ANALYSE DES DONNEES DE LA TOITURE DU CEREMA
TROISIÈME PARTIE

I. INFLUENCE DE LA DERIVE DES VALEURS DES RESISTANCES DE CHARGE

I.1 Simulation des courants Icc de pseudo courts-circuits

- En examinant le câblage de la centrale d'acquisition NI on remarque que toutes les mesures effectuées sont des tensions aux bornes des associations « résistance de charge à 0,1% de tolérance + relais de commutation ». Or, selon les spécifications constructeur, la résistance de contact des relais s'élève à 50 mΩ.
  Cette valeur n'est pas à négliger devant la tolérance même des résistances (ajout de 50 fois la tolérance de la résistance de 1 ohm nominal, de 5 fois la tolérance pour celle de 10 ohms).

- Dans les tableaux on n'intégrera pas la tolérance de fabrication de la résistance de 1 ohm et on considérera différentes valeurs de résistance aux bornes de la carte d'acquisition : le cas idéal d'une résistance de charge d' 1 ohm nominal en omettant le relais, une résistance de charge d'1 ohm nominal en l'intégrant, une résistance de charge augmentée de 10 % et enfin une de 20%, avec prise en compte des relais dans les calculs. Ces augmentations de résistance peuvent être dues à des contacts imparfaits dans les différents borniers ou à des soudures à forte résistivité. Le courant lu est exprimé pour plusieurs longueurs de câble.

- La résistance de charge de 10 ohms nominaux est elle aussi augmentée de celle du relais pour tous les calculs de la pseudo puissance. Par contre on suppose ici qu'elle n'évolue pas même lorsqu'elle dissipe plus de 5W.

- Les calculs ci-dessous concernent des conducteurs de petite section. D'autres figurent en annexe pour des sections courantes supérieures.

Section de 0,5 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	Icc lu en A 5m	Icc lu en A 10m	Icc lu en A 15m	Icc lu en A 20m	Icc lu en A 25m	Icc lu en A 30m	Icc lu en A 35m	Icc lu en A 40m	Icc lu en A 45m	Icc lu en A 50m
1	1,232	1,230	1,228	1,226	1,225	1,223	1,221	1,219	1,217	1,215
1,05	1,294	1,292	1,290	1,288	1,286	1,284	1,282	1,280	1,278	1,276
1,15	1,416	1,414	1,412	1,410	1,408	1,405	1,403	1,401	1,399	1,397
1,25	1,539	1,536	1,534	1,532	1,529	1,527	1,525	1,522	1,520	1,518

On constate à la deuxième ligne du tableau que la mesure de pseudo court-circuit dépasse déjà la valeur STC (1,24 A) en intégrant la simple résistance de contact des relais, soit un excès de 3,7% à 25 m de la centrale d'acquisition et encore de 2,9% à 50m. En clair le panneau à 25m

présente un courant de court-circuit supérieur d'environ 0,8% par rapport à celui situé à 50m, ce à conditions d'éclairement et de température identiques.

En rajoutant 100 mΩ supplémentaire (10% de la valeur nominale , troisième ligne) on calcule un excès de 13,5% pour le panneau situé à 25m et de 12,7% pour celui à 50 mètres, soit toujours un écart relatif de 0,8% au bénéfice de celui situé à 25m.

Pour 200 mΩ supplémentaires (20% de la valeur nominale, quatrième ligne) on calcule un excès de 23,3% à 25m et de 22,4% à 50m, soit un écart relatif de 0,7% au bénéfice de celui situé à 25m.

Dans le tableau ci-dessous on calcule une pseudo puissance au moyen du courant mesuré grâce à la résistance d'1 ohm et de la tension mesurée via celle de 10 ohms.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
1	14,654	14,610	14,565	14,521	14,477	14,434	14,390	14,347	14,304	14,261
1,05	15,387	15,340	15,294	15,247	15,201	15,155	15,110	15,064	15,019	14,974
1,15	16,845	16,794	16,743	16,692	16,641	16,591	16,541	16,491	16,442	16,392
1,25	18,301	18,246	18,190	18,135	18,080	18,026	17,971	17,917	17,863	17,810

Les écarts de résistance se répercutent bien évidemment sur ceux de la pseudo puissance : ainsi on « gagne » artificiellement 3,603 W pour un panneau situé à 25m si son courant est mesuré avec une résistance de charge 25% supérieure au cas idéal. Ramené à un panneau de 20Wc STC, c'est loin d'être négligeable.

I.2 Simulation des pseudo tensions

- Dans les tableaux de calcul on n'intégrera pas la tolérance de fabrication de la résistance de 10 ohms et on considérera différentes valeurs de résistance aux bornes de la carte d'acquisition : le cas idéal d'une résistance de charge de 10 ohms nominaux en omettant le relais, une résistance de charge de 10 ohms nominaux en l'intégrant, une résistance de charge augmentée de 1 % et enfin une de 2%, avec prise en compte du relais dans les calculs. Ces augmentations de résistance peuvent être dues à des contacts imparfaits dans les différents borniers ou à des soudures à forte résistivité. La pseudo tension lue est exprimée pour plusieurs longueurs de câble.

- On suppose que la résistance de charge de 10 ohms n'augmente pas lorsqu'elle dissipe une puissance supérieure à 5W, phénomène inévitable aux conditions STC.

- Pour les calculs de pseudo puissance on se place dans le cas quasi idéal où seule intervient la résistance du relais dans l'augmentation de la résistance de 1 ohm. En effet, on calcule aisément qu'il faudrait un courant supérieur à 2,23 A pour que cette résistance dissipe une puissance susceptible de l'altérer car alors supérieure à 5W.

- Là encore les calculs ci-dessous concernent des conducteurs de petite section. D'autres figurent en annexe pour des sections courantes supérieures.

Section de 0,5 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	U lue en V 5m	U lue en V 10m	U lue en V 15m	U lue en V 20m	U lue en V 25m	U lue en V 30m	U lue en V 35m	U lue en V 40m	U lue en V 45m	U lue en V 50m
10	11,837	11,819	11,802	11,784	11,767	11,749	11,732	11,715	11,697	11,680
10,05	11,894	11,876	11,858	11,841	11,823	11,805	11,788	11,771	11,753	11,736
10,15	12,007	11,989	11,971	11,953	11,935	11,918	11,900	11,883	11,865	11,848
10,25	12,120	12,102	12,084	12,066	12,048	12,030	12,012	11,994	11,977	11,959

A 25 m la tension lue est surévaluée de :

- 0,47% avec la prise en compte du relais (0,5% d'augmentation de la résistance),
- 1,42% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

A 50 m la tension est surévaluée de :

- 0,48% avec la prise en compte du relais,
- 1,44% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

Dans le tableau ci-dessous on calcule maintenant la pseudo puissance toujours avec un courant mesuré via la résistance d'1 ohm et une tension grâce à celle de 10 ohms.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
10	15,314	15,267	15,221	15,175	15,129	15,083	15,038	14,992	14,947	14,902
10,05	15,387	15,340	15,294	15,247	15,201	15,155	15,110	15,064	15,019	14,974
10,15	15,533	15,486	15,439	15,392	15,346	15,299	15,253	15,207	15,162	15,116
10,25	15,679	15,632	15,584	15,537	15,490	15,443	15,397	15,350	15,304	15,258

Pour un panneau situé à 25m le gain artificiel de puissance dû à la lecture surévaluée de la tension s'élève à 361 mW si la résistance de charge en entrée de la carte d'acquisition est de 2,5% supérieure au cas idéal (quatrième ligne). Ramené à un panneau de 20Wc STC, c'est relativement faible, soit 1,8%.

II INTERPRÉTATION DES SIMULATIONS DE COURANT ET DE PUISSANCE

- En raison de la résistance des câbles, le point de pseudo court-circuit se déplace vers la droite sur la courbe I-V. Ainsi plus le module PV est loin de la centrale d'acquisition, plus le courant fourni par le module est faible et plus la valeur lue par la résistance de 1 ohm le sera également. Ainsi, un module proche de la centrale d'acquisition donnera l'impression d'être mieux éclairé qu'un module éloigné, ce à température de cellules identique et irradiation similaire.

- La seule prise en compte de la résistance introduite par les relais de commutation accentue la valeur de pseudo court-circuit mesuré au point de dépasser la valeur STC quelle que soit la longueur de câble ou la section de conducteur prises en compte (voir les annexes). Cela est encore plus criant lorsque l'on simule une augmentation provoquée par des contacts résistifs supplémentaires ou des soudures imparfaites.

- La résistance des câbles affecte également la valeur de la pseudo tension, de la même manière que le pseudo court-circuit. Un module PV proche de la centrale présente une pseudo tension supérieure à celle d'un module éloigné alors même que l'irradiation et la température de cellules sont identiques. Comme précédemment des résistances de contact parasites augmentent sensiblement la valeur de tension mesurée.

- L'influence du courant de pseudo court-circuit l'emporte d'un facteur 10 sur celle de la pseudo tension dans le calcul de la pseudo puissance, avec l'hypothèse d'un module situé à 25 m et de la prise en compte des résistances parasites prises séparément. Cependant dans le cas où les résistances de 1 ohm et de 10 ohms seraient affectées simultanément de valeurs parasites il est clair que le calcul de la pseudo puissance donnerait des valeurs encore plus importantes.

- La distance entre les modules PV et la centrale d'acquisition introduit un biais expérimental important, quand bien même les résistances de mesure aux bornes des entrées analogiques ne présenteraient pas de dispersions à conditions environnementales identiques.

- De légères modifications de ces résistances faussent les mesures de manière sensible, aggravant ou compensant le cas échéant les problèmes d'éloignements différents des modules.

- Le principe de mesure retenu n'est pas vraiment adapté à la détection de la modification de puissance d'un module PV dont la température de cellule serait refroidie par l'action du vent ou de l'évapo-transpiration d'une toiture végétalisée.
  En effet le banc expérimental qui repose, pour chaque module PV, sur l'emploi de deux résistances de charge fixes ne permet pas de se positionner au point de puissance maximale (sauf à considérer, lors de la commutation de la résistance de 10 ohms une très grande longueur de câbles ou une section très faible dans des conditions environnementales très précises).
  Lorsque le MPP se déplace à droite le courant diminue très peu sur tous les points de la courbe I-V correspondante, point de court-circuit compris. Dans notre cas, une mesure de pseudo courant de court-circuit plus faible signifierait, à condition environnementales identiques, une température de cellule plus basse, donc un module qui produirait plus. **Ainsi le calcul d'une pseudo puissance plus faible signifierait en fait une plus grande production du module, proposition des plus contre intuitives. Il faudrait alors hiérarchiser les modules par puissance croissante.**

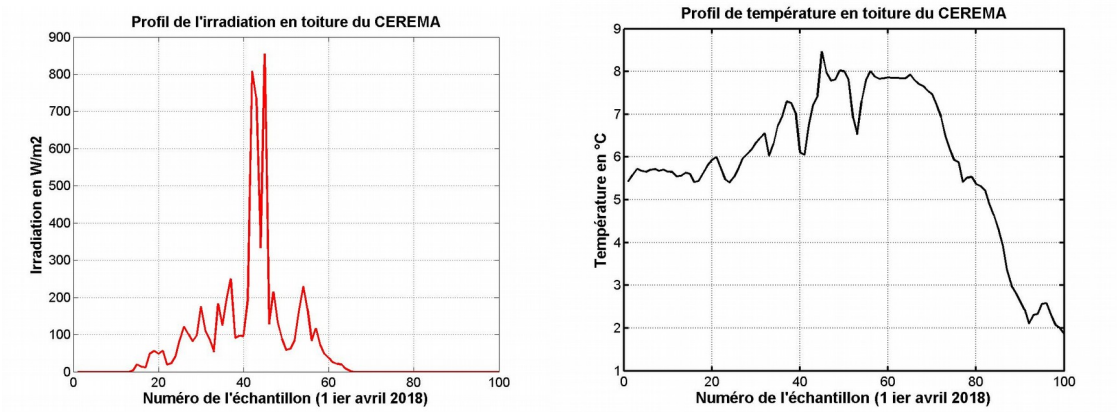
  Cependant le principal écueil serait probablement les très (trop ?) faibles écarts résultants à caractériser, au regard des nombreux biais expérimentaux présents (courbes I-V réelles légèrement différentes, distance des modules PV par rapport à la centrale d'acquisition, dispersion des résistances de charge réelles, encrassement des cellules).
  Les ombrages dus aux superstructures en toiture sont par contre faciles à caractériser en raison de la réduction sensible et durable du courant de court-circuit résultant.

III COMPARAISON AVEC DES RELEVES EXPÉRIMENTAUX

III.1 Relevés du 1 ier avril 2018

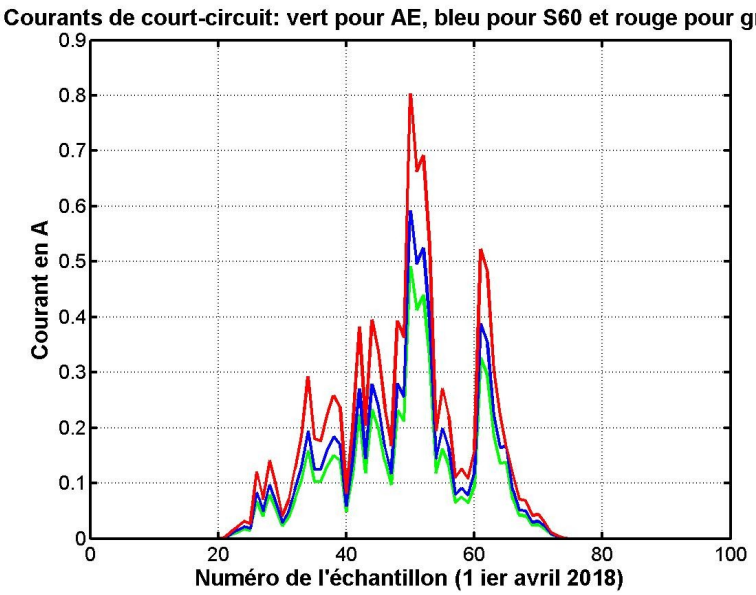
Cette date a été choisie car l'irradiation présente beaucoup de fluctuations pendant la journée.

III.1.1 Profils de l'irradiation et de la température



La température de l'air du 1 ier avril 2018 qui n'excède pas 8,5°C au meilleur de la journée est globalement favorable au refroidissement des modules PV. Le courant de court-circuit des modules PV aura donc tendance à être moins important que lors d'une journée plus chaude, ce à irradiation égale.
Sur le profil de l'irradiation on constate deux pics importants : le premier à 809 W/m2 et le second à 855 W/m2. Ces deux valeurs proches de l'irradiation STC devraient induire des courants de court-circuit avoisinant les 1,24 A théoriques, ce par valeurs légèrement inférieures.
Ces acquisitions s'étant faites hors période caniculaire on va supposer que l'effet de refroidissement des modules PV dû à la toiture végétalisée pendant est négligeable et donc n'est pas visible sur le courant de court-circuit.

III.1.2 Profils des trois courants de court-circuit



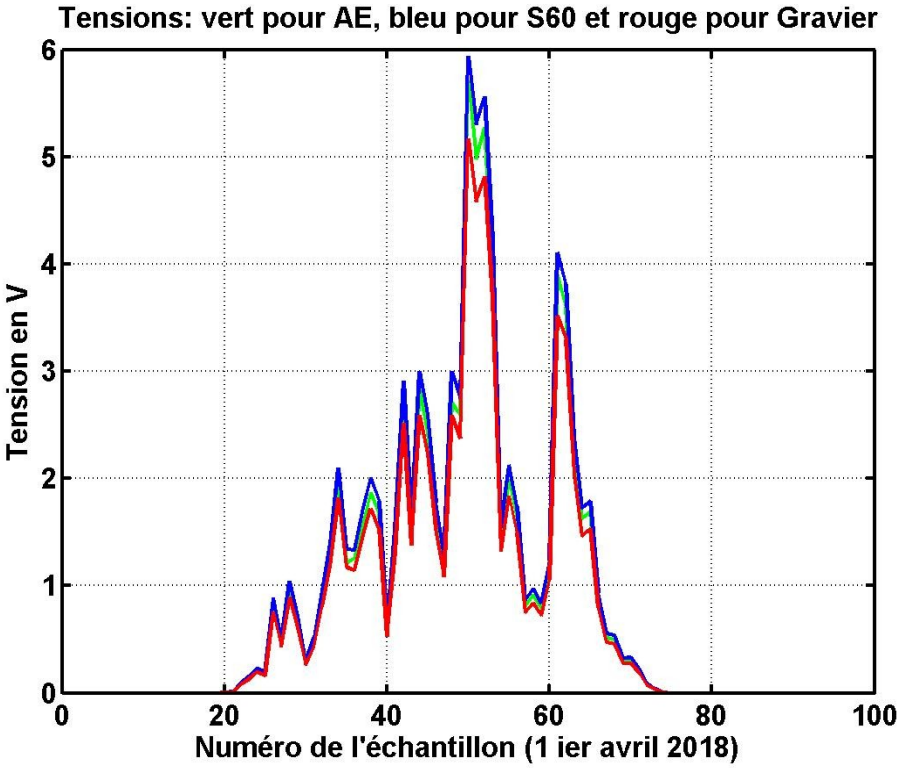
Le profil de courant est de forme similaire pour les trois modules, ce quasiment toute la journée.
Le courant de court-circuit du module S60 est supérieur à celui du module AE de 0 à 36%, avec un écart moyen de 21% et un écart type de 5%. Les écarts extrêmes sont notés en début de journée, lorsque l'éclairement est faible.
L'écart moyen de 21% ne semble pas pouvoir s'expliquer par l'éloignement du module S60 (car c'est le plus éloigné de la centrale d'acquisition) mais plus sûrement par une résistance de charge de pseudo court-circuit environ 20% plus élevée que celle du module AE, en faisant l'hypothèse de courbes I-V strictement identiques.

Le courant de court-circuit du module Gravier est supérieur quant à lui de 20 à 100% à celui du module AE, avec un écart moyen de 70% et un écart type de 11%.
Dans ce cas l'écart moyen de 70% est probablement causé en partie par une moindre longueur des câbles (module le plus proche du coffret) **ou** (inclusif) plus sûrement par une résistance de charge de pseudo court-circuit environ 70% plus élevée que celle du module AE.
Les écarts extrêmes sont notés :

- en tout début de journée (100%)
- à l'échantillon 65 (20%), alors que l'on devrait retrouver la même écart que celui de l'échantillon 64 (64%), un palier étant en effet observé sur les deux autres modules.

Il faut attendre l'échantillon 67 pour que de nouveau le module Gravier se comporte comme les deux autres.
Cette diminution anormale du courant est peut-être provoquée par un ombrage temporaire (de l'ordre de 45 mn) en fin de journée.

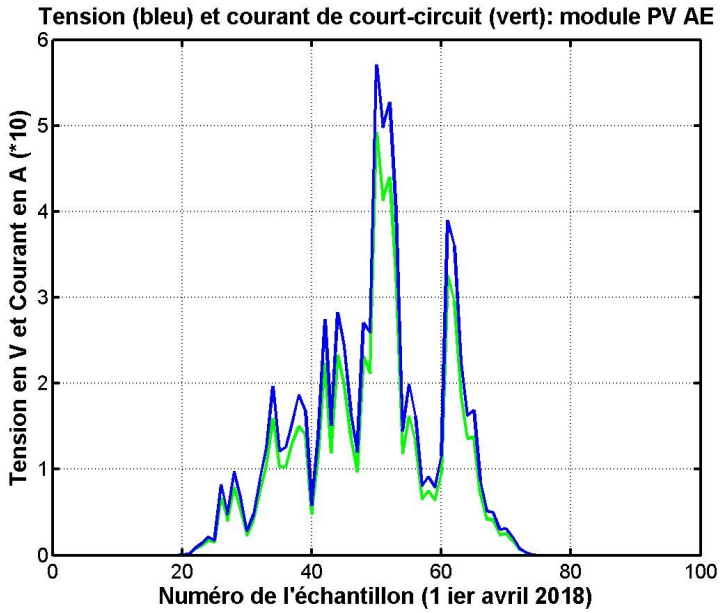
III.1.3 Profils des trois tensions



Le profil de tension est de forme similaire pour les trois modules, ce quasiment toute la journée.
La tension du module S60 est supérieure à celle du module AE de 0 à 17%, avec un écart moyen de 7% et un écart type de 3%. Les écarts extrêmes sont notés en début et fin de journée, lorsque l'éclairement est faible.
Comme pour les courants de pseudo court-circuit l'écart moyen de 7% ne s'explique pas par un moindre éloignement du module S60, car c'est en fait le plus éloigné de la centrale d'acquisition. Il est plus probablement dû à une résistance de charge de tension environ 7% plus élevée que celle du module AE.

La tension du module Gravier est inférieure quant à elle de 0 à 12% à celle du module AE, avec un écart moyen de 8% et un écart type de 2%.
Dans ce cas l'écart moyen de 8% est dû en partie à une moindre longueur des câbles (module le plus proche du coffret) **ou** (inclusif) plus sûrement par une résistance de charge de tension environ 8% plus faible que celle du module AE.
Les écarts extrêmes sont relevés tout à la fin de journée lorsque l'éclairement est faible.

III.1.4 Module PV sur parcelle d'argile expansée (AE)



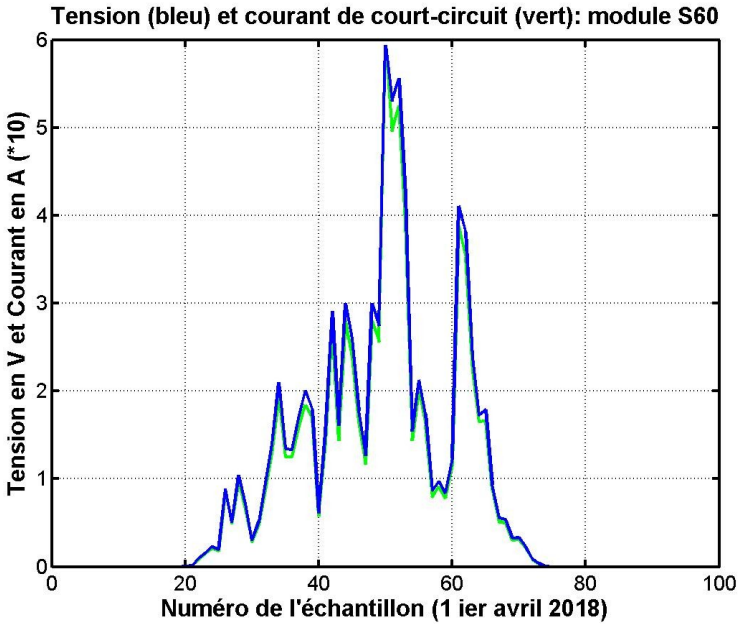
On constate que les courant et tension ont le même profil, ce qui est normal en raison de la nature résistive des charges. Cependant le niveau de tension excède pour chaque point le courant affiché au décuple, ce qui suggère que la résistance de charge pour la mesure de la tension est nettement supérieure à 10 ohms.
Si l'on compare maintenant le profil du courant avec celui de l'irradiation on constate dans les deux cas la présence de pics mais ils ne se trouvent pas aux mêmes échantillons. Ainsi on relève par exemple cinq échantillons :

- d'irradiation, échantillons 42 à 45 et [809; 736; 333; 855] W/m2,
- de courant, échantillons 50 à 53 et [0,492; 0,413; 0,440; 0,329] A.

En supposant les acquisitions des courants fiables, on constate que celles de l'irradiation semblent avancées de 8 échantillons (2 heures). Cela est peut-être dû à

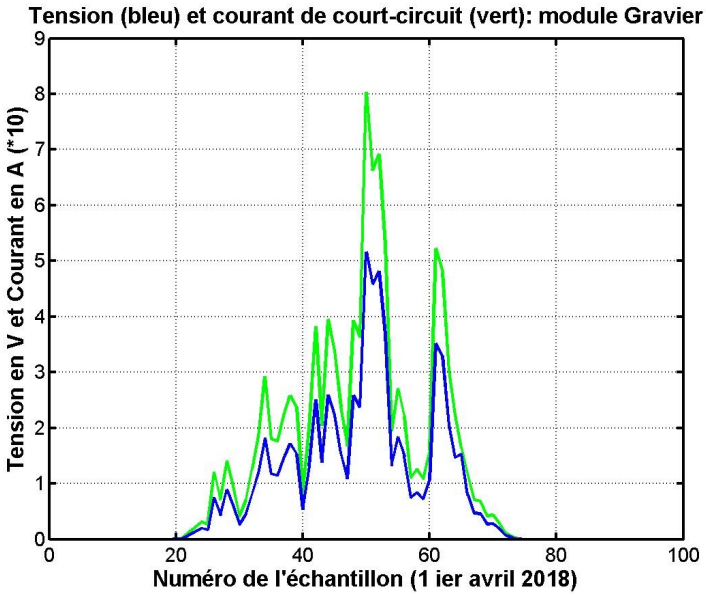
une mise en forme imparfaite de données en provenance d'une autre centrale d'acquisition que celle des résistances de charge.
Ce qui frappe le plus cependant est l'absence de corrélation nette entre les niveaux de courant et ceux de l'irradiation: à des conditions proches de STC les courants se révèlent en effet trop faibles. Seule la valeur de 0,413 A est compatible avec une irradiation de 333 W/m2, à condition de supposer que la résistance de charge soit très proche d'1 ohm. Une explication plaiderait pour la présence d'ombrages temporaires mais ce phénomène se reproduit exactement en même temps sur les trois modules, ce qui est peu probable. Plus sûrement on pourrait supposer une **désynchronisation entre les acquisitions d'irradiation et de courant en raison d'une prise en compte retardée des requêtes d'acquisition du pyranomètre**.

III.1.5 Module PV sur parcelle avec stockage d'eau (S60)



Les tensions et courants « décuplés » étant quasiment confondus, on en déduit que la résistance de charge pour la mesure de tension est elle-même nettement supérieure aux 10 ohms nominaux, sachant aussi que la résistance de pseudo court-circuit est probablement plus élevée de 20% que celle du module AE.
Ainsi le module S60 présente un pic de courant mesuré à 0,592 A à la mi-journée (échantillon 50), soit 20% de plus que le module AE (0,492 A).

III.1.6 Module PV sur parcelle Gravier



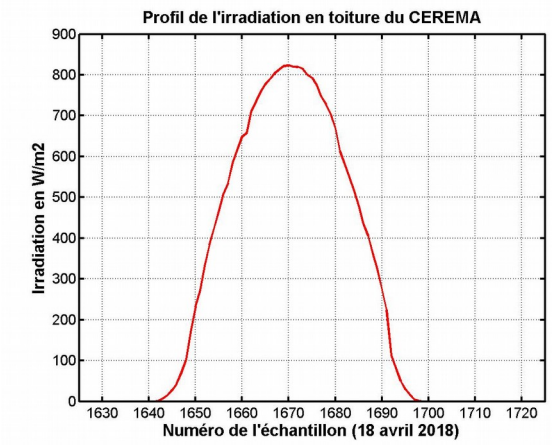
Le module Gravier présente un pic de courant mesuré à 0,804 A à la mi-journée (échantillon 50), soit 63% de plus que le module AE (0,492 A).

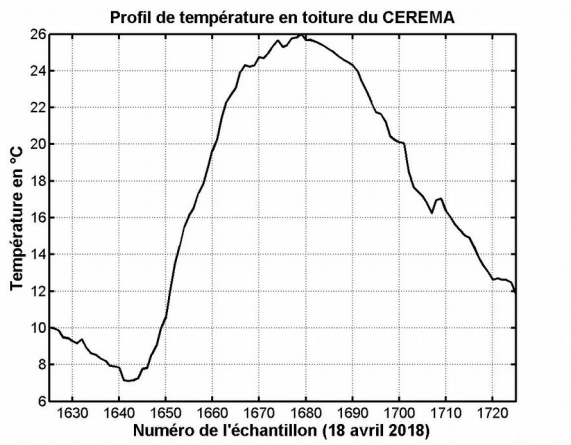
La tension par contre est inférieure à celle des deux autres modules et semble compatible avec une résistance de charge se rapprochant des 10 ohms nominaux.

III.2 Relevés du 18 avril 2018

Cette date a été choisie car l'irradiation présente une parabole quasi parfaite, signe d'un ensoleillement sans aucun passage nuageux, avec des conditions assez proches des valeurs STC. La comparaison entre les différents modules en est donc facilitée.

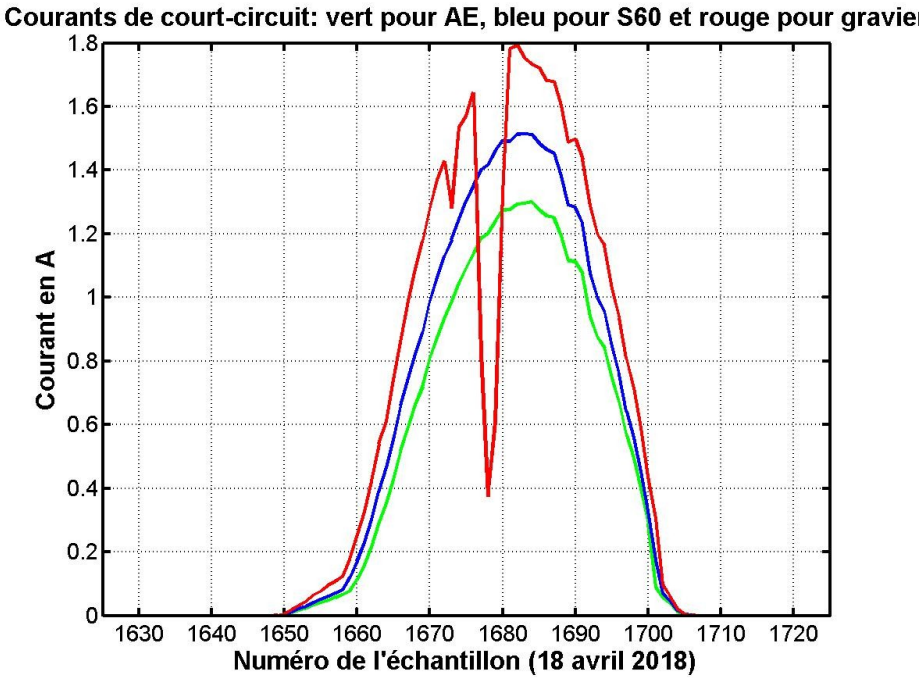
III.2.1 Profils de l'irradiation et de la température





La température de l'air du 18 avril 2018 oscille entre 7,11°C et 26,00 °C et reste donc suffisamment clémente pour éviter un échauffement excessif des cellules.
Sur le profil de l'irradiation on relève un pic à 823 W/m2 à l'échantillon 1670 mais il faut garder à l'esprit la désynchronisation de la mesure de l'irradiation par rapport à celle des grandeurs électriques. Située à seulement 17,7% de la valeur STC (1000 W/m2) ce niveau d'éclairement devrait permettre de retrouver, à des échantillons ultérieurs, des courants compatibles avec les données constructeurs, hors biais expérimentaux évidemment.

III.2.2 Profils des trois courants de court-circuit



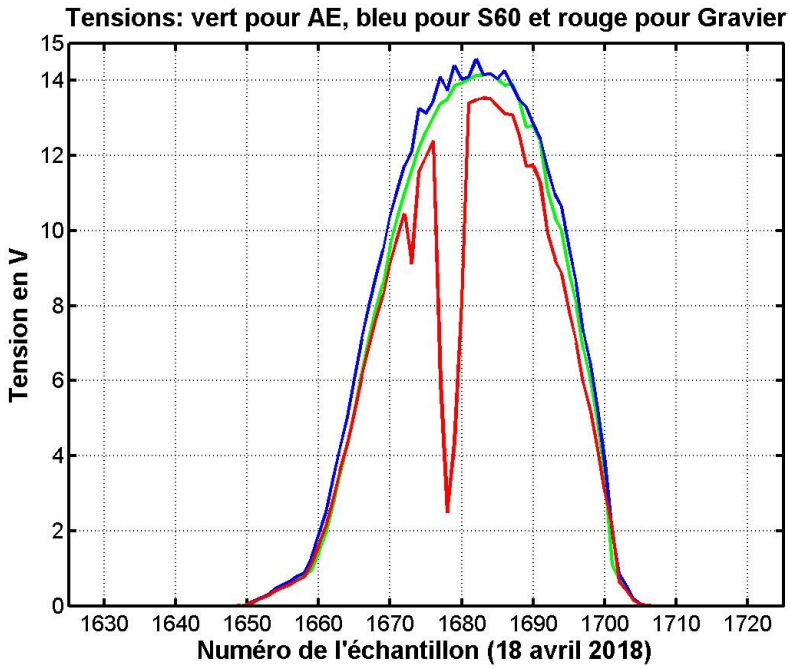
Les courants des modules AE et S60 adoptent un profil similaire avec une valeur en moyenne 23,7% supérieure pour le module de la parcelle avec stockage d'eau (écart type de 13,4%).
L'écart minimum se trouve à l'échantillon 1699 (12,7%) et le maximum est visible à l'échantillon 1701 (95,5%). Ces échantillons espacés de seulement 30 mn se situent en fin de journée, où des différences d'illuminations sont possibles en lumière rasante sur ces deux modules.

Il est à noter que le calcul d'écart de courant entre les deux modules est très proche de celui effectué sur les relevés du 1 ier avril (21%, avec un écart type de 5%), ce qui indique une bonne fidélité des mesures en présence de conditions environnementales très différentes.

La comparaison entre les modules AE et Gravier montre un écart moyen de courant (57,9% contre 70%) comme un écart type (44,3% vs 11%) assez éloignés des calculs de la journée du 1ier avril. Cette dispersion importante s'explique en grande partie par le profil perturbé du courant, signe incontestable de la présence d'ombrages pendant la journée.
On relève ainsi un premier creux de courant à l'échantillon 1673 où l'intensité n'est supérieure à celle du module AE que de 29, 3% puis à l'échantillon 1678, soit 1h15 plus tard,

où elle passe très nettement en dessous avec une valeur minimale de 0,375 A, soit un déficit de 68,8 % par rapport au module AE.
Les écarts les plus importants se retrouvent aussi en fin de journée: ainsi à l'échantillon 1701 on a un courant 242,7% plus élevé sur le module Gravier, toujours par rapport au module AE (0,305 A vs 0,089A). Un éclairement plus tardif du module Gravier pourrait expliquer ce phénomène.

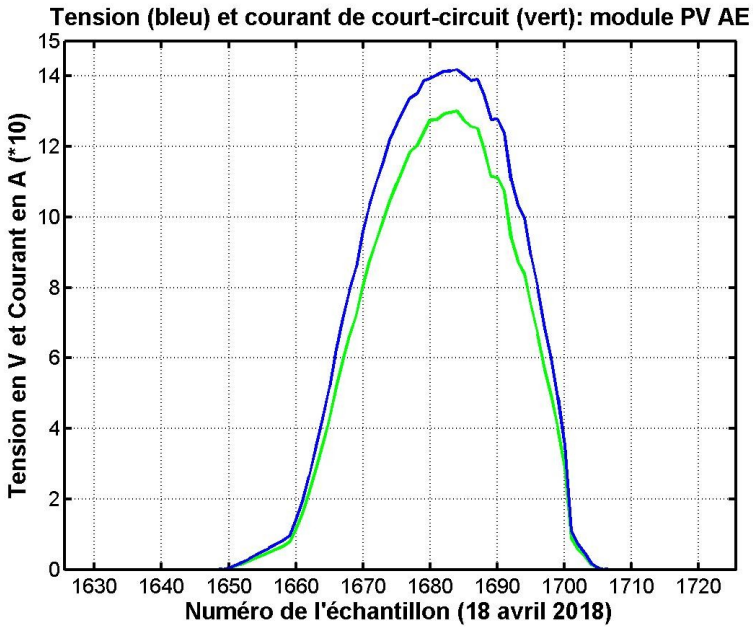
III.2.3 Profils des trois tensions



Le profil de tension est de forme similaire pour les modules AE et S60, à la différence du module Gravier qui présente des creux de tension aux échantillons 1673, 1677, 1678, 1679 et 1680.
La tension du module S60 est supérieure à celle du module AE de 0 à 80%, avec un écart moyen de 11% et un écart type de 13%. L'écart le plus important se situe en fin de journée (échantillon 1701).
La tension plus élevée du module S60 est probablement due à une résistance de charge plus forte d'environ 11 %.

La tension du module Gravier présente beaucoup plus de dispersion en raison de la présence d'ombrages : inférieure de 82% à celle du module AE à l'échantillon 1678 elle lui est supérieure de 90% à l'échantillon 1701. En moyenne cependant elle lui reste inférieure de 8 % avec un écart type important de 21% qui reflète bien cette dispersion. Il est à remarquer que l'on retrouve le même écart moyen de 8% que celui de la journée du 1^{ier} avril, avec cependant un écart type dix fois supérieur.
Ici on ne peut conclure à une moindre longueur des câbles car c'est la tension la plus basse mais plus sûrement à une résistance de charge environ 8% plus faible que celle du module AE.
Les écarts extrêmes sont relevés logiquement au maximum de l'ombrage (échantillon 1678) et aussi en fin de journée (échantillon 1701).

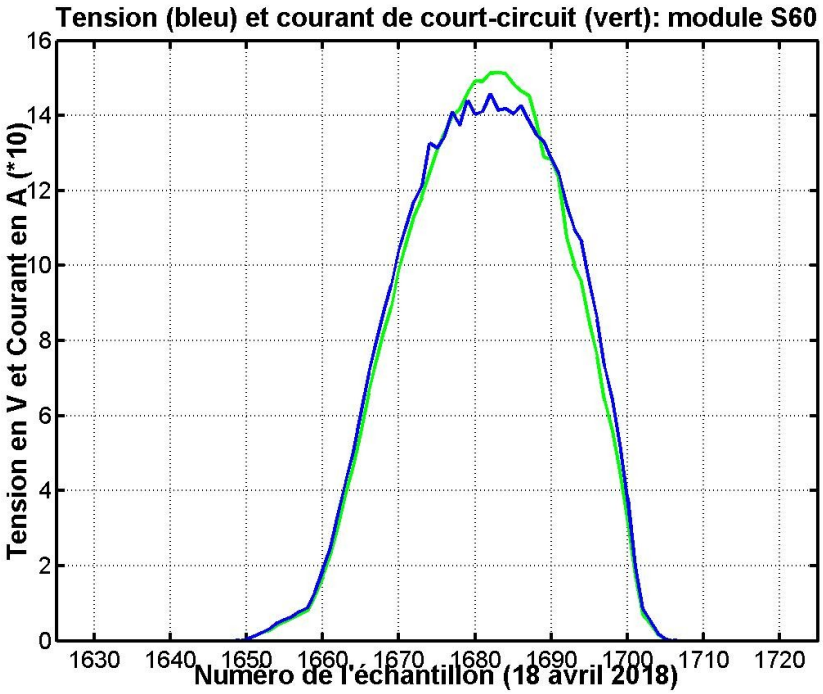
III.2.4 Module PV sur parcelle d'argile expansée (AE)



Comme pour les relevés du 1 ier avril, courant et tension ont le même profil, avec une tension toujours supérieure au décuple du courant, confirmant ainsi une charge pour la mesure de la tension nettement supérieure à 10 ohms.

Le courant crête s'élève à 1,301 A à l'échantillon 1684, ce qui dépasse de 4,9% la valeur de court-circuit STC (1,24 A) alors que l'éclairement se situe 17,7% en dessous. Au regard de la période de l'année il est probable que l'irradiation n'a pas atteint de niveau supérieur à la valeur STC de 1000 W/m2 et que sa mesure à 823 W/m2 peut être considérée comme exacte. Ici encore nous avons la quasi confirmation que la résistance de charge excède nettement 1 ohm nominal (en supposant une courbe I-V expérimentale strictement identique à la courbe STC).

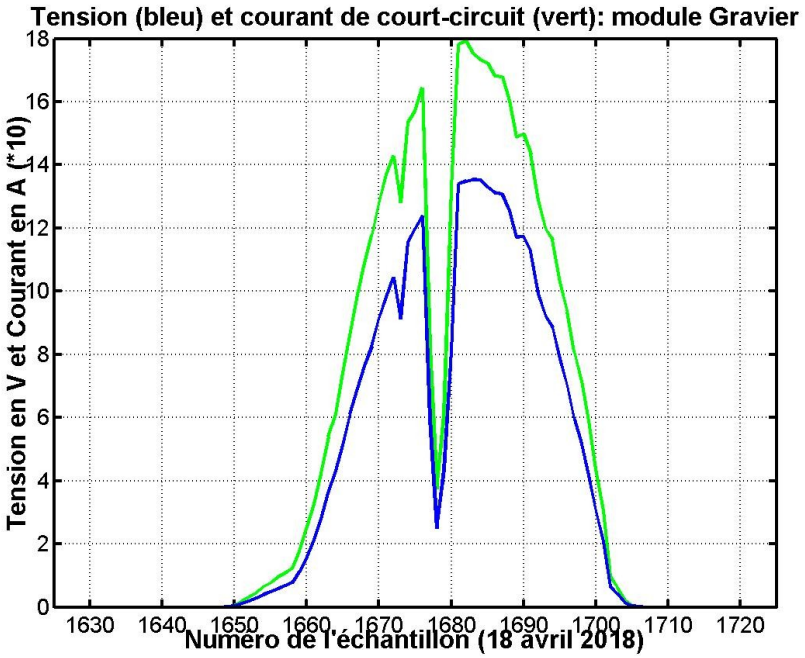
III.2.5 Module PV sur parcelle avec stockage d'eau (SE)



Le courant crête s'élève à 1,514 A à l'échantillon 1683 et dépasse donc la valeur de court-circuit STC de 22,1%. Comme le module S60 est le plus éloigné de la centrale d'acquisition il ne reste que l'hypothèse d'une résistance de charge excédant nettement 1 ohm nominal», ce dans une proportion d'au moins 20 % par rapport à celle du module AE (21% pour le 1ier avril, 23,7% pour le 18 avril).

Les tensions et courants « décuplés » étant quasiment confondus, on en déduit que la résistance de charge pour la mesure de tension est elle-même nettement supérieure aux 10 ohms nominaux.

III.2.6 Module PV sur parcelle Gravier



Le courant crête s'élève à 1,793 A à l'échantillon 1682, valeur 44,6% supérieure à la valeur de court-circuit STC. Nous constatons ici l'influence d'une moindre longueur de conducteurs qui se cumule à une résistance de charge devant excéder nettement 1 ohm nominal. En gommant les creux de courant du module Gravier, donc l'effet des ombrages, on trouve un écart moyen de 63,7% en faveur du module Gravier, ce par rapport au module AE, valeur assez proche des 70% des relevés du 1ier avril. Le lissage de la courbe de courant améliore aussi l'écart type (35,2% vs 44,3% avec ombrages).
On peut raisonnablement en déduire que la valeur de la résistance de charge de mesure de pseudo court-circuit est, pour le module Gravier, supérieure d'au moins 60% à celle du module AE.

La tension étant sensiblement inférieure au courant « décuplé » on en déduit que la résistance de charge pour la mesure de tension ne doit pas avoir une valeur bien différente des 10 ohms nominaux.

IV AMÉLIORATION DU BANC PV ACTUEL

IV.1 Caractérisation des mesures de courant de pseudo court-circuit et de tension

Afin de calibrer au mieux les mesures de courant et de tension pour chacun des modules il serait judicieux de procéder à des acquisitions après avoir remplacé les modules par une alimentation de laboratoire stabilisée et régulée. Une discrétisation du courant injecté devrait permettre d'en déduire la valeur des résistances de charge. Une trentaine de d'acquisitions pourraient être envisagées, avec un intervalle de 0 à 1,5A et un pas de 50 mA.

Il serait ensuite possible de corriger les acquisitions afin d'obtenir des grandeurs électriques plus réalistes, aptes à des comparaisons plus justes des comportements des modules PV.

IV.2 Ajout de convertisseurs élévateurs de type Boost

Les phénomènes d'accroissement de la puissance des modules grâce à un refroidissement des cellules seront bien mieux détectés si l'on fait travailler les panneaux à leur point maximum de puissance. Cela est possible en reliant aux modules PV un convertisseur statique muni d'un algorithme de recherche de la puissance maximale (MPPT).

Au choix, la puissance pourra être dissipée individuellement sur une résistance de charge dimensionnée à la puissance du module ou via un bus de puissance parallèle reliant tous les convertisseurs à une résistance de charge unique.

La première solution est la plus simple à réaliser car elle permet un découplage parfait entre les modules, d'où la conception de programmes de commande relativement simples et fiables L'inconvénient est qu'il faut prévoir la protection de trois résistances de charge, soit trois coffrets distincts près des modules, soit un coffret plus encombrant déporté pouvant toutes les contenir.

La seconde solution ne nécessite qu'une seule charge pouvant dissiper le triple de puissance, donc un seul coffret. En contrepartie, l'utilisation d'un bus de puissance parallèle implique le couplage de tous les convertisseurs par leur sortie, donc la nécessité de concevoir des algorithmes de commande aptes à compenser les influences mutuelles des convertisseurs risquant de provoquer la déstabilisation du bus de puissance.

Dans tous les cas il faut prévoir un dispositif de mesure des tensions et courant au MPP suffisamment précis pour distinguer de faibles écarts de puissance dus à l'influence des parcelles végétalisées.

V ANNEXES

V.1 Pseudo courant de court-circuit pour d'autres sections de conducteur

Section de 0,75 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	Icc lu en A 5m	Icc lu en A 10m	Icc lu en A 15m	Icc lu en A 20m	Icc lu en A 25m	Icc lu en A 30m	Icc lu en A 35m	Icc lu en A 40m	Icc lu en A 45m	Icc lu en A 50m
1	1,233	1,231	1,230	1,229	1,228	1,226	1,225	1,224	1,223	1,221
1,05	1,294	1,293	1,292	1,290	1,289	1,288	1,286	1,285	1,284	1,282
1,15	1,417	1,416	1,414	1,413	1,411	1,410	1,408	1,407	1,405	1,404
1,25	1,540	1,538	1,536	1,535	1,533	1,532	1,530	1,528	1,527	1,525

Pour la résistance de valeur nominale augmentée de la résistance de contact du relais on calcule une intensité de pseudo court-circuit dépassant la valeur STC de 3,9% à 25 m de la centrale d'acquisition et de 3,4% à 50m. Le courant mesuré du panneau à 25m est supérieur de 0,6% à celui situé à 50m.

En rajoutant 100 mΩ supplémentaire (10% de la valeur nominale) on calcule un excès de 13,8% pour le panneau situé à 25m et de 13,2% pour celui à 50 mètres, soit un écart relatif de 0,5% au bénéfice de celui situé à 25m.

Pour 200 mΩ supplémentaires (20% de la valeur nominale) on calcule un excès de 23,6% à 25m et de 23,0% à 50m, soit un écart relatif de 0,5% au bénéfice de celui situé à 25m.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
1	14,669	14,639	14,610	14,580	14,551	14,521	14,492	14,463	14,434	14,405
1,05	15,403	15,371	15,340	15,309	15,278	15,247	15,217	15,186	15,155	15,125
1,15	16,862	16,828	16,794	16,760	16,726	16,692	16,658	16,625	16,591	16,558
1,25	18,320	18,283	18,246	18,209	18,172	18,135	18,099	18,062	18,026	17,989

Avec cette section de conducteurs on « gagne » artificiellement 3,621 W pour un panneau situé à 25m si son courant est mesuré avec une résistance de charge 25% supérieure au cas idéal. Cette valeur, bien que supérieure, est très proche de celle calculée pour des conducteurs de 0,5 mm2.

Section de 1 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	Icc lu en A 5m	Icc lu en A 10m	Icc lu en A 15m	Icc lu en A 20m	Icc lu en A 25m	Icc lu en A 30m	Icc lu en A 35m	Icc lu en A 40m	Icc lu en A 45m	Icc lu en A 50m
1	1,233	1,232	1,231	1,230	1,229	1,228	1,227	1,226	1,225	1,225
1,05	1,295	1,294	1,293	1,292	1,291	1,290	1,289	1,288	1,287	1,286
1,15	1,417	1,416	1,415	1,414	1,413	1,412	1,411	1,410	1,409	1,408
1,25	1,540	1,539	1,538	1,536	1,535	1,534	1,533	1,532	1,530	1,529

Pour la valeur nominale augmentée de la résistance de contact du relais on calcule une intensité de pseudo court-circuit dépassant la valeur STC de 4,1% à 25 m de la centrale d'acquisition et de 3,7% à 50m Le courant mesuré du panneau à 25m est supérieur de 0,4% à celui situé à 50m.

En rajoutant 100 mΩ supplémentaire (10% de la valeur nominale) on calcule un excès de 13,9% pour le panneau situé à 25m et de 13,5% pour celui à 50 mètres, soit un écart relatif de 0,3% au bénéfice de celui situé à 25m.

Pour 200 mΩ supplémentaires (20% de la valeur nominale) on calcule un excès de 23,8% à 25m et de 23,3% à 50m, soit un écart relatif de 0,4% au bénéfice de celui situé à 25m.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
1	14,677	14,654	14,632	14,610	14,588	14,565	14,543	14,521	14,499	14,477
1,05	15,410	15,387	15,364	15,340	15,317	15,294	15,270	15,247	15,224	15,201
1,15	16,870	16,845	16,819	16,794	16,768	16,743	16,717	16,692	16,667	16,641
1,25	18,329	18,301	18,273	18,246	18,218	18,190	18,163	18,135	18,108	18,080

Avec cette section de conducteurs on « gagne » artificiellement 3,630 W pour un panneau situé à 25m si son courant est mesuré avec une résistance de charge 25% supérieure au cas idéal. Cette valeur est très légèrement supérieure à celle calculée pour des conducteurs de 0,75 mm2.

Section de 1,5 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	Icc lu en A 5m	Icc lu en A 10m	Icc lu en A 15m	Icc lu en A 20m	Icc lu en A 25m	Icc lu en A 30m	Icc lu en A 35m	Icc lu en A 40m	Icc lu en A 45m	Icc lu en A 50m
1	1,233	1,233	1,232	1,231	1,231	1,230	1,230	1,229	1,228	1,228
1,05	1,295	1,294	1,294	1,293	1,292	1,292	1,291	1,290	1,290	1,289
1,15	1,418	1,417	1,416	1,416	1,415	1,414	1,413	1,413	1,412	1,411
1,25	1,540	1,540	1,539	1,538	1,537	1,536	1,536	1,535	1,534	1,533

Pour la valeur nominale augmentée de la résistance de contact du relais on calcule une intensité de pseudo court-circuit dépassant la valeur STC de 4,2% à 25 m de la centrale d'acquisition et de 3,9% à 50m Le courant mesuré du panneau à 25m est supérieur de 0,2% à celui situé à 50m.

En rajoutant 100 mΩ supplémentaire (10% de la valeur nominale) on calcule un excès de 14,1% pour le panneau situé à 25m et de 13,8% pour celui à 50 mètres, soit un écart relatif de 0,3% au bénéfice de celui situé à 25m.

Pour 200 mΩ supplémentaires (20% de la valeur nominale) on calcule un excès de 23,9% à 25m et de 23,6% à 50m, soit un écart relatif de 0,3% au bénéfice de celui situé à 25m.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
1	14,684	14,669	14,654	14,639	14,625	14,610	14,595	14,580	14,565	14,551
1,05	15,418	15,403	15,387	15,371	15,356	15,340	15,325	15,309	15,294	15,278
1,15	16,879	16,862	16,845	16,828	16,811	16,794	16,777	16,760	16,743	16,726
1,25	18,338	18,320	18,301	18,283	18,264	18,246	18,227	18,209	18,190	18,172

Avec cette section de conducteurs on « gagne » artificiellement 3,640 W pour un panneau situé à 25m si son courant est mesuré avec une résistance de charge 25% supérieure au cas idéal. Cette valeur est très légèrement supérieure à celle calculée pour des conducteurs de 1 mm2.

Section de 2,5 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	Icc lu en A 5m	Icc lu en A 10m	Icc lu en A 15m	Icc lu en A 20m	Icc lu en A 25m	Icc lu en A 30m	Icc lu en A 35m	Icc lu en A 40m	Icc lu en A 45m	Icc lu en A 50m
1	1,234	1,233	1,233	1,233	1,232	1,232	1,231	1,231	1,231	1,230
1,05	1,295	1,295	1,295	1,294	1,294	1,293	1,293	1,293	1,292	1,292
1,15	1,418	1,418	1,417	1,417	1,416	1,416	1,415	1,415	1,415	1,414
1,25	1,541	1,540	1,540	1,539	1,539	1,538	1,538	1,537	1,537	1,536

Pour la valeur nominale augmentée de la résistance de contact du relais on calcule une intensité de pseudo court-circuit dépassant la valeur STC de 4,35% à 25 m de la centrale d'acquisition et de 4,19% à 50m Le courant mesuré du panneau à 25m est supérieur de 0,15% à celui situé à 50m.

En rajoutant 100 mΩ supplémentaire (10% de la valeur nominale) on calcule un excès de 14,19% pour le panneau situé à 25m et de 14,03% pour celui à 50 mètres, soit un écart relatif de 0,14% au bénéfice de celui situé à 25m.

Pour 200 mΩ supplémentaires (20% de la valeur nominale) on calcule un excès de 24,1% à 25m et de 23,9% à 50m, soit un écart relatif de 0,2% au bénéfice de celui situé à 25m.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
1	14,690	14,681	14,672	14,663	14,654	14,645	14,636	14,628	14,619	14,610
1,05	15,425	15,415	15,406	15,396	15,387	15,378	15,368	15,359	15,350	15,340
1,15	16,886	16,876	16,865	16,855	16,845	16,835	16,824	16,814	16,804	16,794
1,25	18,346	18,335	18,323	18,312	18,301	18,290	18,279	18,268	18,257	18,246

Avec cette section de conducteurs on « gagne » artificiellement 3,647 W pour un panneau situé à 25m si son courant est mesuré avec une résistance de charge 25% supérieure au cas idéal. Cette valeur est très légèrement supérieure à celle calculée pour des conducteurs de 1,5 mm2.

V.2 Pseudo tension pour d'autres sections de conducteur

Section de 0,75 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	U lue en V 5m	U lue en V 10m	U lue en V 15m	U lue en V 20m	U lue en V 25m	U lue en V 30m	U lue en V 35m	U lue en V 40m	U lue en V 45m	U lue en V 50m
10	11,843	11,831	11,819	11,808	11,796	11,784	11,773	11,761	11,749	11,738
10,05	11,899	11,888	11,876	11,864	11,852	11,841	11,829	11,817	11,805	11,794
10,15	12,013	12,001	11,989	11,977	11,965	11,953	11,941	11,930	11,918	11,906
10,25	12,126	12,114	12,102	12,090	12,078	12,066	12,054	12,042	12,030	12,018

A 25 m la tension lue est surévaluée de :

- 0,47% avec la prise en compte du relais,
- 1,43% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

A 50 m la tension est surévaluée de :

- 0,48% avec la prise en compte du relais,
- 1,43% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,38% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
10	15,329	15,298	15,267	15,236	15,206	15,175	15,144	15,114	15,083	15,053
10,05	15,403	15,371	15,340	15,309	15,278	15,247	15,217	15,186	15,155	15,125
10,15	15,549	15,518	15,486	15,455	15,423	15,392	15,361	15,330	15,299	15,269
10,25	15,695	15,664	15,632	15,600	15,569	15,537	15,506	15,475	15,443	15,412

Pour un panneau situé à 25m le gain artificiel de puissance dû à la lecture surévaluée de la tension s'élève à 363 mW si la résistance de charge en entrée de la carte d'acquisition est de 2,5% supérieure au cas idéal. Ramené à un panneau de 20Wc STC, c'est relativement faible, soit encore 1,8%.

Section de 1 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	U lue en V 5m	U lue en V 10m	U lue en V 15m	U lue en V 20m	U lue en V 25m	U lue en V 30m	U lue en V 35m	U lue en V 40m	U lue en V 45m	U lue en V 50m
10	11,846	11,837	11,828	11,819	11,811	11,802	11,793	11,784	11,775	11,767
10,05	11,902	11,894	11,885	11,876	11,867	11,858	11,849	11,841	11,832	11,823
10,15	12,016	12,007	11,998	11,989	11,980	11,971	11,962	11,953	11,944	11,935
10,25	12,129	12,120	12,111	12,102	12,093	12,084	12,075	12,066	12,057	12,048

A 25 m la tension lue est surévaluée de :

- 0,47% avec la prise en compte du relais,
- 1,43% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

A 50 m la tension est surévaluée de :

- 0,47% avec la prise en compte du relais,
- 1,43% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
10	15,337	15,314	15,291	15,267	15,244	15,221	15,198	15,175	15,152	15,129
10,05	15,410	15,387	15,364	15,340	15,317	15,294	15,270	15,247	15,224	15,201
10,15	15,557	15,533	15,510	15,486	15,463	15,439	15,416	15,392	15,369	15,346
10,25	15,703	15,679	15,656	15,632	15,608	15,584	15,561	15,537	15,514	15,490

Pour un panneau situé à 25m le gain artificiel de puissance dû à la lecture surévaluée de la tension s'élève à 364 mW si la résistance de charge en entrée de la carte d'acquisition est de 25% supérieure au cas idéal. Ramené à un panneau de 20Wc STC, c'est relativement faible, soit encore 1,8%.

Section de 1,5 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	U lue en V 5m	U lue en V 10m	U lue en V 15m	U lue en V 20m	U lue en V 25m	U lue en V 30m	U lue en V 35m	U lue en V 40m	U lue en V 45m	U lue en V 50m
10	11,849	11,843	11,837	11,831	11,825	11,819	11,813	11,808	11,802	11,796
10,05	11,905	11,899	11,894	11,888	11,882	11,876	11,870	11,864	11,858	11,852
10,15	12,019	12,013	12,007	12,001	11,995	11,989	11,983	11,977	11,971	11,965
10,25	12,132	12,126	12,120	12,114	12,108	12,102	12,096	12,090	12,084	12,078

A 25 m la tension lue est surévaluée de :

- 0,48% avec la prise en compte du relais,
- 1,44% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

A 50 m la tension est surévaluée de :

- 0,47% avec la prise en compte du relais,
- 1,43% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
10	15,345	15,329	15,314	15,298	15,283	15,267	15,252	15,236	15,221	15,206
10,05	15,418	15,403	15,387	15,371	15,356	15,340	15,325	15,309	15,294	15,278
10,15	15,565	15,549	15,533	15,518	15,502	15,486	15,470	15,455	15,439	15,423
10,25	15,711	15,695	15,679	15,664	15,648	15,632	15,616	15,600	15,584	15,569

Pour un panneau situé à 25m le gain artificiel de puissance dû à la lecture surévaluée de la tension s'élève à 365 mW si la résistance de charge en entrée de la carte d'acquisition est de 25% supérieure au cas idéal. Ramené à un panneau de 20Wc STC, c'est relativement faible, soit encore 1,8%.

Section de 2,5 mm2.

Résistance aux bornes en Ω	U lue en V 5m	U lue en V 10m	U lue en V 15m	U lue en V 20m	U lue en V 25m	U lue en V 30m	U lue en V 35m	U lue en V 40m	U lue en V 45m	U lue en V 50m
10	11,851	11,848	11,844	11,841	11,837	11,833	11,830	11,826	11,823	11,819
10,05	11,908	11,904	11,901	11,897	11,894	11,890	11,886	11,883	11,879	11,876
10,15	12,021	12,017	12,014	12,010	12,007	12,003	11,999	11,996	11,992	11,989
10,25	12,134	12,130	12,127	12,123	12,120	12,116	12,112	12,109	12,105	12,102

A 25 m la tension lue est surévaluée de :

- 0,48% avec la prise en compte du relais,
- 1,44% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

A 50 m la tension est surévaluée de :

- 0,48% avec la prise en compte du relais,
- 1,44% avec 1,5% d'augmentation de la résistance,
- 2,39% avec 2,5% d'augmentation de la résistance.

Résistance aux bornes en Ω	P calc en W 5m	P calc en W 10m	P calc en W 15m	P calc en W 20m	P calc en W 25m	P calc en W 30m	P calc en W 35m	P calc en W 40m	Pcalc en W 45m	Pcalc en W 50m
10	15,351	15,342	15,333	15,323	15,314	15,305	15,295	15,286	15,277	15,267
10,05	15,425	15,415	15,406	15,396	15,387	15,378	15,368	15,359	15,350	15,340
10,15	15,571	15,562	15,552	15,543	15,533	15,524	15,514	15,505	15,496	15,486
10,25	15,718	15,708	15,699	15,689	15,679	15,670	15,660	15,651	15,641	15,632

Pour un panneau situé à 25m le gain artificiel de puissance dû à la lecture surévaluée de la tension s'élève à 365 mW si la résistance de charge en entrée de la carte d'acquisition est de 25% supérieure au cas idéal. Ramené à un panneau de 20Wc STC, c'est relativement faible, soit encore 1,8%.