

Université de Kinshasa  
Faculté des Sciences Agronomiques

# Cours de Machines et Moteurs agricoles

lère Partie : Machines agricoles  
**G3 agronomie**

Pr Jean de Dieu MINENGU

2018- 2019

# Plan du cours

0. Introduction générale

Chap. 1. Tracteurs agricoles

Chap. 2. Outils de travail du sol

Chap. 3. Matériels de semis et de plantation des cultures

Chap. 4. Matériels de protection phytosanitaire et de fertilisation

Chap. 5. Matériels de récolte des cultures

Chap. 6. Matériels de drainage et irrigation

Chap. 7. Matériels de transport et de manutention

Chap. 8. Electrification de la ferme

# 0. Introduction générale

- ✓ Le secteur agricole constitue un pilier fondamental du développement rural.
- ✓ Il est reconnu que l'augmentation de la production agricole est un précurseur essentiel permettant le passage d'une agriculture de subsistance à celle commerciale, synonyme d'amélioration des revenus des agriculteurs et de leur niveau de vie.
- ✓ L'amélioration de la production agricole ne peut être garantie que par l'adoption des facteurs de production dont il faut citer la mécanisation.
- ✓ L'objectif poursuivi par ce cours, est de permettre aux apprenants, futurs ingénieurs agronomes, de connaître les différentes machines utilisées en agriculture et leur mode de fonctionnement.
- ✓ Ce cours présente également des éléments simple et souple capables d'orienter les responsables et les experts opérant dans le domaine de la mécanisation de l'agriculture, d'adopter des approches plus réalistes pour une utilisation durable des machines agricoles.

## Avantages et inconvénients de la mécanisation

# **Chap. 1. Tracteurs agricoles**

# I.1. Définition et constitution

- ✓ Par définition, **un tracteur** est un véhicule automobile destiné à tirer des machines portées, semi-portées ou trainées ainsi qu'à entraîner des organes d'autres machines travaillant à poste fixe.
- ✓ Le tracteur agricole dans sa forme la plus classique possède **quatre roues**: les roues arrières sont motrices et de plus grand diamètre que les roues avant directrices.
- ✓ Les agriculteurs utilisent des tracteurs de plus en plus puissants demandant plus d'adhérence.
- ✓ Le **poste de conduite** du tracteur peut être ouvert ou constitué d'une cabine dans laquelle le conducteur prend place sur un siège unique situé au centre.
- ✓ La plupart des tracteurs recourent à une **transmission manuelle**, et possèdent plusieurs gammes de vitesses (**rapides, lentes**) et de **démultiplicateurs** permettant de rouler très lentement pour les travaux nécessitant une faible vitesse ou jusqu'à 40 km/h sur la route.
- ✓ **Comparé à d'autres véhicules, le tracteur est donc plutôt lent.**
- ✓ Sur les tracteurs modernes, les transmissions manuelles sont remplacées par des **transmissions automatiques** (powershift) et depuis une dizaine d'années par des transmissions à **variation continue**.

## Tracteurs agricoles (suite)



## I.2.Principaux éléments constitutifs du tracteur agricole

1. Moteur
2. Roues
3. Systèmes d'attelage
4. Prise de force
5. Poste de conduite
6. Electronique

## I.3. Attelage trois-points

- ✓ L'attelage trois-points est un système d'attelage permettant de relier une charrue ou toute autre machine agricole à un tracteur agricole.
- ✓ Le système d'attelage trois-points est la plus simple et la seule manière statiquement déterminée de relier deux organes mécaniques.
- ✓ Les outils accrochés à l'attelage peuvent être soit portés, soit remorqués par le tracteur.
- ✓ Ce système ressemble à un triangle ou à la lettre A.
- ✓ Le **principal avantage** du système d'attelage trois-points est de transférer le poids et l'effort de l'outil sur les roues arrières du tracteur.

## Attelage trois-points (suite)



## I.4. Types de tracteurs

### 1. Tracteur conventionnel

- ✓ Les tracteurs conventionnels ont la faculté de porter, tirer, pousser ou entraîner divers outils, ce qui leur confère une grande polyvalence.
- ✓ La puissance des tracteurs disponibles sur le marché s'échelonne de 33 à 500 CV suivant les constructeurs.



## 1.4. Types de tracteurs (suite)

### 2. Tracteur porte-outils

- ✓ Ils sont utilisés pour pousser, porter ou tirer des outils (mais ces tracteurs ne sont plus fabriqués actuellement).
- ✓ **La particularité de ces tracteurs** réside dans l'emplacement du bloc moteur.
- ✓ **En effet**, le moteur, les transmissions et le système hydraulique du porte-outil forment un ensemble compact entièrement disposé sous la cabine de conduite
- ✓ Il s'en suit une visibilité accrue, par rapport aux tracteurs conventionnels, ainsi qu'une large place disponible à l'avant pour une plate-forme porte-outils.
- ✓ **Ce type de tracteur présente les avantages suivants :**
  - excellente visibilité,
  - bonne maniabilité,
  - très polyvalent (polyvalence équivalente à un tracteur conventionnel de moyenne puissance).
  - L'inconvénient majeur de ce tracteur est la **perte de performance** dans les cas de lourds travaux de traction pour lesquels il n'est pas conçu.

## I.4. Types de tracteurs (suite)

### 3. Tracteur à chenilles

- ✓ Les éléments constitutifs d'une chenille sont :
  - **Les tuiles** : pièces métalliques munies de barrettes et articulées entre elles pour former la bande de roulement. Les chenilles pour usages agricoles sont généralement disponibles en 3 largeurs (699, 762 ou 914 mm).
  - **Le barbotin-moteur** : reliée aux tuiles par l'intermédiaire d'une chaîne, cette roue à dents ou pignons est responsable de l'entraînement de la chenille.
  - **La roue de tension** : positionnée à l'opposé du barbotin-moteur, cette roue tourne librement et maintient la tension de la chenille.
  - **Les roues centrales** : développées sur les machines récentes, ces roues semi-suspendues indépendantes, permettent aux chenilles d'épouser parfaitement la géométrie du terrain et de limiter l'impact des dénivellations.

## I.4. Types de tracteurs (suite)

### 3. Tracteur à chenilles



## I.4. Types de tracteurs (suite)

### 4. Tracteur articulé

- ✓ Tracteurs ultra-puissants (de 300 à 500 CV), sont destinés à tracter de lourdes charges, telle une sous-soleuse qui nécessite de disposer d'un maximum de puissance pour maintenir l'outil à la juste profondeur de travail.



## I.4. Types de tracteurs (suite)

### 5. Tracteur étroit

- ✓ C'est un type de tracteur dont la puissance est généralement inférieure à 80 CV.
- ✓ Il est **étroit et léger** et a été conçu pour travailler dans les cultures à interrang étroit.
- ✓ Compte tenu de l'espace réduit dans lequel le tracteur est amené à évoluer, la maniabilité est accrue pour permettre un braquage très court.



## 1.4. Types de tracteurs (suite)

### 5. Tracteur enjambeur

- ✓ Les tracteurs enjambeurs, équipés d'un châssis à portique, sont utilisés dans le cas de cultures exigeant **une garde au sol** (distance entre le point le plus bas du châssis et le sol) importante, telles que les vignes et les cultures arbustives.
- ✓ Contrairement aux grandes cultures, ces cultures spécialisées ne nécessitent pas l'intervention de tracteurs de grande puissance.



# CALCUL D'EFFORT DE TRACTION

- ✓ Travail =  $F \times L$  (Joules)
- ✓ Vitesse =  $e/t$  (m/s)
- ✓ Temps =  $e/vitesse$  (seconde)
- ✓ Puissance (P) =  $F \times V$  (W, KW)
- ✓ Section du sillon = Profondeur de labour x largeur x nbre de socs
- ✓ Effort de traction (F) = Résistance (R) x Section de labour (N ou kgf)

## Exercice

1. Calculez la puissance nécessaire du tracteur qui doit effectuer avec une charrue trisocs un labour de 25 cm de profondeur et de 30 cm de largeur par sillon, dans un sol dont la résistance moyenne est de 600 N/dm<sup>2</sup>. La vitesse au labour est de 5 km/h. Calculez également le travail fourni lorsque la charrue laboure sur une longueur de 50 m.

## **Chap. 2. Outils de travail du sol**

## II.1. Introduction

- ✓ Les outils de travail du sol sont très variés. Ils se différencient les uns des autres par:
  - **la nature des pièces travaillantes** (outils à disques, outils à dents, outils à pointes, outils à versoirs, rouleaux),
  - **l'animation ou non des pièces travaillantes** par la prise de force du tracteur (outils animés, outils auto-animés, outils non-animés),
  - **le type de travail réalisé** (outils de travail profond, outils de travail superficiel)

## II.2. Outils de travail profond du sol

1. Sous-soleuse
2. Décompacteur
3. Décompacteur rotatif
4. Machine à bêcher
5. Charrue à disques
6. Charrue à versoirs

## II.2.1. Sous-soleuse

- ✓ Une sous-soleuse est un décompacteur lourd, instrument de sous-solage et d'essouchement.
- ✓ Elle est constituée d'un assemblage **de dents** très robustes porté à l'avant ou à l'arrière d'un tracteur puissant ou d'un bulldozer.
- ✓ Les dents sont munies de socs plus ou moins effilés.
- ✓ **La qualité du travail** du sol avec une sous-soleuse dépend de la vitesse de travail, de la profondeur de travail, de l'espacement entre les dents et de la pointe utilisée.
- ✓ La sous-soleuse doit être utilisée **en saison sèche** pour éviter le lissage.

## II.2.1. Sous-soleuse



## II.2.2. Décompacteur

- ✓ Le **décompacteur** permet de réaliser un décompactage, c'est-à-dire un travail du sol profond (25 à 40 cm) **sans retournement** grâce à des dents très robustes fixées sur un bâti porté ou semi-porté.
- ✓ On réalise ce type de travail lorsqu'il y a nécessité de fragmenter un sol compacté (en général par une récolte en conditions humides) sur une profondeur qui est de l'ordre de celle du labour.
- ✓ Le décompactage est donc différent du sous-solage.
- ✓ La hauteur sous bâti d'un décompacteur varie de 60 à 75 cm (75 à 110 cm pour une sous-soleuse).
- ✓ Le nombre de dents par m est compris entre 2 et 3.
- ✓ Une roue de jauge ou un rouleau sont indispensables pour régler la profondeur du travail et stabiliser l'outil.
- ✓ Le rouleau permet également d'émietter les mottes en surface et de rappuyer la couche compactée.

## II.2.2. Décompacteur



## II.2.3. Machine à bêcher

- ✓ La machine à bêcher, aussi appelée charrue à bêtes rotatives ou roto-bêche, est un outil mécanique tracté qui réalise un travail du sol profond remarquable par l'importance de la fragmentation et la qualité de l'enfouissement des débris végétaux.
- ✓ La profondeur de travail peut atteindre 50 cm.
- ✓ Les pièces travaillantes sont des fers de bêche robustes (actionnés par un ensemble bielles-vilebrequin).
- ✓ On leur reproche leur lenteur et, surtout, de souvent trop fragmenter le sol, ce qui diminue la portance pour les travaux ultérieurs.
- ✓ Les plus lourdes sont parfois utilisées pour défricher (une jachère, une ancienne prairie).
- ✓ **Les caractéristiques de ces machines sont :**
  - La vitesse d'avancement du tracteur et celle de rotation des bêtes déterminent l'épaisseur des blocs découpés. La vitesse de travail est très faible (2,5 km/h environ).
  - La profondeur de travail peut aller de 15 à 50 cm. Elle est réglable grâce à des patins.
  - **L'enfouissement** des débris végétaux et le degré de fragmentation peuvent être modifiés par un tablier réglable.

## II.2.3. Machine à bêcher



## II.2.4. Charrue à disques

- ✓ La charrue à disques est utilisée dans les sols superficiels et caillouteux lorsque les conditions de travail du sol sont en général sèches.
- ✓ Utilisée principalement dans les régions aux climats tropicaux, arides et semi-arides, la charrue à disques pénètre bien dans le sol, même sec, **mais enfouit mal** les débris végétaux.
- ✓ Le bord du **disque** est en général **biseauté** pour améliorer l'efficacité de découpage du sol.
- ✓ Il existe des charrues à disques portées ou semi-portées.
- ✓ Les réglages de la charrue à disque portent sur la profondeur de travail, que l'on maîtrise grâce à la roue stabilisatrice et au réglage de l'attelage trois points et sur les angles caractéristiques des disques.

## II.2.4. Charrue à disques (suite)

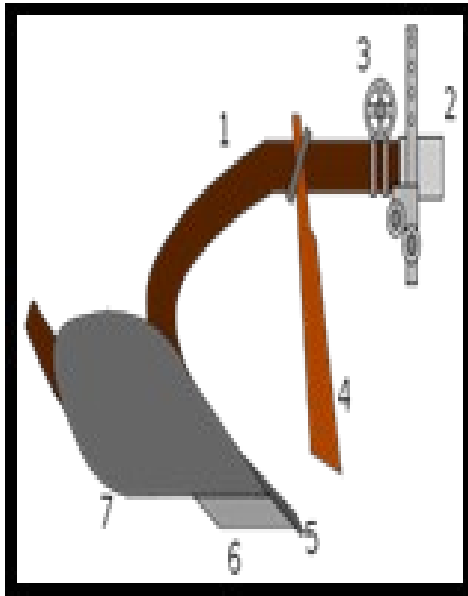


## II.2. 5. Charrue à versoirs

- ✓ La charrue à versoirs (souvent improprement appelée '**charrue à socs**') est un instrument de préparation du sol qui permet de réaliser un labour, technique de travail profond qui consiste à découper et retourner une bande de terre.

**La charrue à socs est constituée de :**

1. Age (ici courbé en étauçon)
2. Système d'attelage
3. Dispositif de réglage
4. Coutre
5. Pointe
6. Soc
7. Versoir



## II.2.6. Cultivateur

- ✓ Le terme "cultivateur" regroupe toute une famille d'outils à dents qui se différencient par **la forme des dents, leur espacement, le poids et le dégagement sous bâti.**
- ✓ **Les cultivateurs lourds** (4 à 5 dents au mètre, 60 à 75 cm de dégagement sous bâti) sont adaptés à des opérations de déchaumage et de reprise profonds, voire de décompactage en non labour.
- ✓ **Les cultivateurs légers** (4 à 7 dents au mètre, 45 à 60 cm de dégagement sous bâti) sont appropriés en préparation de lit de semences.

## II.2.6. Cultivateur (suite)

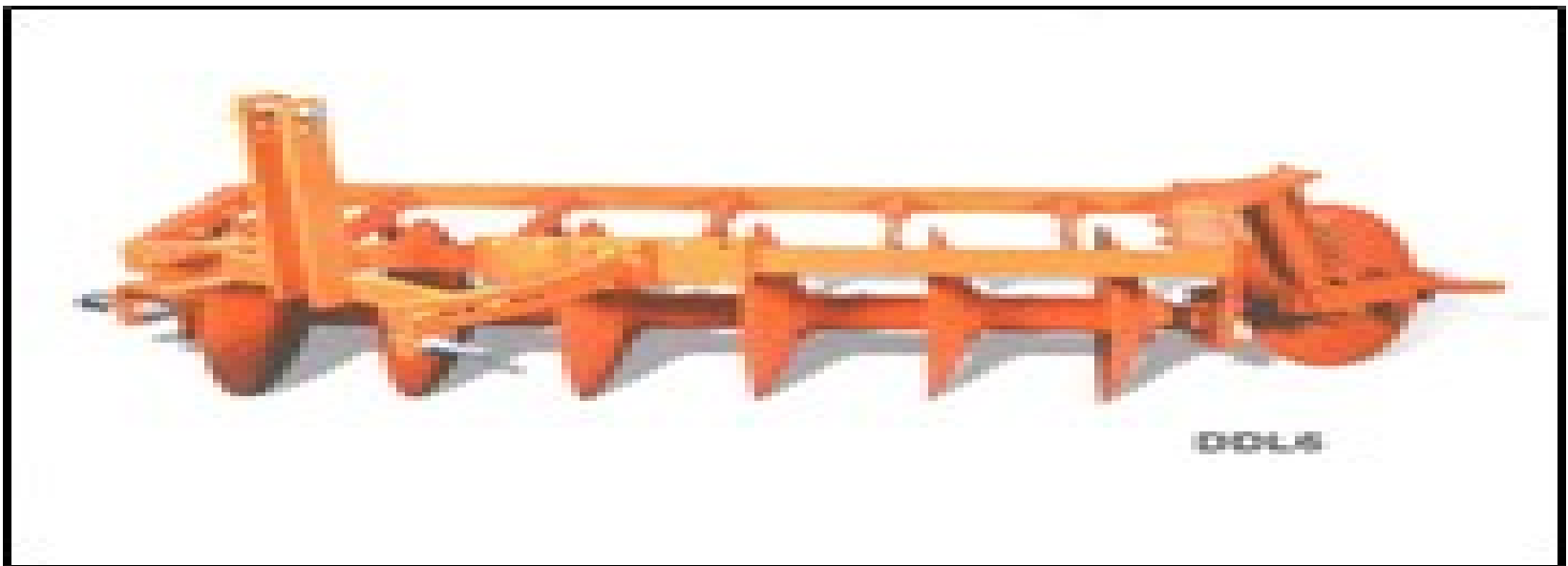


## II.3. Outils de travail superficiel du sol

- ✓ Les outils à disques sont souvent utilisés pour ameublir le sol et détruire les mauvaises herbes. **Suivant leur usage, les outils à disques sont appelés déchaumeuses à disques ou pulvérisateurs à disques.**
- ✓ Ces outils sont munis d'un ou plusieurs trains de disques dont l'angle d'attaque, réglable, dépend du travail à effectuer.
- ✓ **Contrairement aux charrues à disques, les disques sont disposés verticalement par rapport au sol.**
- ✓ Les disques ont la forme d'une calotte sphérique plus ou moins bombée, de diamètre plus ou moins grand et dont le bord tranchant le sol **est lisse ou crénelé.**
- ✓ Pour augmenter l'efficacité de pénétration, le bord du disque peut **être crénelé**, mais dans ce cas, **l'usure est plus rapide.**
- ✓ Enfin, les disques peuvent être équipés de grattoirs (décrotteurs) qui raclent la terre collée à la pièce travaillante, afin de diminuer les forces de frottement.

## II.3.1. Différents types d'outils à disques utilisés dans le travail superficiel du sol

- ✓ On distingue différents types suivant la disposition et le nombre de trains de disques :
- 1. **Les déchaumeuses à disques** : Elles sont constituées d'un seul train de disques disposés en oblique par rapport au sens d'avancement.



## II.3.1. Différents types d'outils à disques utilisés dans le travail superficiel du sol (suite)

### 2. Les pulvérisateurs "offset" ou "cover-crop"

- ✓ possèdent deux trains de disques disposés en "V" ouvert latéralement, travaillant la même bande de terre avec des séries de disques montés en opposition.
- ✓ Le train avant est en général muni de disques crénelés, facilitant ainsi l'attaque dans le sol non encore travaillé.
- ✓ On distingue selon le mode d'attelage, les pulvérisateurs portés, semi-portés, traînés ou autoportés.



## 2.3.1. Différents types d'outils à disques utilisés dans le travail superficiel du sol (suite)

### 3. Les pulvérisateurs tandem

- ✓ possèdent quatre trains de disques disposés en "X".
- ✓ Ces outils sont proposés en trois gammes : légère (moins de 350 kg par mètre), moyenne (de 350 à 700 kg/m) ou lourde (plus de 700 kg/m).



## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### 2.3.2.1. Bineuse

- ✓ La bineuse est un outil destiné à effectuer un travail très superficiel d'entretien du sol et de binage, dans des cultures disposées en ligne.
- ✓ L'objectif premier est de détruire les adventices.
- ✓ Les bineuses récentes travaillent sur plusieurs rangs à la fois (4 à 12).
- ✓ Elles comportent un bâti porté sur lequel peuvent coulisser les éléments bineurs et le dispositif de guidage, ce qui permet de s'adapter à différents écartements entre les rangs.
- ✓ Elles sont portées sur le tracteur, à l'avant ou à l'arrière. Pour les machines frontales, le conducteur du tracteur peut gérer lui même la direction de l'outil : le confort au travail est meilleur.

## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### 2.3.2.1. Bineuse



## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### 2.3.2.2. Herse classique

- ✓ Les herse sont destinées aux opérations de préparation du lit de semences.
- ✓ Elles permettent d'ameublir superficiellement le sol soit, de la nettoyer en ramenant à la surface les mauvaises herbes, de la niveler et d'enfouir les semences (objectif pour lequel elles ont été conçues à l'origine).
- ✓ Elles sont apparues au Moyen Age, en même temps que la charrue à versoirs.
- ✓ On distingue les herse sans terrage forcé (qui ne pénètrent dans le sol que grâce à leur propre poids) et les herse avec terrage forcé (qui pénètrent dans le sol grâce à leurs poids ou grâce à un vérin double-effet) permettant de mieux contrôler la profondeur du travail.

## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### 2.3.2.2. Herse classique



## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### II.3.2.2. Différents types de herse classiques

#### 1. Herse rotative

- ✓ Les herse rotatives sont des outils de préparation du lit de semences.
- ✓ Les pièces travaillantes sont des dents tournant autour d'un axe vertical, animé par la prise de force du tracteur.
- ✓ Peu encombrantes, les herse rotatives peuvent être associées à d'autres outils ou à un semoir, ce qui permet de réaliser la préparation du sol et le semis en un seul passage.
- ✓ Les herse rotatives comportent un certain nombre de rotors.
- ✓ Chacun est équipé de deux dents plus ou moins longues (30 à 33 cm pour les dents standard, jusqu'à 40 cm pour les dents longues) qui peuvent être de section carrée, ronde ou triangulaire.

## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### II.3.2.2. Différents types de herse classiques

#### 1. Herse rotative



## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### II.3.2.2. Différents types de herse classiques

#### 2. Herse alternative

- ✓ Les herse alternatives ou "herse à barres oscillantes" sont des outils de reprise superficielle de labour et de préparation du lit de semences.
- ✓ L'énergie nécessaire au fonctionnement des pièces travaillantes est entièrement fournie par la prise de force du tracteur.
- ✓ Elles permettent d'effectuer en un seul passage la reprise de labour, une préparation rapide du sol et le semis.
- ✓ Elles sont constituées de 2 rangées parallèles de dents verticales en mouvement alternatif. Ces dents, au nombre de 10 par m de largeur de travail, sont généralement triangulaires et inclinées vers l'avant et d'une longueur d'environ 25 à 30 cm.
- ✓ La largeur de travail des herse alternatives, est comprise entre 2,5 et 6 m.
- ✓ Le rouleau émietteur vient systématiquement compléter cet outil. Il permet de contrôler la profondeur de travail, de calibrer l'émottage, de tasser la terre et de niveler la surface.

## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### II.3.2.2. Différents types de herse classiques

#### 2. Herse alternative



## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### II.3.2.3. Bêche roulante & outils auto-animés<sup>2</sup>. Herse alternative

- ✓ Les **bêches roulantes** sont principalement utilisées pour les opérations de déchaumage.
- ✓ Il s'agit d'un outil qui n'est pas animé par la prise de force du tracteur, mais dont les pièces travaillantes sont mises en rotation par l'avancement de l'engin.
- ✓ On parle d'outil auto-animé, dont il existe plusieurs sortes qui permettent de travailler rapidement en assurant un bon mélange de la terre et des débris végétaux.
- ✓ On peut distinguer les bêches roulantes selon leur bâti (rigide, articulé ou autoporté).
- ✓ **Les pièces travaillantes** sont des lames courbées, tranchantes à leur extrémité, de 38 à 44 cm de long, disposées en croix sur un arbre. Environ 40 cm séparent deux croisillons, décalés d'un huitième de tour. L'angle d'attaque est, en général, réglable.

## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### II.3.2.3. Bêche roulante & outils auto-animés



## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### II.3.2.4. Rouleaux

- ✓ Ces équipements sont entièrement dédiés à la préparation des lits de semences (à une exception près, le roulage des jeunes céréales ou des prairies pour favoriser le tallage).
- ✓ Ils agissent de façon très superficielle sur les sols, qu'ils tassent légèrement (on parle de rappuyage du lit de semences), tout en complétant l'action de fragmentation des mottes en surface.
- ✓ A l'heure actuelle, les rouleaux sont rarement employés seuls : ils sont associés aux autres outils de préparation superficielle du sol.
- ✓ La diversité des formes et des poids des rouleaux s'explique par la complexité des problèmes à résoudre. Il faut en effet :
  - **Le tasser légèrement le sol** (pour améliorer le contact terre graine, favoriser les remontées d'eau par capillarité et éviter un assèchement trop rapide de la surface),
  - **Le niveler** (pour faciliter la récolte lorsqu'il faut que la barre de coupe passe très près du sol), parfaire l'action des outils précédents en diminuant la taille des mottes en surface tout en triant les mottes et la terre fine. Le tout en évitant les bourrages.

## II.3.2. Autres outils utilisés dans le travail superficiel sol

### II.3.2.1. Différents types les rouleaux lisses

#### 1. Les rouleaux squelettes



#### 2. Les rouleaux croskill



#### 3. Les rouleaux étoile (herse norvégienne)



## Chapitre III. MATERIELS DE SEMIS ET DE PLANTATION DES CULTURES

- ✓ Les matériels de semis et de plantation peuvent être classés en quatre groupes : le semoir multigraines, le semoir monograine, la planteuse et la repiqueuse.

## III.1. Semoir en ligne ou multigraines

- ✓ Les semoirs en ligne (ou multigraines, ou semoirs à céréales) sont des outils permettant le semis régulier en lignes équidistantes et à profondeur uniforme de presque toutes les graines utilisées en grande culture.
- ✓ On distingue les semoirs semi-portés, traînés (dont le poids est plus important, la trémie peut être de plus grande capacité), ou intégrés à un outil de travail du sol.
- ✓ L'acheminement des graines entre les organes de distribution et les socs d'enterrage peut se faire soit par gravité, soit par flux d'air dans des tuyaux d'alimentation flexibles. Dans ce deuxième cas, la largeur semée peut être plus importante que celle de la trémie.

# Constitution

- ✓ Il s'agit du réservoir qui communique avec les organes de distribution et dans lequel se trouvent les graines à semer.
- ✓ Pour les semoirs avec écoulement par gravité, elle est de section trapézoïdale, et a une capacité de 100 à 200 litres par mètre de largeur de semis.
- ✓ Les orifices d'alimentation des organes de dosages peuvent être obstrués par des vannes coulissantes pour supprimer l'alimentation de certains doseurs.
- ✓ Les semoirs avec transport pneumatique possèdent une trémie en forme de cône ou de pyramide.

**1. Organes de distribution** : une série de cylindres

**2. Tubes de descente**: ils assurent la liaison entre les organes de distribution et les organes d'enterrage.

**3. Organes d'enterrage et de recouvrement** : organes de mise en terre : le soc, le disque simple et le disque double. Les organes de recouvrement referment le sillon derrière les socs ou les disques.

**4. Equipements accessoires** : les effaceurs de traces (dents), le dispositif de traçage (disque), le système de jalonnement (des disques traceurs permettent de repérer les lignes non ensemencées avant la levée).

**5. Les équipements de contrôle électronique** : le débit, la profondeur de semis et le jalonnement peuvent être contrôlés par des équipements électroniques.

## III.2. Semoir monograine

- ✓ Les semoirs monograines ou semoirs de précision permettent de disposer les graines une à une en ligne à un espacement régulier préalablement défini. Ils sont utilisés pour des cultures d'inter-rang supérieur à 25 cm et nécessitant un dépôt de graines précis, telles que le maïs, les haricots, le pois, le tournesol ... mais aussi les cultures maraîchères et florales.
- ✓ La classification des semoirs monograines tient compte du mode de distribution des graines (mécanique ou pneumatique). **Les semoirs pneumatiques sont les plus répandus en raison de leur bonne adaptation à toute taille de graines.**
- ✓ Les graines, stockées dans la trémie, sont déposées à la profondeur désirée dans un sillon par les organes de distribution (disques alvéolés, injecteurs..) sous l'effet de la gravité ou d'une assistance pneumatique. Avant l'ouverture du sillon par le soc (ou plus rarement par un disque), une roue avant éventuellement dotée d'un chasse motte se charge de niveler le lit de semences. Sitôt le dépôt de la graine par le soc effectué, des rouleaux situés à l'arrière rappuient le sol (pour assurer un bon contact graine-sol) et referment le lit de semences, en ramenant la terre écartée par le chasse-motte. Pour assurer la régularité de la profondeur de semis, les éléments semeurs sont reliés au châssis par un parallélogramme déformable demeurant toujours parallèle au sol.

## III.2. Semoir monograine



### III.2.1. Différents types de semoirs monograine

- ✓ Il existe deux types de semoir monograine : le semoir à distribution mécanique et le semoir à distribution pneumatique.
- ✓ Chez le semoir à distribution mécanique, la sélection des graines est purement mécanique.
- ✓ En tournant, des disques (horizontaux, verticaux ou obliques) munis d'alvéoles de la taille des graines à semer, se chargent de graines qu'ils amènent au niveau du soc où elles sont relâchées par gravité.
- ✓ Par contre, chez le semoir à distribution pneumatique, la sélection des graines est toujours assistée pneumatiquement.

## III.2.2. Accessoires de semoir monograinne

- ✓ Les principaux organes accessoires de semoir monograinne sont :
  - Le dispositif de traçage : des disques montés sur des bras dans le prolongement du semoir marquent le sol pendant le semis pour indiquer la trace à suivre par le tracteur lors du passage suivant.
  - Les fertilisateurs/microgranulateurs : une fertilisation ou une distribution d'engrais peut être opérée simultanément au semis en adaptant un dispositif supplémentaire à l'avant ou à l'arrière du tracteur.
  - Le contrôleur de semis électronique : des consoles modernes sont capables d'indiquer le nombre de graines semées par rangs, la population à l'hectare, la vitesse de semis, le rendement horaire...

### Réglages de semoir monograinne

- ✓ L'écartement des lignes de semis : en fonction de l'espèce semée, la disposition sur le châssis et le nombre d'éléments semeurs peut être modifié.
- ✓ La densité de semis : la vitesse de rotation et le nombre d'alvéoles des organes de distribution sont variables.
- ✓ La profondeur du semis : est ajustable par la position du soc, des roues avant ou arrière de l'élément semeur.
- ✓ Le réglage des traceurs :  $D = (E(N+1) - V) / 2$ , avec  $D$  = distance entre le disque traceur et l'axe du dernier élément semeur;  $N$  = nombre d'éléments semeurs,  $V$  = voie avant du tracteur (distance entre l'axe des roues avant), et  $E$  = écartement entre éléments semeurs.

### III.3. Planteuse

- ✓ Les planteuses de pommes de terre sont des outils permettant la mise en terre de plants de différents calibres, à distance et profondeur régulière, sans abîmer les germes.
- ✓ Elles sont constituées d'un ou plusieurs éléments de plantation sur un bâti semi-porté (jusqu'à 3 rangs) ou traîné (4 à 6 rangs).



### III.3.1. Différents types de planteuses

- ✓ Les planteuses peuvent être groupées en fonction de :
  - L'alimentation manuelle est utilisée pour les plantations en primeur, avec des germes développés. Chaque plant est déposé dans un logement du distributeur.
  - L'alimentation automatique peut faire l'objet de différents systèmes :
    1. des systèmes à chaîne ou à godets,
    2. des systèmes à convoyeur aligneur,
    3. des systèmes à disque et doigts extracteurs.

### III.3.2. Eléments constitutifs d'une planteuse

- ✓ Une planteuse est constituée :
  - D'un bâti : profilé, du type "porte-outils", il permet le déplacement des éléments planteurs afin de régler l'espacement entre les rangs (entre 55 et 90 cm).
  - D'une trémie : c'est le bac, de capacité variable en fonction du nombre d'éléments qu'il peut desservir.
  - D'un système de distribution : il existe des distributeurs à alimentation manuelle ou automatique.
- ✓ Le distributeur manuel peut être rotatif vertical (les tubercules sont déposés un à un dans des encoches ou godets, maintenus en place pendant la rotation et libérés au niveau du sol) ou horizontal (les tubercules sont déposés sur un plateau compartimenté tournant dans un tambour percé d'une lucarne qui ouvre sur le tube de descente.)
- ✓ Le distributeur automatique peut être constitué d'une courroie ou chaîne à godets (le tubercule est prélevé dans la partie inférieure de la trémie), d'un système avec convoyeur-aligneur (les tubercules sont alignés sur un tapis à vitesse de rotation réglable. Ce système est utilisé en particulier avec les plants pré-germés), ou d'un système à disques et doigts extracteurs.
  - Des organes de mise en terre et de recouvrement : un soc butteur ouvre le sillon dans lesquels seront déposés les plants.
  - Le recouvrement est effectué par deux disques.

# Éléments constitutifs d'une planteuse

- ✓ Une planteuse est constituée :
  - D'un bâti : profilé, du type "porte-outils", il permet le déplacement des éléments planteurs afin de régler l'espacement entre les rangs (entre 55 et 90 cm).
  - D'une trémie : c'est le bac, de capacité variable en fonction du nombre d'éléments qu'il peut desservir.
  - D'un système de distribution : il existe des distributeurs à alimentation manuelle ou automatique.
- ✓ Le distributeur manuel peut être rotatif vertical (les tubercules sont déposés un à un dans des encoches ou godets, maintenus en place pendant la rotation et libérés au niveau du sol) ou horizontal (les tubercules sont déposés sur un plateau compartimenté tournant dans un tambour percé d'une lucarne qui ouvre sur le tube de descente.)
- ✓ Le distributeur automatique peut être constitué d'une courroie ou chaîne à godets (le tubercule est prélevé dans la partie inférieure de la trémie), d'un système avec convoyeur-aligneur (les tubercules sont alignés sur un tapis à vitesse de rotation réglable. Ce système est utilisé en particulier avec les plants pré-germés), ou d'un système à disques et doigts extracteurs.
  - Des organes de mise en terre et de recouvrement : un soc butteur ouvre le sillon dans lesquels seront déposés les plants.
  - Le recouvrement est effectué par deux disques.

## Réglages d'une planteuse

- ✓ Le réglage de l'écartement des plants dans la ligne: le distributeur est équipé d'une série d'engrenage qui permet de modifier sa vitesse de rotation, et donc le rythme des dépôts pour une même vitesse d'avancement.
- ✓ Le réglage de l'écartement entre les lignes : sur les machines à plusieurs rangs, les éléments peuvent être déplacés latéralement sur le châssis, pour faire varier la distance entre les lignes.
- ✓ Le réglage de l'enterrage et du recouvrement : Les socs d'ouverture des sillons sont fixés au châssis par des étriers qui permettent de modifier rapidement leur profondeur. On peut régler la hauteur, l'écartement, l'inclinaison, la pression des disques de recouvrement

### III.4. Repiqueuse

- ✓ Les repiqueuses de plants sont des machines d'assistance à la plantation servies manuellement et capables de placer correctement les plants dans le sol en respectant le plus possible les parties fragiles de la jeune plante (racines, tiges, feuilles).
  - ✓ Il s'agit en général de machines attelées au système trois points du tracteur, portées en transports et reposant sur leurs propres roues au travail.
  - ✓ Elles comportent un bâti supportant 1 à 6 éléments planteurs, correspondant à autant de postes assis, permettant à quelqu'un d'alimenter manuellement le mécanisme de distribution correspondant. Selon les végétaux à planter et les machines, la vitesse peut aller de 1000 à 2500 plants par homme et par heure.
- ❑ **On distingue différents systèmes de distribution :**
1. Les distributeurs circulaires à disques convergents
  2. Les distributeurs à roues et à pinces
  3. Les distributeurs à courroies

### III.5. Planteuses automatiques de mini-mottes

- ✓ Ce sont des machines tractées ou automotrices, conçues pour la plantation mécanique de mini-mottes contenues dans des plateaux conteneurs.
- ✓ Les éléments de plantation peuvent être écartés par coulissement sur le châssis de base ; leur entraînement est assuré par une boîte de vitesse entraînée par les roues avant de la machine.
- ✓ Un système positionneur assure les mouvements horizontaux et verticaux des plateaux.
- ✓ Les mottes sont éjectées 3 par 3 par des poussoirs et transférées par des pinces vers les godets de l'unité de plantation.
- ✓ L'unité de plantation comporte une chaîne sans fin portant des godets ouvrant qui reçoivent les mottes.
- ✓ Un disque de retournement reçoit les mottes déposées par les godets puis, elles sont saisies par un disque de plantation et enfin lâchées en synchronisme avec deux roues tasseuses qui assurent le rappuyage.

# **Chapitre IV. MATERIELS DE PROTECTION PHYTOSANITAIRE ET DE FERTILISATION**

## IV. Introduction

- ✓ Les matériels de protection phytosanitaire et de fertilisation les plus utilisées sont le pulvérisateur, l'épandeur à fumier, l'épandeur à lisier et le distributeur d'engrais.
- ✓ L'application de produits phytosanitaires et d'engrais liquide s'effectue à l'aide de pulvérisateurs; alors que les formes solides sont appliquées à l'aide de distributeurs d'engrais.
- ✓ Enfin les épandeurs à lisier et à fumier ont été conçus pour l'épandage des divers engrais de ferme.
- ✓ Les poudreuses et les atomiseurs sont aussi utilisés pour l'application des produits phytosanitaires.

## IV.2. Pulvérisateur

- ✓ Un pulvérisateur sert à épandre une certaine dose de produits phytosanitaires ou d'engrais liquide sous forme de fines gouttelettes en les répartissant uniformément sur une cible (le sol, le peuplement cultivé, des adventices...).
- ✓ Les pulvérisateurs peuvent être traînés, semi-portés ou portés (à l'avant ou à l'arrière de tracteur) et certains sont automoteurs.



## IV.2.1. Constitution et principes de fonctionnement

**Tout pulvérisateur se compose des éléments de base suivants :**

1. Cuve : organe de stockage du produit de capacité variable, les automoteurs possédant les plus fortes capacités.
2. Système de distribution : il s'agit d'une pompe qui a pour rôle de : (i) prélever une quantité donnée de liquide dans la cuve et de la débiter dans le système de transfert du liquide sous une pression déterminée, (ii) brasser le liquide de la cuve, (iii) remplir le pulvérisateur (sur les petits appareils, car une deuxième pompe se charge de cette opération sur les appareils plus gros).
3. Système de transfert de liquide : la rampe correspond à la canalisation supportant les buses et est fixée sur un bâti ou support de rampe (lui même rattaché à un cadre) qui permet l'articulation de la rampe et son réglage en hauteur.
4. Système de division du liquide en gouttelettes : des buses, orifices calibrés répartis le long de la rampe, contrôlent la forme du jet, sa répartition sur la cible, la dimension et le nombre de gouttes.
5. Système de transfert de gouttes : les gouttes doivent acquérir suffisamment d'énergie cinétique pour atteindre leur cible. **Le transport par jet projeté** : les gouttes sont transportées grâce à l'énergie cinétique emmagasinée lors de la division du liquide en gouttes. **Le transport par jet porté** : un flux d'air porte les gouttes jusqu'à leur cible.
6. Système de régulation : des automatismes de type DPA (dispositifs de régulation à débit proportionnel à l'avancement ou des DPM (débit proportionnel au régime moteur du tracteur) sont fréquemment installés pour réguler et maintenir constant le débit de pulvérisation fixé.

## IV.2.2. Différents types de pulvérisateurs

- ✓ On distingue les pulvérisateurs à pression de liquide et à jet projeté, les pulvérisateurs centrifuges et pulvérisateurs pneumatiques.
- 1. **Pulvérisateurs à pression de liquide et à jet projeté** : l'énergie potentielle du liquide, mis sous pression par la pompe, est utilisée pour le transformer en gouttes (division par pression de liquide) et pour transporter celles-ci jusqu'à la cible (transport par jet projeté) par l'intermédiaire de buses.
- 2. **Pulvérisateurs centrifuges** : utilisés en grandes cultures pour travailler à bas volume (50 à 100L/Ha), ils mettent en œuvre la force centrifuge et le transport par jet projeté.
- 3. **Pulvérisateurs pneumatiques** : un courant d'air divise le jet et porte les gouttes formées. Ces appareils sont notamment utilisés en viticulture.

### IV.3. Epandeur à fumier

- ✓ Les épandeurs à fumier, remorques semi-portées dotées d'un dispositif d'épandage, sont comme leur nom l'indique destinés à épandre du fumier sur une parcelle.
- ✓ Ces apports de fumier sont raisonnés en fonction des besoins de la culture et de la composition du fumier (teneurs en MO et en N).

## IV.3.1. Eléments constitutifs et fonctionnement

✓ Les épandeurs se composent d'une citerne de stockage, d'un système d'alimentation et d'un système d'épandage.

**1. Citerne** : Les citernes sont semi-portées, fixées sur un châssis de un ou deux essieux, et peuvent contenir entre 3 et 15 T de fumier.

**2. Système d'alimentation** : Des barrettes métalliques fixées sur des chaînes sans fin composent un fond mouvant permettant l'avancement du fumier vers les organes de distribution.

**3. Système d'épandage** : en fonction du système d'épandage, on distingue :

- **Épandeurs à projection arrière** : des moulinets horizontaux ou verticaux munis d'éléments disperseurs (dents, griffes, disques crénelés, vis hélicoïdal...) sont animés d'un mouvement de rotation par la prise de force du tracteur et ont pour rôle de déchiqueter puis épandre le fumier. Le système peut être complété par un système éparpilleur ou une table de projection.
- **Épandeurs à projection latérale** : Ils ont été conçus pour l'épandage de fumier semi-liquide (lisier épais, fientes de volailles).

## IV.4. Epandeur à lisier

- ✓ Les épandeurs à lisier, aussi appelés "tonnes à lisier" assurent le brassage du lisier dans la fosse, le soutirage et l'épandage.
- ✓ Certains appareils sont même dotés d'un système d'enfouissement adaptable à l'arrière de l'épandeur.



## IV.4.1. Eléments constitutifs

### 1. Citerne

Généralement cylindrique, elle peut stocker entre 3 000 et 20 000 litres de lisier. La paroi arrière ouvrable ou amovible permet de nettoyer l'intérieur.

### 2. Pompe

Il s'agit d'une pompe à lobes ou à palettes qui peut fonctionner alternativement comme compresseur (lors de l'épandage, le fumier est mis sous pression) ou comme pompe à vide (pour créer le vide d'air avant le remplissage de la citerne) grâce à un système de vannes d'inversion. La pompe agit uniquement sur de l'air et n'entre jamais en contact avec le lisier.

### 3. Système d'épandage et système d'incorporation

- a. Diffuseurs en nappe
- b. Rampes avec tuyaux traînants

### 4. Système d'enfouissement

- a. Les enfouisseurs pour terres de culture ressemblent aux cultivateurs à dents de type "chisel". L'avantage de ce dispositif est la possibilité de déchaumer les cultures tout en apportant du lisier sans cependant émaner d'odeurs désagréables.
- b. Les enfouisseurs pour prairies sont munis de disques ou couteaux ouvreurs de sillons et disposent le fumier à une profondeur de 10 à 15 cm dans le sol.

## IV.5. Distributeur d'engrais

- ✓ Les distributeurs d'engrais permettent d'épandre une quantité déterminée d'engrais solides sur une partie (épandage localisé) ou plus souvent sur la totalité (épandage généralisé) de la parcelle.



## IV.5.1. Éléments constitutifs

- ✓ **Les éléments de base de tout distributeur d'engrais sont :**
  1. Un système de liaison avec le tracteur, les distributeurs pouvant être portés, semi-portés ou traînés
  2. Une trémie dans laquelle sont stockées les particules d'engrais
  3. Un système de distribution assurant la répartition de l'engrais sur le sol
- ☐ Pour rester constant, le débit d'épandage doit être proportionnel à l'avancement, grâce à un entraînement à partir d'une des roues du distributeur d'engrais
- 4. Un système de transfert et des organes de sortie sont présents sur certains types de distributeurs

## IV.5.2. Les différents types de distributeurs d'engrais

### 1. Distributeurs d'engrais centrifuges

- ✓ Ce sont les appareils les plus utilisés (pour l'épandage généralisé) en raison de leur faible coût, leur simplicité et leur bon rendement. En revanche ils sont assez délicats à régler précisément.
- ✓ Ils sont généralement portés (capacité de la trémie : 400 à 2000 litres) ou semi-portés (capacité de la trémie: jusqu'à 10 000 litres).

### 2. Distributeurs d'engrais pneumatiques

- ✓ Ils peuvent être portés, semi-portés (capacité de la trémie : 600 à 800 litres) ou traînés (capacité pouvant s'élever à 6000 litres).
- ✓ Ces appareils sont plus chers et plus délicat d'entretien, mais offrent une grande précision de dosage même sur de grandes largeurs et quelles que soient les qualités de l'engrais.

### 3. Distributeurs localisateurs d'engrais

- ✓ En adaptant des manchettes de localisation sur les diffuseurs, les distributeurs classiques pneumatiques peuvent être utilisés pour une fertilisation localisée.
- ✓ Ils apportent les engrais en surface, en bandes continues à quelques cm des plantes.
- ✓ Les distributeurs localisateurs peuvent également être utilisés combinés avec un semoir en ligne classique ou un semoir de précision.
- ✓ Dans ce cas, une ou deux trémies sont reliées au semoir et alimentent chaque ligne de semis par les tubes de descente.

## IV.6. Poudreuses

- ✓ Les poudreuses sont des machines plus simples que les pulvérisateurs mais l'emploi des poudres très fines, rend leur utilisation assez délicate.



## **IV.6.1. Constitution**

- ✓ Les poudreuses se composent en principe de :
  1. D'une trémie qui renferme la réserve de poudre avec couvercle.
  2. D'un agitateur
  3. D'une grille de sortie
  4. D'un ventilateur actionné par un levier, un essieu (pièce en fer qui passe à travers le moyeu de roues), ou encore par un moteur qui souffle la poudre vers un ou plusieurs tuyaux.

## **IV.6.2. Avantages de la poudreuse**

- ✓ La poudreuse présente les avantages suivants :
  - La réduction de la quantité de produit à transporter, 20 à 30 kg de poudre remplacent une tonne de bouillie.
  - La durée du travail est courte.

## **IV.6.3. Inconvénients de la poudreuse**

- ✓ La grande dispersion et le manque d'adhésion du produit nuisent à l'efficacité de traitement.

## IV.7. Atomiseurs

- ✓ Les atomiseurs mélangent l'air sous pression à l'aide des liquides sous pression.
- ✓ Ils ont l'avantage de nécessiter beaucoup moins de liquide que le pulvérisateur.



# **Chapitre V. MATERIELS DE RECOLTE DES CULTURES**

## V. 1. Introduction

- ✓ Les machines utilisées pour la récolte sont : la moissonneuse-batteuse, l'ensileuse, la faucheuse, la faneuse, l'andaineuse, la presse, l'enrubaneuse, l'arracheuse et la machine à vendanger.
- ✓ La récolte des grains (céréales, oléoprotéagineux) est réalisée avec une moissonneuse batteuse. Celles des racines et tubercules fait appel à différentes machines (arracheuse, effeuilleuse, décolleteuse..) pouvant être utilisées les unes après les autres ou simultanément sous forme combinées.
- ✓ Les machines destinées à récolter les fourrages sont également très variées et dépendent notamment du type récolte (voie sèche ou humide).

## V.2. Moissonneuse batteuse

- ✓ La moissonneuse-batteuse sert à récolter les céréales et les **oléoprotéagineux**.
- ✓ Elle réalise automatiquement et simultanément la coupe des inflorescences, le battage des grains et leur nettoyage pour les extraire des enveloppes.
- ✓
- ✓ Les moissonneuses-batteuses **sont automotrices** et la puissance du moteur varie généralement de 200 à plus de 300 CV.
- ✓ La **caractéristique essentielle** d'une moissonneuse-batteuse est son débit horaire (de 80 à 250 Q/h).

## V.2. Moissonneuse batteuse (suite)



## V.2.1. Constitution

- ✓ Une moissonneuse-batteuse comprend:
  - un système de coupe (barre de coupe, releveurs, diviseurs, rabatteur, vis d'alimentation)
  - un système de battage (bateur, contre-bateur, auge à pierres, tire-paille)
  - un système de séparation et de nettoyage (secoueurs, table à grains, caisson de Nettoyage) et un système de stockage (trémie).
- ✓ Equipements complémentaires:
  1. Broyeur de paille.
  2. Eparpilleur de paille
  3. Becs cueilleurs à maïs
  4. Equipement de récolte des oléo-protéagineux (diviseurs coupants et table de coupe rallongée pour le colza (limitant la perte de graines).

## V.3. Ensileuse

- ✓ Les ensileuses ou récolteuses-hacheuses-chargeuses sont utilisées pour la **récolte du fourrage vert** (graminées, légumineuses, maïs) ou pré-fané (graminées, légumineuses ayant préalablement été fauchés et conditionnés).
- ✓ Le **produit haché par l'ensileuse** est ensuite tassé et stocké à l'abri de l'air pour se transformer en ensilage par fermentation.



## V.3.1. Constitution

Elles se composent de :

- ✓ **Une tête de récolte** : constituée soit d'une barre de coupe (identique à celle des faucheuses) pour la coupe directe, d'un pick-up ramasseur (barres transversales à dents dont les extrémités sont liées à des disques en rotation) et de becs récolteurs de maïs (récolte de maïs-fourrage, plante-entière).
- ✓ **Un dispositif d'alimentation** : la circulation du fourrage de la tête de récolte vers le hacheur est assurée par 2 étages (l'un fixe, l'autre mobile) de rouleaux cannelés ou de chaînes à barrettes dont la vitesse de rotation influe sur la longueur des brins.
- ✓ **Un système de hachage** : à la sortie du système d'alimentation, le fourrage arrive au contact de tambours hacheurs (cylindres rotatifs transversaux munis de lames coupantes, frôlant un contre-couteau tangentiel).
- ✓ **Une soufflerie** : sur les machines à grand débit, un ventilateur provoque l'éjection du produit haché vers la trémie de stockage ou la remorque suiveuse.

## V.4. Faucheuse

- ✓ Les faucheuses réalisent la première étape de la récolte des fourrages : la **coupe**.
- ✓ Elles coupent les fourrages à la base de leurs tiges le plus nettement possible **et laissent le produit en vrac** sur le sol ou le plus souvent le disposent **en lignes appelées andains**.
- ✓ Les **organes de fauche** peuvent être placés en position avant, arrière voire latérale, et sont animés par la prise de force du tracteur.



## V.4.1. Constitution

La faucheuse se compose de :

1. **Système de coupe** : coupe par sectionnement (ou coupe avec appui) :

Elle est réalisée par une barre de coupe qui se compose :

- D'une lame de coupe ou scie: partie mobile munie de sections tranchantes et animée d'un mouvement rectiligne alternatif
- D'un porte-lame ou "barre support" : partie fixe munie de doigts dans laquelle vient coulisser la lame de coupe. Elle peut atteindre 3 à 4 m de large et glisse sur le sol grâce à deux sabots.
- Coupe par lacération ("coupe sans appui") : Cette coupe, moins franche que la coupe par sectionnement, est réalisée par des éléments rotatifs (tambours, ou assiettes) munis de couteaux.

2. **Système de conditionnement** : conditionner les tiges **signifie les écraser afin d'accélérer l'évaporation** de l'eau qu'elles contiennent (jusqu'à 80%) et qui est défavorable à leur bonne conservation.

- Les faucheuses sont le plus souvent équipées d'un dispositif conditionneur qui peut se composer soit de 2 rouleaux nervurés qui plient et éclatent les tiges.

## V.4.2. Différents types de faucheuses

- 1. Faucheuses alternatives** (faucheuses à barre de coupe) : elles effectuent **une coupe par sectionnement**. Bien qu'elles permettent une coupe franches, leur vitesse de travail est relativement lente (5 à 8 km/h) et elles ne sont pas adaptées aux terrains caillouteux ou mal nivelés.
- 2. Faucheuses rotatives à tambours** : elles possèdent des tambours en guise d'organes de coupe et réalisent une coupe par lacération (**broyage**). Ces machines ont supplantées les précédentes en raison de leur vitesse de travail élevée (12 à 15 km/h) sans bourrage.
- 3. Faucheuses-conditionneuses** : les faucheuses peuvent être équipées d'un système de conditionnement afin d'effectuer la coupe et le conditionnement en une seule opération.
- 4. Faucheuses-conditionneuses-andaineuses** : ces machines réalisent à la fois fauchage, conditionnement et andainage.
  - Les versions automotrices à coupe frontale dotées d'un rabatteur à peigne, sont utilisées sur les gros chantiers en raison de leur puissance permettant une coupe très large à grande vitesse.

## V.5. Faneuse

- ✓ Le fanage intervient juste après la coupe et complète l'action du conditionnement (réalisé par les faucheuses-conditionneuses) s'il a eu lieu.
- ✓ Il consiste à soulever délicatement et à étaler, à plusieurs reprises pendant quelques jours, le fourrage laissé au sol par la faucheuse.
- ✓ La capacité de séchage de la matière sous l'action du soleil et du vent s'en trouve alors renforcée (l'andainage est très souvent associé au fanage).



## V.5.1. Principe de fonctionnement

- ✓ Semi-portées ou traînées, les faneuses, matériels légers, n'exigent que peu de puissance de la prise de force du tracteur, et sont capables de travailler sur une largeur de 3 à 5 m.

## V5.2. Différents types de faneuses

**1. Faneuses rotatives** : désignées également sous l'appellation "**pirouettes**", ces faneuses **éparpillent le fourrage grâce à des rotors**, au nombre de 4 à 8, tournant en sens inverse deux à deux et portant des bras munis de dents flexibles presque verticales. Les rotors sont rattachés à un châssis pouvant être articulé avec des roues de jauges, de manière à épouser parfaitement les dénivellations du terrain.

**2. Faneuses-andaineuses** : ces machines fonctionnent selon les mêmes principes que ceux décrits ci-dessus, mais elles comportent seulement 2 ou 4 rotors dont les bras peuvent fonctionner en fanage ou en andainage: au cours d'un tour, les fourches sont d'abord verticales pour râteler le fourrage, puis s'inclinent libérant ainsi le fourrage qui se dispose en andain.

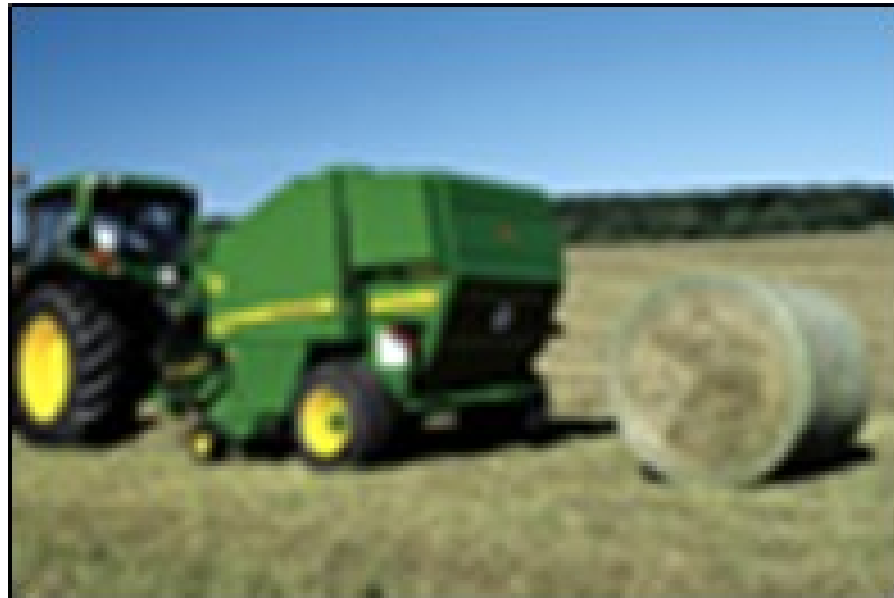
## V.6. Andaineuses

- ✓ Les andaineuses regroupent le fourrage sec, issu du fanage, sous forme de lignes continues, les andains.
- ✓ Ces appareils peuvent également être couplés à une faneuse et dans ces cas là interviennent juste après la coupe.



## V.7. Presse

- ✓ La récolte du fourrage se termine par le ramassage-pressage, consistant à ramasser le fourrage andainé et à le comprimer sous forme de balles compactes de formes parallélépipédique ou cylindrique, et de densités variables (basse:  $<100 \text{ kg/m}^3$ , moyenne: 100 à  $175 \text{ kg/m}^3$ , haute: 175 à  $250 \text{ kg/m}^3$ ).



## V.7.1. Constitution

✓ La presse comporte 4 systèmes :

1. **Un système de ramassage** : un ramasseur ou "pick-up" effectue le ramassage de l'andain grâce à des dents fixées sur des barres horizontales reliées à leurs extrémités à des disques en rotation.

2. **Un système d'alimentation** : des ameneurs, constitués de vis ou de fourches, ou encore des convoyeurs acheminent le fourrage jusqu'au système de compression. Parfois c'est directement le ramasseur qui se charge d'alimenter le système de compression.

3. **Un système de compression** : dans le cas des balles parallélépipédiques, un piston se déplace de manière cadencée dans un caisson de forme cubique et comprime le fourrage, ensuite sectionné à la dimension voulue par des couteaux.

4. **Un système de liage et d'expulsion** : des noueurs, localisés au niveau du dispositif de compression, assurent le liage des bottes avec une ficelle ou un filet. L'expulsion des balles cylindriques est réalisée par l'ouverture de la partie supérieure mobile de la chambre de compression.

## V.7.2. Différents types de presses

On distingue trois types de presses :

1. **Une ramasseuse-presse** à balles parallélépipédiques de moyenne densité : constituée d'un ramasseur, d'ameneurs, d'un piston et de noueurs. Cette machine génère des balles pesant entre 15 à 35 kg.
2. **Une ramasseuse-presse à balles cylindriques** : cette machine est pourvue d'un ramasseur, éventuellement d'un convoyeur, et d'une chambre d'enroulement, et fabrique des balles de 1 à 1,80 m de diamètre, pouvant atteindre 600 kg pour le foin ou 400 kg pour la paille.
3. **Des presses à balles parallélépipédiques de haute densité** : cette machine, utilisée pour le pressage de paille ou foin très sec, se compose d'un ramasseur, d'une chambre de pré-compression, d'une chambre de compression, d'un piston alternatif rectiligne, et de 4 à 6 noueurs à ficelles. Les presses à grosses balles sont capables de presser des balles de 2,4 m de long et 1,25 m de section.

## V.8. Enrubanneuse

- ✓ **L'enrubanneuse** sert à la confection de "balles de conserve", c'est à dire des balles enveloppées d'un emballage **limitant** la quantité d'air en contact avec le **fouillage** afin d'en améliorer la conservation.
- ✓ Les enrubanneuses peuvent être indépendantes ou associées à une presse.



## V.8.1. Principe de fonctionnement

- ✓ L'enrubanneuse bobine un film plastique étirable autour de la balle, recouverte ainsi par au moins 4 épaisseurs de film.
- ✓ Il existe :
  - des enrubanneuses à table rotative : la table supportant la balle tourne autour d'un axe vertical, tandis que les rouleaux d'entraînement font tourner cette balle autour d'un axe horizontal;
  - des enrubanneuses à bras rotatifs : la balle tourne autour d'un axe horizontal comme précédemment, mais la table est fixe et c'est un bras mobile autour de la balle qui l'enveloppe de film.

## V.9. Arracheuse de pommes de terre

- ✓ Le terme d'arracheuse est désigné pour parler de l'ensemble des outils de récolte des tubercules.
- ✓ Les chantiers de récolte nécessitent l'utilisation successive ou combinée de différentes machines effectuant arrachage, tamisage, effanage, triage et chargement.



## V.9.1. Les étapes de la récolte

### 1. Effanage préalable

Destruction des parties aériennes ou fanes peut être réalisé par voie **chimique** avec un pulvérisateur, par voie **mécanique** à l'aide d'un broyeur de fanes, ou encore par voie **thermique**.

### 2. Arrachage

Le système d'arrachage découpe les butes dans lesquelles se trouvent les tubercules et les dirige vers les organes de tamisage. La découpe et le soulèvement de la bute s'effectuent grâce à **des coutres circulaires** latéraux et un **soc** horizontal.

### 3. Tamisage

La bute soulevée par le **soc** est réceptionnée par des convoyeurs à chaînes et barreaux qui tamisent le mélange sous l'effet de secousses: les tubercules (et les mottes) sont retenues alors que les particules de terre retournent au niveau du sol.

### 4. Effanage final

L'effanage final peut être réalisé par un tapis roulant incliné, muni de doigts en caoutchouc, qui retient les fanes et les rejette au sol par l'arrière, alors que les tubercules descendent le tapis pour rejoindre le dispositif de triage.

### 5. Triage

Cette opération consiste à séparer les tubercules des mottes de terre, qui étant de densité et forme voisines n'ont pas pu être séparées par le tamisage. Le système de triage peut se présenter sous la forme :

- d'un déterreur composé de rangées de rouleaux, d'écartement réglable, entre lesquelles passent les mottes et les pierres,
- d'un tapis incliné à tétines : les mottes et les pierres se coinçant entre les doigts remontent le tapis en rotation et sont envoyés vers un couloir à déchets, alors que les tubercules, plus lourds, roulent jusqu'en bas du tapis.

## V.10. Autres machines de récolte des tubercules

### 1. Arracheuses simplifiées

Tractées (1 ou 2 rangs) ou automotrices (2 à 4 rangs), elles réalisent l'arrachage, le tamisage et le chargement, mais étant dépourvues de table de visite, elles nécessitent que le triage soit effectué dans un poste fixe de l'exploitation.

### 2. Arracheuses combinées

Tractées ou parfois portées (1 ou 2 rangs), elles assurent l'ensemble des opérations élémentaires (y compris le triage).

### 3. Arracheuses-aligneuses

Elles réalisent l'arrachage et le nettoyage, puis rejettent les tubercules en ligne sur le sol derrière elles.

### 4. Arracheuses-débardeuses

Elles arrachent, nettoient et chargent les tubercules dans une remorque avançant en parallèle.

### 5. Arracheuses-chargeuses

Elles arrachent, nettoient et stockent les tubercules dans une trémie devant être vidangée régulièrement.

### 6. Arracheuses automotrices

Tous les organes de récolte sont rassemblés sur un châssis automoteur, l'effaneuse étant positionné à l'avant du tracteur.

# **Chapitre VI. MATERIELS DE DRAINAGE ET D'IRRIGATION**

## VI. Outils de drainage

- ✓ Le drainage agricole consiste à évacuer l'excès d'eau d'une parcelle. On distingue d'une part les outils à l'origine de fossés à ciel ouvert et d'autre part les draineuses qui enterrent des drains en plastique.

## VI.1.1. Matériels pour la réalisation de fossés à ciel ouvert

### 1. Charrue fossoyeuse

- ✓ Utilisée pour creuser de petits fossés, cette charrue est pourvue de **lames ou disques** (qui effectuent une coupe verticale ou oblique du sol), un **soc** (pour découper le fond du fossé), des versoirs pour dégager la terre de chaque côté du fossé.



## 2. Cureuse-creuseuse de fossés

L'organe de travail peut être:

- ✓ une roue munie de couteaux,
- ✓ une vis d'Archimède également munie de lames coupantes,
- ✓ deux fraises circulaires obliques : on parle de "rigoleuse à fraise".
- ✓ Ce système peut être porté derrière le tracteur ou au bout d'un bras latéral articulé.



### 3. Pelle hydraulique

- ✓ Le fossé est creusé grâce à un godet excavateur actionné par un bras articulé.
- ✓ Le plus souvent, les engins utilisés sont automoteurs mais ils peuvent également être portés ou traînés par un tracteur.



## 4. Draineuses

✓ Il existe deux types de draineuses, la draineuse trancheuse et la draineuse sous-soleuse.

**a. Draineuse trancheuse** : Ces machines automotrices se composent d'un tracteur à chenilles, d'une chaîne trancheuse, d'un caisson de pose qui déroule le drain et d'une vis hélicoïdale transversale qui répartit la terre.

**b. Draineuse sous-soleuse** : La principale différence avec la machine décrite précédemment concerne l'outil de pose qui est un coute sous-soleur situé en amont du caisson de pose.

### 4.1. Réglages de la profondeur d'enfouissement des drains

✓ La pose de drains nécessite l'aide d'un système de guidage automatique par laser rotatif afin de suivre fidèlement l'étude topographique effectuée au préalable.

## 4. Draineuses



## VI.2. Ouvrages spéciaux utilisés dans les travaux d'assainissement

✓ Les ouvrages spéciaux utilisés dans les travaux d'assainissement sont :

**a. Regards et chambres de raccordement (boucle) :** les regards servent de point de jonction de 2 ou plusieurs collecteurs et permettent d'assurer le bon fonctionnement du réseau à intervalle régulier. Il faut régulièrement enlever les dépôts qui s'y forment. Les chambres de raccordement (boucle) ont la même construction que les regards, mais elles sont enterrées.

**b. Tranchées :** Elles empêchent l'obstruction des drains par les arbres ; on y place le plus souvent des tranchées remplies des pierres pour limiter la progression des racines.

## VI.3. Irrigation

- ✓ L'irrigation consiste à apporter artificiellement de l'eau aux cultures pour compenser l'insuffisance des précipitations naturelles et éviter des déficits en eau à des phases critiques du cycle de croissance.
- ✓ Elle peut aussi être utilisée pour lutter contre le gel, ou encore pour apporter simultanément l'eau et les éléments fertilisants (on parle dans ce cas d'irrigation fertilisante).
- ✓ **Plusieurs techniques d'irrigation ont été développées :**
  - Le système de surface : il consiste à envoyer l'eau au moyen des canaux ou fossés. Ici, on utilise les machines suivantes : charrue fossoyeuse, pelle hydraulique, Cureuse-Creuseuse des fossés).
  - Le système sous pression. L'eau est transportée et distribuée par un réseau des tuyaux sous pression. On utilise dans ce cas les draineuses.
  - Le système souterrain : L'eau est distribuée sous le sol par un système de canaux enterrés (on peut même mettre dans l'eau des engrais pour les plantes). Pour réaliser ces canaux enterrés, on utilise es draineuses.
- ✓ **Pour réaliser un canal, on doit connaître au moins certains éléments :**
  - La section transversale du canal : on appelle section transversale du canal, la section plane normale à la direction générale d'écoulement ;
  - La profondeur ou la hauteur d'eau ;
  - La surface mouillée : a b c d ;
  - Le périmètre mouillé ( $ab + bc + cd$ ) ;
  - Le rayon hydraulique  $r =$  ;
  - La largeur superficielle et la largeur du fond de canal.

## **Chapitre VII. MATERIELS DE TRANSPORT ET DE MANUTENTION**

## VII.1. Remorque

- ✓ Les remorques sont utilisées pour le transport des récoltes et des intrants agricoles.



## VII.1.1. Constitution

### ✓ La remorque est constituée de :

1. Anneau d'attelage : il permet de relier la remorque au tracteur en s'adaptant dans le crochet, le piton ou la chape d'attelage.
2. Timon : "flèche" métallique reliant l'anneau d'attelage et la remorque, et souvent montée avec des ressorts pour amortir les secousses
3. Châssis : C'est l'ossature métallique de la remorque
4. Caisse : Conteneur monté sur le châssis pour recevoir les matières à transporter. Elle est pourvue d'un hayon arrière et éventuellement de côté rabattable pour permettre le déchargement.
5. Freins : Commandés depuis le poste de conduite, ils assurent le ralentissement ou l'immobilisation de la remorque.

## VII.1.2. Types de remorques

✓ **On distingue trois types de remorque :**

1. Remorque traînée : munie de 2 essieux (remorque dite "à quatre roues"), elles sont essentiellement utilisées pour le transport des pailles et des fourrages.

2. Remorque semi-portée : couramment appelée "benne", elle possède deux ou trois essieux au niveau de la partie arrière du châssis. Certains modèles sont dotés d'un essieu-moteur, animé par la prise de force du tracteur, et sont utilisés pour des déplacements en terrains difficiles où la seule traction du tracteur ne suffit pas. Certains essieux peuvent enfin être directeurs afin de faciliter les manœuvres.

3. Remorque basculante

## VII.2. Chargeur

- ✓ Les chargeurs (frontaux, arrières ou automoteurs) sont des outils mobiles de manutention associés ou non à un tracteur.



## VII.2.1. Types de chargeurs

✓ **Il existe trois types de chargeurs :**

1. Chargeur frontal : il s'agit d'un châssis supportant deux bras, actionnés par des vérins hydrauliques, sur lesquels peuvent s'adapter différents équipements : godet, fourche à fumier, pince-balle, lève-palette.

2. chargeur arrière : moins fréquent que les chargeurs frontaux, il peut être porté par le relevage hydraulique, ou semi-porté sur un essieu.

3. Chargeur automoteur : Les chargeurs automoteurs se divisent en deux catégories :

- les chargeurs à bras fixes ou télescopiques,
- les chargeurs du type lève-palettes.

## **Chapitre VIII. ELECTRIFICATION DE LA FERME**

## VIII.1. Introduction

- ✓ La question de l'électrification des exploitations agricoles et d'approvisionnement en énergie constitue l'une des préoccupations majeures pour le développement du secteur agricole surtout en Afrique.
- ✓ Les sources d'énergie utilisables par l'homme sont nombreuses : elles lui fournissent chaleur, lumière et force. De tout temps, l'énergie a été essentielle à l'existence humaine et son emploi sous des formes diverses a continuellement transformé l'humanité.
- ✓ Certaines de ces sources s'épuisent, d'autres polluent notre environnement.
- ✓ Les énergies renouvelables sont celles dont les sources sont presque inépuisables. Certaines, comme le vent et l'eau, sont utilisées depuis des milliers d'années.
- ✓ D'autres doivent être exploitées de façon rationnelle si on ne veut pas qu'elles s'épuisent.
- ✓ Les différents types d'énergies renouvelables pouvant servir à l'électrification de la ferme sont l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et la biomasse.

## VIII.2. Energie solaire

- ✓ Le soleil est une étoile, qui émet un rayonnement sous forme d'ondes électromagnétiques.
- ✓ En fonction de la longueur de ces ondes, certaines parties du rayonnement sont visibles (lumière) ou non (infrarouges, ultraviolets...), et parviennent jusqu'à la terre (tous les rayonnements cités ci-avant) ou non (les rayons à ondes courtes comme les rayons X et gamma).
- ✓ Aujourd'hui, on sait utiliser la chaleur du soleil pour créer de l'électricité.
- ✓ Les panneaux solaires captent cette énergie et la transforment en électricité ou en chaleur.
- ✓ L'homme est capable de transformer le rayonnement solaire en deux formes d'énergie :
  - énergie thermique (chaleur),
  - énergie photovoltaïque (électricité).
- ✓ Le principe de l'énergie solaire photovoltaïque consiste à transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

## VIII.2.1. Différentes installations photovoltaïques

- ✓ Il existe deux types d'installations photovoltaïques, l'installation sur site isolé et l'installation raccordée au réseau de distribution public.

### 1. Installation sur site isolé

- ✓ L'énergie produite est directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins de la ferme ou de l'exploitation.
- ✓ Ici, l'usage de l'électricité est réservé aux applications telles que l'éclairage, l'informatique, l'électroménager, le petit outillage électrique, le moteur, les télécommunications, la signalisation terrestre (routière), maritime (phares et balises) et aérienne, le pompage (eau), l'électrification rurale, le mobilier urbains (horodateurs, abris bus, ...) et les utilisations grand public (montres, calculatrices),...

## 1. Installation sur site isolé (suite)

- ✓ Une installation photovoltaïque produit un courant électrique continu.
- ✓ **Elle est constituée en plus de panneaux par :**
  1. Le régulateur : il optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.
  2. L'onduleur : il transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteurs.
  3. Les batteries : elles sont chargées le jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.
  4. Des récepteurs spécifiques. Ces appareils sont particulièrement économes.
- ✓ Pour répondre aux différents besoins en puissance électrique, les cellules photovoltaïques sont regroupées en modules.
- ✓ Les installations utilisent le plus souvent des modules photovoltaïques d'une puissance de 50 ou 100 Wc (watts crête).

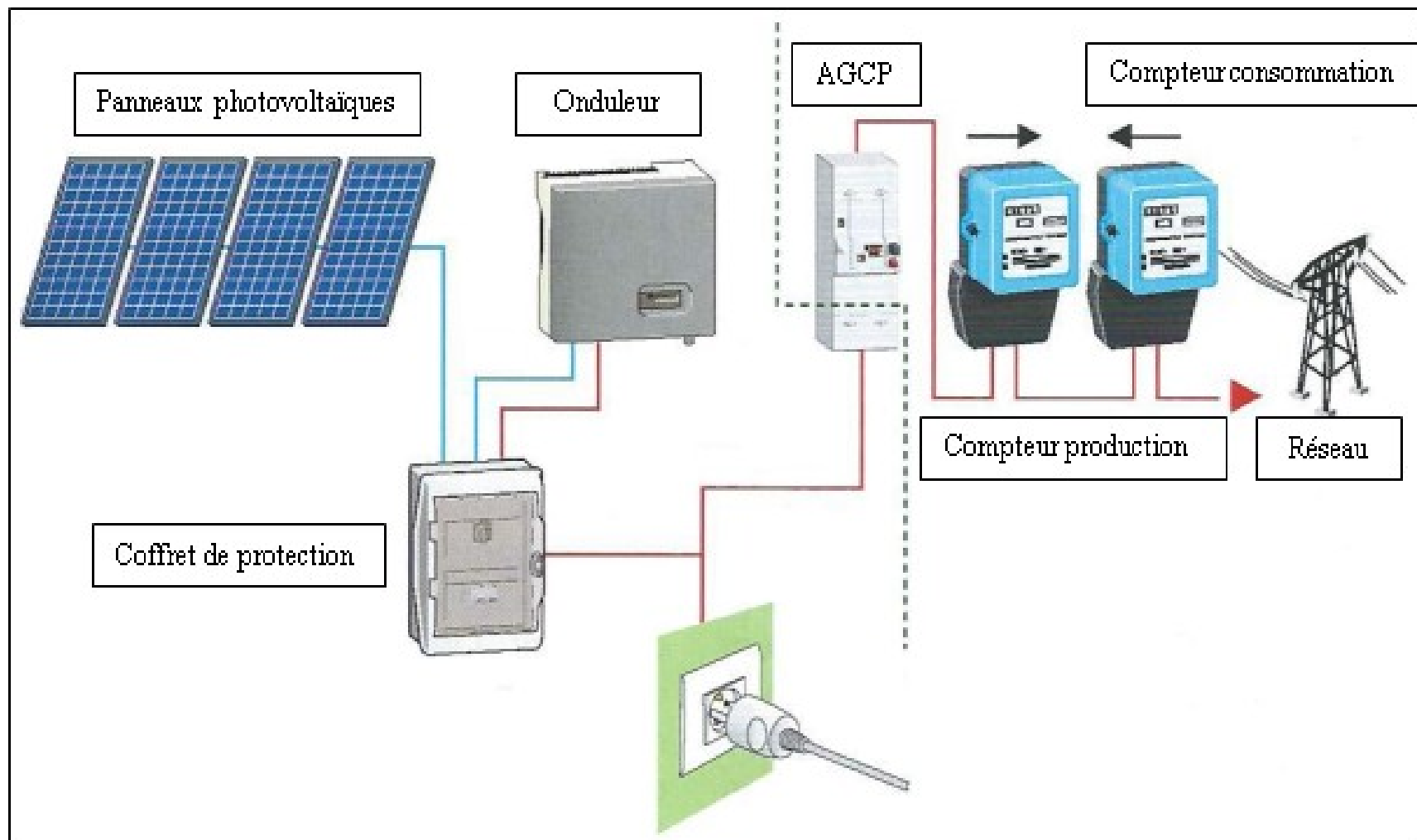
## 1. Installation sur site isolé (suite)

- ✓ La puissance d'une installation photovoltaïque s'exprime en Watt crête (Wc).
- ✓ Le watt-crête est l'unité de mesure énergétique des professionnels du photovoltaïque. 1 Wc représente la puissance électrique maximale produite pour une puissance solaire incidente de 1000 W/m<sup>2</sup>. On estime qu'un module de 1 m<sup>2</sup> produit 100 Wc.



## 2. Installation raccordée au réseau de distribution public

- ✓ Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée sur le réseau de distribution.



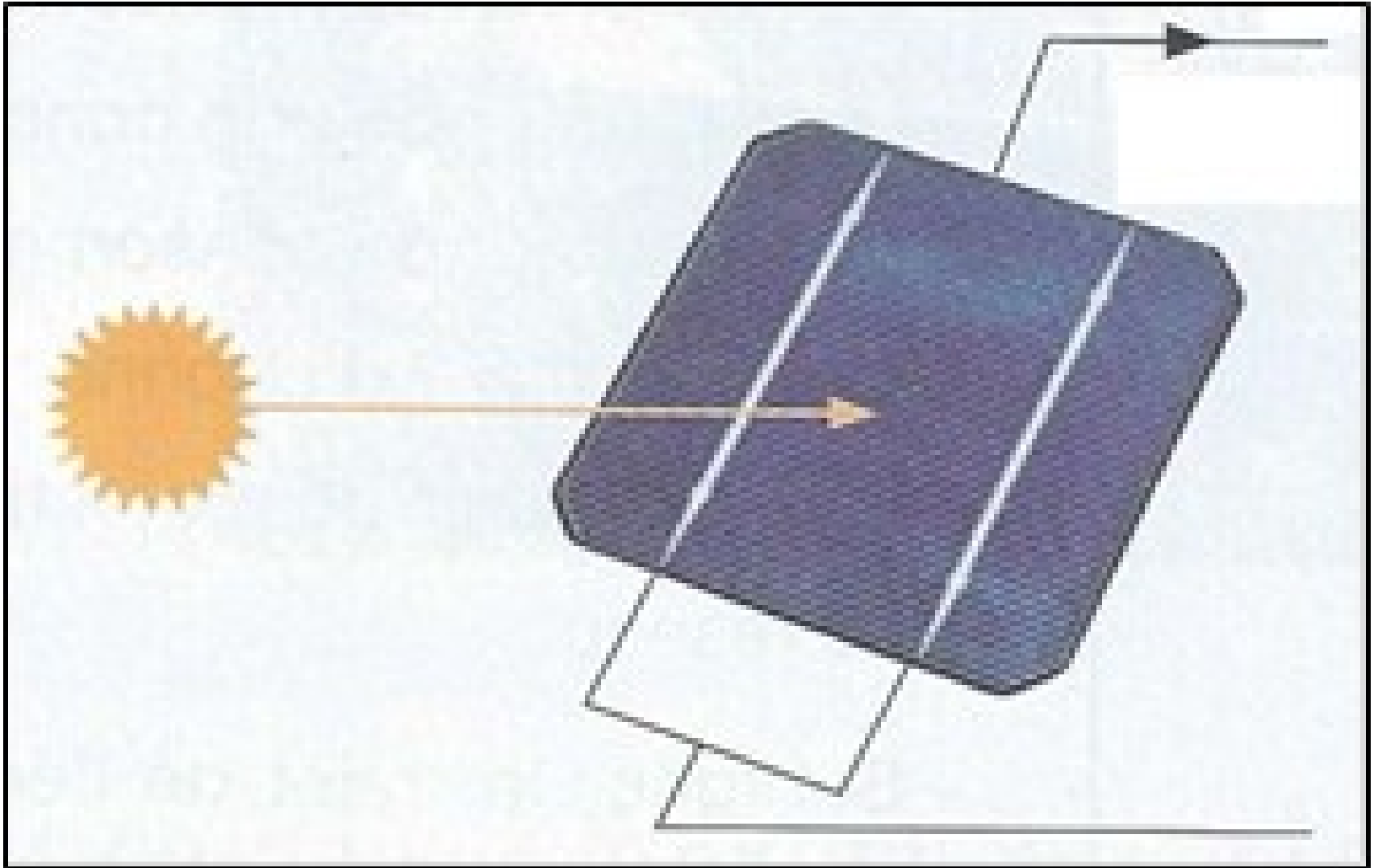
## VIII.2.2. Cellule photovoltaïque

- ✓ L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Becquerel.
- ✓ Un panneau solaire fonctionne par l'effet photovoltaïque c'est-à-dire par la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide.
- ✓ C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.
- ✓ La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques.
- ✓ Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V.
- ✓ La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) :
  - une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P),
  - une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).

## VIII.2.2. Cellule photovoltaïque (suite)

- ✓ Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques.
- ✓ Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N.
- ✓ Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée.
- ✓ C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.
- ✓ A la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium.
- ✓ Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion.
- ✓ C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

## VIII.3. Cellule photovoltaïque (suite)



## VIII.2.3. Module solaire ou photovoltaïque

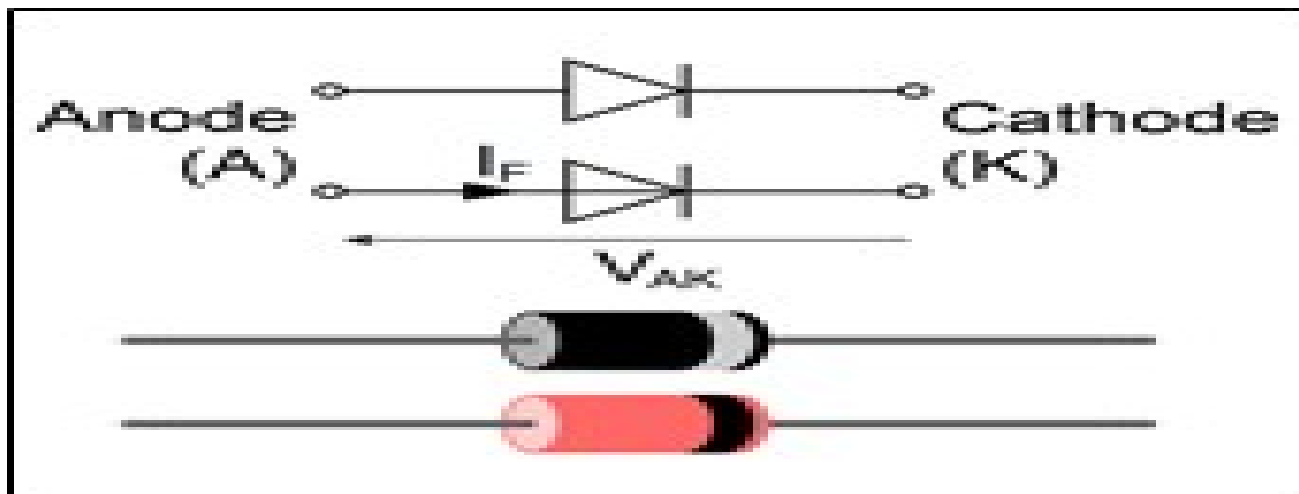
### 1. Association des cellules en série

- ✓ Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont généralement insuffisantes pour alimenter les équipements électriques.
- ✓ Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante : le module solaire ou panneau photovoltaïque. Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série de cellules permettant d'obtenir une tension de 12 volts.
- ✓ La puissance d'un panneau solaire est fonction de sa surface, c'est à dire du nombre de cellules photovoltaïques.
- ✓ La tension  $U = \text{nombre de cellules} \times 0,5 \text{ V}$ .
- ✓ **Exemple** : 6 cellules placées sur 3 rangées constituent un module solaire de 18 cellules en série. La tension fournie par ce module est de  $18 \times 0,5 = 9 \text{ V}$ .

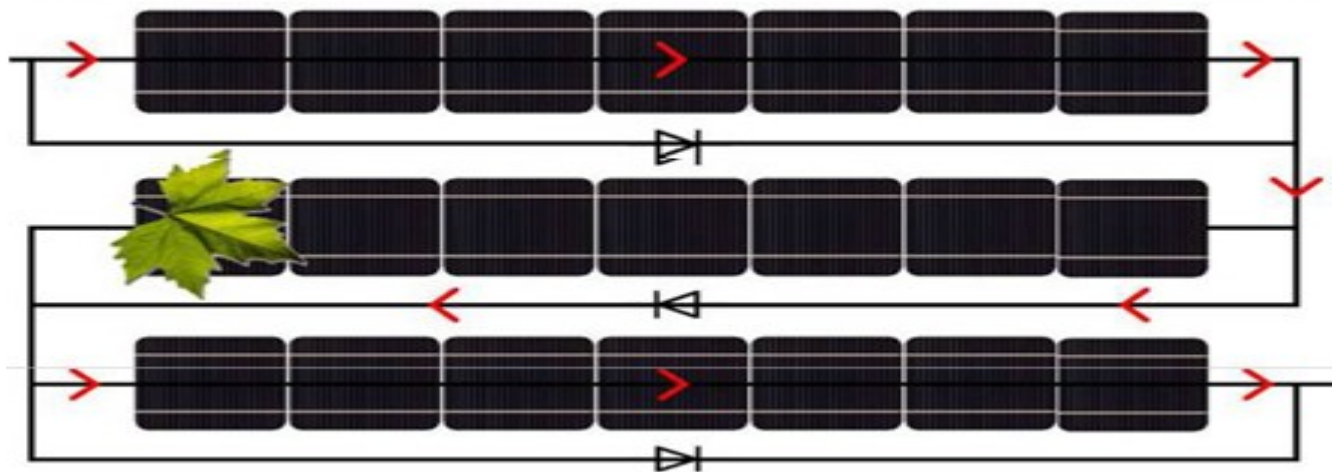
## 2. Diodes « by-pass »

- ✓ La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre.
- ✓ Elle va s'échauffer et risque de se détruire.
- ✓ En effet, une cellule "masquée" voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité "normale" produite par les autres modules.
- ✓ La tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe.
- ✓ C'est l'effet d'autopolarisation inverse.
- ✓ Une telle cellule est appelée "Hot spot".
- ✓ Pour supprimer ce problème et protéger la cellule « masquée », on place des diodes « by-pass » en anti-parallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées.
- ✓ Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes bypass).

## 2. Diodes « by-pass » (suite)



La deuxième rangée passe par la Diode By-Pass pour cause d'ombrage



### 3. Constitution d'un champ photovoltaïque

- ✓ Afin d'obtenir la tension nécessaire à l'onduleur, les panneaux sont connectés en série.
- ✓ Ils forment alors une chaîne de modules ou string.
- ✓ Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque.
- ✓ Il faut également installer des diodes ou des fusibles en série sur chaque chaîne de modules.
- ✓ Ces protections sont utiles pour éviter qu'en cas d'ombre sur une chaîne, elle se comporte comme un récepteur et que le courant y circule en sens inverse et l'endommage.

## 4. Onduleur

- ✓ L'onduleur permet de convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau électrique.
- ✓ Il calcule en permanence le point de fonctionnement (tension-courant) qui produit la puissance maximale à injecter au réseau : c'est la MPPT (Maximum Power Point Tracker).
- ✓ Ce fonctionnement dépend de l'ensoleillement et de la température.
- ✓ Un onduleur possède un rendement supérieur à 94 %. Son remplacement est à prévoir tous les 10 ans environ.



## 5. Technologie de capteurs

- ✓ Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.
- ✓ Il doit être purifié afin d'obtenir un silicium de qualité photovoltaïque. Il se présente alors sous la forme de barres de section ronde ou carrée appelée lingots.
- ✓ Les lingots sont ensuite découpés en wafers : fines plaques de quelques centaines de microns d'épaisseur.
- ✓ Ils sont ensuite enrichis en éléments dopants pour obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N.
- ✓ Des rubans de métal sont alors incrustés en surface et raccordés à des contacts pour constituer des cellules photovoltaïques.
- ✓ Les cellules les plus utilisées pour la production d'électricité sont les cellules silicium polycristallin grâce à leur bon rapport qualité-prix.
- ✓ Les constructeurs garantissent une durée de vie de 20 à 25 ans à 80 % de la puissance nominale.
- ✓ On estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner environs 2 à 3 ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

## VIII.3. Energie hydraulique

- ✓ L'homme a utilisé la force créée par les courants des rivières ou des chutes d'eau pour faire tourner la roue d'un moulin.
- ✓ Aujourd'hui, on utilise cette force pour faire tourner les turbines des centrales hydro-électriques qui produisent de l'électricité.
- ✓ La production de l'énergie hydraulique ressemble à celle de l'énergie éolienne. Cette fois c'est l'énergie mécanique provenant de l'eau qui est convertie en énergie électrique.
- ✓ Le déplacement de l'eau entraîne une turbine (qui tient ici lieu de rotor) et qui à son tour entraîne un alternateur. C'est ce dernier qui assure la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.
- ✓ L'hydroélectricité est la deuxième source d'énergie renouvelable utilisée dans le monde.
- ✓ L'énergie hydraulique utilise l'énergie des cours d'eau, des chutes, voire des marées, pour transformer la force du courant en électricité.
- ✓ On l'appelle aussi l'hydroélectricité.
- ✓ C'est un système largement utilisé par les grands barrages, qui peut être étendu à de nombreuses petites usines de quelques kW exploitant le potentiel d'une multitude de cours d'eau.

## VIII.3.1. Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

- ✓ Une centrale hydraulique est généralement composée de trois éléments :
  - un barrage (sauf pour les centrales au fil de l'eau),
  - un canal de dérivation,
  - la centrale elle-même.
- ✓ Le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grandes quantités d'eau s'accumulent alors, formant ainsi un lac de retenue. Le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique se présente comme suit :
  1. L'eau, par son poids et sa vitesse, actionne une turbine qui entraîne à son tour un générateur.
  2. L'énergie mécanique produite va être transformée par ce générateur en énergie électrique.
  3. L'électricité est dirigée vers le réseau électrique.
- ✓ L'électricité d'origine hydraulique provient de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux : en pratique il faut une tonne d'eau qui descend d'environ 400 m pour produire 1 kWh.
- ✓ 1 kWh = 1000 Watt consommés pendant une heure. 1 kWh d'énergie hydroélectrique émet 4 à 6 g de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

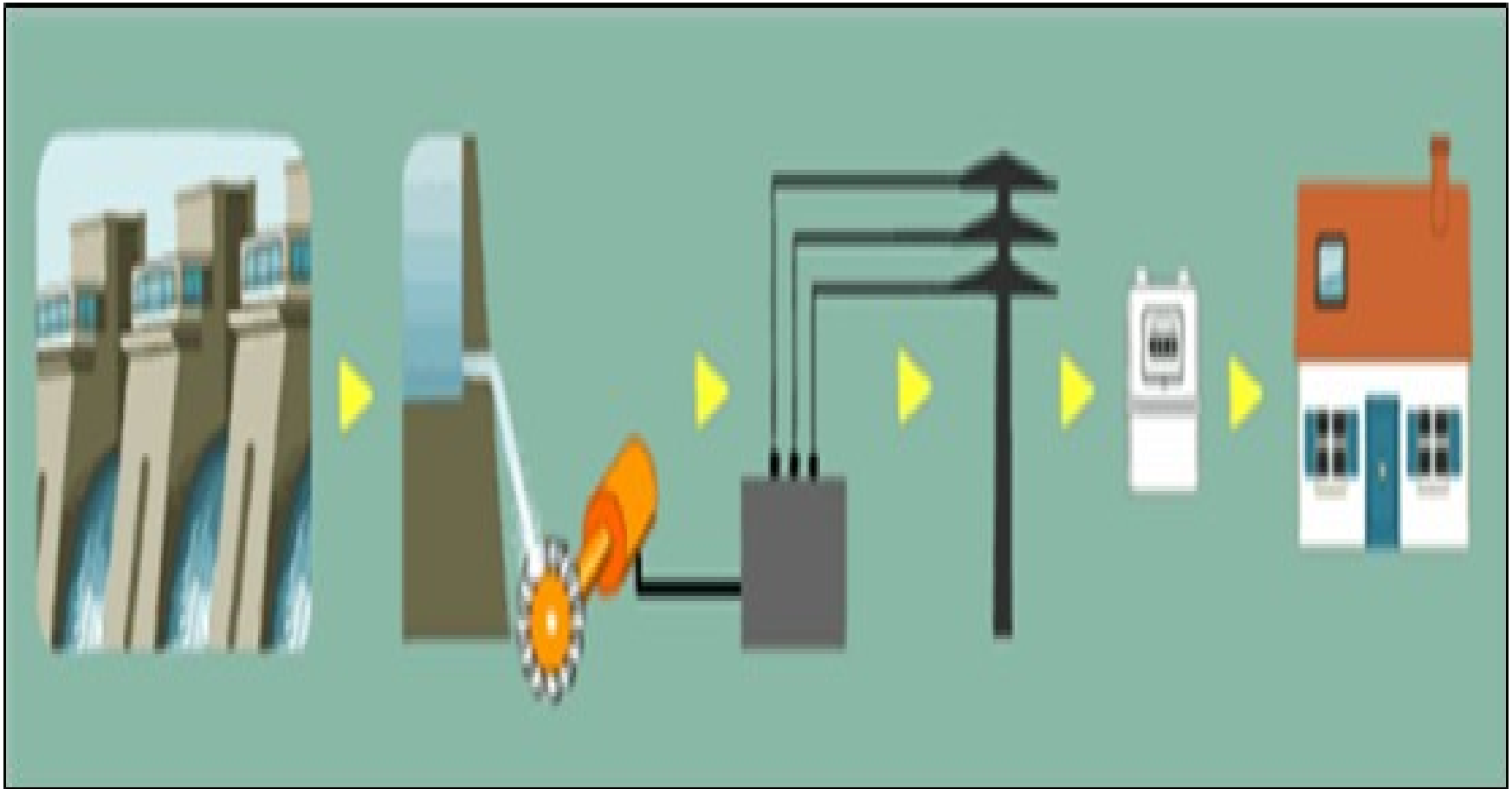
## VIII.3.1. Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

- ✓ Une centrale hydraulique est généralement composée de trois éléments :
  - un barrage (sauf pour les centrales au fil de l'eau),
  - un canal de dérivation,
  - la centrale elle-même.
- ✓ Le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grandes quantités d'eau s'accumulent alors, formant ainsi un lac de retenue. Le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique se présente comme suit :
  1. L'eau, par son poids et sa vitesse, actionne une turbine qui entraîne à son tour un générateur.
  2. L'énergie mécanique produite va être transformée par ce générateur en énergie électrique.
  3. L'électricité est dirigée vers le réseau électrique.
- ✓ L'électricité d'origine hydraulique provient de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux : en pratique il faut une tonne d'eau qui descend d'environ 400 m pour produire 1 kWh.
- ✓ 1 kWh = 1000 Watt consommés pendant une heure. 1 kWh d'énergie hydroélectrique émet 4 à 6 g de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

### VIII.3.1. Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique (suite)

- ✓ Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour entamer le cycle de production.
- ✓ L'eau s'écoule alors en contrebas, vers la centrale hydraulique, par un canal de dérivation.
- ✓ Il y a donc une forte chute d'eau entre deux niveaux différents. La force de l'eau entraîne la rotation de la turbine.
- ✓ La turbine entraîne l'alternateur, qui produit de l'électricité.
- ✓ Un transformateur élève alors la tension du courant produit par l'alternateur pour qu'elle puisse être plus facilement transportée dans les lignes à haute et très haute tension.
- ✓ L'électricité ainsi produite peut alors être injectée dans le réseau des lignes électriques.
- ✓ L'eau turbinée rejoint la rivière par le canal de fuite.

## VIII.3.1. Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique (suite)



## VIII.3.2. Différents types de centrales hydrauliques

Il existe deux grands types de centrales hydrauliques : la Petite Centrale Hydraulique (PCH) et la Grande Centrale Hydraulique (GCH).

### 1. Centrales au fil de l'eau (ou de basse chute)

Les Petites Centrales Hydrauliques sont très majoritairement des centrales au fil de l'eau. Cette technique est également utilisée pour capter l'énergie des grands fleuves. Elles ne disposent pas de réservoir de stockage et sont donc à même de produire de l'électricité qu'en fonction des apports en eau du moment. La production dépend donc du niveau des eaux et des précipitations. Ces centrales sont souvent situées en plaine sur des cours d'eau fort et à faibles fluctuations tout au long de l'année.

Les petites centrales hydrauliques, également appelées PCH, ont une puissance qui varie de quelques centaines de watts à une dizaine de mégawatts (MW). Elles sont mises en place sur les petites rivières et elles ne barrent pas le cours de l'eau.

## VIII.3.2. Différents types de centrales hydrauliques (suite)

- ✓ Il existe deux grands types de centrales hydrauliques :
  - la Petite Centrale Hydraulique (PCH) et
  - la Grande Centrale Hydraulique (GCH).

# 1. Centrales au fil de l'eau (ou de basse chute)

- ✓ Les Petites Centrales Hydrauliques sont très majoritairement des centrales au fil de l'eau.
- ✓ Cette technique est également utilisée pour capter l'énergie des grands fleuves.
- ✓ Elles ne disposent pas de réservoir de stockage et sont donc à même de produire de l'électricité qu'en fonction des apports en eau du moment.
- ✓ La production dépend donc du niveau des eaux et des précipitations.
- ✓ Ces centrales sont souvent situées en plaine sur des cours d'eau fort et à faibles fluctuations tout au long de l'année.
- ✓ Les petites centrales hydrauliques, également appelées PCH, ont une puissance qui varie de quelques centaines de watts à une dizaine de mégawatts (MW).
- ✓ Elles sont mises en place sur les petites rivières et elles ne barrent pas le cours de l'eau.

## 1. Centrales au fil de l'eau (ou de basse chute) (suite)

- ✓ En « haut chute » (grand dénivelé, faible débit), l'eau est captée par une prise d'eau sommaire.
- ✓ Elle est ensuite dirigée à travers une conduite vers une turbine qui se met à tourner grâce à l'écoulement de l'eau.
- ✓ Cette turbine entraîne le générateur électrique.
- ✓ L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries d'accumulateurs ou soit utilisée directement.
- ✓ En « basse chute » (faible dénivelé, haut débit), on ne passe plus par une conduite et l'eau est dérivée dans un canal sur lequel sera aménagée la petite centrale hydraulique.
- ✓ Ces unités peuvent permettre l'autoalimentation d'unités de production d'eau potable ou de centrales de traitement des eaux usées.
- ✓ Elles ne rejettent aucun déchet dans l'eau et n'émettent aucun gaz polluant.

## 2. Grandes Centrales Hydrauliques

### a. Centrales à réservoir (ou usines à lac, de moyenne ou haute chute)

- ✓ Grâce à des barrages, elles disposent d'une grande capacité de stockage de l'eau, pour adapter au plus juste la production à la demande d'électricité.
- ✓ Ces centrales sont souvent placées dans des massifs montagneux, sur des cours d'eau dont le débit est très variable en fonction des précipitations et des saisons.

### b. Stations de transfert d'énergie par pompage (Step)

- ✓ Ces stations fonctionnent en circuit fermé.
- ✓ Il s'agit d'une station composée de deux retenues d'eau :
  - l'eau du bassin supérieur situé en amont est turbinée aux heures de très forte consommation, puis recueillie dans une retenue en aval.
  - Aux heures de faible consommation, l'eau est pompée et remontée dans la retenue en amont. Le stock d'eau est donc renouvelé à l'infini.
- ✓ Les hauteurs de chute sont en général très élevées (800 à 1000 m).

## 2. Grandes Centrales Hydrauliques (suite)

### c. Centrales marémotrices

- ✓ Il existe une centrale marémotrice en France: il s'agit de l'usine de la Rance, proche de Saint-Malo (Ille-et-Vilaine).
- ✓ Cette centrale est la seule au monde qui produit de l'électricité de façon industrielle à partir des marées.
- ✓ Le principe de fonctionnement est le même que celui d'une centrale de basse chute mais c'est la force du courant créé par les marées qui entraîne la turbine et avec elle l'alternateur.

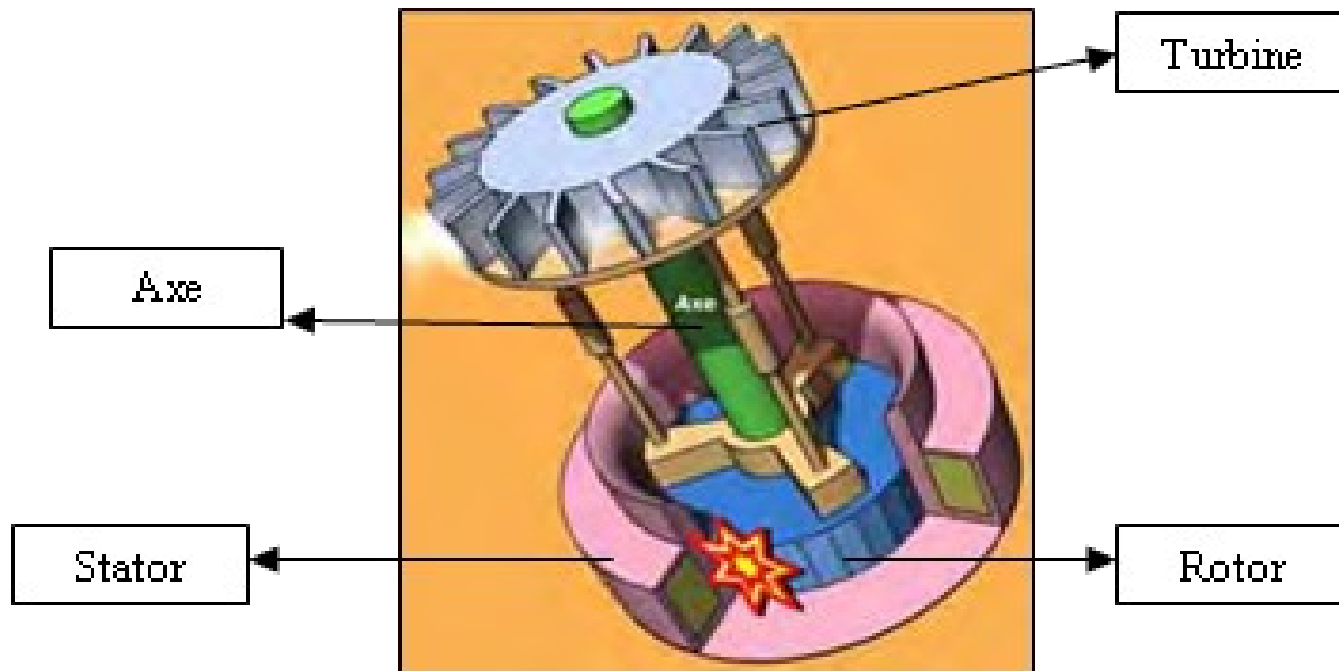
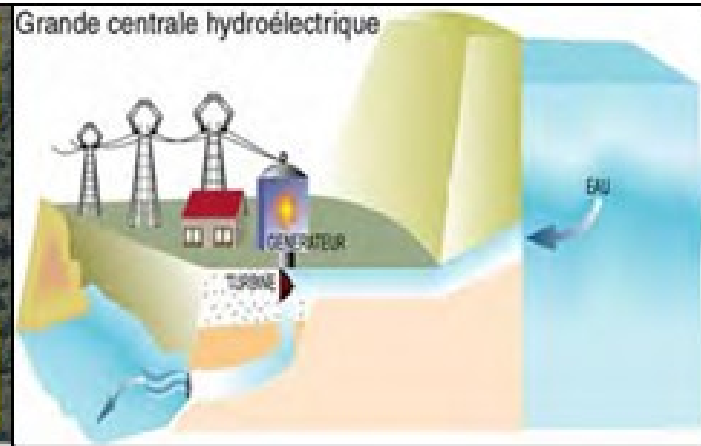
### d. Barrage

- ✓ Les barrages sont des grandes centrales hydroélectriques construites sur les grands fleuves ou en bas des montagnes.
- ✓ Son rôle est de retenir l'eau pour créer une chute d'eau artificielle.
- ✓ L'eau s'engouffre au bas du barrage, est canalisée dans des conduites forcées, gros tuyaux fixés sur la pente, au bout desquels se situent les turbines.

## 2. Grandes Centrales Hydrauliques (suite)

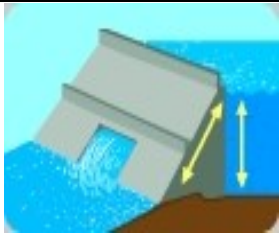
- ✓ La turbine mise en mouvement, ici par l'eau, fait tourner l'axe de l'alternateur sur lequel elle est fixée.
- ✓ L'alternateur qui produit donc le courant est constitué d'un axe, d'un aimant mobile appelé rotor, et d'une bobine fixe appelée stator.
- ✓ La turbine hydraulique couplée à un alternateur (ou générateur) convertit l'énergie cinétique de l'eau en mouvement en énergie électrique utilisable par les consommateurs.
- ✓ Le barrage permet de stocker une très grande quantité d'eau (la centrale peut ainsi continuer de produire de l'électricité même en période de basses eaux) mais elle permet aussi de créer de grandes chutes d'eau et donc de faire tourner plus facilement les turbines.

## 2. Grandes Centrales Hydrauliques (suite)

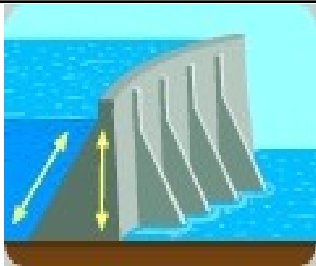


## Types de barrages :

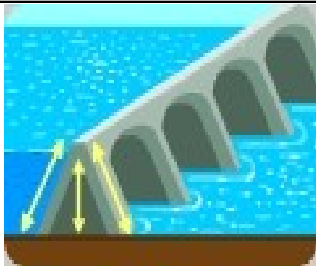
✓ Il existe 3 types de barrages



Les barrages poids : il s'agit des barrages les plus simples mais aussi les plus lourds (ils sont constitués de pierre ou de béton). Il est vertical par rapport à la retenue d'eau et incliné par rapport à la vallée.



**Les barrages voûtes** : constitués en béton et en forme de courbe, ils s'appuient en partie sur des parois rocheuses. Ils peuvent être soutenus par des contreforts. Il est incliné par rapport à la retenue et vertical par rapport à la vallée. On en trouve le plus souvent dans des vallées étroites.



**Les barrages à contreforts** : ce sont les barrages les plus légers car composés de contreforts triangulaires en béton, qui lui permettent de reporter la pression exercée par l'eau vers le sol.

### VIII.3.3. Puissance d'une centrale hydroélectrique

- ✓ Le choix de la taille d'une centrale hydraulique dépend essentiellement du débit du cours d'eau sur lequel on souhaite installer cette centrale.
- ✓ Pour calculer la puissance d'une installation, certaines données sont à connaître :
  - le débit d'eau (en litres),
  - la hauteur de chute d'eau (en mètres).
- ✓ **La formule suivante détermine la puissance maximale de l'installation hydraulique envisageable =  $k (=7) \times \text{débit en litres} \times \text{la hauteur de chute en m}$ .**
  - La puissance en kVa (sachant que  $1 \text{ kVa} = 0,8 \text{ kW}$ ).
  - Le coefficient  $k$  tient compte du poids spécifique de l'eau et des rendements des différentes machines.
- ✓ La puissance d'un générateur hydraulique, ou centrale hydroélectrique, dépend de deux facteurs : la hauteur de la chute d'eau (dénivelé) et le débit de l'eau. On arrive à deux solutions possibles : les petites centrales hydrauliques (dérivation de l'eau) et les barrages (rétention de l'eau).

## VIII.4. Energie éolienne

- ✓ Le vent est également source d'énergie
- ✓ Dans l'atmosphère, l'air se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression.
- ✓ Le vent est cet air en mouvement.
- ✓ Les premiers savants à avoir pu expliquer l'origine du vent sont Evangelista Torricelli (1608-1647) et Blaise Pascal (1623-1662).
- ✓ Le premier mit en évidence la pression atmosphérique de l'air grâce à son baromètre tandis que le second décrit le vent comme de l'air en mouvement, un courant d'air plus ou moins puissant, et il expliqua aussi la diminution de pression avec l'altitude.
- ✓ Les premières éoliennes apparaissent au XIXe siècle aux États-Unis et sont utilisées pour le pompage de l'eau.

## VIII.4.1. Connaissance de la direction et de la vitesse du vent

- ✓ Depuis la Grèce Antique, on peut déterminer la direction du vent grâce à une girouette.
- ✓ Si la girouette indique le Nord, cela signifie que le vent va du Nord vers le Sud. On parle alors de vent du Nord.
- ✓ Pour mesurer la vitesse du vent, on utilise un anémomètre. Il s'agit d'un petit instrument composé de coupelles tournant autour d'un axe grâce à la force du vent.
- ✓ La vitesse de rotation des coupelles permet de déterminer la vitesse du vent grâce à une formule mathématique qui dépend de différents paramètres.
- ✓ Ainsi, nous avons :  $V_{\text{vent}} = 2\pi F(N) R.N$ . R est le rayon moyen des bras (de l'axe de rotation jusqu'au centre des coupelles), N, le nombre de tours par seconde [1/s] et F(N), une fonction d'étalonnage.
- ✓ La vitesse du vent se mesure en km/h, en m/s ou en nœud.
- ✓ Un nœud équivaut à 1,852 km/h. La vitesse du vent ainsi que sa direction sont deux paramètres essentiels si l'on veut exploiter le vent comme source d'énergie.

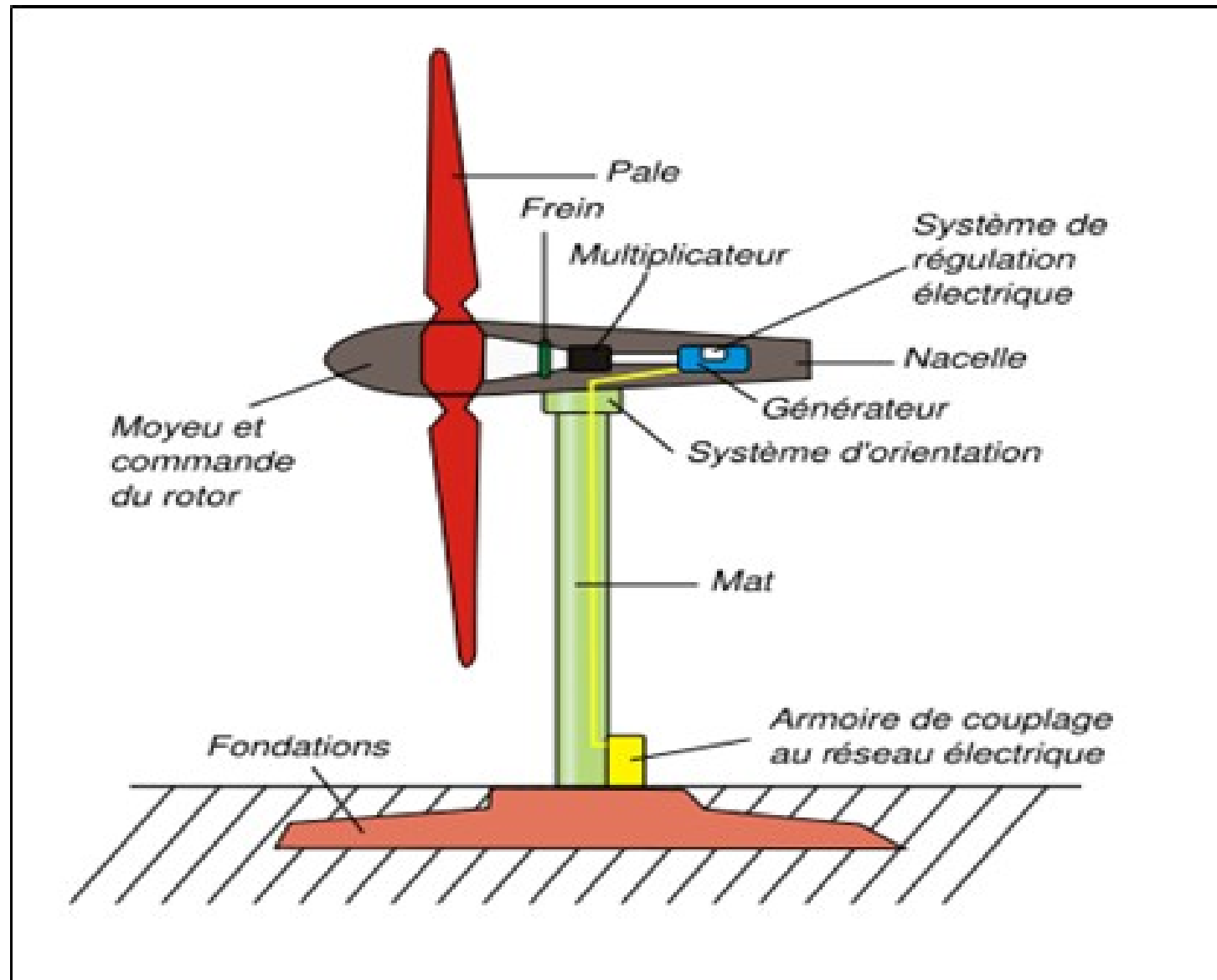
## VIII.4.2. Types d'éoliennes

- ✓ Il existe deux grandes catégories d'éoliennes :
  - les éoliennes de faible puissance (quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts) et
  - les grandes éoliennes de fortes puissances raccordées aux réseaux nationaux, dont les plus grandes atteignent des puissances de 2500 kW.
- ✓ Une seule éolienne peut servir à alimenter une maison, un village.
- ✓ Cependant, elles sont souvent regroupées dans un endroit bien exposé au vent, près d'une ligne à haute tension, parfois même dans la mer (Offshore), et forment ce que l'on nomme un parc d'éoliennes.
- ✓ Les petites éoliennes sont placées à environ 18 mètres de hauteur (au-dessus des poteaux électriques), tandis que les grandes éoliennes s'élèveront à 30 mètres de hauteur (voir 50 mètres pour les plus grandes).
- ✓ Les éoliennes modernes sont dites à axe horizontal, leur axe de transmission est parallèle au sol.
- ✓ Les éoliennes à axe vertical sont beaucoup plus rares.

### VIII.4.3. Composants d'une éolienne

- ✓ **Une éolienne se compose des principaux éléments suivants :**
  - le mât dont la hauteur va de 20 à plus de 100 m
  - la nacelle qui contient le moteur et les différents composants mécaniques
  - Le rotor comprenant le nez et les pales d'un diamètre de 3 à 90 m
  
- ✓ On compte généralement 3 pales sur les éoliennes modernes.

## VIII.4.4. Composants d'une éolienne



## VIII.4.5. Fonctionnement d'une éolienne

- ✓ **Le fonctionnement d'une éolienne se présente comme suit :**
  1. Le vent fait tourner les pales de l'éolienne qui elles-mêmes font tourner le générateur.
  2. L'énergie mécanique produite va être transformée par ce générateur en énergie électrique. C'est le même principe que pour une dynamo ou un alternateur de voiture.
  3. L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou des batteries de stockage.
- ✓ Grâce à un multiplicateur, la vitesse de rotation des pales (entre 15 et 30 tours par minute) est multipliée afin de faire tourner le générateur entre 1000 et 2000 tours par minute. C'est le principe des engrenages.
- ✓ Les pales de l'éolienne font tourner un grand engrenage (avec beaucoup de dents) qui est connecté à un petit engrenage (ayant environ 70 fois moins de dents) mais qui tourne alors 70 fois plus vite. Cet engrenage est raccordé au générateur.
- ✓ Pour obtenir un rendement optimal, la vitesse du vent doit être d'environ 50 km/h. Au delà de 90 km/h, les éoliennes ne peuvent plus tourner car cela endommagerait trop vite les mécanismes.
- ✓ Pour fonctionner, une éolienne a besoin d'un vent d'au moins 10 km/h.
- ✓ L'implantation des éoliennes doit donc tenir compte de la vitesse moyenne du vent autant que de sa direction afin d'avoir le meilleur rendement possible.
- ✓ La capacité d'une éolienne à produire de l'énergie s'appelle la puissance et s'exprime en watts. La puissance des éoliennes varie également suivant leur taille. Actuellement, il existe des petites éoliennes permettant de générer 400 W et des grosses éoliennes industrielles pouvant avoir une puissance jusqu'à 5 MW (=5000000 W).

## VIII.5. Matières organiques végétales ou animales

- ✓ Les matières organiques sont utilisées pour produire de la chaleur. On appelle cette énergie la biomasse.
- ✓ La combustion du bois est la plus ancienne des utilisations de cette énergie : dès la préhistoire, les hommes ont appris à utiliser le feu pour s'éclairer, se chauffer et cuire les aliments.
- ✓ La biomasse est le produit de la photosynthèse des végétaux. Cette réaction photochimique transforme et stocke l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique.
- ✓ Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, le terme biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (biocarburant ou agrocarburant).
- ✓ La biomasse est une véritable réserve d'énergie, captée à partir du soleil grâce à la photosynthèse.
- ✓ L'énergie tirée de la biomasse est considérée comme une énergie renouvelable et soutenable tant qu'il n'y a pas surexploitation de la ressource, mise en péril de la fertilité du sol, et tant qu'il n'y a pas de compétition excessive d'usages (des terres arables, de l'eau), ni d'impacts excessifs sur la biodiversité, etc.
- ✓ C'est la première source d'énergie exploitée pendant des millénaires jusqu'à la découverte du charbon et des autres énergies fossiles.
- ✓ A la fin du XIXe siècle, à la naissance de l'industrie automobile, les motoristes se tournaient, entre autres, vers ce qu'on n'appelait pas encore des biocarburants : Nikolaus Otto, inventeur du moteur à combustion interne, avait conçu celui-ci pour fonctionner avec de l'éthanol.
- ✓ Rudolf Diesel, inventeur du moteur portant son nom, faisait tourner ses machines à l'huile d'arachide.

## VIII.5.1. Valorisation de la biomasse

### 1 Sous forme de chaleur: la bioénergie

- ✓ La valorisation énergétique de la biomasse se fait essentiellement par combustion.
- ✓ Une partie de la chaleur produite peut être transformée en une énergie mécanique (travail) par un moteur.
- ✓ Si le moteur est couplé à une génératrice électrique, il y a production d'électricité.

#### Cas du bois

- ✓ L'énergie chimique du bois est libérée par combustion sous forme de chaleur et utilisée directement pour le chauffage ou pour produire de l'électricité.
- ✓ Le bois comme source de chauffage est utilisé à toutes les échelles sur la planète.

## **Menaces**

- ✓ Les inconvénients de cette valorisation sont les coûts et impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque, ainsi que le risque de contribution à la déforestation ou à une surexploitation des forêts ou encore à un accaparement des terres pour y délocaliser une production de biocarburant pour les pays riches.
- ✓ Les problèmes de pollution atmosphérique induits par la combustion mal maîtrisée du bois ne sont pas anodins : sous certaines conditions, les poêles à bois libèrent des dioxines dont certaines sont toxiques ou encore des furanes.

## **Réduction des risques**

- ✓ Si les surfaces dévolues aux forêts restent constantes, à proximité des lieux d'utilisation, et que la quantité prélevée est plus ou moins remplacée, alors l'utilisation n'aggrave pas la déforestation et a peu d'impact sur l'effet de serre.
- ✓ En effet, lors de la combustion du bois, du CO<sub>2</sub> est dégagé et de l'oxygène absorbé tandis que lors de la photosynthèse, le CO<sub>2</sub> est absorbé par les végétaux qui l'utilisent pour construire leur composants (racines, feuilles...) et ce processus libère de l'oxygène dans l'atmosphère.

## 2 Conversion biologique de la biomasse

### Biogaz

- ✓ On appelle biogaz les effluents gazeux, méthane essentiellement, issus de la fermentation de matières organiques contenues dans les décharges, les stations d'épuration, etc.
- ✓ Le méthane est un puissant gaz à effet de serre et sa captation est de toute façon hautement souhaitable même si sa combustion produit du gaz carbonique.
- ✓ Il peut être considéré comme une ressource énergétique, souvent via sa combustion pour produire de la vapeur et de l'électricité.
- ✓ On l'utilise également dans des moteurs à gaz. Ainsi, les bus urbains de Lille et Stockholm roulent en majorité avec du biogaz. Combustion du méthane ( $\text{CH}_4$ ) :  $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ .

### Compost

- ✓ Le compostage est un procédé biologique simple et naturel par lequel la matière organique (résidus verts ou résidus de jardin, résidus de cuisine et restes de table) se décompose sous l'action des micro-organismes.
- ✓ Mais attention, le compostage libère de grandes quantités de méthane, gaz dont le pouvoir réchauffant est 21 fois plus élevé que celui du  $\text{CO}_2$ .
- ✓ La décomposition des matières organiques produit aussi du  $\text{CO}_2$ , mais il s'agit en quelque sorte de restitution du gaz qui a été capté durant le développement de la plante.
- ✓ La façon de composter affecte la production plus ou moins grande de méthane ou de gaz carbonique : en remuant souvent ou en procédant par petits tas, on favorise la production de  $\text{CO}_2$ .

### 3. Biocarburants

- ✓ Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse. Il existe actuellement deux filières principales :
  - filière huile et dérivés, comme le biodiesel (ou biogazole) ;
  - filière alcool, à partir de sucres, d'amidon, de cellulose ou de lignine hydrolysée.

NB. L'installation d'une Unité d'électrification dans une ferme doit nécessiter l'implication d'un électricien.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anonyme, 2002. Memento de l'agronome, Ministère des Affaires étrangères, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), Groupe de recherche et d'échanges technologiques (GRET), 1698 p.

Bishop C., 1997. Guide pratique pour la préparation d'une stratégie de mécanisation agricole, AGSE, FAO.

Delenclos S., 2013. Les énergies renouvelables, 98 p.

Gifford R.C., 1993. Génie agricole et développement : élaboration d'une stratégie en matière de mécanisation, Vol. I - Concept et principes, FAO Bulletin des services agricoles 99/1, Rome, Italie.

Houmy K. 2008. Guide de formulation d'une stratégie de mécanisation agricole : Etude de cas: stratégie nationale de la mécanisation agricole au Mali. Organisation des Nations Unies Pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, 65 p.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable de la France, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2005. Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens, France, 125 p.

**Merci pour votre attention**  
**Pr JDD MINENGU**