

BATTERIE AU PLOMB, EVALUATION DE LA CAPACITE UTILE
V6, Lsdx 2022.02.07

Table des matières

1	CONTEXTE	1
2	PROCEDURE	2
	2.1 Préparation:	2
	2.2 Décharger la batterie à ampérage constant jusqu'à un seuil à définir:	2
	2.3 Déroulement:	2
	2.4 Adaptation et répétition des tests:	3
3	ANNEXES:	4
	3.1 Voltage en fonction de la décharge (Victron)	4
	3.2 Densité de l'électrolyte en fonction de l'état de charge	5
	3.3 Utilisation du "coup de fouet	6
	3.4 Methode actuelle	6
4	QUELQUES REFERENCES	8
	4.1 Delaille	8
	4.2 Victron	9
	4.3 Europe	9

1 CONTEXTE

Sur mon installation photo-voltaïque autonome¹, pour conserver une longue durée de vie aux batteries au plomb, je n'utilise que 33% de leur capacité théorique. Pour mesurer leur capacité utile actuelle, les vider complètement n'a pas de sens, serait destructeur et il faut être sur place.

En hiver, je ne dispose que des données d'utilisation à faible puissance (42W) après quelques calculs et corrections, j'arrive à des estimations qui semblent correctes si j'en crois le bon ajustement d'une fonction exponentielle (voir annexe).

Pour aller plus loin, je propose le protocole suivant à utiliser sur place mais qui doit être adapté à chaque installation en modifiant les parties soulignées qui me sont spécifiques. Les parties en rouge sont les plus criticables. Ce protocole, éventuellement corrigé par les contributions des lecteurs, sera utilisé au printemps.

Par prudence, il sera intéressant de l'utiliser dès la mise en place de nouvelles batteries.

¹ Alpes du Sud, 1740m d'altitude, 2kWc sur le toit (SSE, pente 8/10). 30kWh de batteries au plomb OpzS installées en 2012, Groupe électrogène 1500W, gestion Victron, suivi local par CCGX et hors site par VRM. Cycles de 24h. Je projette d'augmenter les watt crêtes et les batteries car mes consommations peuvent se monter à 1200Wh en une heure.

2 PROCEDURE

2.1 PREPARATION:

- 2.1.1 Charger la batterie jusqu'à 3h de float, éventuellement par groupe électrogène;
- 2.1.2 Egaliser pour homogénéiser l'électrolyte (1h, égalisation ou mini-pompe);
- 2.1.3 Mesurer la densité de l'électrolyte. La densité doit être de 1260 à 17°C selon annexe 3.2. corriger si nécessaire);
- 2.1.4 Supprimer les alarmes sauf SOC=66% (voir les relais programmables). Ou présence nécessaire le moment voulu;
- 2.1.5 Couper les entrées de courant (chargeurs venant des panneaux, groupe électrogène);
- 2.1.6 Couper toutes les sorties de courant continu ou alternatif (si on utilise l'onduleur, ce qui est le plus pratique), sauf branchement de la résistance de décharge.
- 2.1.7 Brancher la résistance de décharge. Dans ma situation le pic de consommation en début d'automne 2022 a été de 1200W (lave-linge, four micro-onde, éclairage, ordinateurs). La consommation horaire moyenne a varié entre 367 et 1118 W . Une décharge sur un appareil de 1000W environ (fer à repasser via onduleur) serait convenable, ce qui donne 42A pour des batteries de 24V. Mais on pourrait s'adapter à la consommation moyenne de la journée;

2.2 DECHARGER LA BATTERIE A AMPERAGE CONSTANT JUSQU'A UN SEUIL A DEFINIR:

- 2.2.1 Jusqu'à SOC=66% Jusqu'à **12.5V** d'après les graphiques en annexe ou mesurés à la mise en place des batteries neuves. Mais ce voltage dépend de l'état de charge et de l'intensité prélevée. Il varie très peu en début de décharge (de 12.66 à 12.53V de SOC 100% à SOC 66%, Perez 1993). Le résultat est donc assez approximatif, même avec un voltmètre très précis. Pour comparer d'une année sur l'autre, il faudra donc toujours utiliser exactement le même protocole.
- 2.2.2 Jusqu'à une densité d'électrolyte de l'ordre de 1215 g/l², pour tenter d'établir une corrélation entre voltage et densité, et confirmer si possible le niveau de charge. Eventuellement, utiliser une micro-pompe pour recycler en permanence l'électrolyte pour éviter la stratification;
- 2.2.3 Une dernière méthode utilise le "coup de fouet", baisse puis remontée de voltage à la remise en service après pleine charge. Recherches en cours.

2.3 DEROULEMENT:

- 2.3.1 Comme ces valeurs évoluent, mesurer toutes les heures directement ou sur les relevés CCGX ou VRM si on utilise Victron:
 - a. L'ampérage soit I_t toutes les heures leur total donnera des Ah ;
 - b. Les voltages V_t de batterie d'ou des Watt heures $Wh_t = (I_t * V_t)$;
 - c. Les densité de l'électrolyte.
 - d. La température qui a une importante influence sur toutes ces variables

Pour chaque plage horaire le calcul se fait avec la moyenne des valeurs de début et de fin.

² Pour décharge de 30%, graphique en annexe

- 2.3.2 Durée du test: pour mes batteries de 24V, 1250Ah, 30kWh, 10kWh utiles, la décharge prendra: $10\,000\text{Wh}/(24\text{V} * 42\text{A}) = 10\text{h}$ soit une bonne demi-journée, moins si la batterie commence à bien vieillir.
- 2.3.3 Lorsqu'on atteint la limite fixée (SOC, Volts ou densité)
- Noter la durée en heures **H**.*
 - Remettre en service alarmes, charge des panneaux et consommations en courant continu ou alternatif pour le soulagement des autres utilisateurs;*
 - La capacité utile est alors a) en **Ah utile**= somme des **I_t** horaires mesurées ou b), valeur plus pratique pour les futurs calculs, en **Wh utile** = somme des **Wh_t** notées précédemment; mais ce calcul est fondé sur l'ancienne valeur de capacité totale qui diminue d'année en année.*
 - La méthode utilisée actuellement consiste à tester une hypothèse de capacité ce qui permet de corriger SOC et temps de décharge complète, recalculer la capacité avec ces données corrigées, puis ajuster l'hypothèse de façon à ce que les deux valeurs soient égales. Le très bon ajustement d'une courbe logarithmique semble justifier cette méthode (cf. annexe "méthode actuelle").*

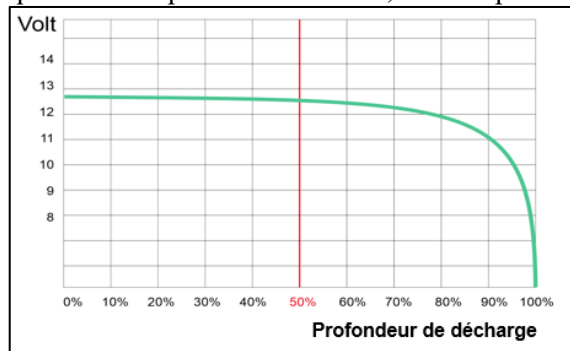
2.4 ADAPTATION ET REPETITION DES TESTS:

- 2.4.1 La répétition annuelle, ou plus fréquente, de cette procédure **avec la même résistance** permet d'évaluer son vieillissement pratique;
- 2.4.2 On peut mener l'opération avec des puissances différentes pour s'adapter au système évalué ou pour estimer l'erreur due à la différence de puissance utilisée réellement et la puissance de décharge utilisée. Les valeurs de résistance proposées ici et les estimations de durée correspondent à un système particulier avec gestion Victron (éléments soulignés).

3 ANNEXES:

3.1 VOLTAGE EN FONCTION DE LA DECHARGE (VICTRON)

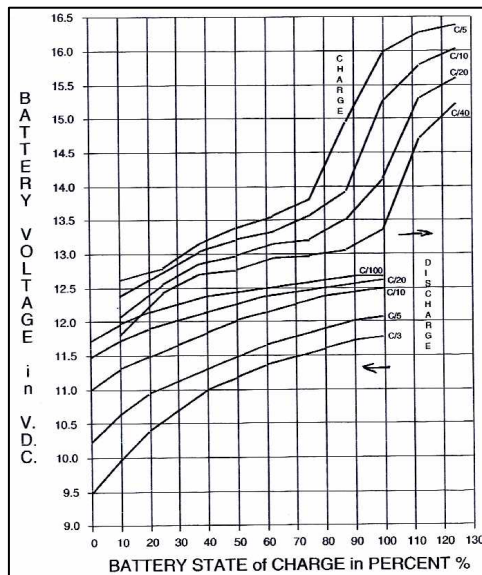
Sur ce graphique: 12.67 V pour SOC = 100%, 12.53V pour SOC=66%



I

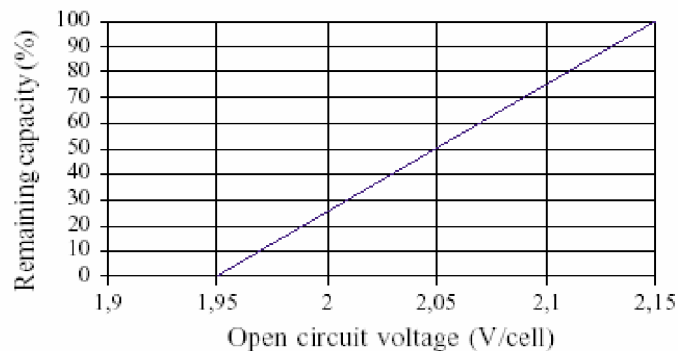
Voltage en fonction de la décharge (Delaille)

Sur ce graphique pour C100, 2.08V à 65% de charge, 2.12 à 100%



Tension d'une batterie plomb-acide en charge et en décharge à différents régimes de courant en fonction de l'état de charge [115, Perez, 1993]. In Delaille p.91

Sur ce graphique, en décharge, 12.7V à SOC=100% et 12.53V pour SOC=66%



Tension d'équilibre d'une batterie au plomb en fonction de son état de charge [110, Cadirci et al., 2004].

3.2 DENSITE DE L'ELECTROLYTE EN FONCTION DE L'ETAT DE CHARGE

(in Delaille p. 80)

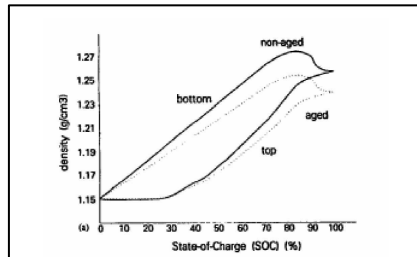


Figure 20. Densité en fonction de l'état de charge [89, Armenta-Deu, 1996].

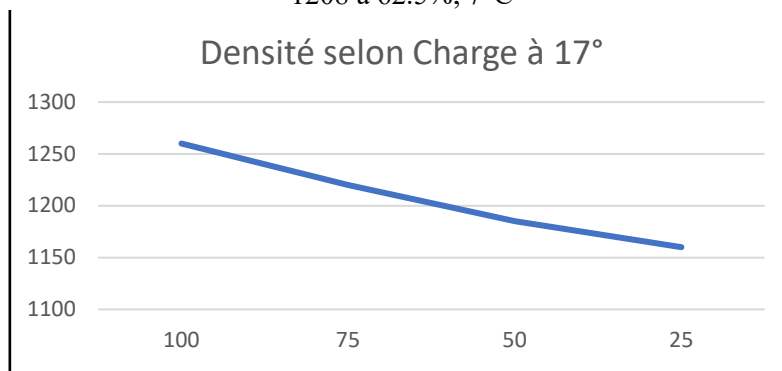
Croissance linéaire, décroissance ??

[In energie-developpement.blogspot.com/2012/07/pese-acide.utilisation.batterie.electrolyte.html](http://energie-developpement.blogspot.com/2012/07/pese-acide.utilisation.batterie.electrolyte.html)

Charge	Densité de l'électrolyte (g/L)			
	17°C	27°C	37°C	47°C
100%	1260	1255	1250	1245
75%	1220	1215	1210	1205
50%	1185	1180	1175	1170
25%	1160	1155	1150	1145

D'où le graphique ci-dessous:

1208 à 62.5%, 7°C

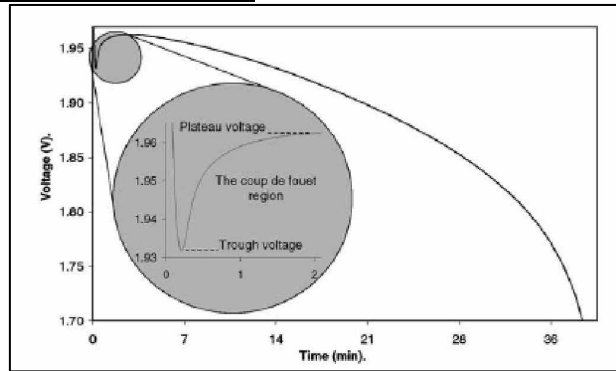


[In Battery University.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge](http://Battery University.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge)

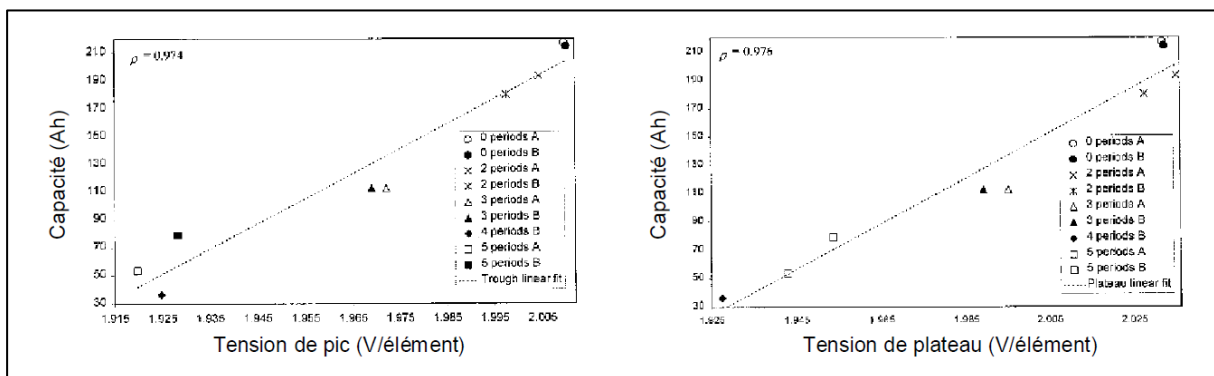
Approximate state-of-charge	Average specific gravity	Open circuit voltage			
		2V	6V	8V	12V
100%	1.265	2.10	6.32	8.43	12.65
75%	1.225	2.08	6.22	8.30	12.45
50%	1.190	2.04	6.12	8.16	12.24
25%	1.155	2.01	6.03	8.04	12.06
0%	1.120	1.98	5.95	7.72	11.89

Table 3: BCI standard for SoC estimation of a starter battery with antimony
Readings are taken at 26°C (78°F) after a 24h rest.

3.3 UTILISATION DU "COUP DE FOUET"



Région du coup de fouet lors de la décharge d'une batterie plomb-acide pleinement chargée



Relation linéaire entre la tension de pic et de plateau du coup de fouet et la capacité d'une batterie [118 , Pascoe et al., 2002]. In Delaille, pp 93-94

3.4 METHODE ACTUELLE

En plein hiver, sans accès à ma maison: j'utilise les données envoyées sur le site Victron. Les périodes partent de SOC=100%, la consommation est faible (40W), la productions nulle ou très faible (inférieures à 50W) et sans jamais atteindre à nouveau SOC = 100%. La période s'arrête au retour d'une production significative. Il est alors possible de calculer diverses valeurs (durée de décharge totale, capacité totale) Pour éviter un calcul fondé sur une capacité totale que l'on cherche à mesurer, on corrige SOC nominal à partir d'une hypothèse de capacité nominale pour recalculer la capacité totale. L'hypothèse est ajustée jusqu'à obtenir la même valeur hypothèse et calcul. Les résultats semblent cohérents si on en juge par l'ajustement exponentielle: Capacité = f(durée de décharge) (voir graphique ci-après).

Cette méthode doit pouvoir être utilisée pour les tests de décharge à 33% proposés au premier chapitre ci-dessus.

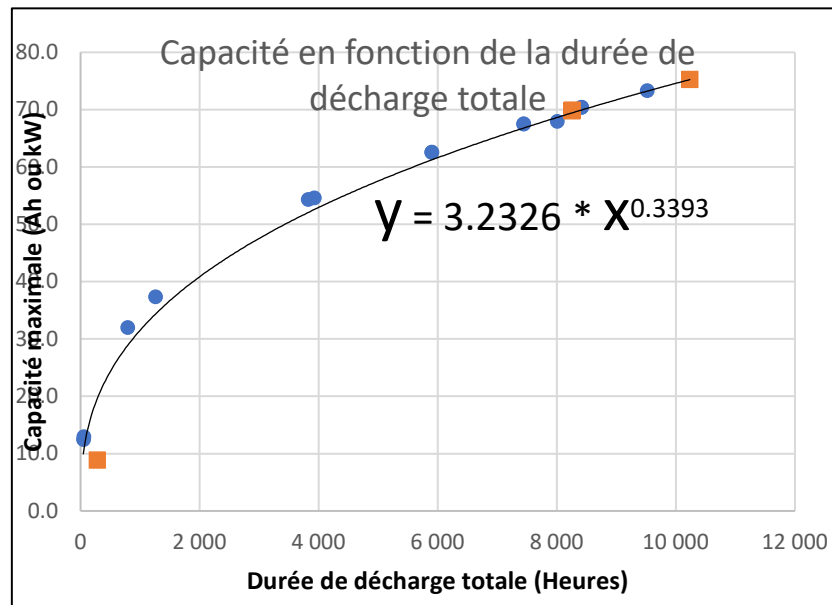
Relevés et calculs comme suit sur tableur Excel:

Action	Résultat cet hiver
Noter Date heure début	
Noter Date-heure fin	
Calcul durée	10 à 41h
Noter SOC début	
Noter SOC fin	
Calcul décharge (SOC fin-début);	0,40% à 9,3%
Calcul Durée décharge totale (durée période / % décharge de la période);	118 à 4333H
Noter Consommation période (Sorties – entrées);	
Capacité totale (consommation période / % décharge période)	5 178kWh
Noter hypothèse de capacité;	

Calcul de capacité après correction de capacité nominale, durée de vidage total et décharge de la période.	
Ajustement hypothèse de capacité pour rejoindre la capacité calculée	27.3 à 75.1
Etablissement de courbes (fonction exponentielle)	

Le tableur utilisé est reproduit ci-dessous. Il pourra être utilisé pour les fortes décharges (1000W) proposées ci-dessus (§ 21).

ESTIMATION CAPACITE BATTERIES à parti de faibles variations										Relevés fin 2022						
capacité = Wh période /DOD										premières lectures incomplètes						
jaune: données, bleu: calculé																
Du fait de la faible variation des tensions en cours de décharge, les capacités peuvent s'exprimer en Ah ou en Wh																
Pour une très faible consommation (41W), il est normal que les capacités calculées soient élevées																
Capacité nominale: 1250Ah * 12.72V *2 (batteries 24V) = 31.8kWh																
Début mesure	fin mesure	SOC		décharge (DOD en % total)	Durée (H)		Consommation horaire (W)	Consommation période Wh	capacité calculée kWh	capacité Nominale (kWh)	capacité totale					
		début	final		mesuré	vidage total					test	valeur C corrigée	calcul faible décharge	calcul forte décharge		
				100.00	10		41	410	0	31.8						
01/08/2022 18:30	02/08/2022 04:30	100.00	91.70	8.30	10	120		1 940	23	31.8	27.3	103	27.3			
19/11/2022 15:44	20/11/2022 06:43	100.00	98.60	1.40	15	1070	41	614	44	31.8	37.4	1 257	37.4			
20/11/22 17:44	21/11/2022 04:43	100.00	98.60	1.40	11	785	41	450	32	31.8	32.0	789	32.0			
21/11/22 17:44	22/11/2022 04:43	100.00	90.70	9.30	11	118	41	450	5	31.8	12.4	46	12.4			
22/11/22 16:44	23/11/2022 04:43	100.00	90.70	9.30	12	129	41	491	5	31.8	13.0	53	12.9			
23/11/22 17:44	24/11/2022 05:43	100.00	95.10	4.90	12	245	41	491	10	31.8	36.0	277	8.9	8.9		
30/11/2022 00:00	30/11/2022 09:00	100.00	99.60	0.40	9	2250	41	369	92	31.8	54.0	3 821	54.3			
02/12/2022 16:00	04/12/2022 06:00	100.00	99.00	1.00	38	3800	41	1558	156	31.8	70.4	8 413	70.4			
04/12/2022 14:45	06/12/2022 08:00	100.00	99.00	1.00	41	4125	41	1 691	169	31.8	73.4	9 515	73.3			
08/12/2022 16:00	09/12/2022 11:00	100.00	99.50	0.50	19	3800	41	779	156	31.8	70.4	8 413	70.4			
09/12/2022 16:00	10/12/2022 07:00	100.00	99.50	0.50	15	3000	41	615	123	31.8	62.5	5 896	62.6			
10/12/2022 16:00	11/12/2022 06:00	100.00	99.60	0.40	14	3500	41	574	143	31.8	67.6	7 440	67.5			



Faible puissance de décharge en bleu. En rouge possibilité de noter les série en forte puissance

4 QUELQUES RÉFÉRENCES

La plupart de ces articles utilisent la notion d'état de charge (SOC), sans préciser s'il s'agit du % de charge par rapport à une valeur nominale, ou de la valeur de charge en Ah ou Wh. Ces méthodes s'intéressent surtout à l'état de santé de la batterie, plutôt qu'à sa capacité totale ou utile.

4.1 DELAILLE

- [86] J.D. Weiss, B.R. Stallard, M.J. Garcia, “*Using optical absorption to measure the state of charge of lead-acid batteries*”, Society of Photo-Optical Instrumentations Engineers Vol-12 (1998) p. 3254-3259. **Document demandé**
A l'aide de fibre optique ce système mesure la variation d'absorption lumineuse de l'électrolyte;
- [87] O.D. Cortazar, V. Feliu, “*A simple and robust fiber optics system for measuring the lead-acid battery state-of-charge*”, Journal of Power Sources, Article in Press (2006).
La fibre optique, couplée à un réfractomètre, évalue la densité de l'électrolyte d'où une évaluation de l'état de charge;
- [92] P.J. Blood, S. Sotiropoulos, “*An electrochemical technique for state-of-charge (SOC) probing of positive lead-acid battery plates*”, Journal of Power Sources Vol-110 (2002) p. 96-106.
Cette méthode sert surtout à contrôler la qualité de la plaque positive, et accessoirement de l'état de charge.
- [93] I.R. Hill, E.E. Andrukaitis, “*Non-intrusive measurement of the state-of-charge of lead-acid batteries using wire-wound coils*”, Journal of Power Sources Vol-103 (2001) p. 98-112.
Cette technique utilise une bobine fixée à l'extérieur de la batterie du côté de la plaque négative. Avec une excitation de 1 à 40Hz, le changement d'inductance de la bobine permet d'estimer l'état de charge de la batterie avec une précision de 10%.
- [98] E. Michel, B. Monvert, Mc Carthy, N. Vela, P. Lenain, “*New battery charge control for PV systems*”, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow (2000).
- [99] D.U. Sauer, “ . 1-13.
- [100] R. Weiss, J. Appelbaum., “*Battery state of charge determination in photovoltaic systems*”, Journal of the Electrochemical Society Vol-129 No. 9 (1982) p. 1928-1933
- [105] S. Nugues, “*Mesure de l'état de charge d'une batterie par coulométrie corrigée par impédancemétrie*”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Spécialité, Génie Electrique, soutenue le 09 octobre 1996.
- [115] R. Perez, “*Lead-acid battery state of charge vs. Voltage*”, Home Power Vol-36 (1993) p. 66-69.
- [116] F. Hoffart, “*Charge indicator gauges lead-acid batteries*”, Design Ideas EDN (1999) p. 102-103
- [118] P.E. Pascoe, A.H. Anbuky, “*The behaviour of the coup de fouet of valve-regulated lead-acid batteries*”, Journal of Power Sources Vol-111 (2002) p. 304-319.
- [123] P. Pascoe, A. Anbuky, Patent number GB2350686, “*Battery capacity measurement*”, 06-12-2000.
- [124] C.S.C. Bose, Patent number US6255801, “*System and method for assessing a capacity of a battery and power plant incorporating the same*”, 03-07-2001.
- [129] A. Delaille, “*Développement de méthodes d'évaluation de l'état de charge et de l'état de santé des batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques*”, Rapport technique DSEN/DL/2005-01.
- [147] F. Huet, R.P. Nogueira, “*Etude de la faisabilité du diagnostic de l'état de charge d'un accumulateur au plomb par mesures d'impédance*”, Rapport final contrat CEAC-CNRS (2000).
- [161] D.H.J. Baert, A.A.K. Vervaet, “*A fast method for the measurement of the electrical capacitance for the estimation of battery capacity*”, 25th International Telecommunications Energy Conference Vol-E87 N°12 (2004) p. 3478-3484.
- [162] H. Blanke, O. Bohlen, S. Buller, R.W. De Doncker, B. Fricke, A. Hammouche, D. Linzen, M.

Thele, D.U. Sauer, “*Impedance measurements on lead-acid batteries for state-of-charge, state-of-health and cranking capability prognosis in electric and hybrid electric vehicles*”, Journal of Power, Sources Vol-144 (2005) p. 418-425.

- [163] S. Biscaglia, “Modélisation de la phase de décharge
- [168] Y. Mieno, M. Teramura, “Prediction of remaining battery discharge capacity by neural networks and its display circuit”, EPE Lausanne (1999) p. 1-5.
- [176] Norme européenne EN 61427, “Accumulateurs pour systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. Prescriptions générales et méthodes d'essai”, (2002) p. 1-15.

4.2 VICTRON

4.3 EUROPE