

Pompage Solaire Modélisation

Michel Villoz
michel.villoz@dynatex.ch

Sommaire

- Technologies et types de pompes
- Modélisation des pompes – Objectifs et contraintes
- Modélisation des pompes – Résultats
- Systèmes de pompage - Dimensionnement
- Configurations: couplage direct et convertisseurs
- Performances comparées
- Conclusions

Technologies de pompes

2 classes de technologies:

Pompes centrifuges

- Pompes centrifuges multi-étage

Hauts débits et faibles pressions

⇒ Augmente pressions

Pompes à déplacement

Hautes pressions

- Pompes à piston

- Pompes à membrane (ou diaphragme)

- Cavité progressive (vis)

- Palettes rotatives

2 types de moteurs: AC ou DC

2 mécaniques selon l'utilisation:

➤ Pompes de **surface** (aspiration ou refoulement)

➤ Pompes **immergées** (pour puits)

3

mvilloz@dynatex.ch

Modèle de pompe

Pour effectuer des simulations :

- il faut un **modèle** pour décrire le comportement de la pompe
- doit décrire le comportement **hydraulique** (débit / pression)
- doit décrire le comportement **électrique** (puissance, courant, tension)
- en valeurs instantanées (simulation horaire)
- dans **toutes les conditions** d'utilisation d'un système PV
(variations d'ensoleillement, variations de pression)

Pour être utilisable dans un logiciel:

- Doit pouvoir être établi selon les données des fabricants
- Doit couvrir toutes les technologies
- Intégrer les limitations du fabricant
- Doit être "robuste" (pas trop sensible aux paramètres)

4

mvilloz@dynatex.ch

Modèle phénoménologique

- Une pompe est constituée de 2 éléments: le moteur et la pompe
- Toutes les modélisations publiées tentent de décrire le comportement détaillé du moteur et de la pompe, avec paramètres intrinsèques, en général pour une pompe donnée.

Pour PVsyst:

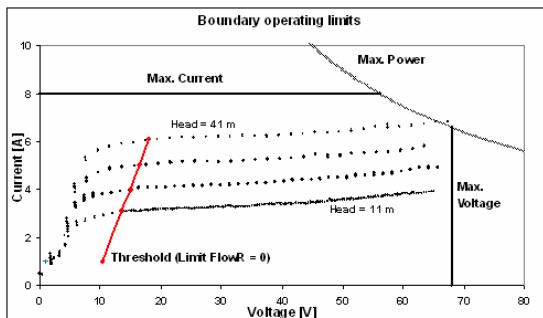
- développé un modèle **phénoménologique** pour l'ensemble moteur-pompe,
- calé sur les **performances** annoncées par les fabricants
- 4 Variables:
 - électriques: Tension, **Courant**, => Puissance: **Up, Ip (ou Pp)**
 - hydrauliques: Pression (**Head**) et Débit (**Flowrate**) **H, Fr**
- La "caractéristique" est une fonction représentant les points de fonctionnement: $F(Up, Ip, H, Fr) = 0$
- Cette fonction doit passer par les points de fonctionnement spécifiés par le constructeur.

5

mvilloz@dynatex.ch

Domaine de validité

- Cette fonction F est définie sur tout le **domaine des conditions de fonctionnement**, limité par:
- Tension maximale, Courant maximal, Puissance maximale
- Pression maximale (\Leftrightarrow Ip ou Pp max)
- **Seuil** de Pp ou Up ou Ip pour démarrage (Débit > 0)



Exemple:
pompe solaire à
membrane
(Watermax BU)

6

mvilloz@dynatex.ch

Etablissement du modèle

Le problème est de déterminer cette fonction F :

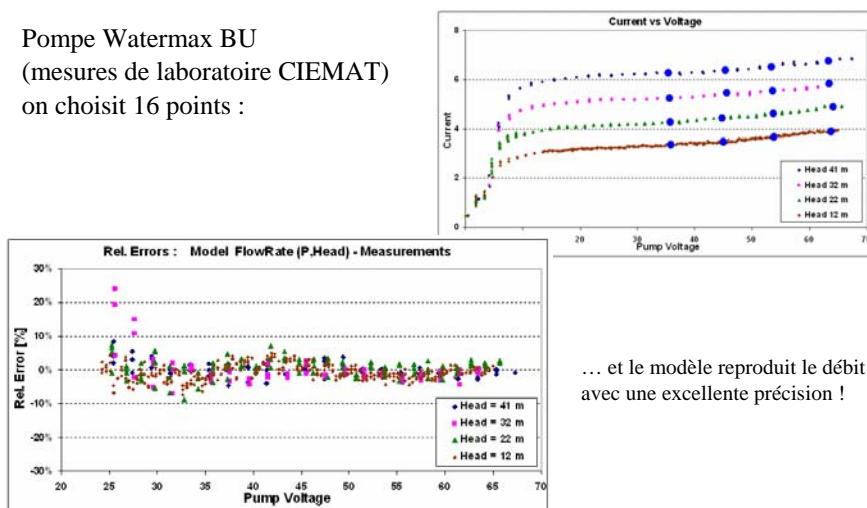
- Sur quelques points de fonctionnement (performances annoncées ou mesures de laboratoire)
- Si les points sont suffisamment bien distribués: la surface F est bien définie, modèle précis
- Si les points sont insuffisants: on fait des hypothèses physiques => perte de précision
- Chaque constructeur donne son propre ensemble de points de fonctionnement => 4 manières de caler le modèle
- Modèle à compléter par certaines informations:
Ex: Courant de démarrage (Booster)
- Résultats attendus:
fonctions de base:
 $Ip = f(Up, H)$
 $Fr = f(Pp, H)$
 $Pp = f(Fr, H)$

7

mvilloz@dynatex.ch

Précision du modèle

Pompe Watermax BU
(mesures de laboratoire CIEMAT)
on choisit 16 points :



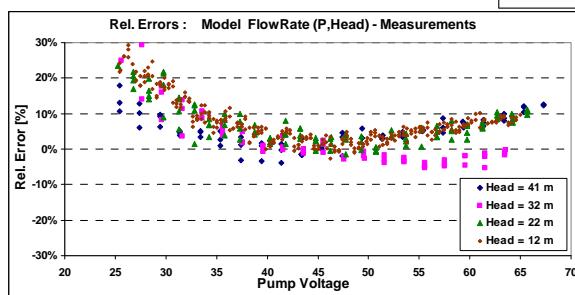
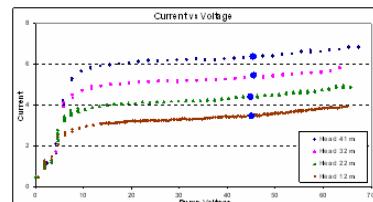
8

mvilloz@dynatex.ch

Précision, modèle restreint

Pompe Watermax BU
Si on n'a que 4 points à disposition :

=> Hypothèse additionnelle:
efficacité constante selon la tension



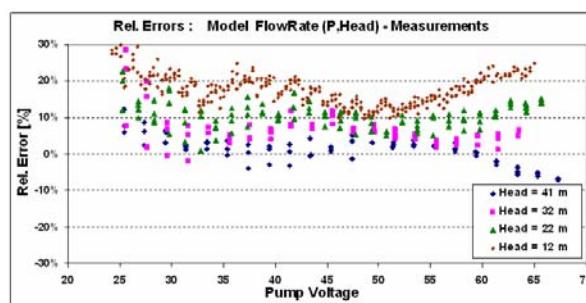
... la réponse du modèle est dégradée hors du domaine spécifié

9

mvilloz@dynatex.ch

Précision, selon fabricant

Avec les spécifications fabricant (les mêmes 16 points):



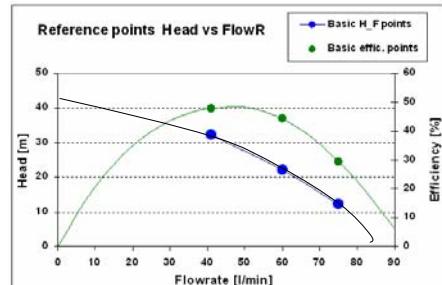
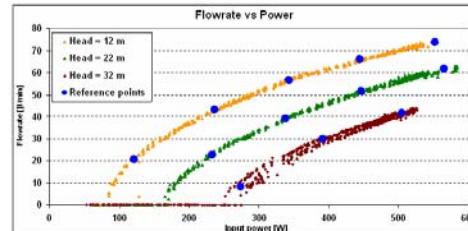
⇒ Ne pas confondre
Précision du modèle et Précision des paramètres !!!

10

mvilloz@dynatex.ch

Pompes centrifuges

Pompes centrifuges **solaires**:
Souvent spécifiées par des courbes $FR = f(P_p)$ pour différents H



Pompes centrifuges **standard** (non solaires):
Spécifiée par $FR = f(H)$ pour une **vitesse ω** donnée (tension et fréq. réseau)

11

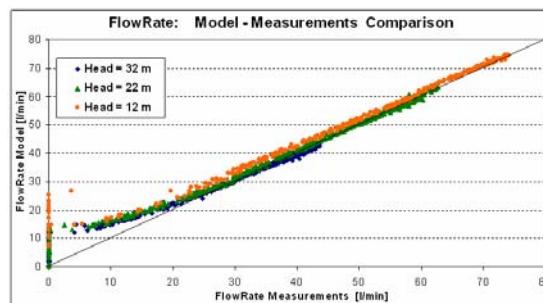
mvilloz@dynatex.ch

Modèle pompe centrifuge

Pour les pompes **centrifuges**: on a un modèle appelé "Lois de similarité":

$$FL_1/FL_0 = w_1/w_0, \quad P_1/P_0 = (w_1/w_0)^2, \quad H_1/H_0 = (w_1/w_0)^3$$

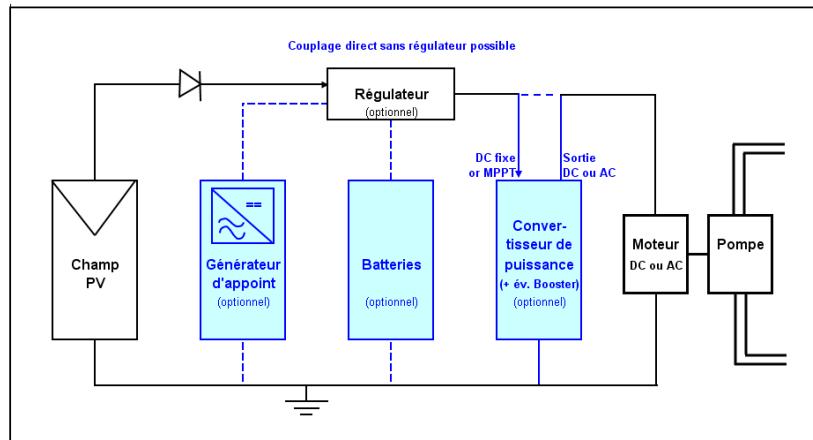
L'application de ce modèle (sur **3 points** seulement) donne de très bons résultats :



12

mvilloz@dynatex.ch

Système de pompage



Système de pompage solaire: **nombreuses variantes possibles !**

13

mvilloz@dynatex.ch

Approche du problème

Fonctionnement d'un système de pompage est hautement non-linéaire
⇒ les évaluations ne sont pas intuitives !

Dimensionnement basé sur :

- Définition des besoins (volumes - constants ou saisonniers)
- Détermination de la pression (peut varier en fonctionnement)
- Energie solaire disponible (météo)

Les paramètres à déterminer :

- La puissance du champ PV nécessaire
- La pompe (débit et pression ⇒ puissance)
- Volume du réservoir de stockage éventuel
- Configuration du système (régulateur, convertisseur de puissance)
- Besoin de batteries ou générateur d'appoint

PVsyst propose un outil de pré-dimensionnement pour ces évaluations

14

mvilloz@dynatex.ch

Notions de base

La **pression (Head)** est une Force par unité de surface.

On l'exprime comme la force (poids) à la base d'une colonne d'eau de hauteur donnée (mCE : mètres de chute d'eau)

Unités : $1 \text{ kg/cm}^2 = 10 \text{ mCE} \sim 1 \text{ Bar} = 14.5 \text{ PSI}$ (Pound/SqInch)

L'**énergie hydraulique** est l'énergie potentielle pour monter l'eau de $h[m]$.

Epot = $m \cdot g \cdot h$ $m=\text{masse}[kg]$, $g=9.81 \text{ [m/s}^2]$, $h = \text{hauteur [m]}$

$E [\text{kWh}] = \text{Volume} [\text{m}^3] \times \text{Pression} [\text{Bar}] / 36$

La **puissance hydraulique** est l'énergie par unité de temps:

$P [\text{kW}] = \text{Débit} [\text{m}^3/\text{h}] \times \text{Pression} [\text{Bar}] / 36$ (Débit = Flowrate, FR)

$\text{Débit} [\text{m}^3/\text{h}] \times \text{Pression} [\text{mCE}] / 3.6$

L'**efficacité** est la Puissance Hydraulique / Puissance Electrique

Valeurs typiques: 30 à 45%

Comportement selon diverses variables: voir graphiques dans PVsyst

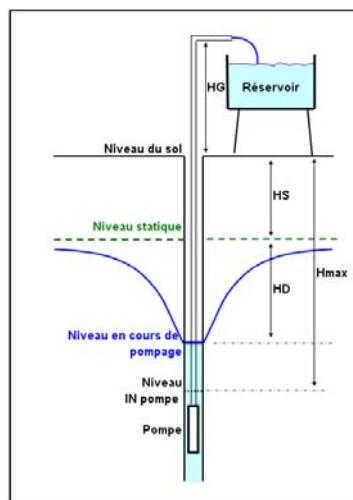
Rapport $P_{\text{nomPV}} / P_{\text{pompe}}$: ordre de grandeur 1.2 à 1.4

Ne pas utiliser ces valeurs pour le dimensionnement !

15

mvilloz@dynatex.ch

Puits / forage



Rappel: la pression peut s'exprimer en différence de niveau: (1 bar = 10 mCE)

Pression totale en fonctionnement:

$H_{\text{tot}} = HG + H_{\text{static}} + H_{\text{dyn}} + H_{\text{friction}}$

H_{friction} = pertes de charge

Condition de fonctionnement:

$H_{\text{tot}} < H_{\text{max}} + HG$ (sinon pompe à sec)

16

mvilloz@dynatex.ch

Puits: Pression dynamique spécifique

Le puits est dans un **milieu poreux**:

il se remplit à une vitesse proportionnelle à la hauteur H_{dyn}

$$\Rightarrow H_{dyn} = Fr * (H_{Dref} / Fr_{Ref})$$

H_{Dref} / Fr_{Ref} est une caractéristique du puits [mCE/m³/h]

	HStat [m]	Href [m]	Qref [m ³ /h]	Href/Qref [m/m ³ /h]
Angola				
Rotunda	20	25	7.2	3.5
Chamaco	12	20	6.9	2.9
Lupale	20	24	5	4.8
Morocco				
Abdi	13	22	21.6	1
Ourika	17	2	10.8	0.2
Iferd	10	50	36	1.4

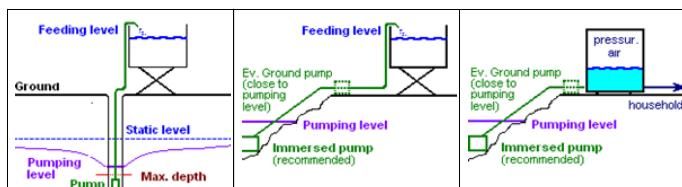
La pression dynamique spécifique **H_{Dref} / Fr_{Ref}** peut se mesurer facilement à l'aide d'une pompe:

- on mesure le niveau statique,
- puis on pompe avec un débit donné et on mesure la baisse de niveau

17

mvilloz@dynatex.ch

Autres utilisations

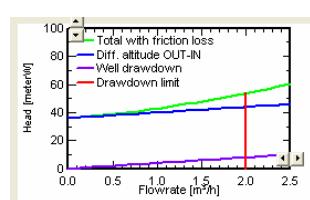


Types de systèmes de pompage dans PVsyst:

- Puits
- Lac ou rivière
- Pressurisation pour distribution

Outil de visualisation de la situation selon les paramètres choisis.

Définir les longueurs et diamètres de tuyaux



18

mvilloz@dynatex.ch

Types de systèmes PV-Pompe

Configurations de Couplage direct (moteurs DC)

- Couplage direct sans régulateur
- Couplage direct avec Booster
- Cascade
- Reconfiguration du champ

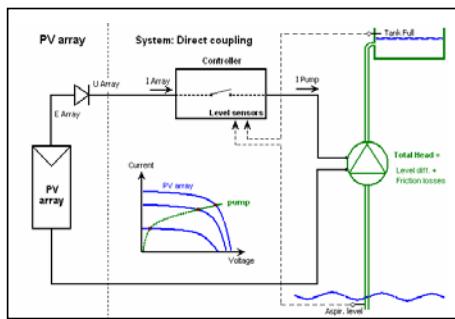
Avec convertisseurs de puissance (moteurs DC ou AC)

- Convertisseur MPPT
- Convertisseur à tension fixe
- Avec batterie

Convertisseur:

- ✓ Pour Moteurs AC: Onduleur DC-AC obligatoire !
- ✓ Pompes et onduleur "standard" avec entrée DC (prix !)
- ✓ Certaines pompes: convertisseur intégré (Grundfos)

Couplage direct



Pompe DC seulement

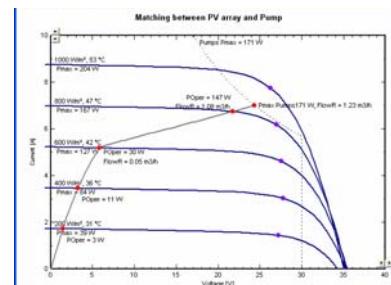
La pompe est branchée directement sur le champ PV

Le contrôleur n'assure que les fonctions de sécurité (niveaux)

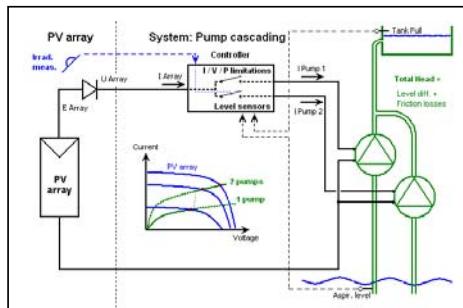
La caractéristique de la pompe n'est pas adaptée à la caractéristique PV

Problèmes de démarrage à faible irradiance
⇒ fonction de démarrage **Booster**

Limite de puissance maximale
⇒ **dimensionnement** doit être très soigné !



2 pompes: montage en cascade

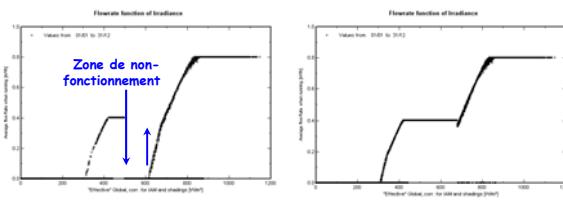


Une ou deux pompes actives selon le niveau d'irradiance

⇒ meilleure adaptation I/V

Difficile de mettre 2 pompes dans un même puits !

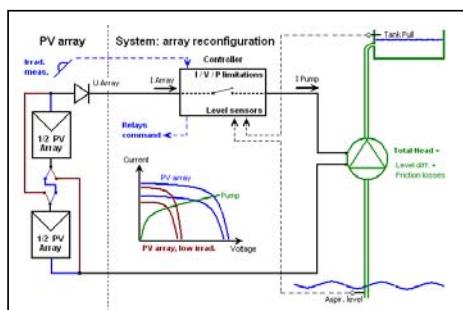
Attention: le seuil doit être choisi très soigneusement ! (logiciel nécessaire)



21

mvilloz@dynatex.ch

Reconfiguration champ PV



La pompe démarre avec deux demi-champs en parallèle (⇒ grand courant)

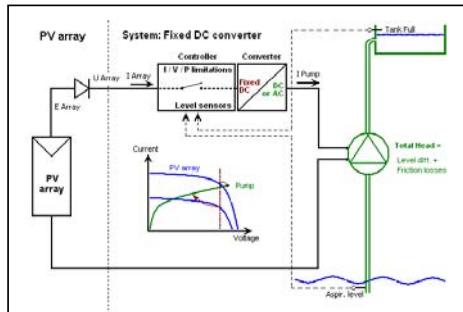
Électronique très simple.
Mais pas de contrôleur commercialisé (?)

Le seuil de commutation doit être choisi soigneusement.

22

mvilloz@dynatex.ch

Convertisseur de puissance



Peut être à **MPPT**
(maximum power tracker)
ou **tension d'entrée fixe**

Convertisseur DC-DC :
Absorbe la puissance PV
à une tension optimale
Générateur de courant
adapté au moteur
Joue le rôle de booster

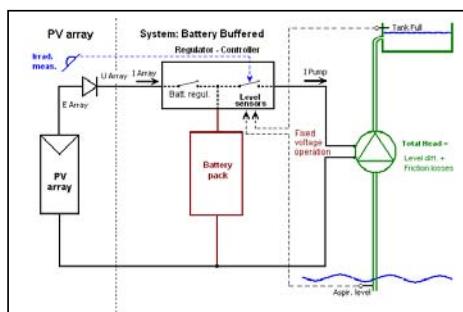
Onduleur DC-AC : Mono ou triphasé
La fréquence peut commander la vitesse de la pompe

Dans **PVsyst**: convertisseur souvent associé à la pompe
 ⇒ les caract. d'entré de la pompe sont celles du convertisseur
 ⇒ on ne connaît pas les caractéristiques électriques intermédiaires
 ⇒ avec MPPT, seule la puissance est connue

23

mvilloz@dynatex.ch

Système avec batterie



Pompe fonctionne à tension fixe,
donc à puissance fixe
(pour une pression donnée)

Stockage journalier:
la puissance supplémentaire à midi
est stockée pour le soir/matin.

Dimensionnement Batterie: **pas pour un stockage moyen ou long terme !**
le réservoir d'eau est bien plus efficace pour ça !

Régulation: minimiser les charges/décharges !
La pompe doit être enclenchée selon un **seuil d'ensoleillement**
seulement un peu avant soleil suffisant, et arrêtée un peu après sa baisse.
Le seuil d'enclenchement/déclenchement optimal doit être établi par simulation.
La batterie peut être considérée comme un élément de **régulation de puissance**.

24

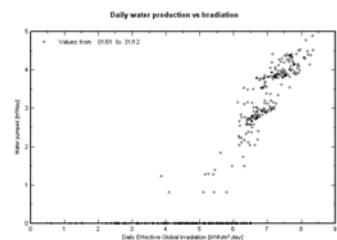
mvilloz@dynatex.ch

Performances comparées

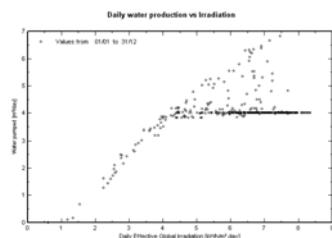
Exemple: Puits à Dakar, Profondeur 34m et alim. réservoir à 6m ($H=40m$)

Besoins: $4 \text{ m}^3/\text{jour}$

Système: 2 pompes de 100 W, à membrane, moteur DC 200 W pompes
 2×2 modules PV 60 Wc, 240 Wc PV



Couplage direct: Prod. max. $5 \text{ m}^3/\text{jour}$.
 aucune production pour les jours en dessous de 4-5 kWh/m^2 !

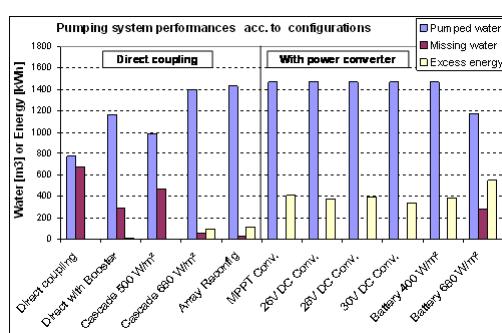


Avec convertisseur MPPT: $\Rightarrow 7 \text{ m}^3/\text{jour}$
 Production pratiquement tous les jours
 Limitée par la taille du réservoir de 15 m^3 !

25

mvilloz@dynatex.ch

Performances selon mise en oeuvre



Pour couvrir les besoins ($1460 \text{ m}^3/\text{an}$):

- Les systèmes à **couplage direct** ne peuvent jamais fournir (seules les stratégies de cascades – rares – **si le seuil est très bien choisi**)
- Les systèmes avec **convertisseur** ou batterie sont tous suffisants.

26

mvilloz@dynatex.ch

Conclusion

- Si vous achetez une pompe solaire à un fabricant:
il proposera un kit avec un nombre de modules PV prédéterminé
et assurera un débit nominal "pour les beaux jours".
- Or le dimensionnement d'une installation de pompage est complexe
Dépend de la hauteur d'eau, du débit désiré, de la météo,
et de la technologie de couplage !
- Les installations à couplage direct sont à proscrire.
Leur dimensionnement est très délicat, leurs performances médiocres
- Les installations à batterie-tampon demandent un grand cyclage
⇒ usure rapide de la batterie
- Seules les installations avec **convertisseur** de puissance
sont **efficaces** et **faciles à dimensionner**.