

Aurian Arrigoni

# Les installations photovoltaïques autonomes

Les clés de la conception et du dimensionnement

*En partenariat avec l'Association Française du  
Photovoltaïque avec Stockage*



**Aldeau**

Editeur de connaissances

Editions Aldeau

<http://www.aldeau.com>

Les auteurs et l'éditeur remercient les nombreux organismes qui leur ont procuré les illustrations figurant dans l'ouvrage. sauf mention particulière, toutes les autres illustrations ont été réalisées par les auteurs.



Le code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée notamment dans les établissements d'enseignement, provoquant une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du Droit de Copie, 20 rue des Grands-Augustins, 75 006 Paris.

© Editions Aldeau, 2014, ISBN : 978-2-9551116-0-4

# Sommaire

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Les batteries .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Les différentes technologies de batteries acide-plomb.....</b>	<b>3</b>
1.1 Les batteries ouvertes.....	4
1.2 Les batteries étanches .....	5
<b>2 La décharge d'une batterie acide-plomb.....</b>	<b>6</b>
2.1 Principe électrochimique de la décharge .....	7
2.2 Décharge profonde & Phénomène de sulfatation .....	10
2.3 Autodécharge des batteries .....	12
<b>3 La charge d'une batterie acide-plomb.....</b>	<b>15</b>
3.1 Principe électrochimique de la charge .....	15
3.2 Stratification de l'électrolyte & Surcharge .....	17
3.3 Vitesse de charge.....	22
<b>4 Tension(s) des batteries acide-plomb.....</b>	<b>24</b>
4.1 Caractéristiques courant-tension.....	24
4.2 Evolution de la tension pendant la décharge .....	28
4.3 Effet de la température sur la tension .....	29
<b>5 Capacité(s) des batteries acide-plomb .....</b>	<b>30</b>
5.1 Définition de la capacité d'une batterie .....	30
5.2 Capacité nominale .....	31
5.3 Loi de peukert .....	31
5.4 Effet de la température sur la capacité .....	36
<b>6 Entretien et maintenance des batteries .....</b>	<b>37</b>
6.1 Température de fonctionnement des batteries.....	37

6.2	Ventilation du local batteries .....	37
6.3	Mise à niveau du volume d'eau des batteries .....	40
6.4	Nettoyage des batteries.....	41
<b>Chapitre 2 Cellules &amp; Modules Photovoltaïques .....</b>		<b>42</b>
<b>1</b>	<b>Les cellule photovoltaïques .....</b>	<b>43</b>
1.1	Caractéristique courant-tension .....	43
1.2	Effet du niveau d'éclairément sur une cellule photovoltaïque .....	45
1.3	Effet de la température sur une cellule photovoltaïque .....	51
<b>2</b>	<b>Les modules photovoltaïques .....</b>	<b>54</b>
2.1	Des cellules au module photovoltaïque .....	54
2.2	CAractéristique courant-tension d'un module PV.....	56
2.3	Savoir lire une fiche technique .....	58
<b>Chapitre 3 La régulation photovoltaïque.....</b>		<b>66</b>
<b>1</b>	<b>Rôles de la régulation photovoltaïque .....</b>	<b>67</b>
1.1	Gérer la charge des batteries .....	67
1.2	Gérer la décharge des batteries.....	70
1.3	Indiquer l'état du système .....	72
<b>2</b>	<b>Petit Historique de la régulation photovoltaïque .....</b>	<b>74</b>
2.1	Régulation "tout ou rien" .....	74
2.2	Régulation de type MLI (Modulation Largeur Impulsion).....	76
2.3	Régulation de type PPM (Point de Puissance Maximum).....	78
<b>3</b>	<b>Rendement des régulateurs.....</b>	<b>81</b>
<b>Chapitre 4 L'onduleur.....</b>		<b>84</b>
<b>1</b>	<b>Rôle de l'onduleur .....</b>	<b>85</b>
<b>2</b>	<b>Dimensionnement de l'onduleur.....</b>	<b>87</b>
2.1	Partie CC.....	87

2.2	Partie CA .....	87
2.3	Puissance nominale .....	87
2.4	Courants de démarrage des appareils électriques .....	87
<b>3</b>	<b><i>Performance de l'onduleur .....</i></b>	<b>90</b>
3.1	Rendement de l'onduleur .....	90
3.2	Effet de la température sur l'onduleur.....	91
3.3	Consommation en veille.....	92
	<b><i>Chapitre 5 Conception et dimensionnement.....</i></b>	<b>94</b>
<b>1</b>	<b><i>Définition du besoin électrique.....</i></b>	<b>95</b>
1.1	INventaire des appareils électriques.....	95
1.2	Calculs des besoins électriques.....	107
<b>2</b>	<b><i>Evaluation du gisement solaire local .....</i></b>	<b>109</b>
2.1	Influence de la localisation.....	109
2.2	Angle d'inclinaison optimale .....	114
2.3	Orientation.....	116
<b>3</b>	<b><i>Qualité d'une installation photovoltaïque autonome.....</i></b>	<b>119</b>
3.1	Rendement des modules.....	120
3.2	Pertes par échauffement des câbles .....	126
3.3	Rendement du régulateur .....	129
3.4	Pertes par absence du MPPT .....	129
3.5	Rendement des batteries .....	129
3.6	Rendement de l'onduleur .....	130
3.7	Autres pertes.....	130
3.8	Le ratio de performance.....	130
<b>4</b>	<b><i>Production électrique d'une installation .....</i></b>	<b>132</b>
4.1	Calcul du productible électrique .....	132
4.2	Impacts des ombrages > Les masques.....	134

4.3	Impacts des ombrages > Rôle des diodes by-pass.....	136
4.4	Impacts des ombrages > Phénomène de courant-retour .....	139
<b>5</b>	<b><i>Dimensionnement du champ photovoltaïque .....</i></b>	<b>141</b>
5.1	Formule de calcul.....	141
5.2	Analyse de la formule .....	143
5.3	Exemple simple .....	148
<b>6</b>	<b><i>Dimensionnement du parc de batteries .....</i></b>	<b>152</b>
6.1	Choix de la tension du parc de batteries .....	152
6.2	Choix de la capacité du parc de batteries.....	157
<b>7</b>	<b><i>Choix du régulateur.....</i></b>	<b>162</b>
7.1	Les 3 paramètres de dimensionnement .....	162
7.2	Identifier les paramètres de dimensionnement sur la fiche technique	163
<b>8</b>	<b><i>Choix de l'onduleur .....</i></b>	<b>164</b>
<b>9</b>	<b><i>Dimensionnement des câbles .....</i></b>	<b>165</b>
9.1	Courant admissible des câbles.....	165
9.2	Chute de tension .....	166
9.3	Exemple de calcul .....	167
9.4	Conditionnement de fonctionnement des câbles PV .....	172
	<b><i>Chapitre 6 Etude de cas.....</i></b>	<b>174</b>
<b>1</b>	<b><i>Etape N°1 - Déterminer les besoins électriques .....</i></b>	<b>175</b>
1.1	Inventaire des appareils électriques .....	175
1.2	Bilan de puissance et d'énergie .....	178
<b>2</b>	<b><i>Etape N°2 - Dimensionner le champ photovoltaïque .....</i></b>	<b>179</b>
2.1	Evaluation du gisement solaire.....	179
2.2	Calcul de la puissance crête du champ PV .....	181
2.3	Intégration du champ photovoltaïque .....	185
<b>3</b>	<b><i>Etape N°3 - Dimensionner le parc de batteries .....</i></b>	<b>190</b>

3.1	Choix de la tension .....	190
3.2	Calcul de la capacité du parc de batteries .....	192
<b>4</b>	<b><i>Etape N°4 - Choix du régulateur.....</i></b>	<b>194</b>
4.1	Choix de la technologie de régulation.....	194
4.2	Dimensionnement du régulateur.....	194
4.3	Câblage des modules PV .....	197
<b>5</b>	<b><i>Etape N°5 - Calculer la section des câbles.....</i></b>	<b>199</b>
5.1	Câbles côté Champ PV .....	199
5.2	Câbles côté parc de batteries .....	202
5.3	Câbles côté Récepteurs électriques .....	202
<b>6</b>	<b><i>Etape N°6 - Calibrer les dispositifs de coupure et de protection ....</i></b>	<b>204</b>
6.1	Côté Champ PV.....	204
6.2	Côté Batteries.....	209
6.3	Côté Régulateur.....	216
<b><i>Chapitre 7 Intégration architecturale des panneaux .....</i></b>		<b>219</b>
<b>1</b>	<b><i>Intégration sur toiture inclinée .....</i></b>	<b>220</b>
1.1	La surimposition .....	220
1.2	Couvertures photovoltaïques.....	222
1.3	Montage sur châssis.....	224
<b>2</b>	<b><i>Intégration sur toiture plate .....</i></b>	<b>225</b>
2.1	Montage sur châssis.....	225
2.2	Montage sur bac lesté.....	226
2.3	Montage en applique.....	226
<b>3</b>	<b><i>Membrane souple photovoltaïque.....</i></b>	<b>228</b>
<b>4</b>	<b><i>Intégration en façades .....</i></b>	<b>230</b>
4.1	Bardage photovoltaïque .....	230
4.2	Mur rideau .....	231

4.3	Brise soleil .....	232
4.4	Garde-corps.....	233
4.5	Allèges de fenêtres .....	234
5	<i>Verrière photovoltaïque .....</i>	<i>235</i>
	<b><i>Annexe 1 Fabrication des batteries acide-plomb.....</i></b>	<b><i>237</i></b>
	<b><i>Annexe 2 Coefficients correctifs en tension et en courant pour les modules PV.....</i></b>	<b><i>245</i></b>
	<b><i>Annexe 3 Facteur de forme d'une cellule ou d'un module PV</i></b>	<b><i>249</i></b>
	<b><i>Annexe 4 Données solaires sur le site de l'INES .....</i></b>	<b><i>255</i></b>
	<b><i>Annexe 5 comment réaliser un relevé de masques.....</i></b>	<b><i>261</i></b>
	<b><i>Annexe 6 Valeurs des courants admissibles dans un cable ...</i></b>	<b><i>277</i></b>
	<b><i>Annexe 7 Apparition de l'effet point chaud.....</i></b>	<b><i>281</i></b>
	<b><i>Annexe 8 Apparition d'un courant retour.....</i></b>	<b><i>289</i></b>

# LES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT

## INTRODUCTION

Cet ouvrage traite des installations solaires photovoltaïques dites autonomes. Il s'agit d'installations qui ne sont pas raccordées au réseau électrique; l'électricité qu'elles produisent est, soit directement consommée sur le site par l'utilisateur, soit stockée afin d'y être utilisée ultérieurement. Elles sont constituées de panneaux photovoltaïques, d'un parc de batteries et d'un système de régulation.

Ce qui caractérise spécifiquement ces installations est la présence d'un parc de batteries. Il garantit une autonomie de fonctionnement totale, notamment la nuit. Il permet aussi de répondre aux pics de consommation en apportant un complément de courant au champ photovoltaïque. Néanmoins, les batteries représentent un point faible à cause de leur durée de vie courte, de leur sensibilité, et de leur coût élevé.

Les installations photovoltaïques autonomes sont très pertinentes lorsqu'il s'agit d'alimenter un bâtiment qui ne serait pas raccordé au réseau électrique. En ce sens, elles sont répandues dans les sites isolés tels que les chalets de montagne ou tout autre endroit éloigné du réseau (antenne relais, éclairage isolé, pompage d'eau, etc.).

Le présent ouvrage a l'ambition de fournir au plus grand nombre l'ensemble des connaissances théoriques et pratiques afin de concevoir, dimensionner et réaliser une installation photovoltaïque autonome, fiable et dans le respect des règles de l'art.

Les chapitres 1 à 4 présentent l'ensemble des connaissances techniques à maîtriser vis-à-vis des éléments constitutifs d'une installation photovoltaïque autonome. Les chapitres 5 et 6 permettront au lecteur de s'approprier les clés du dimensionnement. Enfin, le chapitre 7 illustre les différents modes d'intégration architecturale des panneaux sur un bâtiment.

## CHAPITRE 1 LES BATTERIES

---

Il existe plusieurs familles de batteries sur la marché : acide-plomb, Li-Ion, Li-MH, Metal-Air, Zinc-Air, etc.

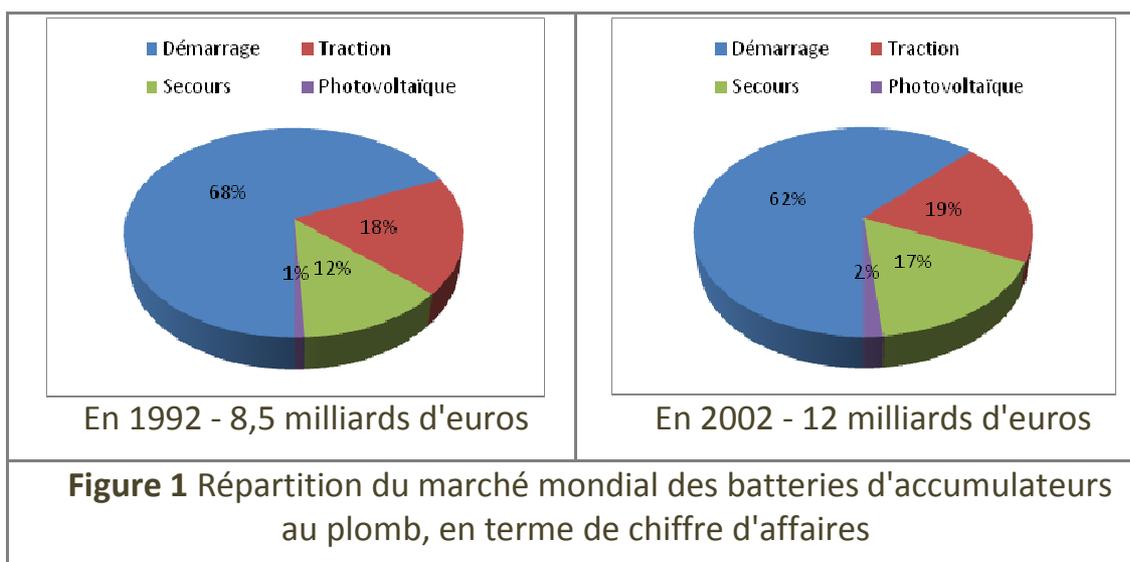
Dans le domaine du photovoltaïque autonome, les batteries acide-plomb sont très répandues. En effet, leur principal atout est un coût faible par rapport aux autres technologies. De plus, cette technologie, étudiée et améliorée depuis plus de 150 ans, est aujourd'hui la plus mature. Les batteries Li-Ion, du haut leurs 20 années de développement, tendent à se positionner sur le marché du photovoltaïque autonome, mais le prix et le manque de retour d'expérience sont des freins considérables à leur généralisation.

Le défaut des batteries acide-plomb provient de leur faible énergie massique (de l'ordre de 35 Wh/kg), ce qui induit un encombrement important. Cela explique pourquoi les batteries Li-Ion ou Ni-MH (énergie massique de l'ordre de 260 Wh/kg) sont préférées pour le marché des batteries portables ou des voitures électriques. Cependant, pour les domaines peu regardant au niveau de l'encombrement, la batterie acide-plomb reste le choix n°1 (démarrage de véhicules, chariots de manutention, bâtiment). Dans cet ouvrage, et plus particulièrement ce chapitre, on traitera donc exclusivement de la famille des batteries acide-plomb.

## 1 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE BATTERIES ACIDE-PLOMB

Aujourd'hui, les batteries acides-plomb sont utilisées pour 3 grands types d'application :

- Domaine du démarrage : Batterie utilisée pour le démarrage d'un moteur thermique (exemple : démarrage des moteurs de véhicules).
- Domaine de la traction - Batterie d'accumulateurs conçue pour fournir l'énergie aux véhicules et engins électriques (exemple : alimentation des chariots de manutention).
- Domaine des applications stationnaires - Batterie d'accumulateurs conçue pour fonctionner à un emplacement fixe et qui n'est normalement pas déplacée au cours de sa vie de fonctionnement (exemple : énergie de secours, photovoltaïque).



A chacune de ses applications est adaptée une technologie d'accumulateurs au plomb, qui se distinguent notamment par l'épaisseur et les alliages des grilles, un électrolyte liquide ou immobilisé, des concentrations d'électrolyte différentes, des plaques planes ou tubulaires, etc.

**Sur les installations photovoltaïques autonomes, on veillera donc à mettre en œuvre des batteries conçues pour les applications stationnaires photovoltaïques.**

Il existe deux types de technologie de batteries acide-plomb : les batteries dites ouvertes et les batteries étanches.

Nous approfondissons ci-après ces 2 technologies de batteries acide-plomb.



### Fabrication des batteries acide-plomb

L'annexe 1 du présent ouvrage permettra d'éclairer le lecteur concernant la fabrication des batteries acide-plomb

#### 1.1 LES BATTERIES OUVERTES

On parle de batterie ouverte lorsque les gaz produits issus de l'électrolyse de l'eau au sein de la batterie peuvent s'échapper en dehors de celle-ci. Nous rappelons que ces gaz sont le dihydrogène et le dioxygène et que cette réaction consomme l'eau de l'électrolyte.



**Figure 2** Parc constitués de 12 éléments de batteries ouvertes de 2V (Capacité 800 Ah - Tension 24 V)

Ainsi, deux conséquences majeures apparaissent :

- Le dihydrogène est un gaz explosif dans l'air lorsque sa concentration atteint un certain seuil (4% dans l'air). D'où la nécessité de mettre en place des mesures de sécurité au niveau du local des batteries, notamment une ventilation suffisante.
- La diminution du niveau de l'électrolyte, par consommation de son eau (qui se transforme en dioxygène et dihydrogène). Ainsi, il est essentiel d'effectuer des opérations de maintenance régulières afin de compléter l'électrolyte en eau.

## 1.2 LES BATTERIES ETANCHES

Les batteries étanches sont apparues pour la première fois vers la fin des années 1950 par la société Allemande Sonnenchein. Dans les batteries étanches, l'électrolyte se présente sous la forme d'un gel (et non-pas sous la forme d'une solution liquide, comme dans le cas des batteries ouvertes). On assiste toujours à la production de dihydrogène et de dioxygène, mais cette fois-ci, ces gaz ne s'échappent pas en dehors de la batterie. En effet, sous l'effet des forces de viscosité du gel, les bulles de gaz sont piégées et diffusent les unes vers les autres afin d'y être recombinaisonnés en eau.

	Avantages	Inconvénients
<b>Batterie ouverte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible coût (entre 250 et 400 €/kWh)</li> <li>-Durée de vie importante (3 000 cycles de charges/décharges à 70% de profondeur de décharge).</li> <li>-Capacité élevée : jusqu'à 4 000 Ah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Dégagement gazeux : nécessite des mesures de sécurité du local des batteries.</li> <li>-Diminution du niveau de l'électrolyte : nécessite un entretien régulier, environ 1 fois tous les 3 mois.</li> </ul>
<b>Batterie étanche</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible coût (entre 200 et 550 €/kWh)</li> <li>-Pas de dégagement gazeux =&gt; moins de contrainte de sécurité.</li> <li>-Recombinaison de gaz =&gt; maintenance réduite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La durée de vie est moins importante (1 000 cycles de charges/décharges à 70% de profondeur de décharge).</li> <li>-Le coût des équipements annexes (chargeurs) est plus important que celui des produits de batteries ouvertes.</li> <li>- Faible capacité des batteries : 200 Ah maximum</li> <li>-La charge optimisée fait appel à un courant de charge à commande électronique avec un contrôle d'algorithme plus complexe que pour les batteries plomb ouvert.</li> </ul>

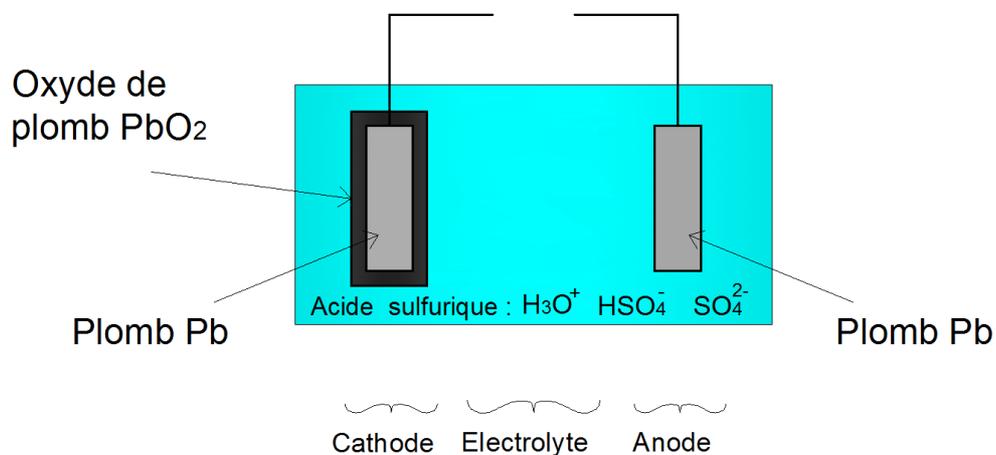
## 2 LA DECHARGE D'UNE BATTERIE ACIDE-PLOMB

Une batterie est un ensemble d'accumulateurs électrochimiques dont le rôle est d'une part, de stocker de l'énergie sous forme chimique, et d'autre part, de la restituer sous forme électrique. Cette dernière fonction s'appelle communément la décharge de la batterie. Elle fait appel à des processus chimiques connus mais qui restent encore indéfinis sur certains aspects.

Un accumulateur électrochimique au plomb est constitué de trois éléments majeurs :

1. Un électrolyte composé d'acide sulfurique aqueux.
2. Une première électrode constituée de plomb. Cette électrode s'appelle l'anode.
3. Une deuxième électrode constituée d'oxyde de plomb. Cette électrode s'appelle la cathode.

L'anode et la cathode baignent dans l'électrolyte.



**Figure 3** Composition d'un accumulateur électrochimique acide-plomb



**Figure 4** Electrode d'une batterie acide-plomb



**Figure 5** Photographie d'une batterie acide-plomb constituée de plusieurs électrodes baignant dans l'électrolyte

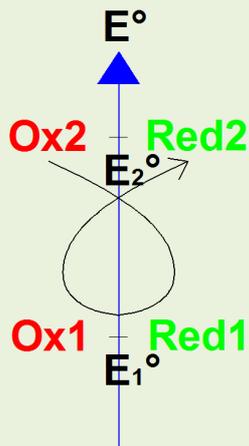
## 2.1 PRINCIPE ELECTROCHIMIQUE DE LA DECHARGE

La décharge d'une batterie repose sur la théorie des réactions d'oxydoréduction.



### Réaction d'oxydoréduction - Rappel

Une réaction d'oxydoréduction est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un transfert d'électron. Elle fait intervenir 2 couples d'éléments chimiques, appelés communément couples oxydo-réducteurs.



La réaction d'oxydoréduction se décompose en deux réactions :

⇒ Une réaction d'oxydation; le réducteur s'oxyde selon l'équation suivante :  $\text{Red}_1 \rightarrow \text{Ox}_1 + \text{électrons}$

⇒ Une réaction de réduction; l'oxydant se réduit selon l'équation suivante :  $\text{Ox}_2 + \text{électrons} \rightarrow \text{Red}_2$

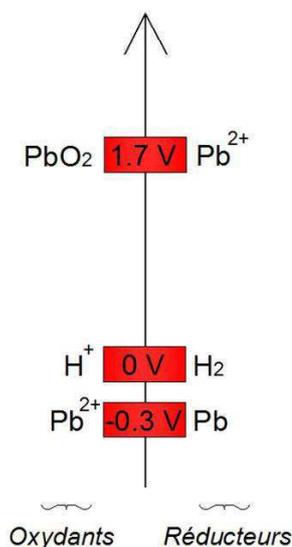
La réaction d'oxydoréduction est alors le bilan de ces deux équations :



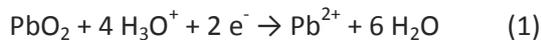
Chaque couple oxydant-réducteur est caractérisé par un potentiel électrique  $E^\circ$ , mesuré expérimentalement dans des conditions dites standard. Les couples ayant un potentiel électrique élevé impliquent des oxydants forts. Les couples ayant un potentiel électrique très bas impliquent des réducteurs forts. La réaction d'oxydoréduction se produit toujours entre un oxydant fort et un réducteur faible. Les réactions d'oxydoréduction sont des réactions totales, plus ou moins rapides.

Dans une réaction d'oxydoréduction, il y a ni création ni perte d'électron, mais plutôt transfert d'électrons qui permettent d'enclencher les deux demi-réactions.

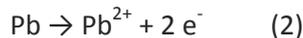
Dans une batterie acide-plomb, les couples oxydants-réducteurs mis en jeu sont les couples  $\text{PbO}_2/\text{Pb}^{2+}$  et  $\text{Pb}^{2+}/\text{Pb}$ , dont les potentiels sont indiqués ci-dessous (par rapport à la référence  $\text{H}^+/\text{H}_2$ ) :



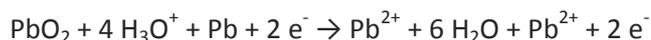
Ainsi, l'oxydant le plus fort est l'oxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ). Celui-ci va se réduire en l'ion  $\text{Pb}^{2+}$  selon la demi-équation de réduction suivante :



De même, le réducteur le plus fort est le plomb ( $\text{Pb}$ ). Celui-ci va s'oxyder en l'ion  $\text{Pb}^{2+}$  selon la demi-équation d'oxydation suivante :



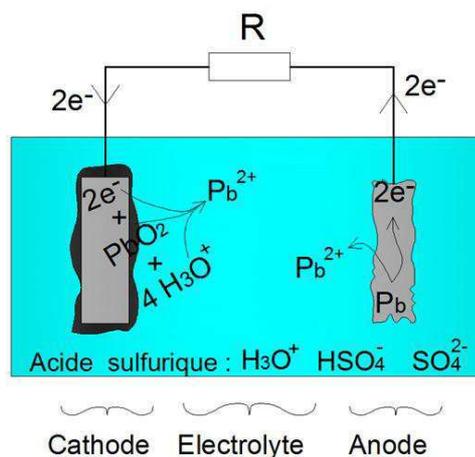
On obtient la réaction d'oxydoréduction suivante :



Certains éléments s'annulent de part et d'autres de l'équation, et on obtient finalement :



Nous constatons que la réaction d'oxydation (2) libère un électron. Cet électron peut être utilisé par l'oxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) afin d'enclencher la réaction de réduction (1). Pour cela, on réalise une connexion électrique entre l'anode et la cathode permettant la circulation des électrons. L'anode en plomb perd donc petit à petit sa masse. Egalement la masse d'oxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) diminue. Ce processus est illustré sur le schéma de la figure 6.



**Figure 6** La connexion électrique entre la cathode et l'anode permet de la circulation des électrons au sein d'un circuit fermé. Les 2 électrodes perdent progressivement leurs quantité de matière



### Pourquoi la cathode est-elle constituée également de plomb ?

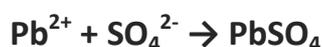
Les électrodes des batteries (qui se présentent sous la forme de grille), doivent présenter une bonne tenue à la corrosion en milieu acide sulfurique et une bonne conductivité électrique. Le plomb est l'un des seuls matériaux à disposer de ces propriétés (en plus de la tenue mécanique). En effet, l'oxyde de plomb présente une conductivité électrique de  $250 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Quant au plomb, sa conductivité est presque 200 fois supérieure :  $48\,000 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

De ce fait, la cathode est en plomb avec une couche superficielle en oxyde de plomb, mais c'est bien ce dernier qui participe aux réactions chimiques.

Actuellement, les travaux de recherche s'orientent plutôt sur des cathodes en alliages de plomb (plomb-antimoine, plomb-étain, plomb-calcium-étain, etc).

## 2.2 DECHARGE PROFONDE & PHENOMENE DE SULFATATION

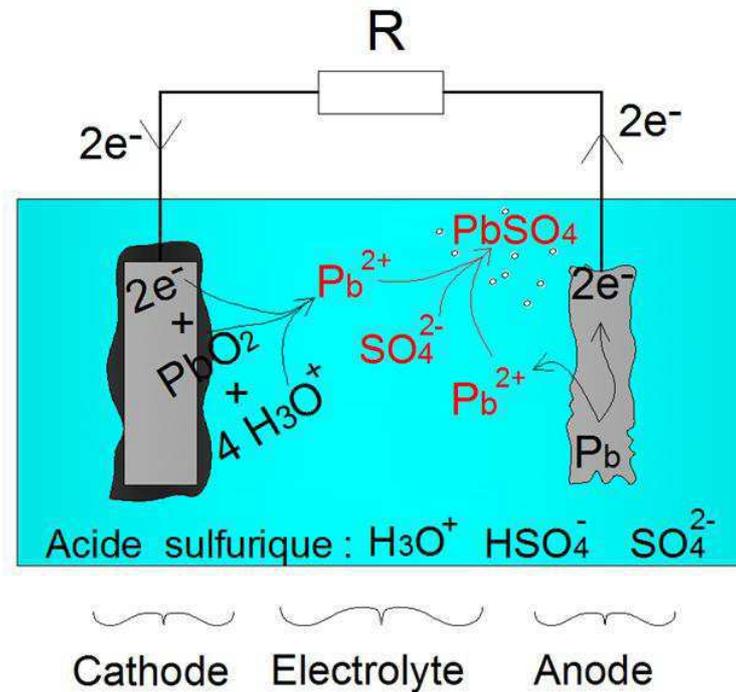
Les batteries acide-plomb sont vulnérables aux décharges profondes. En effet, ainsi qu'expliqué précédemment, la décharge d'une batterie acide-plomb produit des ions  $\text{Pb}^{2+}$ . Donc, au cours de la décharge, on observe une augmentation de la concentration des ions  $\text{Pb}^{2+}$  au sein de l'électrolyte. Or, les ions  $\text{Pb}^{2+}$  sont relativement peu solubles dans une solution d'acide sulfurique. Et, en présence de l'élément  $\text{SO}_4^{2-}$  au sein de l'électrolyte, les ions  $\text{Pb}^{2+}$  réagissent pour former du sulfate de plomb  $\text{PbSO}_4$ , selon l'équation suivante :



Il est à noter que cette réaction se produit dès lors que l'électrolyte est saturée en ions  $\text{Pb}^{2+}$ , à savoir pour une concentration de l'ordre de  $1.1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ . Dans la pratique, cette réaction (transformation des ions  $\text{Pb}^{2+}$  en sulfate de plomb  $\text{PbSO}_4$ ) apparaît à partir d'une profondeur de décharge de l'ordre de 50%.

Lorsque l'accumulateur est complètement chargé, théoriquement, la concentration en ion  $\text{Pb}^{2+}$  est nulle. Dès qu'une décharge s'opère, il y a production d'ion  $\text{Pb}^{2+}$  au niveau des deux électrodes. La concentration en ion  $\text{Pb}^{2+}$  augmente

jusqu'à atteindre la valeur limite de saturation ( $\sim 1.1 \times 10^{-4}$  mol/L). Ensuite, les ions  $\text{Pb}^{2+}$  formés sont directement transformés en sulfate de plomb ( $\text{PbSO}_4$ ).



**Figure 7** Production de sulfate de plomb  $\text{PbSO}_4$  lors de la décharge d'une batterie



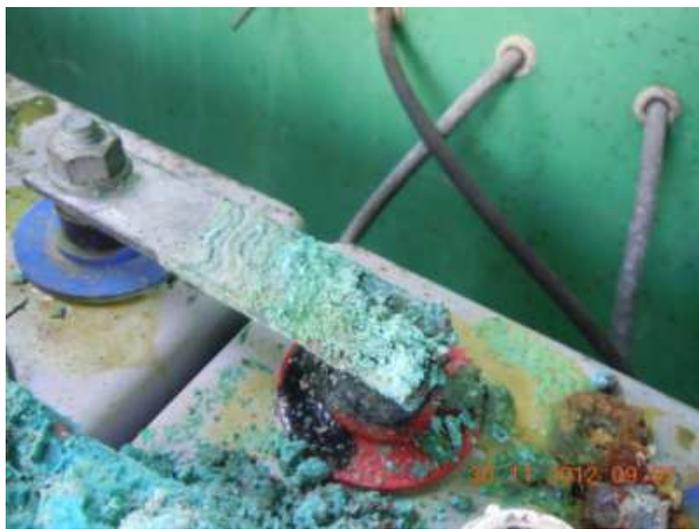
### Comment disparaît le sulfate de plomb pendant la recharge des batteries ?

Pendant la recharge, la concentration en ion  $\text{Pb}^{2+}$  diminue car celui-ci est consommé par le processus de charge pour former du Plomb ( $\text{Pb}$ ) sur l'anode et de l'oxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) sur la cathode (voir paragraphe sur la charge d'une batterie acide-plomb). Ainsi, l'électrolyte n'est plus saturée en ions  $\text{Pb}^{2+}$ , et par suite les cristaux de sulfate de plomb sont dissout selon la réaction :  $\text{PbSO}_4 \rightarrow \text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ . Une batterie parfaitement chargée ne présente donc plus de sulfate de plomb.

**On dit qu'il y a sulfatation lorsqu'il devient impossible de dissoudre le sulfate de plomb par une charge normale des batteries.**

Le phénomène de sulfatation est problématique. En effet, le sulfate de plomb se présente sous la forme de cristaux solide qui viennent s'agréger au niveau des électrodes. Ce phénomène se développe au cours des cycles de charge/décharge, et s'amplifie d'autant plus que la décharge est profonde. A terme, une couche isolante de sulfate de plomb apparaît et empêche les réactions chimiques de se produire. L'accumulateur voit sa capacité fortement diminuer, et à terme devient inutilisable.

C'est pour cette raison qu'il est proscrit d'effectuer des décharges profondes à répétition. La limite de décharge est donc limitée à environ 70%.



**Figure 8** Par capillarité, le sulfate de plomb s'infiltré et remonte jusqu'aux bornes de la batterie

### 2.3 AUTODECHARGE DES BATTERIES

Les batteries au plomb sont soumises à de phénomènes d'autodécharge. L'origine de l'autodécharge provient des réactions d'oxydoréductions secondaires se produisant au niveau des électrodes. Contrairement à ce qui se passe au cours d'une décharge normale, les échanges d'électrons ont lieu entre oxydants et réducteurs d'une même électrode, sans transport de charge à travers l'électrolyte et donc sans génération de courant.



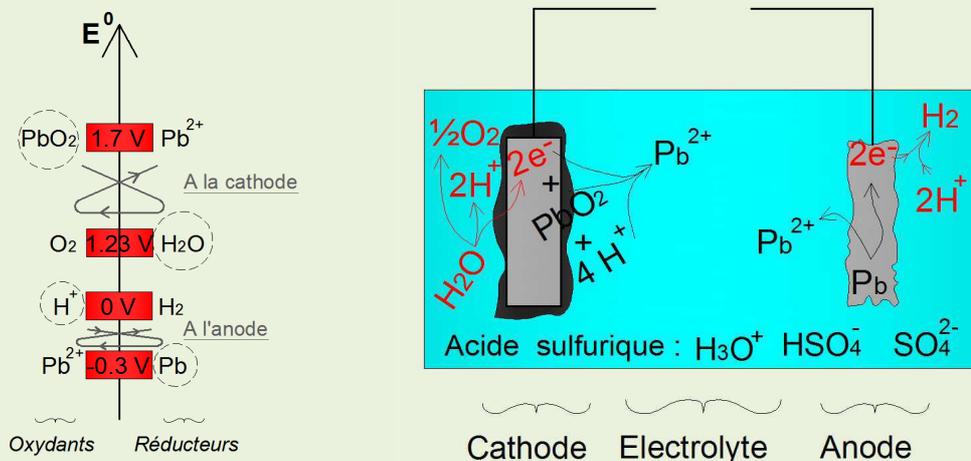
### Quelles sont les réactions secondaires entraînant une autodécharge des batteries ?

Ces réactions secondaires sont nombreuses et plus ou moins prépondérantes les unes par rapport aux autres. En outre, ces réactions secondaires ne sont pas encore toutes identifiées par la communauté scientifique.

Nous citerons :

- A la cathode, production d'oxygène. L'eau de l'électrolyte est oxydée dégageant du dioxygène gazeux ( $O_2$ ) et 2 électrons. Ces deux électrons sont directement exploités par l'oxyde de plomb ( $PbO_2$ ) de la cathode. Le plomb ( $Pb$ ) est alors réduit en ions  $Pb^{2+}$ .

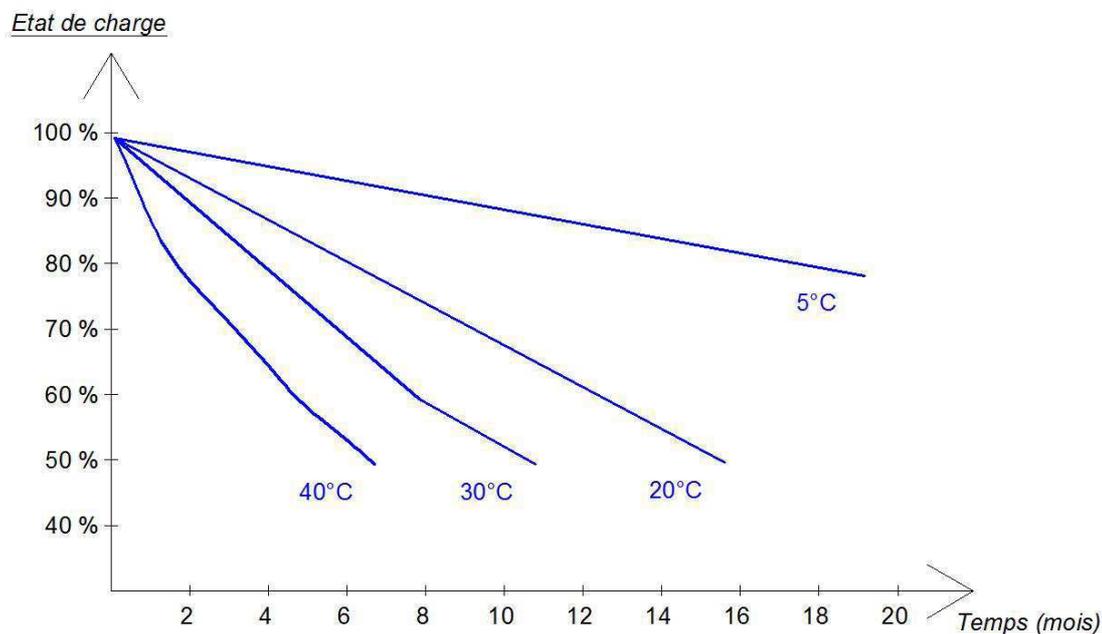
- A l'anode, production de dihydrogène. Le plomb ( $Pb$ ) est oxydé en ions  $Pb^{2+}$  libérant 2 électrons. Ces deux électrons sont directement consommés par les ions  $H_3O^+$  de l'électrolyte. Les ions  $H_3O^+$  sont alors réduits dégageant du dihydrogène gazeux ( $H_2$ ).



**Figure 9** Illustration d'une réaction secondaire responsable de l'autodécharge d'une batterie acide-plomb

Lorsque la batterie est déconnectée (circuit ouvert), elle s'autodécharge. Ainsi, une batterie chargée qui ne serait pas sollicitée se retrouve complètement déchargée au bout de plusieurs mois. Le taux d'autodécharge des batteries actuelles, en terme de perte de capacité, se situe en moyenne entre 2 % et 5 % par mois (à 20°C).

Le graphe ci-dessous indique les temps d'autodécharge typique d'une batterie acide-plomb au repos (en circuit ouvert) en fonction de la température ambiante :



**Figure 10** Temps d'autodécharge des batteries au plomb en fonction de la température ambiante. Les batteries au plomb s'auto déchargent d'autant plus vite que la température ambiante est élevée.