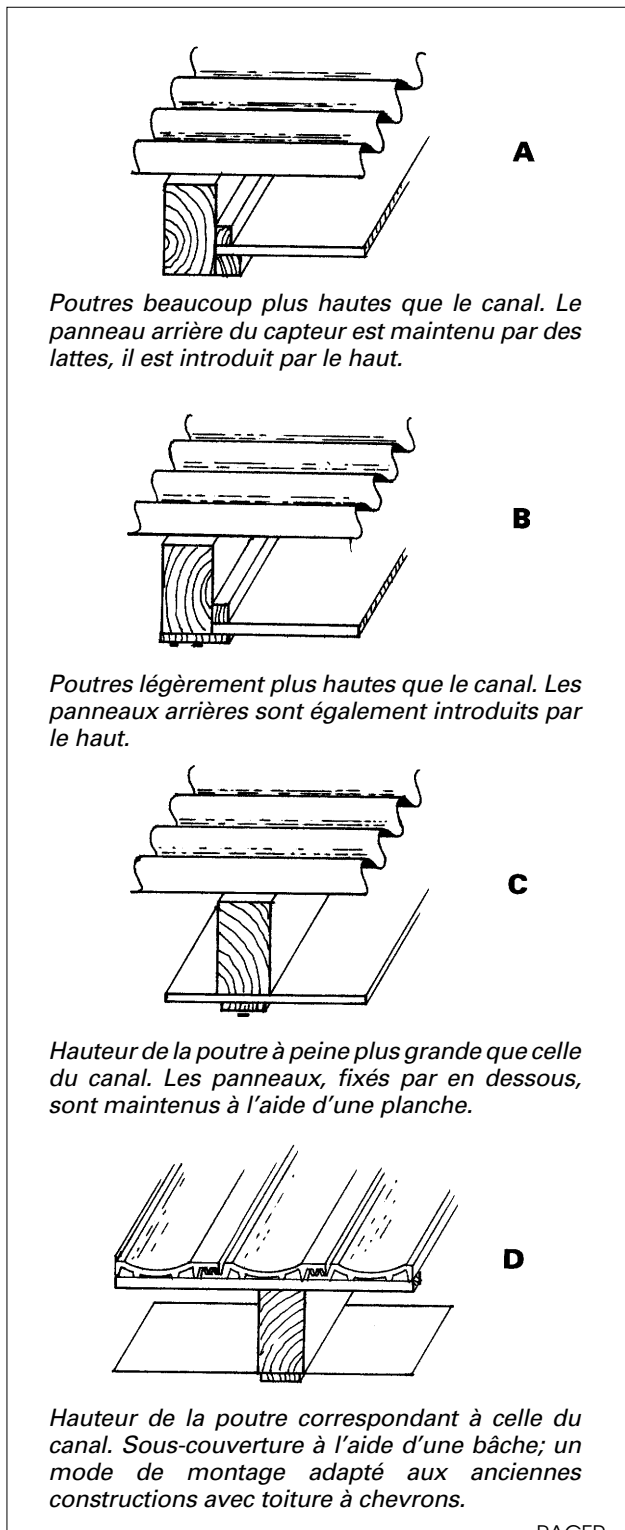
Dans d'anciens bâtiments, lorsque les toits à chevrons sont déformés, on applique la variante D. Le lambrissage se fera alors à l'aide de bâches.

### Pour en savoir plus:

Le séchage en grange de A à Z. Rapport FAT N° 406, 1991

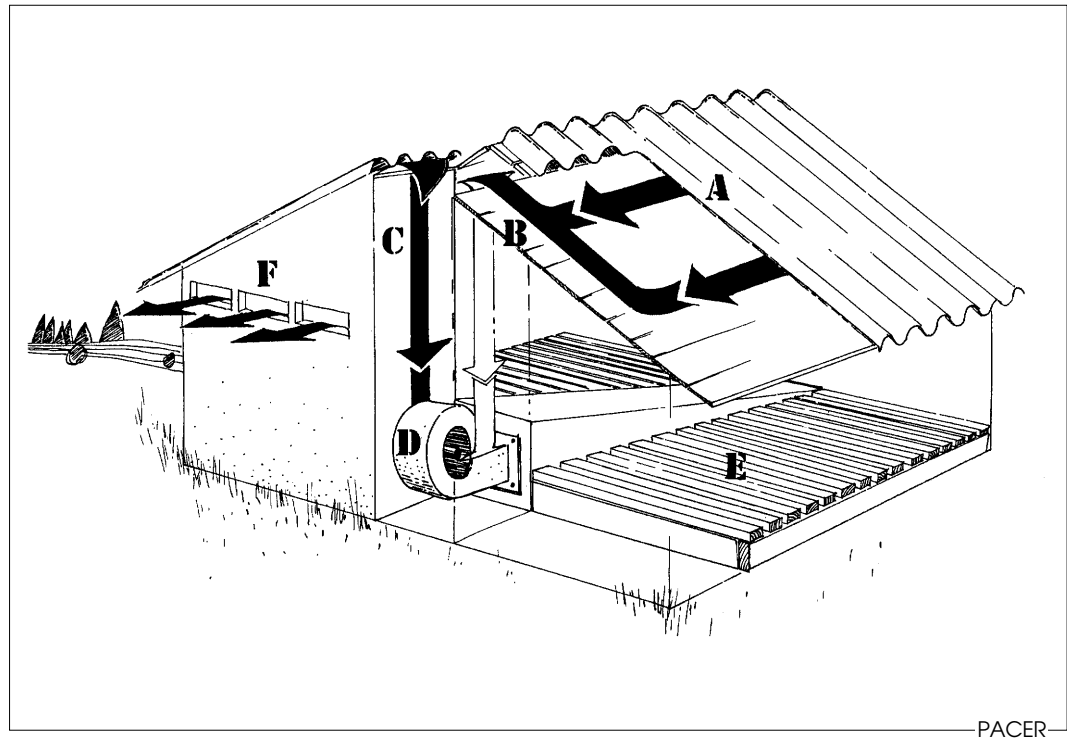
Projets et réalisations de capteurs solaires pour le séchage du foin. Rapport FAT N° 407, 1991

Biogaz, capteurs solaires et récupération d'énergie dans l'agriculture. Documentation PACER (OFQC, N° OCFIM 724.221f), 1992



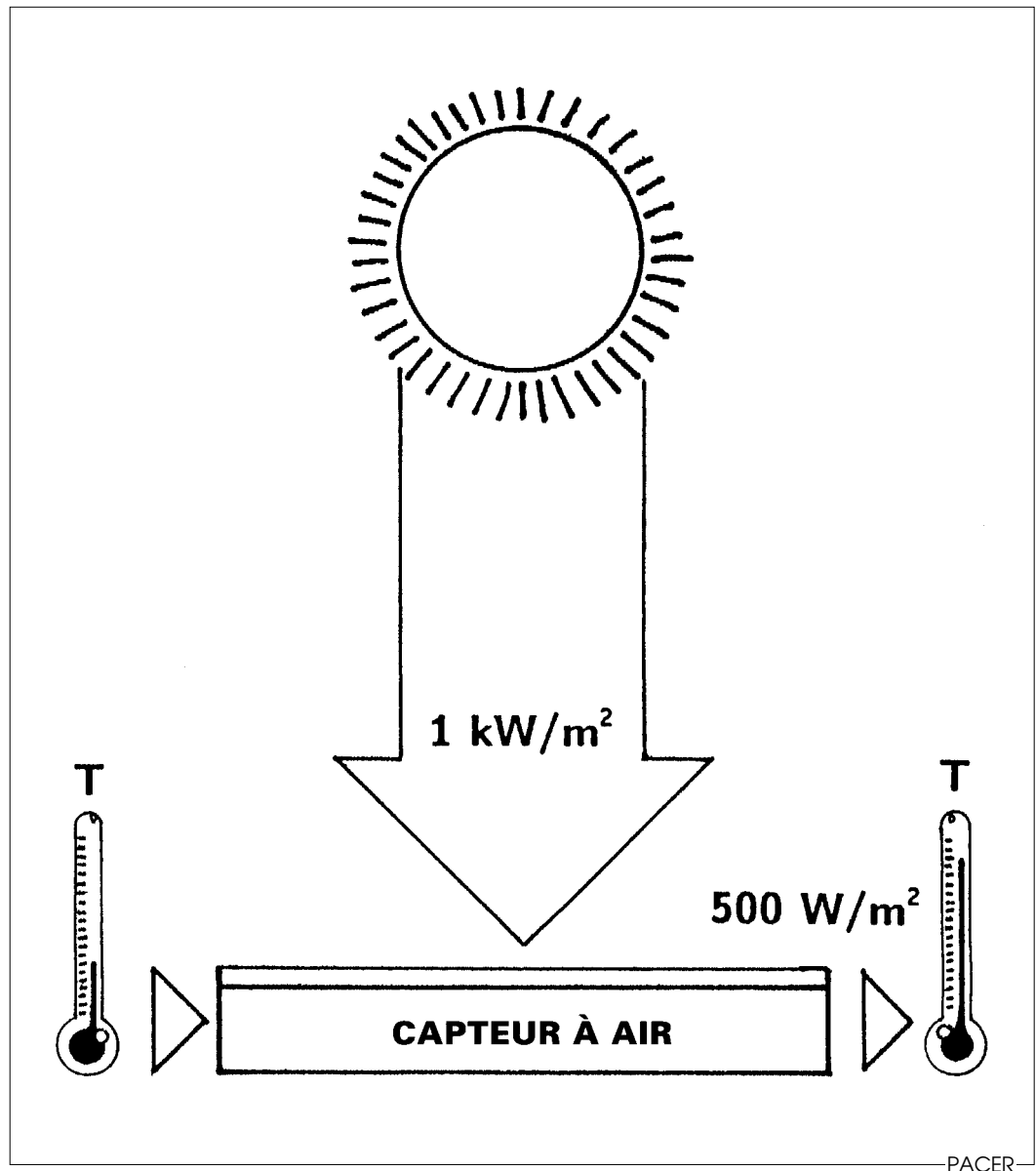
### Modes de montage

## Installation de séchage en grange à l'aide de capteurs solaires



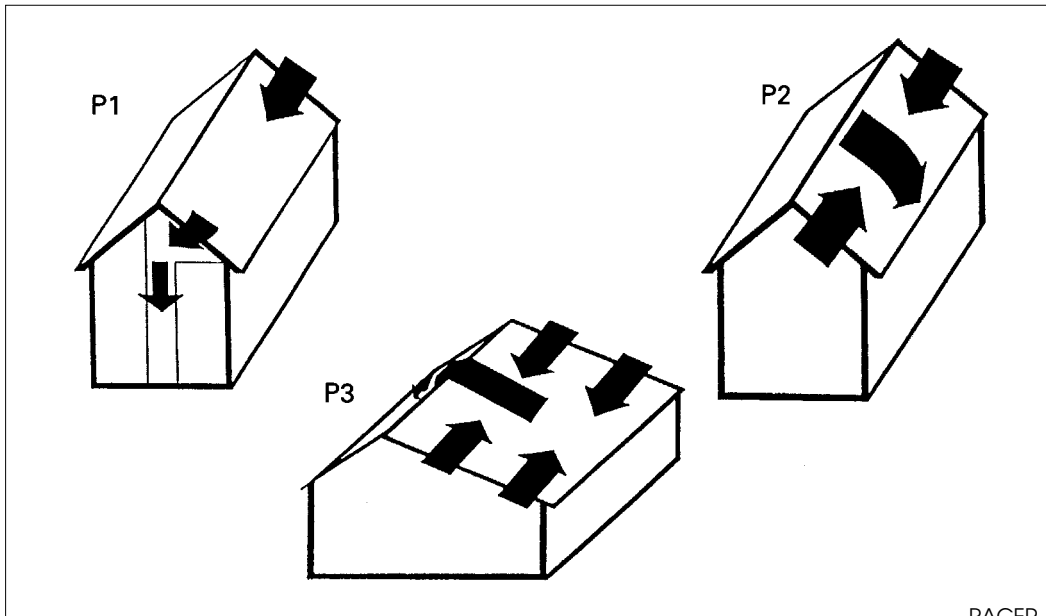
- A** Capteur
- B** Canal collecteur
- C** Canal d'amenée d'air
- D** Ventilateur
- E** Grille
- F** Ouvertures d'évacuation de l'air

## Puissance d'un capteur solaire

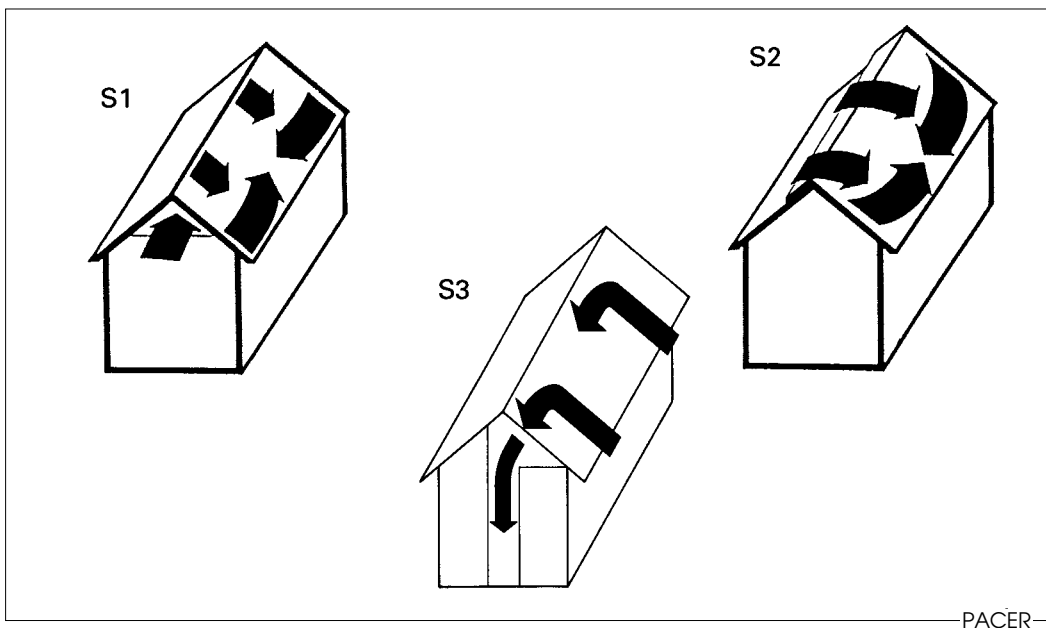




## Cheminement de l'air dans les toits à pannes et à chevrons

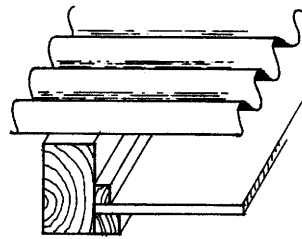


Cheminement de l'air dans les toits à pannes

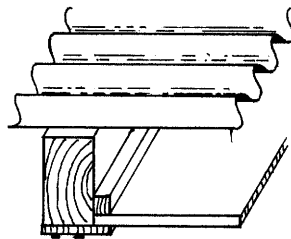


Cheminement de l'air dans les toits à chevrons

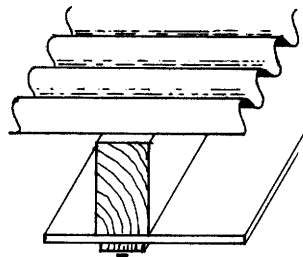
## Modes de montage du capteur



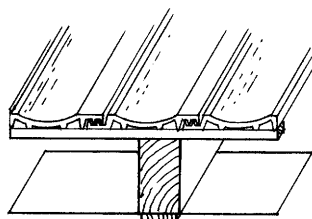
*Poutres beaucoup plus hautes que le canal. Le panneau arrière du capteur est maintenu par des lattes, il est introduit par le haut.*



*Poutres légèrement plus hautes que le canal. Les panneaux arrière sont également introduits par le haut.*

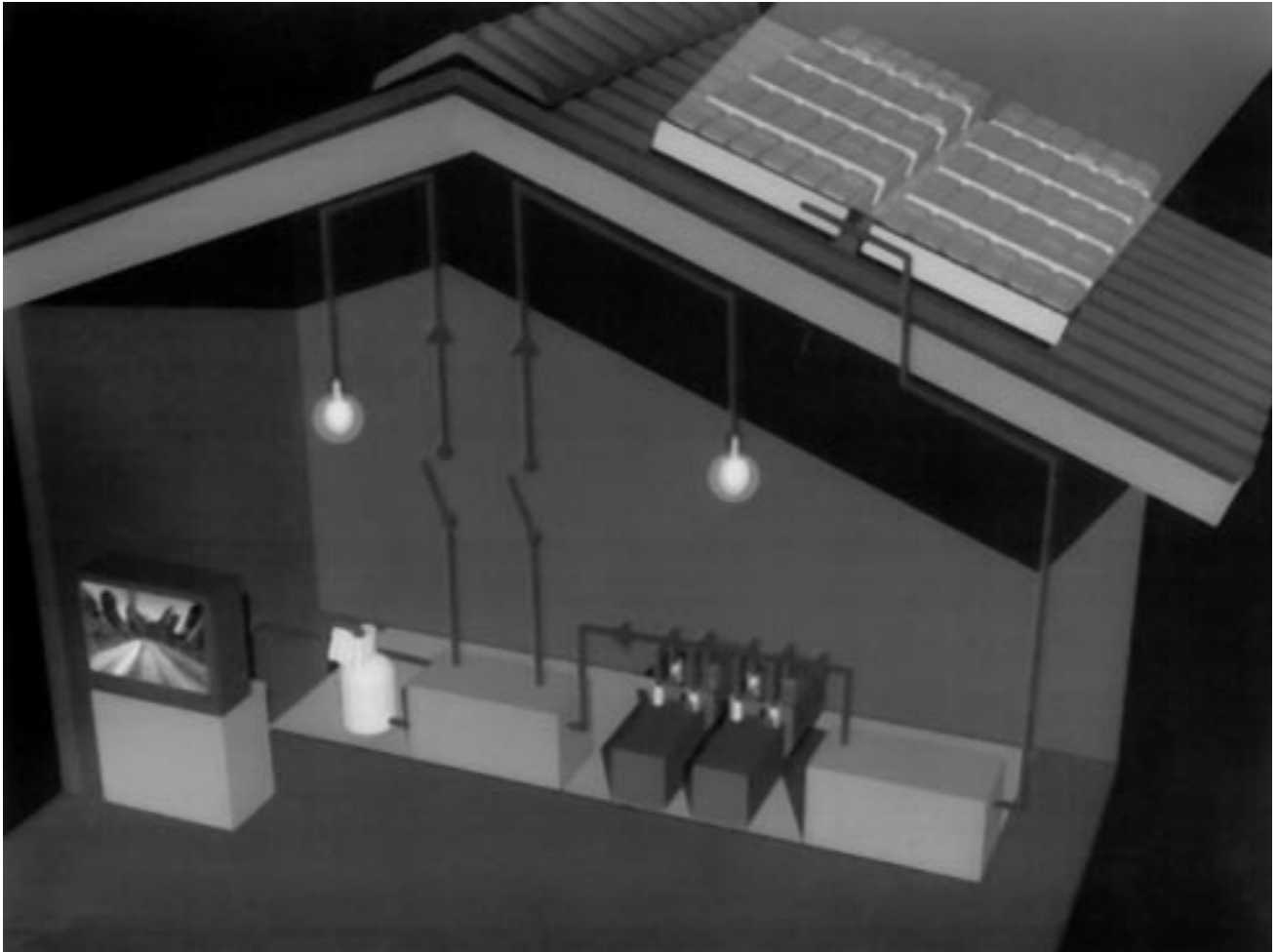


*Hauteur de la poutre à peine plus grande que celle du canal. Les panneaux, fixés par en dessous, sont maintenus à l'aide d'une planche.*



*Hauteur de la poutre correspondant à celle du canal. Sous-couverture à l'aide d'une bâche; un mode de montage adapté aux anciennes constructions avec toiture à chevrons.*

# Installations photovoltaïques



---

Rayonnement global	41
Cellules solaires	41
Composants d'une installation photovoltaïque	44
Exemple pratique	45

---

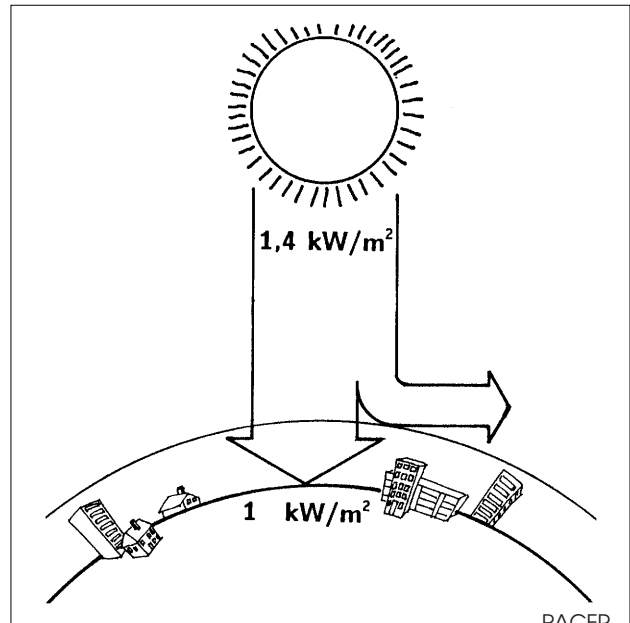
# Installations photovoltaïques

Les cellules solaires constituent aujourd'hui la solution la plus économique de production d'électricité dans les alpages de montagne. Cette situation se retrouve chaque fois que l'on est éloigné d'un réseau électrique, les frais de raccordement étant alors généralement élevés. Ce courant d'origine solaire offre tous les avantages d'une production moderne d'électricité: décentralisation, respect de l'environnement, technique transparente.

## Rayonnement global

D'une température de 6000 °C, la surface du soleil émet à tout instant une quantité gigantesque d'énergie, sous forme de rayonnement et de particules que l'on appelle photons. L'énergie de ces photons est fonction de leur longueur d'onde.

Seule une petite fraction de l'énergie rayonnée par le soleil atteint notre terre. Sous nos latitudes le rayonnement global, qui atteint finalement le sol, ne dépasse pas 1000 watts par mètre carré. L'intensité du rayonnement dépend de la position relative du soleil par rapport au point considéré. On observe ainsi à des variations journalières et saisonnières.



### Rayonnement global maximum

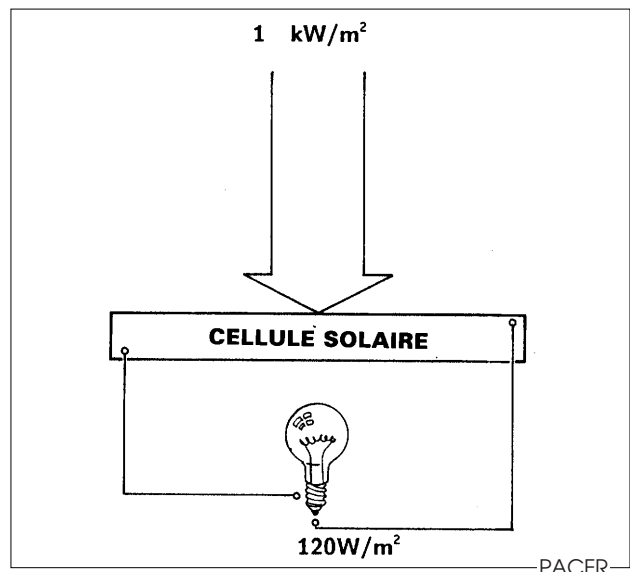
Au niveau du sol, le rayonnement solaire global peut atteindre 1000 W/m<sup>2</sup>, soit l'équivalent de la puissance d'une plaque de cuisson.

## Cellules solaires

Les cellules solaires, ou cellules photovoltaïques, permettent la transformation directe, en électricité, du rayonnement incident. En principe, les cellules solaires, tout comme les transistors, sont des semi-conducteurs, mais leur surface est évidemment beaucoup plus importante. Comme matériau de base, on peut utiliser le silicium, l'indium, le germanium, le gallium ou le tellurium. La préparation de certains de ces éléments peut présenter des risques d'émissions toxiques, ce n'est pas le cas du silicium, qui de plus offre de bonnes caractéristiques du point de vue de la production d'électricité. C'est la raison pour laquelle il est actuellement le plus utilisé.

On distingue trois types de cellules au silicium:

- les cellules monocristallines, qui sont obtenues par découpage de cristaux de silicium;
- les cellules polycristallines, que l'on fabrique à partir de blocs de silicium coulés;
- les cellules amorphes, obtenues par évaporation sous vide de silicium et par déposition sur un substrat.



### Puissance d'une cellule solaire

Pour un rayonnement incident de 1000 W/m<sup>2</sup>, la puissance fournie par une cellule solaire atteint 120 W/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à un rendement de 12%.

Type de cellule	Rendement		Temps de retour énergétique
	Pratique	Laboratoire	
monocristallin	10-13%	23%	6 à 10 ans
polycristallin	9-11%	18%	5 à 10 ans
amorphe	5-8%	12%	1 à 2 ans

**Rendement et temps de retour énergétique des cellules photovoltaïques**

**Rendement et temps de retour énergétique**

Par rapport à l'énergie globale reçue, le rendement théorique d'une cellule monocristalline de silicium peut atteindre 27%. En laboratoire, on atteint aujourd'hui des rendements d'un peu plus de 23%. Les rendements des cellules du commerce sont encore plus faibles: de 5% à 13%, selon le type de cellule. Un autre paramètre intéressant est le temps de retour énergétique: c'est la durée durant laquelle la cellule devra fonctionner, afin de restituer l'énergie qui a été nécessaire pour la fabriquer. Selon les types de cellules, et dans les conditions actuelles, ces temps se situent entre deux et sept ans. Ces durées doivent être mises en parallèle avec la durée de vie de telles cellules, durée de vie qui dépassent 20 ans.

**Tension**

Dès qu'un module est exposé au soleil, une tension apparaît aux bornes. Si une charge extérieure est raccordée, alors un courant continu circule. La tension de fonctionnement dépend du rayonnement, de la charge et de la température des cellules. Plus cette température est basse, plus la tension est élevée. Aux températures usuelles de fonctionnement, la tension des panneaux se situe entre 14 et 16 V. En l'absence de charge, la tension à vide peut atteindre 18 à 24 V.

Tout déplacement d'une charge électrique induit un courant. Un conducteur électrique opposant une résistance au passage des charges, un courant électrique ne pourra circuler que s'il existe une source de tension dans le circuit (cellule solaire, batterie). Du point de vue technique, le courant se déplace du pôle positif au pôle négatif, alors qu'en réalité les électrons se déplacent en sens inverse.

**Loi d'Ohm:**  $U = R \times I$  (Volt)  
 Cette loi lie la tension en volts (V), au courant en ampères (I) qui dépend de la résistance intermédiaire R en Ohms ( $\Omega$ ).

Une source de tension continue U, qui délivre un courant I pendant une durée t produit une énergie E égale à:  
 $E = U \times I \times t$  (kWh)

Sa puissance P est alors égale à:  $P = U \times I$  (kW)

**Tension, courant et puissance électrique**

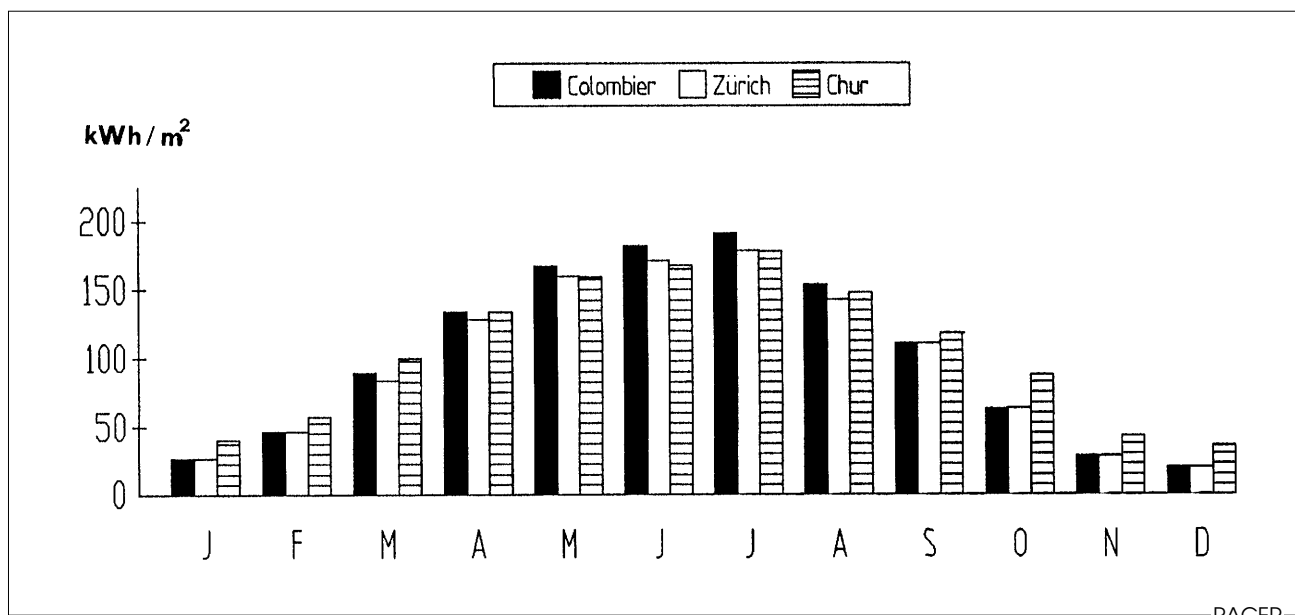
### Production de courant

La puissance de pointe garantie par le fabricant ( $W_p$  = Watt peak) se réfère toujours à un ensoleillement maximum, perpendiculaire à la cellule, de  $1000 \text{ W/m}^2$ , pour une température de la cellule de  $25^\circ\text{C}$ . Si l'on voulait maintenir la valeur pic durant toute la période d'ensoleillement, il y aurait lieu d'orienter le panneau, afin de le maintenir constamment perpendiculaire au rayon incident.

Etant donné qu'un système orientable est complexe et qu'il ne procure pas un gain énorme par rapport à une installation fixe, les panneaux sont généralement fixes. L'angle optimum sera déterminé en fonction des besoins. A titre d'indication, on retiendra les valeurs suivantes:

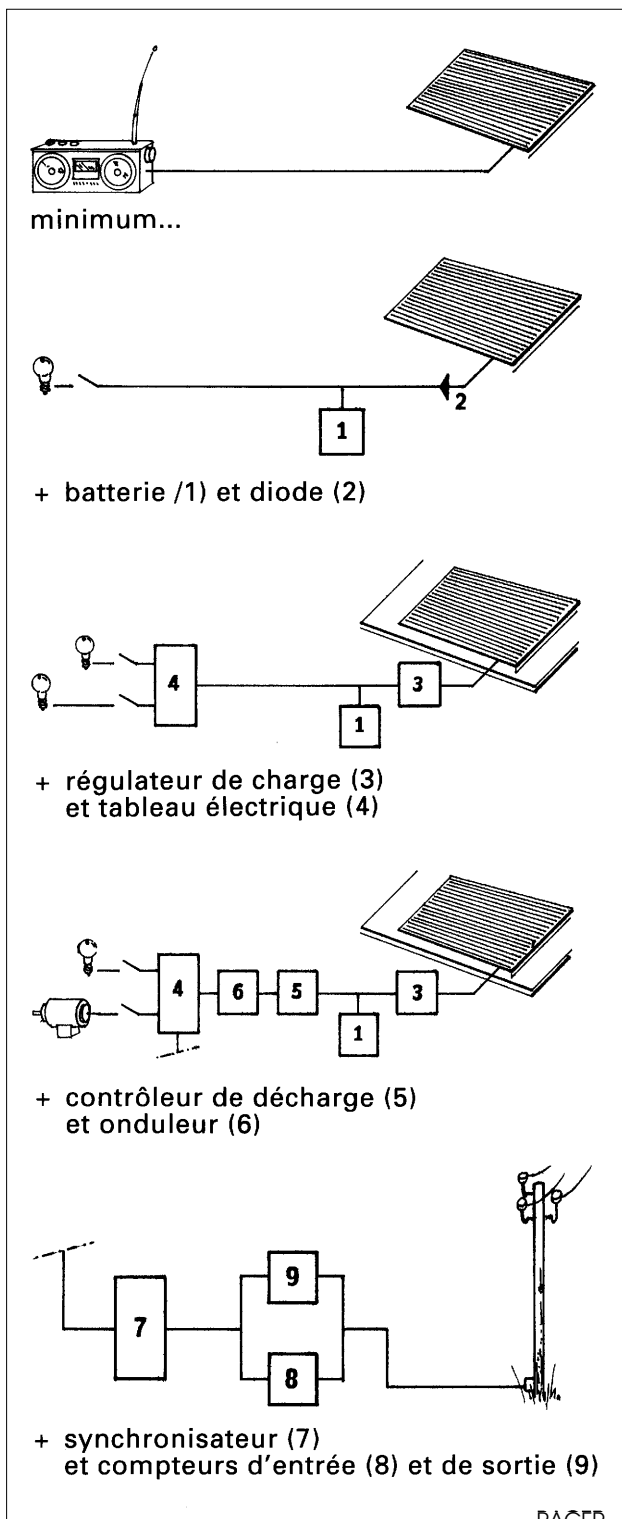
- hiver                                    60 à 70°
- printemps – automne            40 à 50°
- été                                        20 à 30°

Ces valeurs peuvent être affinées en ayant recours aux tabelles ou au programme Météonorm (de l'Office fédéral de l'énergie). En Suisse, on peut admettre qu'une installation photovoltaïque fournit annuellement de 0.8 à 1.5 kWh par  $W_p$  installé.



PACER

Rayonnement solaire global mensuel de trois villes suisses



## Composants d'une installation photovoltaïque

Indépendamment de sa taille, une installation photovoltaïque nécessite divers composants.

Selon les besoins en énergie, on pourra soit se contenter d'une seule cellule, soit avoir besoin d'un champ de cellules important. A titre d'illustration quelques cm<sup>2</sup> suffiront à une calculatrice de poche, alors qu'il faudra compter de 5 à 10 m<sup>2</sup>, afin de couvrir les besoins d'un alpage.

La plupart des appareils électriques nécessitent une alimentation stable et régulière. Le courant issu des cellules solaires variant en fonction de l'ensoleillement, un accumulateur tampon, entre la source et le consommateur, est nécessaire. Dans ce but, on utilise souvent des batteries au plomb spécialement adaptées aux installations solaires.

Afin que, de nuit, le courant ne circule en sens inverse dans les cellules, en les endommageant, il y a lieu de prévoir une diode anti-retour.

Les accumulateurs au plomb doivent également être protégés contre les surcharges ou les décharges totales, dans ce but on introduit dans le circuit un régulateur de charge.

Certains appareils électriques ne peuvent fonctionner au courant continu, et nécessitent du 220 V alternatif. Dans ce cas, on sera contraint d'utiliser un onduleur, ces appareils étant toutefois source de pertes d'énergie, dans la mesure du possible on cherchera des appareils compatibles avec le courant continu. Les appareils producteurs de chaleur et gourmands en énergie, tels les chauffages, les boiler et les cuisinières électriques, ne seront jamais alimentés à partir de courant d'origine photovoltaïque.

Si l'installation photovoltaïque se trouve dans une région où l'on dispose d'un raccordement électrique, il sera alors plus intéressant de réinjecter le courant excédentaire dans le réseau, plutôt que de le stocker dans des batteries. Dans ce but, on devra disposer d'un onduleur adapté et d'un compteur électrique.

### Composants d'une installation photovoltaïque

### Accumulateurs

Les accumulateurs électriques, prévus pour les installations solaires, supportent un grand nombre de cycles charge-décharge: de 300 à 1500 selon le type. A l'exception d'accumulateurs Ni-Cd, seuls les accumulateurs au plomb entrent en ligne de compte. A côté des accumulateurs à faible maintenance, qui nécessitent un contrôle de niveau d'eau tous les 6 à 12 mois, il existe maintenant des accumulateurs étanches qui ne nécessitent pas de maintenance.

### Exemple pratique

Un alpage comprenant 45 têtes de bétail est situé dans les préalpes à 1500 m d'altitude. Jusqu'ici son alimentation électrique a été fournie par un groupe diesel.

L'installation a été dimensionnée de manière à assurer le fonctionnement d'une installation de traite à deux agrégats, d'une centrifugeuse de lait et de 14 lampes d'éclairage. Selon les calculs, les besoins journaliers sont évalués à 3.4 kWh, un chiffre qui a été confirmé par des mesures. Les cellules solaires installées couvrent une surface de 10 m<sup>2</sup>, permettant d'obtenir une puissance maximale de 1.3 kW. Les accumulateurs sont dimensionnés de manière à assurer une réserve de 5 jours de fonctionnement (450 Ah).

La régulation de l'installation comprend les instruments nécessaires au contrôle de charge et de décharge des accumulateurs, ainsi que les compteurs de production et de consommation. La tension de service, de 48 V, garantit un minimum de pertes. La centrifugeuse et la machine à traire sont adaptées à cette tension, ainsi que les lampes qui ont été remplacées.

Cette installation fonctionne depuis 5 ans, à la satisfaction de ses utilisateurs.

Aujourd'hui, la production de modules photovoltaïques est en constante augmentation, et on peut attendre que cette situation aura des effets favorables sur l'évolution de la technologie et des prix. Actuellement, le programme Energie 2000, du Conseil fédéral, soutient de manière politique et financière cette nouvelle technique. Il ne faut toutefois pas oublier que, dans les conditions actuelles, l'énergie hydraulique s'avère plus rentable, pour autant qu'elle soit disponible.

#### Caractéristiques de l'installation

Cellules solaires:		
Type de cellules	monocristallines	
Puissance à 1'000 W/m <sup>2</sup>	1'300 W	
Tension de service	48 V	
Rendement	10%	
Régulateur:		
Principe	régulation en série en/hors	
Courant de décharge maximum	2 x 25 A	
Accumulateur:		
Type de batterie	accumulateur au plomb à faible entretien	
Capacité nominale	450 Ah	
Tension nominale	48 V	

#### Besoins en énergie

Utilisateur	Puissance	Besoins journaliers en énergie
14 lampes à 12 W	170 W	0.17 kWh
1 centrifugeuse à lait	260 W	0.53 kWh
1 machine à traire à 2 agrégats	800 W	2.70 kWh
<b>Total</b>	<b>1280 W</b>	<b>3.40 kWh</b>

#### Coûts

Cellules photovoltaïques	Fr. 30'000.-
Batteries avec supports	Fr. 7'000.-
Modification et remplacement des appareils électriques	Fr. 6'500.-
Boîtier électrique, régulation et installation	Fr. 4'300.-
<b>Coût total</b>	<b>Fr. 47'000.-</b>

### Exemple pratique

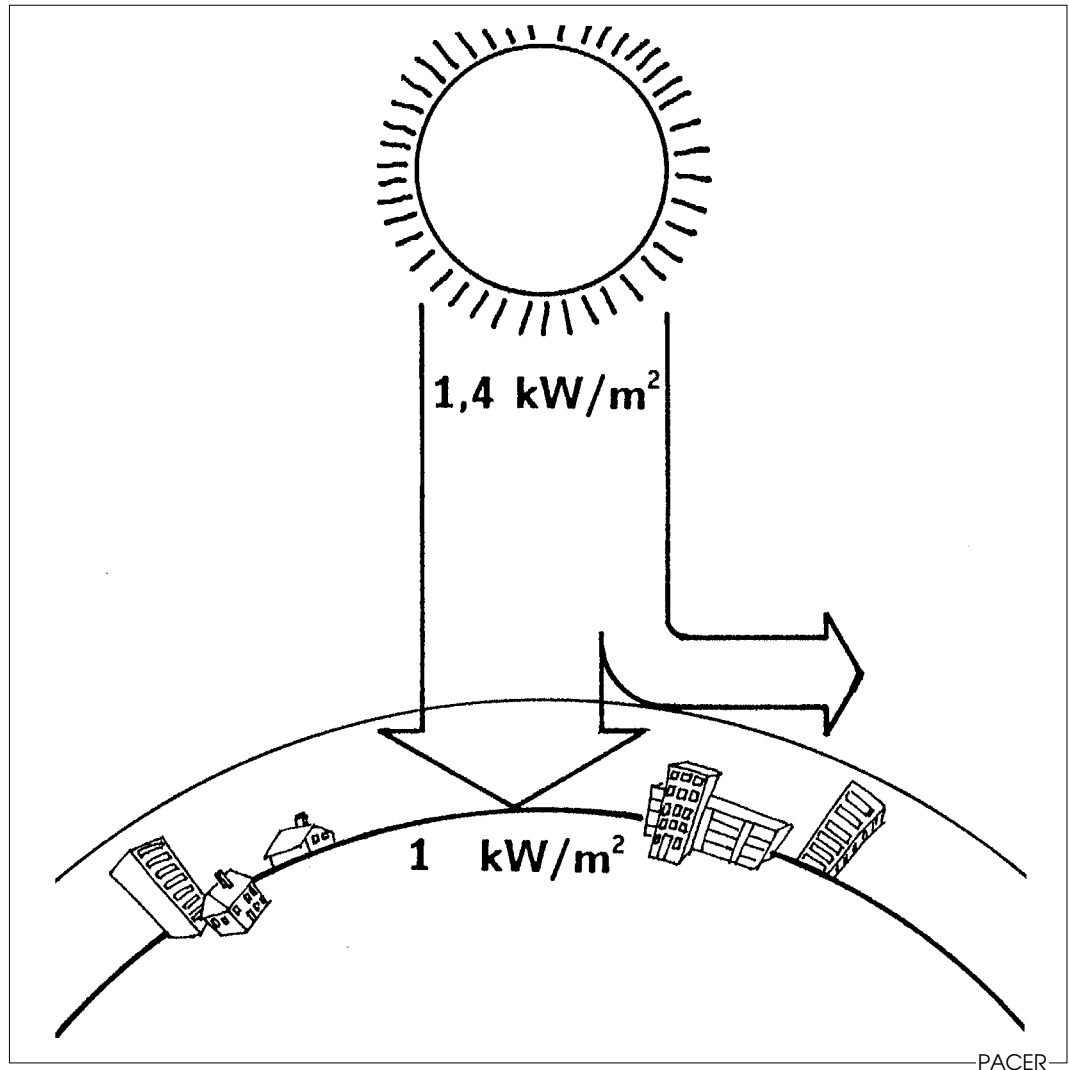


**Pour en savoir plus**

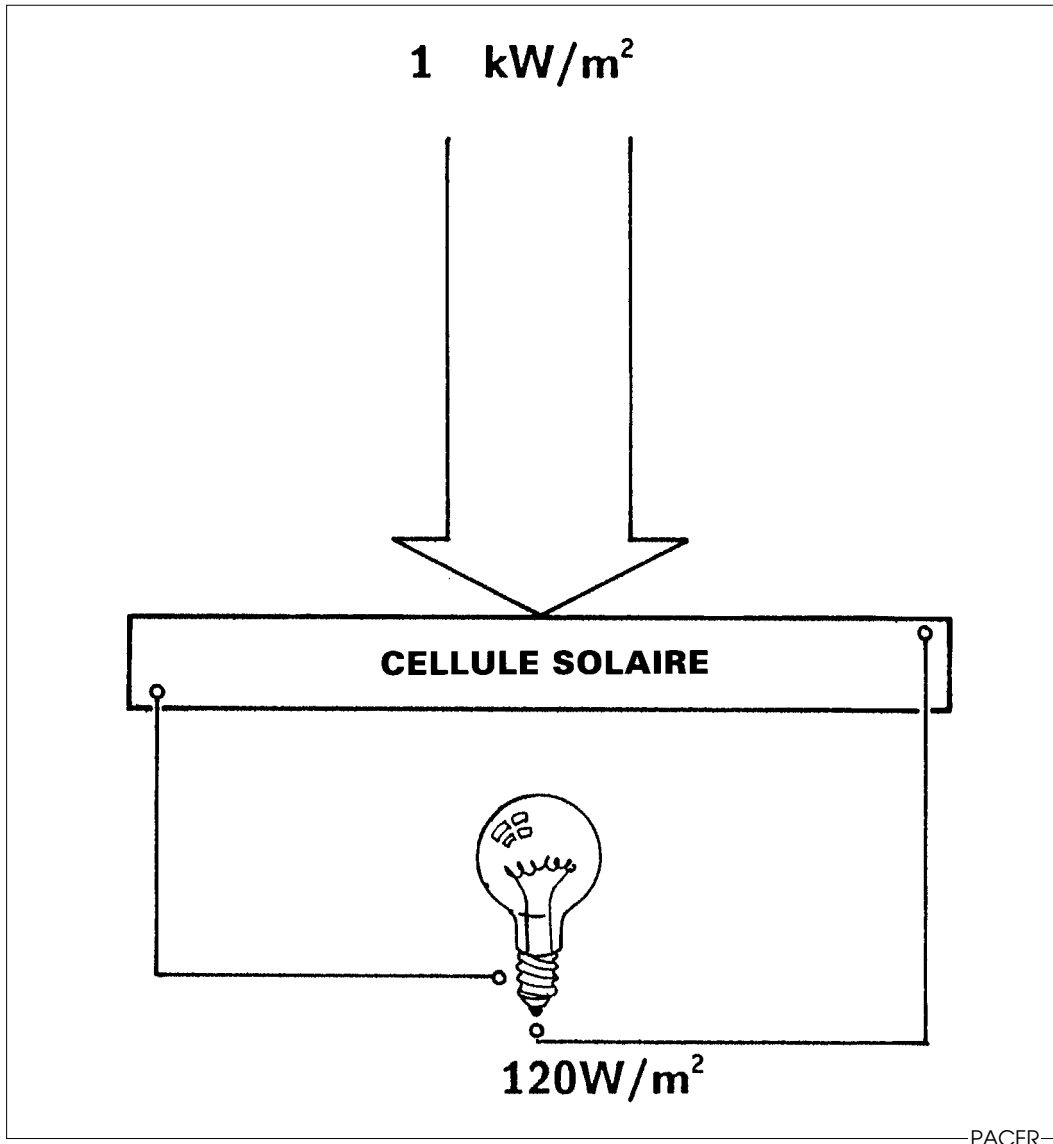
Cellules photovoltaïques – Les possibilités en Suisse. INFOENERGIE, 1991

Générateurs photovoltaïques, principes de base, technique de montage et injection dans le réseau. Document PACER (OFQC, N° de commande OCFIM 724.242f), 1992

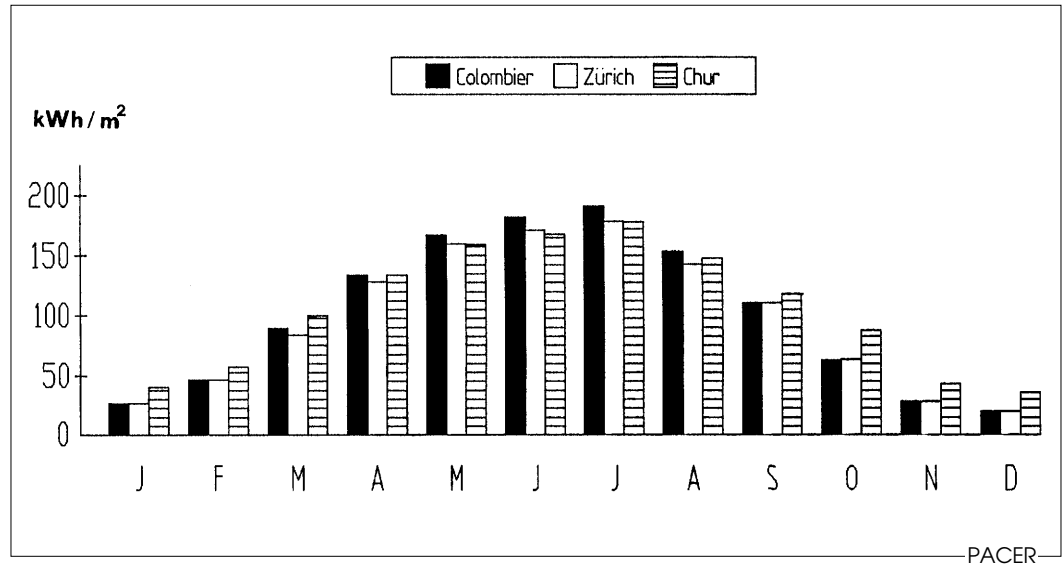
## Rayonnement global maximum



## Puissance d'une cellule solaire



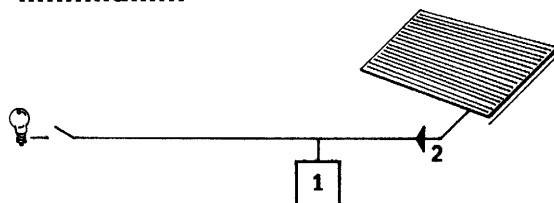
## Rayonnement solaire global mensuel de trois villes suisses



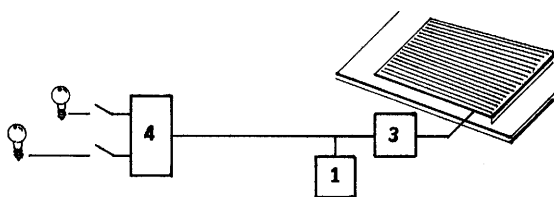
# Composants d'une installation photovoltaïque



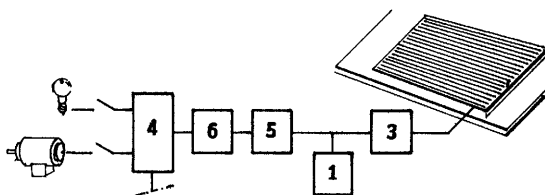
minimum...



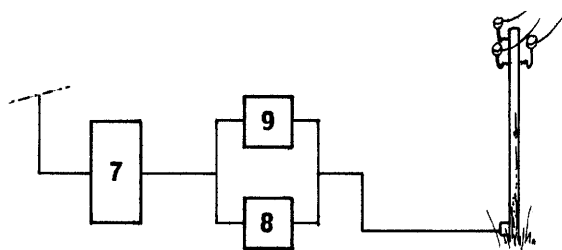
+ batterie (1) et diode (2)



+ régulateur de charge (3)  
et tableau électrique (4)

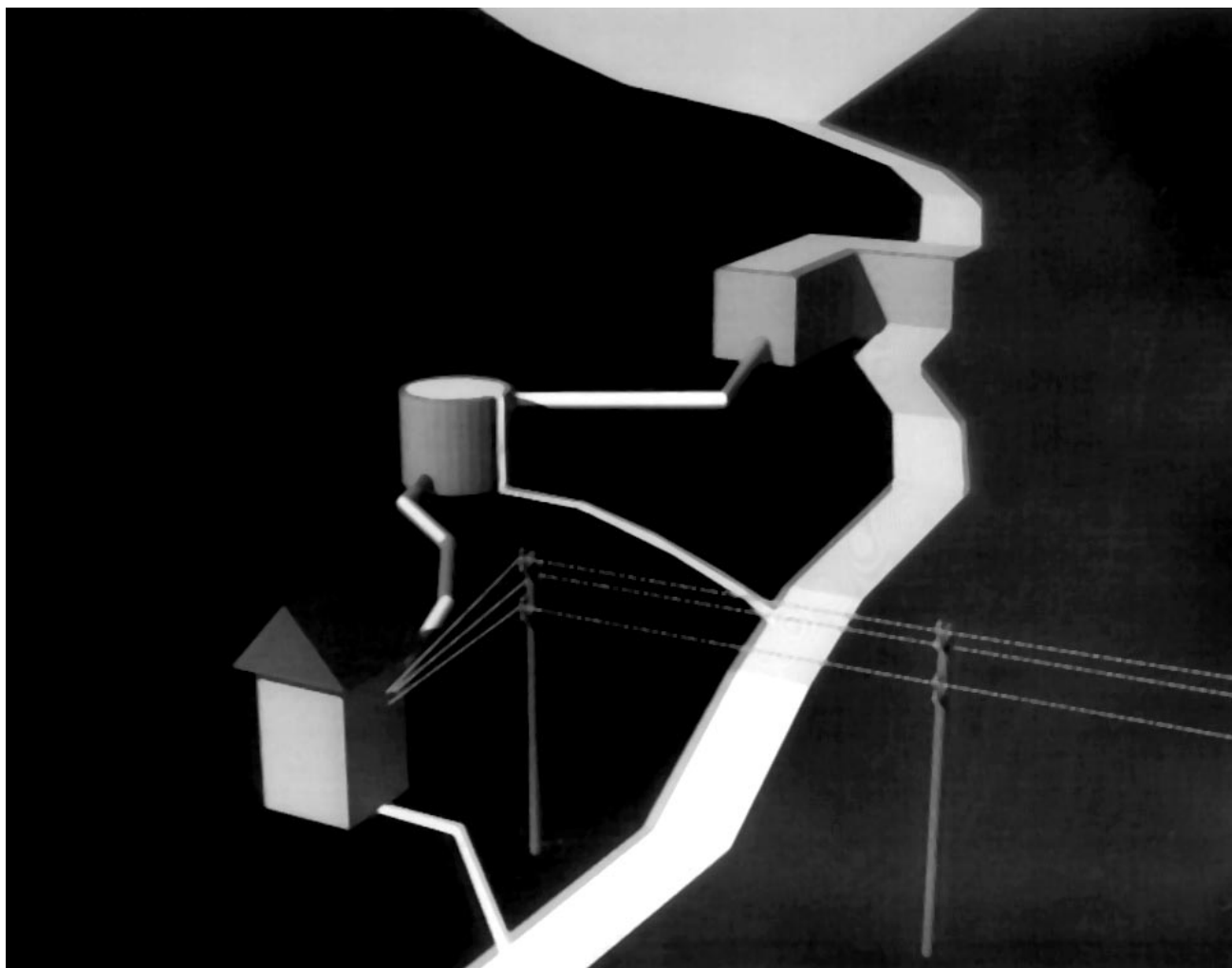


+ contrôleur de décharge (5)  
et onduleur (6)



+ synchronisateur (7)  
et compteurs d'entrée (8) et de sortie (9)

# Microcentrales hydroélectriques



Principe de fonctionnement	53
La turbine	53
Le générateur	54
Composants d'une installation	55
Besoins d'énergie dans les alpages	55
Coûts	57

# Microcentrales hydroélectriques

L'alimentation électrique d'alpage de montagne, ainsi que d'exploitations agricoles éloignées, peut souvent être assurée à l'aide de microcentrales hydroélectriques. De telles installations sont financièrement intéressantes dès qu'il n'y a pas de possibilité immédiate de raccordement au réseau. Les microcentrales hydroélectriques présentent tous les avantages que l'on attend d'un système moderne de production d'électricité: décentralisation et respect de l'environnement. C'est pourquoi le programme du Conseil fédéral Energie 2000 soutient ce type d'installations.

## Principe de fonctionnement

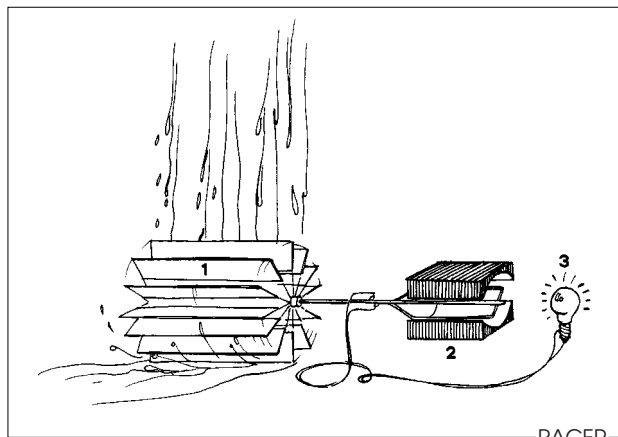
L'énergie mécanique, produite par l'action de l'eau sur la turbine, sert à entraîner une génératrice électrique. Le courant y est produit par induction électromagnétique, une bobine (rotor) tournant dans un champ magnétique.

## La turbine

La turbine se compose d'une partie mobile (roue à aubes, hélice), sur laquelle agit le fluide, et d'une partie fixe qui sert à diriger ce fluide. Pour des puissances inférieures à 20 kW et pour des installations en altitude, seules deux types de turbines entrent en ligne de compte: les turbines Pelton et les turbines à flux traversant.

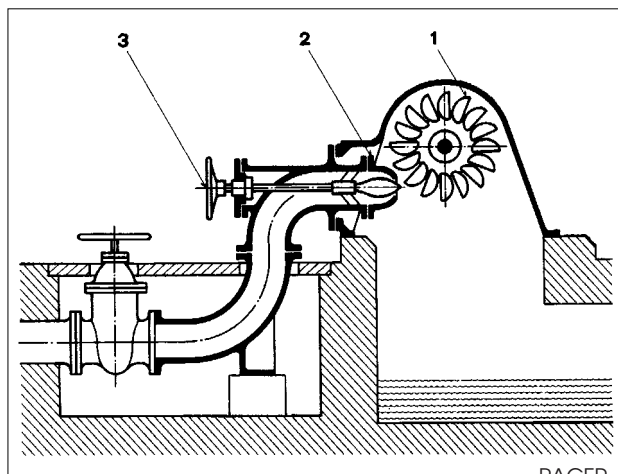
Dans la turbine Pelton, l'eau est projetée à grande vitesse par une ou plusieurs buses sur des augets placés sur la circonférence de la roue. La pression dans les buses a augmenté la vitesse du jet d'eau à son maximum; par la déviation du jet d'eau dans les augets, on transforme l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique. Les turbines Pelton conviennent bien lorsque la hauteur de chute est supérieure à 20 m et que le débit est modeste.

La turbine à flux traversant, connue également sous le nom de turbine Ossberger, est une turbine à action dans laquelle l'eau passe au travers d'une roue à aubes. Son domaine d'application se situe pour des hauteurs de chute de 1 à 200 m, pour autant que les débits soient supérieurs à 20 l/s.



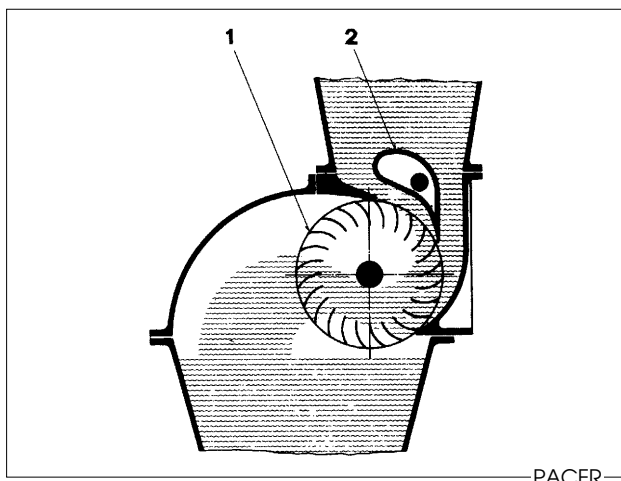
### Principe de fonctionnement

- 1 Turbine
- 2 Génératrice
- 3 Courant électrique



### Turbine Pelton

- 1 Roue
- 2 Injecteur
- 3 Vanne de réglage



### Turbine Ossberger

- 1 Roue
- 2 Distributeur réglable

## Le générateur

La machine tournante qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique s'appelle dynamo si le courant produit est continu, et alternateur si ce courant est alternatif. En pratique, et pour des raisons financières, on utilise en général un alternateur.

Des générateurs à courant monophasé 200 V ne sont adaptés qu'à de petites installations, d'une puissance de moins de 500 W. Pour des puissances plus élevées, à partir d'un kilowatt, on trouve sur le marché des alternateurs triphasés (220/380 V).

Si l'on souhaite disposer de courant continu, on utilisera des alternateurs munis de redresseurs. Ces derniers sont avantageux, étant donné que l'on en fabrique de grandes quantités pour l'industrie automobile. La puissance de telles installations à courant continu va jusqu'à environ 1 kW.

Le choix du genre de courant et de sa tension dépend de l'utilisation que l'on compte en faire. Si l'on souhaite pouvoir accumuler de l'énergie électrique, alors le courant continu s'impose. Un réseau alternatif de 220 V offre l'avantage que l'on peut y raccorder la plupart des appareils électriques du commerce. La même remarque peut être faite pour les alternateurs triphasés 220/380 V, avec l'avantage supplémentaire que de gros moteurs triphasés peuvent y être connectés.

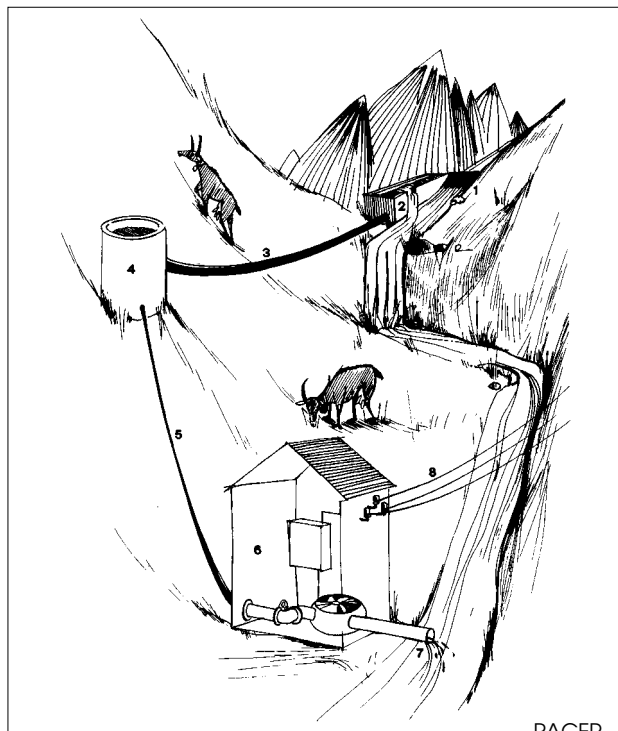
Durant les heures où il n'y a pas de besoins, il est recommandé d'arrêter la turbine et de stocker l'excédent d'eau dans un petit bassin de rétention. Si cela n'est pas possible, on peut alors envisager de stocker le courant produit dans des batteries.



## Composants d'une installation

Une microcentrale hydroélectrique se compose essentiellement des 5 éléments suivants: le captage de l'eau, le réservoir, la conduite forcée, la turbine et la génératrice, qui finalement produit le courant électrique.

Le captage d'eau d'un torrent alpin doit tenir compte des variations rapides de débit, ainsi que de la présence de gravier et de sable. Pour le captage, on utilise souvent un déversoir à grille inversée (ou tyrolien). Un désableur est également indispensable. Le choix du système de captage, du diamètre et de la forme des conduites doit viser à réduire au maximum les pertes dues au frottement. Un réservoir d'accumulation (fonctionnement discontinu), ou un réservoir tampon (fonctionnement continu), permettent de compenser un débit momentanément insuffisant. Un petit lac ou un étang sont parfois utilisés à cet effet, il est également possible de réaliser un réservoir en béton ou en bois. Au sortir de la turbine, l'eau est restituée dès que possible au torrent.



## Besoins d'énergie dans les alpages

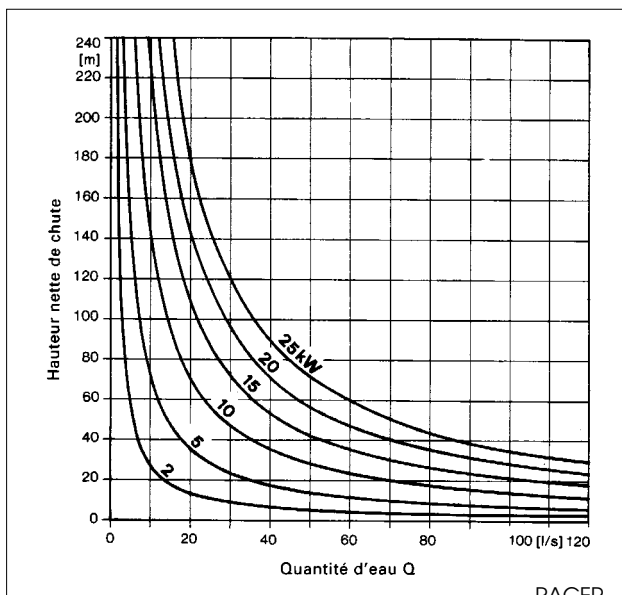
Les besoins en énergie dans un alpage dépendent de sa taille, ainsi que de son mode d'exploitation. Si l'exploitation compte surtout du jeune bétail, l'électricité produite servira surtout à l'éclairage, ainsi qu'au fonctionnement des barrières électrifiées. En présence de vaches laitières, une fraction importante de l'électricité servira à actionner les machines à traire, ainsi que les équipements de la fromagerie.

La puissance effective nécessaire est déterminée en tenant compte des différents appareils que l'on souhaite utiliser. Afin d'éviter un surdimensionnement de l'installation, on tâchera de répartir dans le temps l'utilisation des différents consommateurs d'électricité. On évitera d'enclencher au simultanément de gros consommateurs (par exemple: une machine à traire et une plaque électrique). Les excédents de courants électriques peuvent éventuellement servir au chauffage de l'eau chaude.

Une fois la puissance maximale nécessaire connue, il y a lieu de voir si le cours d'eau envisagé pour la production d'électricité a un débit suffisant. La puissance

### Eléments d'une microcentrale hydroélectrique

- |   |               |   |                    |
|---|---------------|---|--------------------|
| 1 | Captage d'eau | 5 | Conduite forcée    |
| 2 | Désableur     | 6 | Local des machines |
| 3 | Amenée d'eau  | 7 | Conduite de fuite  |
| 4 | Château d'eau | 8 | Ligne électrique   |

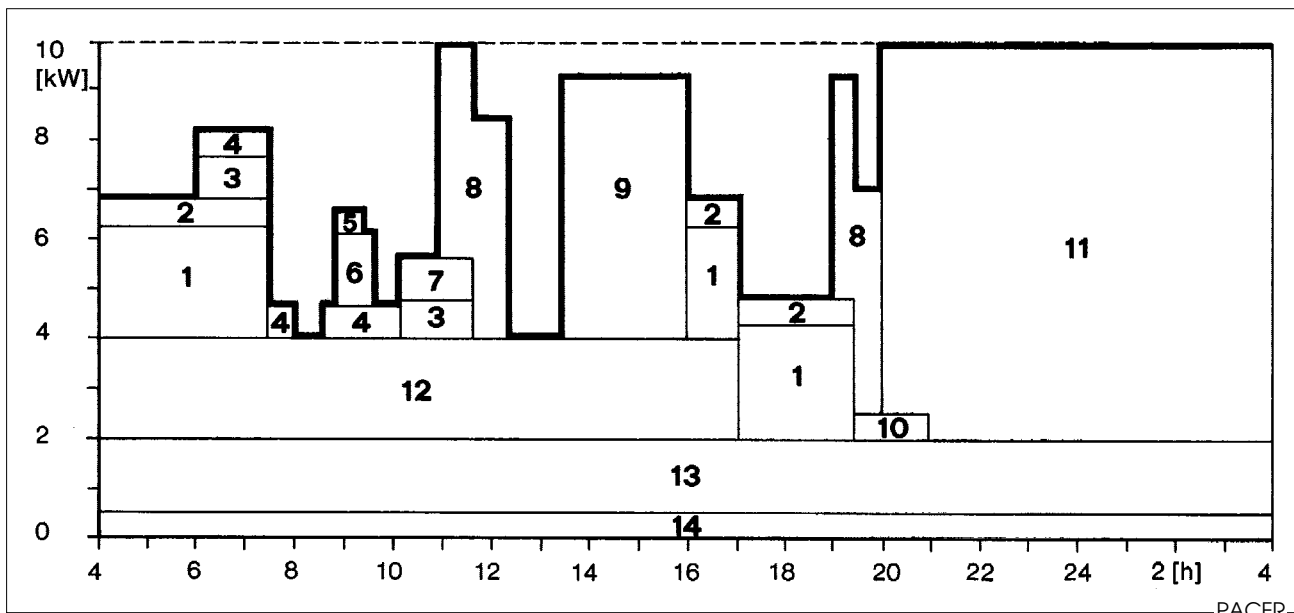


produite dépend de la hauteur de chute utilisable, et de la quantité d'eau dont on peut disposer (débit). Cette puissance se calcule facilement à l'aide de la relation suivante:

$$\text{Puissance électrique (kW)} = \text{débit (l/s)} \times \text{hauteur de chute (m)} \times 0.007$$

A titre d'exemple, une puissance de 10 kW peut être soit produite avec un débit de 10 litres par seconde et une hauteur de chute de 140 mètres, soit avec un débit de 70 l/s et une hauteur de chute de 20 m.

**Puissance électrique en fonction de la hauteur de chute et du débit**



**Profil de la puissance nécessaire à un alpage de 136 vaches avec fromagerie**

- |                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1 Pompe à vide                  | 8 Cuisinière                 |
| 2 Pompe à lait                  | 9 Brasseur à purin           |
| 3 Centrifugeuse                 | 10 Brasseur de la fromagerie |
| 4 Brasseur de la fromagerie     | 11 Accumulateur à eau chaude |
| 5 Pompe à eau chaude            | 12 Boiler à eau chaude       |
| 6 Baratte                       | 13 Eclairage, frigo          |
| 7 Pompe à lait de la fromagerie | 14 Pertes de distribution    |

## Coûts

Les coûts effectifs d'une microcentrale hydroélectrique dépendent très fortement des conditions locales, de l'importance des infrastructures à réaliser et du coût de la main-d'œuvre. C'est pour cela qu'avant de réaliser une installation, il convient d'établir un avant-projet et d'en chiffrer le coût avec le maximum de précision possible.

L'analyse d'autres installations ne permet pas de donner de rapport prix/puissance cohérents. Toutefois, à titre purement indicatif, on peut évaluer le coût du kW installé entre Fr. 9000.– et 15000.–, pour des installations dont la puissance est comprise entre 2 et 16 kW. Ces montants sont nettement inférieurs à ceux qui seraient nécessaires pour la réalisation d'une éolienne ou une centrale photovoltaïque de puissance équivalente.

Ces sommes sont globales, elles ne tiennent pas compte de subsides éventuels. Ceux-ci dépendent des cantons et des conditions locales. En règle générale leur octroi dépend des offices cantonaux d'améliorations foncières.

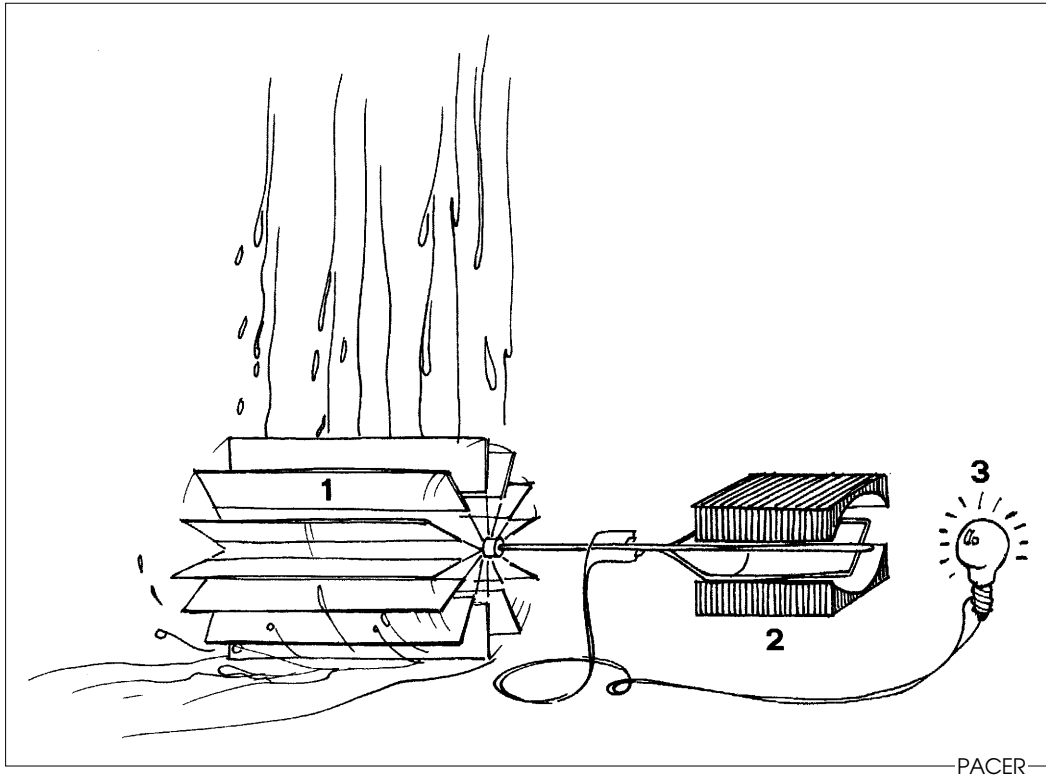
### Pour en savoir plus

Alimentation en énergie des alpages à l'aide de microcentrales hydroélectriques. Rapport FAT N° 348, 1989, 28 p.

Lieu	Puissance (kW)	Hauteur de chute (m)	Débit (l/s)	Coûts (Fr.)
Blackenalp	0.15	18.5	1.6	6'800.–
Beuertweid	2.0	90.0	4.0	18'500.–
Hinterchirel	2.4	130.0	3.0	20'200.–
Bachläger	8.6	50.0	26.0	102'000.–
Cavel	15.4	84.0	27.0	220'700.–
Aebnet	16.0	220.0	11.0	180'400.–

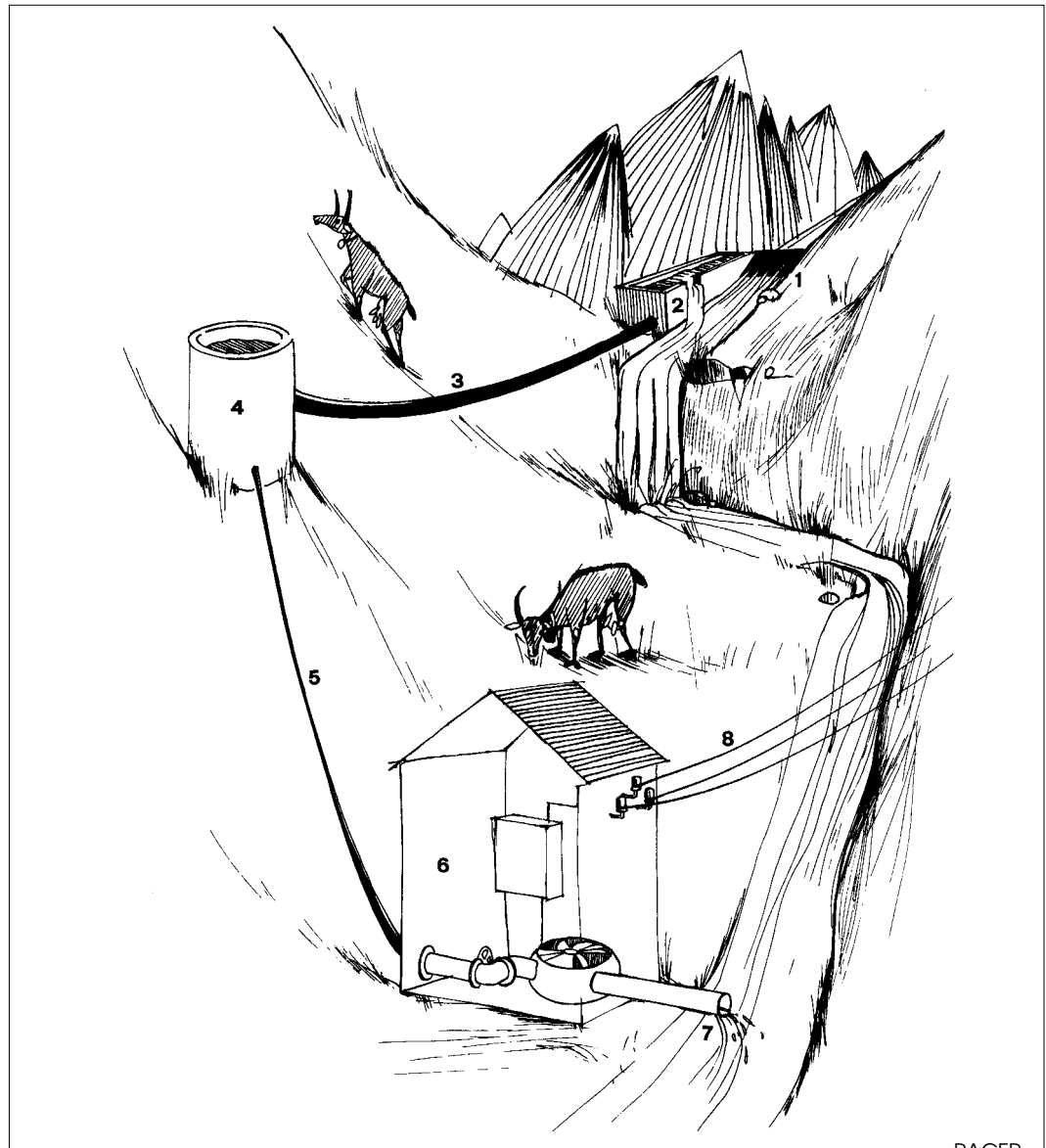
### Coûts d'installation de quelques microcentrales hydroélectriques

## Principe de fonctionnement



- 1 Turbine**
- 2 Génératrice**
- 3 Courant électrique**

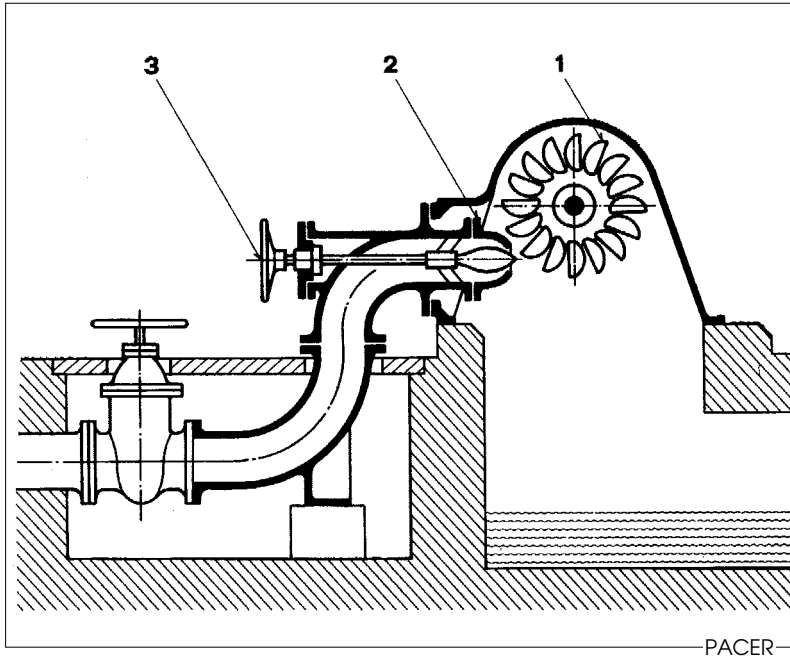
## Eléments d'une microcentrale hydroélectrique



PACER

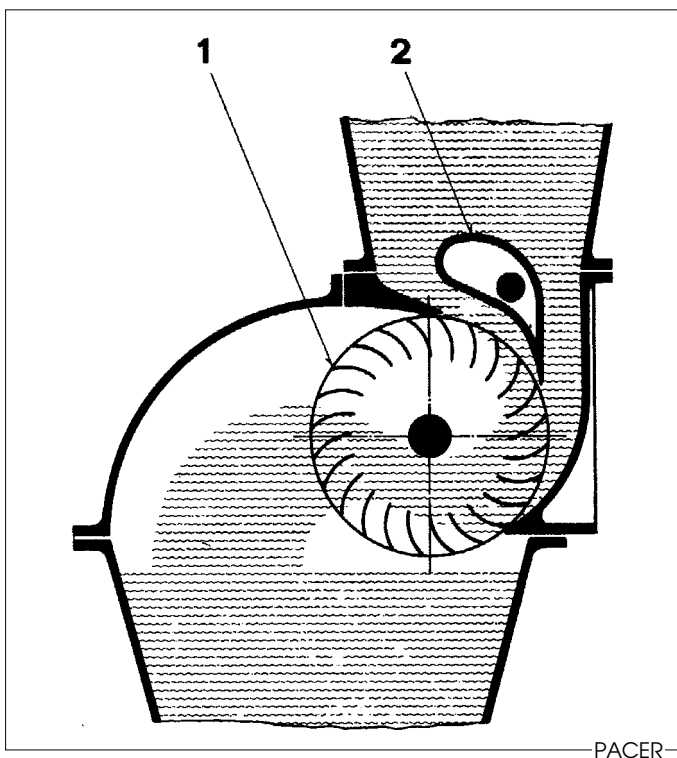
- 1 Captage d'eau
- 2 Désableur
- 3 Amenée d'eau
- 4 Château d'eau
- 5 Conduite forcée
- 6 Local à machines
- 7 Conduite de fuite
- 8 Ligne électrique

## Turbines Peton et Ossberger



### Turbine Pelton

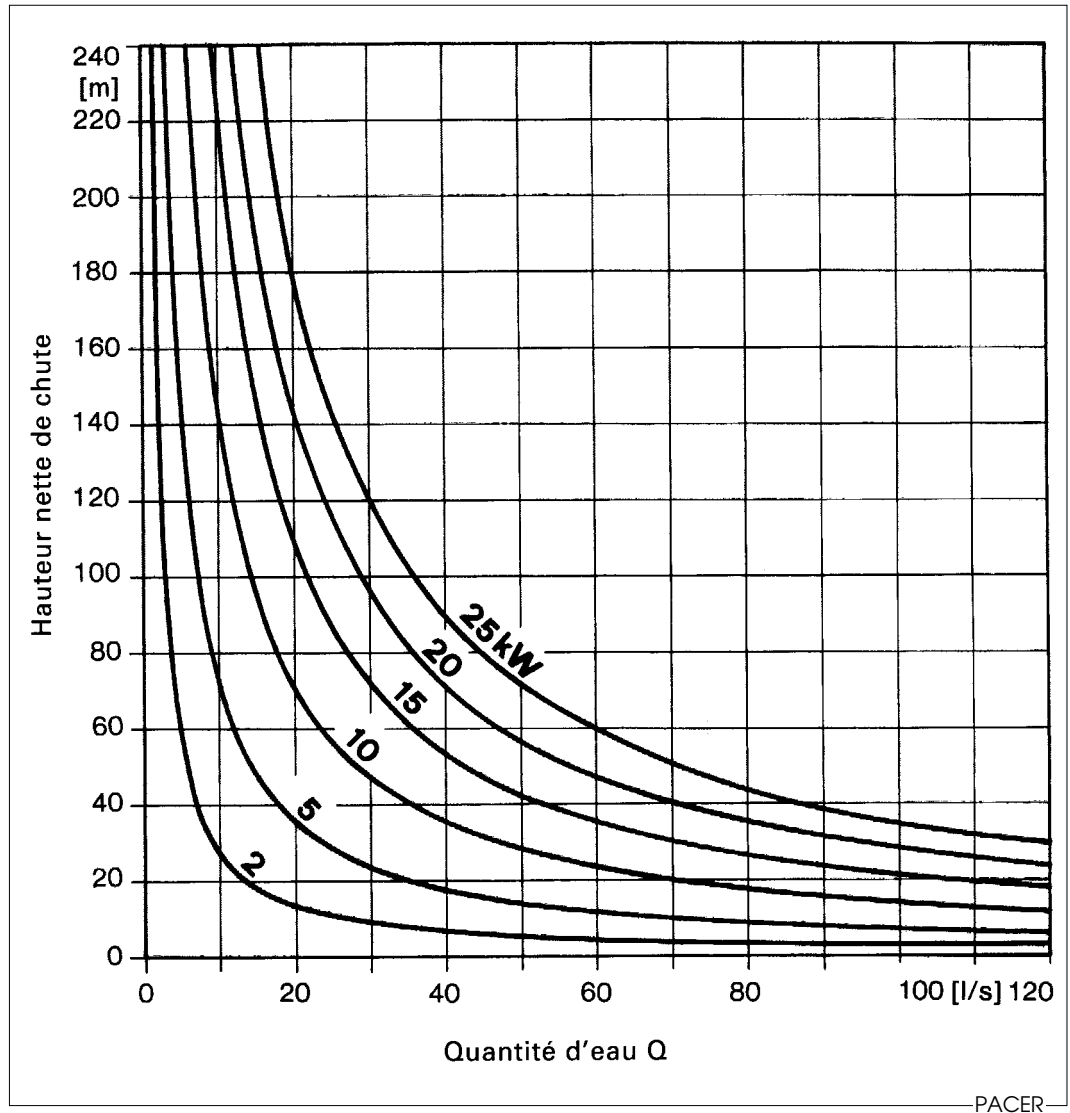
- 1 Roue
- 2 Injecteur
- 3 Vanne de réglage



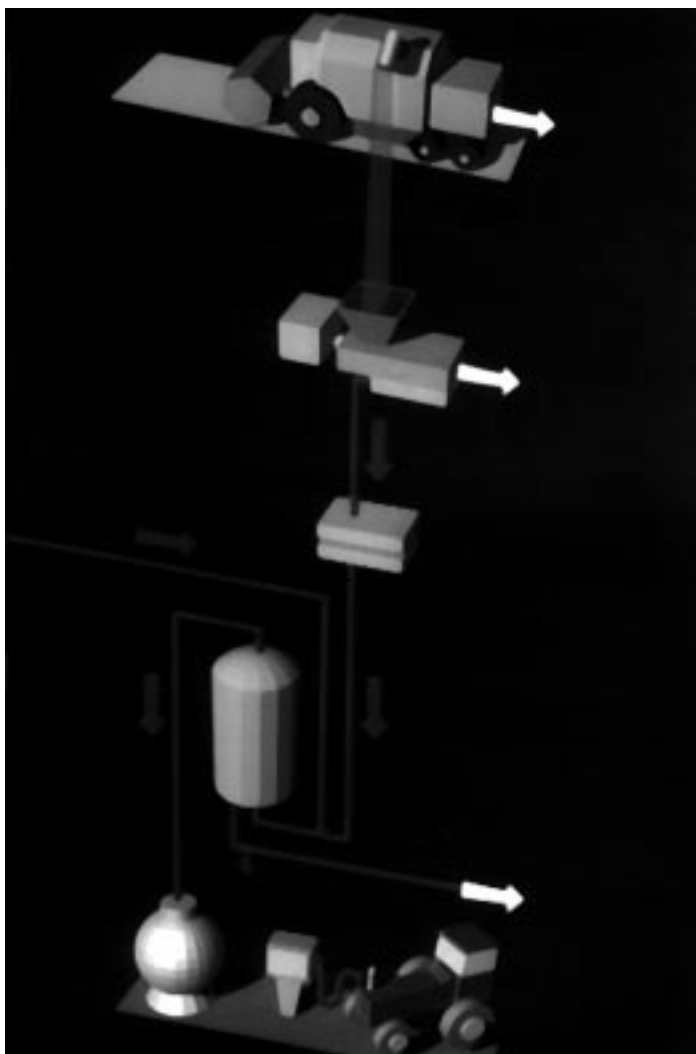
### Turbine Ossberger

- 1 Roue
- 2 Distributeur réglable

## Puissance électrique en fonction de la hauteur de chute et du débit



# Matières premières renouvelables



---

Les plantes comme ressource d'énergie	65
Utilisation de l'huile de colza comme carburant	66
Production d'ester méthylique de colza	67
Mesures comparatives	67
Bilan énergétique	68
Rentabilité économique	68

---



# Matières premières renouvelables

## Les plantes comme ressource d'énergie

L'augmentation constante des rendements agricoles, couplée à la stagnation des marchés, conduit à des excédents de plus en plus importants. Dès lors, on est amené à se poser des questions sur les buts futurs de l'agriculture suisse, et sur la part qui devra être réservée à la production strictement alimentaire.

A côté de cultures extensives et d'une mise en jachère de certaines surfaces, les représentants des milieux agricoles envisagent la production de matières premières et d'énergies renouvelables à partir de plantes. Ces possibilités ne sont pas nouvelles, puisque dans l'agriculture traditionnelle une part non négligeable des terres était réservée à la production de matières premières et de combustible. Ce cycle autarcique a disparu, il y a quelques dizaines d'années, avec l'arrivée du pétrole abondant et bon marché.

Aujourd'hui, la tendance s'inverse à nouveau et l'on cherche à faire renaître les anciennes traditions, au vu des techniques modernes. En lieu et place du fourrage, destiné aux bêtes de trait, on peut développer des cultures destinées à la production de carburants liquides, de lubrifiants ou de biogaz. Ces agents énergétiques pourraient être utilisés aussi bien comme carburant pour faire tourner des moteurs, que comme combustible.

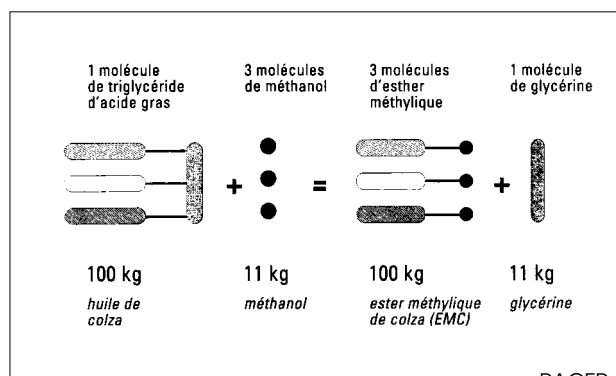
Au premier rang des matières ayant un bon rendement énergétique, on trouve les cultures sucrières ainsi que les plantes renfermant de l'amidon, telles les betteraves, les carottes, les céréales et le maïs. Par un procédé chimico-biologique simple, ces plantes peuvent être transformées en éthanol.

Les bois à croissance rapide, la paille, les céréales entières ou le foin peuvent permettre de produire de la chaleur, voire même de l'électricité. La fabrication de gaz de synthèse par pyrolyse, c'est-à-dire par combustion en l'absence d'air, est plus intéressante du point de vue énergétique. Le gaz produit, riche en monoxyde de carbone, convient à l'entraînement de groupes chaleur-force. Ceux-ci permettent de produire simultanément de 25 à 30% d'électricité et de 50 à 60% de chaleur.

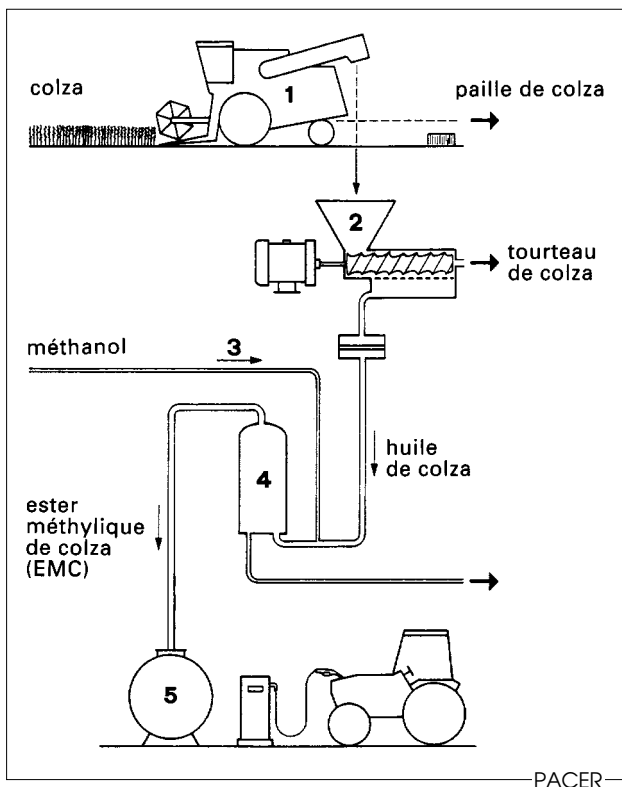
Toutes ces techniques sont connues et elles ont été développées jusqu'au stade d'installations de

Végétal	Carburant
<b>riche en sucre:</b> Canne à sucre Betterave sucrière Betterave fourragère Millet sucré	Ethanol
<b>riche en amidon:</b> Pomme de terre Céréales Maïs Manioc	Ethanol
<b>riche en cellulose:</b> Bois Paille Casse/Balle Bagasse	Ethanol
<b>riche en huile:</b> Colza Rave Lin Chanvre Tournesol	Huiles végétales

## Végétaux se prêtant à la production de carburant



## Estérification de l'huile de colza



**Schéma du processus de fabrication du biodiesel**

### 1 Récolte

1 ha de culture de colza produit 6000 kg de paille de colza et 3000 kg de graines de colza.

### 2 Production d'huile

A partir de 3000 kg de graines de colza, on obtient, après pression, 1300 litres d'huile de colza.

### 3 Adjonction d'alcool méthylique

On ajoute 165 litres de méthanol aux 1300 litres d'huile de colza.

### 4 Estérification

Au travers du processus, on obtient finalement: 1375 litres d'ester méthylique de colza (EMC) et 100 litres de glycérine.

### 5 Stockage et utilisation

Fonctionnement de véhicules diesel (transports publics et tracteurs) à l'aide d'EMC.

démonstration. Leur implantation s'est toutefois heurtée à la concurrence économique du pétrole et parfois à des problèmes de rendement énergétique ou de bilan écologique.

La transformation de l'herbe en biogaz, par fermentation bactérienne, ouvre actuellement de nouvelles perspectives prometteuses. Toutefois ces techniques étant nouvelles, elles relèvent actuellement encore plus de la recherche que de la pratique.

## Utilisation de l'huile de colza comme carburant

Durant les dix dernières années, de nombreux essais ont été faits, en Allemagne et en Autriche, afin d'utiliser des huiles végétales (surtout de l'huile de colza), comme carburant dans des moteurs diesel. Toutefois, en raison de leur viscosité trop élevée d'un facteur 10, ces huiles endommagent les moteurs diesel modernes, surtout ceux à injection directe. Aussi a-t-on développé, en petite série, des moteurs diesel spéciaux, appelés moteur «Elsbett», du nom de leur inventeur. Ces moteurs fonctionnent parfaitement à l'huile de colza et leur rendement peut être qualifié de bon. Par simple pression de l'huile de colza, le producteur peut ainsi produire lui-même son carburant. L'inconvénient de cette solution résulte du coût des modifications nécessaires: de Fr. 5000.- à 10 000.- par moteur. Cet handicap freine actuellement la diffusion de cette solution et, par suite, la possibilité d'écouler l'huile de colza comme carburant.

Alors qu'actuellement, en Allemagne, on encourage le développement de moteurs Elsbett, l'Autriche suit une autre direction: au lieu d'adapter le moteur, on adapte le carburant. Ceci est possible en ayant recours à une réaction chimique relativement simple: l'estérification. L'huile de colza, ainsi transformée en ester méthylique, est directement utilisable, sans adaptation préalable, dans la plupart des moteurs diesel existants. Dès que l'on atteindra des prix comparables à ceux du diesel, on peut s'attendre à une production importante. La technique de l'estérification, développée en Autriche, y connaît actuellement un fort développement. En Suisse, on a l'intention d'implanter également cette technologie.

## Production d'ester méthylique de colza

Ce sont les mêmes espèces de colza qui se prêtent à la production d'huile comestible ou d'ester méthylique. De la même manière, la prise en charge et le traitement se font dans les moulins à huile. S'agissant de la production de carburant, l'estérification remplace le raffinage. Pour cela l'huile est chauffée à 50 à 80 °C, on y ajoute alors du méthanol en présence d'un catalyseur, les grosses molécules de graisse de la glycérine se séparent et se lient à une molécule de méthanol pour donner l'ester méthylique de colza (EMC). Partant de 1300 litres d'huile de colza, on obtient 1375 litres d'EMC avec, comme dérivé, 131 kg de glycérine. Après purification, cette glycérine peut être utilisée dans l'industrie chimique. Les restes de colza (tourteau) constituent l'autre sous-produit, ils conviennent au fourrage, tout spécialement lorsque le colza est du type 00.

## Mesures comparatives

### Caractéristiques des moteurs

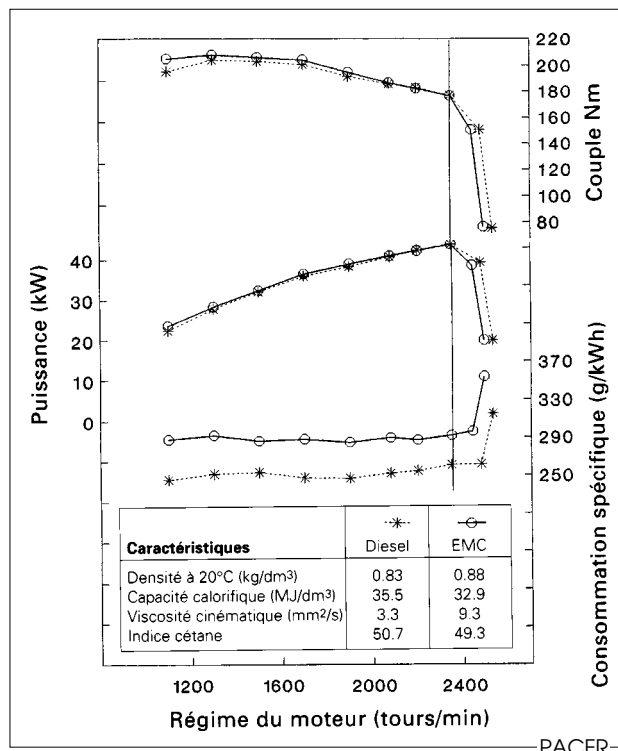
Des mesures comparatives, effectuée sur un tracteur de 48 kW (SAME – Explorer 65), ont montré que les puissances et les couples étaient pratiquement les mêmes, que l'on utilise du diesel ou de l'EMC. Par contre, avec l'EMC la consommation est supérieure de 6 à 8 %, ceci en raison de son pouvoir calorifique un peu plus faible.

Les essais ont également montré qu'en pratique le conducteur ne remarque pas de différence entre les deux carburants, si ce n'est à l'odeur. Avec le diesel, l'odeur des gaz est âcre, avec l'EMC l'odeur se rapproche de celle de la friture.

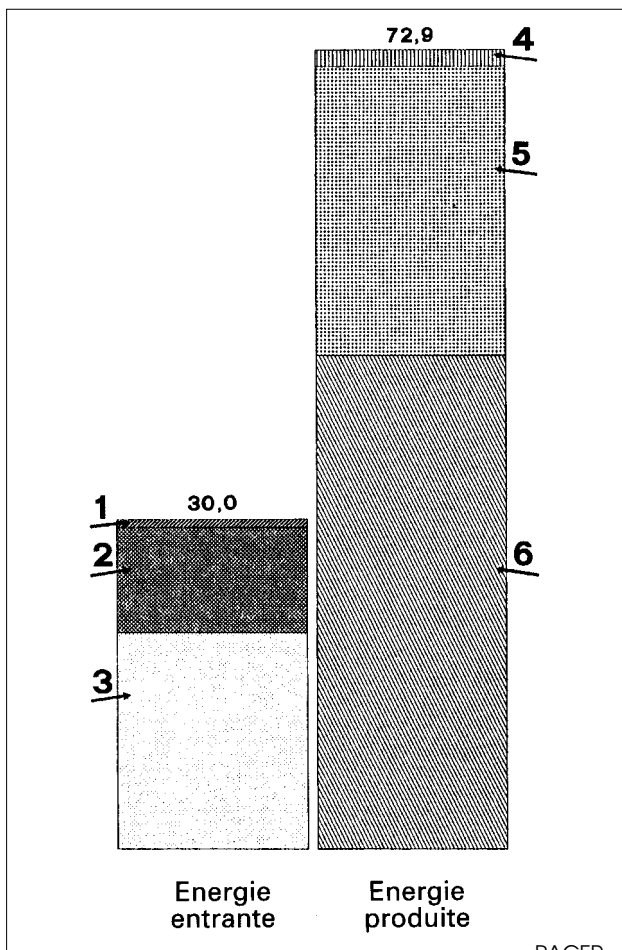
### Gaz d'échappement

Les gaz d'échappement des moteurs fonctionnant à l'EMC présentent non seulement une odeur moins désagréable, mais ils sont également moins nocifs pour l'environnement. Dans des conditions de fonctionnement identiques, l'EMC occasionne:

- environ 1/3 de suie en moins (émission de particules);
- considérablement moins d'hydrocarbures (cancérigène);
- très peu de dioxyde de soufre (responsable des pluies acides);



Comparaison de l'EMC et du diesel



**Bilan énergétique du biodiesel**

Le bilan énergétique du biodiesel est indiscutablement positif. Pour une unité d'énergie consommée, on produit environ 2.5 unités d'énergie sous forme de carburant et de fourrage.

1 Méthanol	0.9 GJ
2 Processus industriel	9.5 GJ
3 Production agricole	19.6 GJ
<b>Energie entrante totale</b>	<b>30.0 GJ/ha</b>
4 Glycérine	1.5 GJ
5 Fourrage	26.5 GJ
6 Biodiesel	44.9 GJ
<b>Energie totale produite</b>	<b>72.9 GJ/ha</b>

- moins de CO<sub>2</sub> (responsable de l'effet de serre), du fait du circuit fermé.

C'est surtout ce dernier point qu'il convient de relever: en effet, si la production indigène de colza (17 000 ha) était utilisée comme carburant, la réduction annuelle d'émission de CO<sub>2</sub> atteindrait 60 000 tonnes!

Des tests sont actuellement en cours, ils portent sur deux tracteurs agricoles qui servent au labours, ainsi que sur 5 autobus des services des transports de la ville de Zurich.

**Bilan énergétique**

Le bilan énergétique du biodiesel est indiscutablement positif: si l'on fait la somme de toute l'énergie qui est utilisée de la culture du colza, à son esthérification, soit directement sous forme d'énergie, soit indirectement sous forme d'engrais, on atteint 30 GJ. Le rendement énergétique, sous forme d'EMC, de glycérine et de déchets de colza atteindrait quant à lui 73 GJ. Le rapport de l'énergie fournie sur l'énergie produite (rendement énergétique) est de 2.4. Même si l'on ne considère comme énergie produite que celle apportée par le carburant (sans la glycérine et le tourteau), le bilan demeure positif.

**Rentabilité économique**

Comme pour la plupart des cultures, le colza est subventionné. Ainsi le paysan suisse reçoit un peu plus de Fr. 2.- pour un kilo de graines de colza, alors que son collègue autrichien ne reçoit que Fr. 0.55. Le prix du marché mondial ne dépasse pas, quant à lui, Fr. 0.30. Le prix du biodiesel produit dépend donc directement du prix de base garanti: par rapport au diesel le manque à gagner est ainsi de Fr. 1.85 par litre d'EMC. Ce manque à gagner doit toutefois être vu sous l'angle d'une alternative à la politique agricole, au même titre que la mise en jachère ou que l'utilisation des céréales panifiables excédentaires.

## Conclusions

La production d'EMC permettrait de réduire les excédents de production de céréales panifiables. Elle n'est toutefois pas concurrentielle sans subsides de l'Etat, dès lors la décision de produire et d'utiliser de l'EMC est un choix politique. L'EMC permettrait d'augmenter sensiblement, et à court terme, la part des énergies renouvelables dans notre bilan énergétique. Même si l'on est loin d'une rentabilité économique, au sens habituel du terme, la production d'EMC présente les avantages suivants, qui devraient influencer la décision politique:

- L'EMC est un carburant qui présente une faible charge pour l'environnement: peu de SO<sub>2</sub>, peu de particules, des émissions de CO<sub>2</sub> réduites.
- La production d'EMC présente un bilan énergétique nettement positif: pour une unité d'énergie consommée on en produit 2.4.
- Le colza recouvre les champs durant les mois d'hiver, les préservant ainsi de la dénitrification.
- Si l'on utilise les nouvelles variétés de colza de type 00, parallèlement à la production d'EMC, on produit un fourrage indigène de première qualité.

### Pour en savoir plus

Rouler au colza. Technique agricole, TA 3/1991.

Biodiesel: bilan énergétique et bilan CO<sub>2</sub> d'un carburant d'origine agricole.  
Revue agricole suisse 24, p.39-43, 1992.

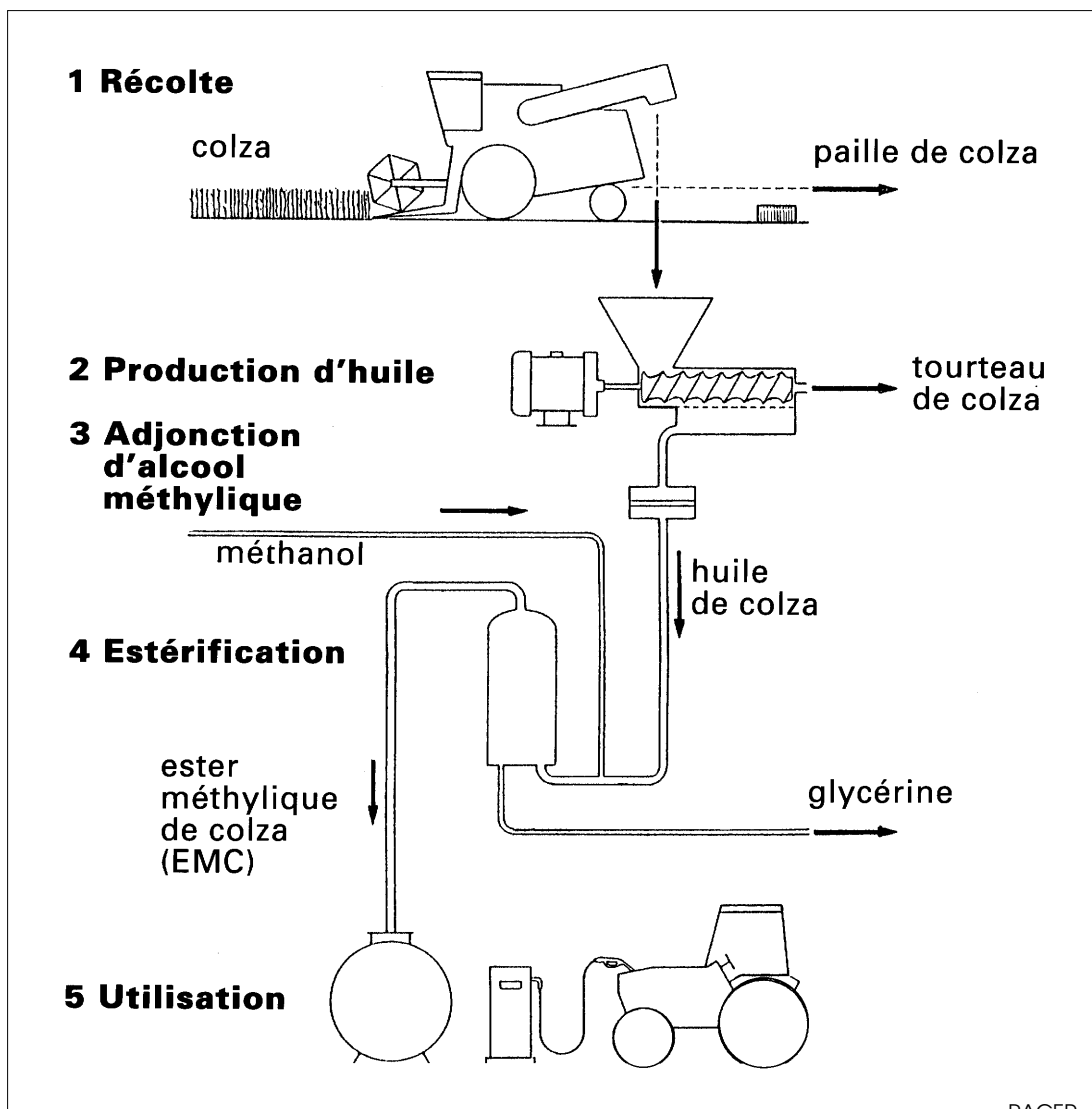
Carburants renouvelables en Suisse: Que choisir?  
Revue agricole suisse 24, p 45-50, 1992.

Nouveaux résultats à propos du biodiesel. Journées d'actualisation pour conseillers et enseignants en machines agricoles. Rapport interne FAT, avril 1992.

## Végétaux se prêtant à la production de carburant

Végétal	Carburant
<b>riche en sucre:</b> Canne à sucre Betterave sucrière Betterave fourragère Millet sucré	Ethanol
<b>riche en amidon:</b> Pomme de terre Céréales Maïs Manioc	Ethanol
<b>riche en cellulose:</b> Bois Paille Casse/Balle Bagasse	Ethanol
<b>riche en huile:</b> Colza Rave Lin Chanvre Tournesol	Huiles végétales

## Schéma du processus de fabrication du biodiesel



### 1 Récolte

1 ha de culture de colza produit 6'000 kg de paille de colza et 3'000 kg de graines de colza.

### 2 Production d'huile

A partir de 3'000 kg de graines de colza, on obtient, après pression, 1'300 litres d'huile de colza.

### 3 Adjonction d'alcool méthylique

On ajoute 165 litres de méthanol aux 1'300 litres d'huile de colza.

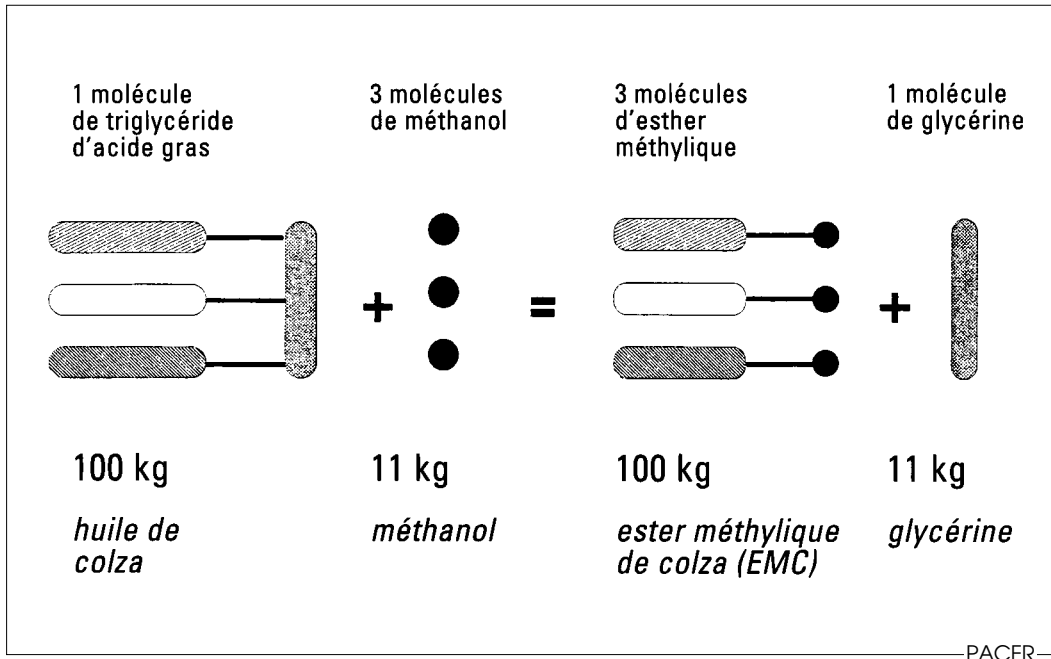
### 4 Estérification

Au travers du processus, on obtient finalement: 1'375 litres d'ester méthylique de colza (EMC) et 100 litres de glycérine.

### 5 Utilisation

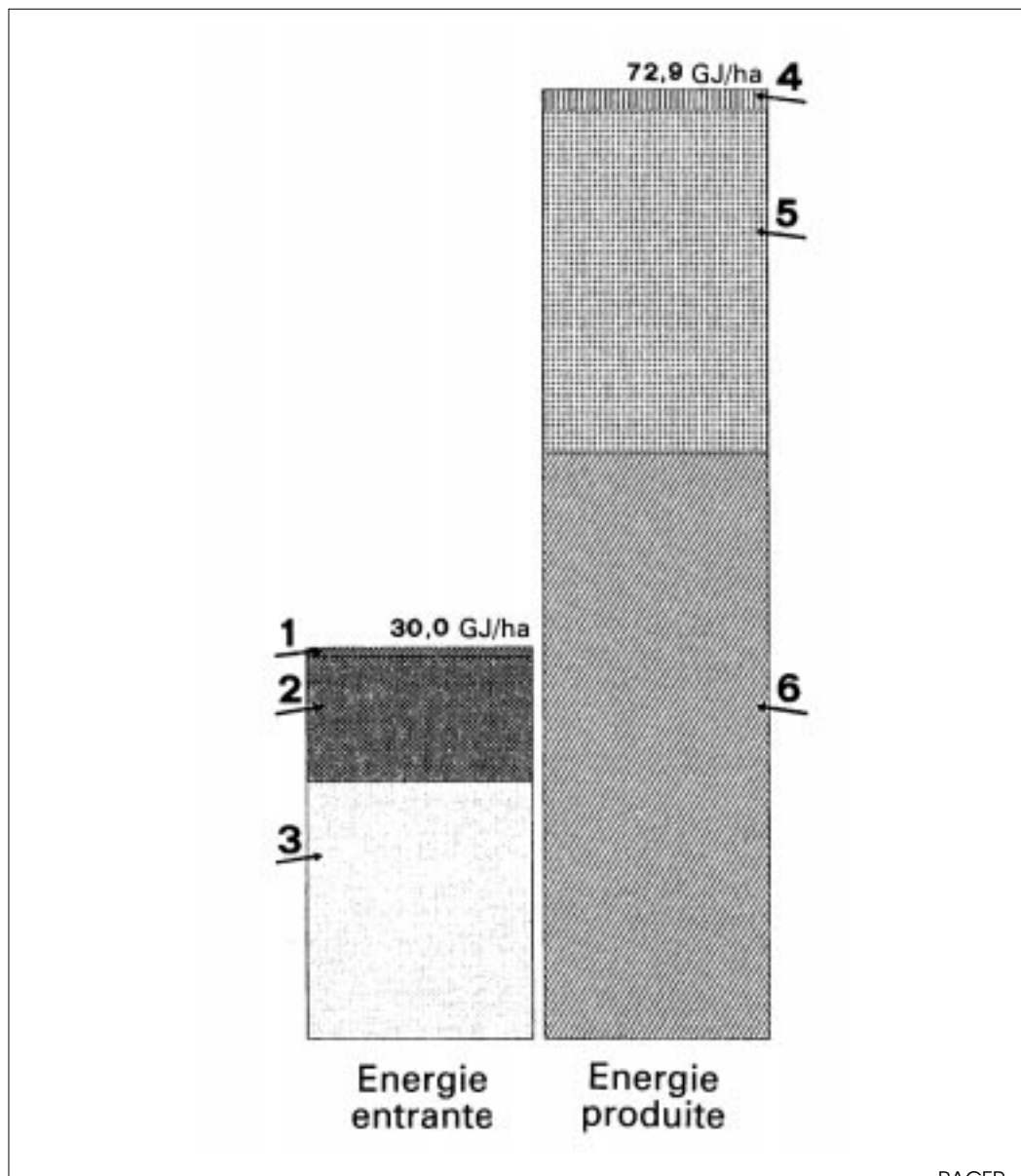
Carburant pour véhicules diesel (tracteurs et bus).

## Estérification de l'huile de colza





## Bilan énergétique du biodiesel



<b>1</b>	<b>Méthanol</b>	<b>0.9 GJ</b>
<b>2</b>	<b>Processus industriel</b>	<b>9.5 GJ</b>
<b>3</b>	<b>Production agricole</b>	<b>19.6 GJ</b>
<b>4</b>	<b>Glycérine</b>	<b>1.5 GJ</b>
<b>5</b>	<b>Fourrage</b>	<b>26.5 GJ</b>
<b>6</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>44.9 GJ</b>

PACER