

Plateforme Logistique de Châteaudun

Installation photovoltaïque en toiture d'entrepôt

NOTE TECHNIQUE PRECISANT LES REGLES DE CONCEPTION DES CIRCUITS DC



ANNEXE D

Maître d'Ouvrage

VIRTUO INVEST

2-22 Place des Vins de France

75012 PARIS

Mélanie CAHIN – melanie.cahin@virtuo-property.com

BET

GENERGIES

Bureaux Coworking

27, Rue Romarin

69001 LYON

Romain CELERIER – romain.celerier@genergies.fr

Version du document

Indice	Date	Rédaction	Vérification	Validation
A	23/04/2021	A.BORGAT	R.CELERIER	M.CAHIN

Historique des versions

Indice	Date	Modification
A	23/04/2021	Création

Sommaire

1.	VALEURS DE COURANT & TENSION DC	3
1.1.	Généralités	3
1.2.	Niveau de tension partie courant continu	3
1.3.	Niveau d'intensité partie courant continu	4
2.	CHOIX DES COMPOSANTS DC	5
2.1.	Connecteurs employés pour les liaisons des chaînes PV	5
2.2.	Câbles double isolation pour les liaisons sur la partie DC	6
2.3.	Protection des branches PV par fusible	7
2.4.	Protection des branches PV par parafoudre	8
3.	MISE EN ŒUVRE DU CIRCUIT DC	9
3.1.	Circulation des câbles inter-modules	9
3.2.	Circulation des câbles jusqu'à l'entrée DC de l'onduleur	9
3.3.	Dimensionnement des câbles DC	9

1. VALEURS DE COURANT & TENSION DC

1.1. Généralités

Si la tension maximale unitaire d'un module photovoltaïque se situe en général entre 35 et 55 V, les onduleurs photovoltaïques requièrent un niveau de tension bien plus élevé afin de générer un signal alternatif compatible avec celui du réseau de distribution. Pour augmenter la tension du champ solaire, les modules sont donc associés en série au sein d'une branche, et les circuits DC atteignent généralement un niveau de tension supérieur à la TBT (>120 Vdc).

D'autre part, la mise en parallèle des branches PV permet d'augmenter le courant d'entrée des onduleurs photovoltaïques jusqu'à des intensités nominales de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines d'ampères, qui nécessite donc un dimensionnement en conséquence des câbles et de l'appareillage électrique.

1.2. Niveau de tension partie courant continu

Le niveau de tension maximal admissible sur la partie courant continu dépend des caractéristiques intrinsèques des composants et du point de fonctionnement des onduleurs retenus.

A l'heure actuelle, les solutions disponibles sur le marché permettent de constituer des chaînes de modules admettant une tension maximale en circuit ouvert de 1500 Vdc. Pour ce projet, la tension maximale en circuit ouvert aux bornes des branches de modules sera limitée à 1000 Vdc en entrée d'onduleur photovoltaïque.

Également, le nombre de modules par branche est déterminé en fonction de la plage de tension nominale acceptée par les onduleurs. Cette plage de fonctionnement nominale est généralement comprise entre 500 Vdc et 800 Vdc.

Le tableau suivant donne des exemples d'arrangements possibles pour les branches de modules photovoltaïques. La valeur $U_{oc,max}$ correspond à la tension maximale en circuit ouvert aux bornes d'une branche – en tenant compte d'une correction en tension pour une température minimale hypothétique de -20°C et un ensoleillement de 1000 W/m^2 . La valeur U_{mpp} correspond à la tension nominale de fonctionnement aux bornes d'une branche.

Marque	Modèle	Technologie	Puissance Unitaire	Quantité max par branche	$U_{oc,max}^*$	U_{mpp}
			W		V	V
Longi Solar	LR4-60HPH	Monocristallin	375	24	986,4	830,4
Voltec	Tarka 120 VSMS	Monocristallin	340	23	945,3	795,8
Trina Solar	TSM – DE06M	Monocristallin	340	23	945,3	786,6
DMEGC	DMH – M6	Monocristallin	335	23	955,7	778,6

* la tension augmente lorsque l'éclairement augmente | la tension augmente lorsque la température baisse.

A retenir :

- La tension maximale mesurable aux bornes d'une branche en circuit ouvert donnée est inférieure à 1000 Vdc
- La tension de travail mesurable aux bornes d'une branche qui produit un courant est inférieure à 800 Vdc

1.3. Niveau d'intensité partie courant continu

La mise en parallèle de plusieurs branches photovoltaïques entraîne une augmentation de l'intensité transitant dans les câbles raccordés à l'entrée de l'onduleur. La valeur maximale admissible est fixée par les caractéristiques de l'onduleur, certains n'acceptant que quelques Ampères en entrée DC (onduleurs de branches monophasés 230Vdc de quelques kVA par exemple), d'autres plusieurs milliers d'Ampères (onduleurs centraux triphasés 480 Vdc de 2 MVA par exemple). Ainsi, contrairement à la tension pour laquelle des limites techniques standards existent, la plage de courants admissibles partie courant continu est relativement vaste, d'autant qu'aucun critère réglementaire ne porte sur ces valeurs.

Au regard de l'analyse de risques et des produits disponibles sur le marché à l'heure actuelle, la topologie la plus pertinente correspond aux onduleurs de puissance intermédiaire voisine de 100 kVA. Ce choix est motivé par la volonté d'éviter des unités de conversion monolithiques et complexes, et permet de limiter l'impact des défauts : un dysfonctionnement sur un convertisseur monobloc 1 MVA aura un effet plus important qu'un dysfonctionnement sur une unité 10 fois plus petite. Cette architecture permet également de gagner en modularité et de faciliter le travail d'arrangement des branches de modules.

Le tableau suivant précise quelques valeurs de courant max admissible pour plusieurs modèles d'onduleurs qui pourraient être envisagés pour ce projet :

Marque	Modèle	Puissance de conversion	Tension nominale AC	Tension max DC	Courant max DC	Courant court-circuit DC
		kVA	Vac	Vdc	Adc	Adc
SMA	SHP 100-20	100	400	1000	180	325
SUNGROW	SG110CX	110	400	1000	234	360
HUAWEI	SUN2000-100KTL-M1	110	400	1000	260	400
INGETEA	INGECON SUN 100TL	100	400	1000	185	240
FRONIUS	TAURO ECO 100-3-D	100	400	1000	225	375

A retenir :

- Le choix se porte sur des onduleurs de plusieurs dizaines à quelques centaines de kVA
- Les courants transitant sur la partie continue sont de l'ordre de quelques centaines d'Ampères

2. CHOIX DES COMPOSANTS DC

Les spécificités du circuit à courant continu des installations photovoltaïques ont nécessité le développement de produits adaptés et la définition de règles de l'art et de normes spécifiques afin de supprimer les risques de choc électrique et d'incendie puisque :

- Les tensions aux bornes des branches de modules PV atteignent généralement plusieurs centaines de volts ; le risque de choc électrique par contact direct ou indirect est donc réel ;
- En cas de mauvais contact, un phénomène d'amorçage d'arc électrique va se produire et se maintenir dans le temps du fait de la nature continue de ce courant électrique. Si cet arc n'est pas rapidement coupé, un début d'incendie peut alors se produire.

2.1. Connecteurs employés pour les liaisons des chaînes PV

La connectique utilisée pour la liaison entre modules PV et jusqu'aux coffrets de protection et de coupure DC est de type IP2X pour garantir la sécurité des opérateurs face au risque de contact direct avec une partie conductrice sous tension et IP67 moulée dans un plastique anti-UV afin de résister dans le temps aux agressions climatiques.

Ces connecteurs, conformes à la norme NF EN 62852 (2015) qui remplace la norme NF EN 50521, seront sertis aux tenants et aux aboutissants des câbles assurant la liaison entre les modules et les boîtes de jonction. Ces connecteurs débroschables peuvent être ouverts ou fermés en toute sécurité dans la mesure où la coupure du circuit DC est effective – ces broches possèdent un pouvoir de séparation mais pas de coupure.

Nous donnons ci-dessous les caractéristiques du couple de connecteurs MC4 de la marque Staubli qui pourront être employés (ou modèle équivalent chez un autre fabricant).



Technische Daten

Bemessungsstrom Rated current Intensité assignée	17A (1,5mm ²) 22A (2,5mm ² ; 14AWG) 30A (4mm ² ; 6mm ² ; 12AWG)
Bemessungsspannung Rated voltage Tension assignée	1000V (IEC/CEI) 600V (UL)
Prüfspannung Test voltage Tension de test	6kV (50Hz, 1min.)
Überspannungskat./Verschmutzungsgrad Overvoltage category/Pollution degree Catégorie de surtension/Degré de pollution	CATIII/2
Kontaktwiderstand der Steckverbinder Contact resistance of plug connectors Résistance de contact des connecteurs	0,5mΩ
Kontaktmaterial Contact material Matériau conducteur	Kupfer, verzinkt copper, tin plated cuivre, étamé
Isolationsmaterial Insulation material Matériau isolant	PC / PA
Kontaktsystem Contact system Système de contact	MC Kontaktlamellen MC Multilam Contact à lamelles MC

Technical data

Caractéristiques techniques

Verriegelungssystem Locking system Système de verrouillage	Snap-in
Schutzart, gesteckt Degree of protection, mated Degré de protection, connecté	IP67
Schutzart, ungesteckt Degree of protection, unmated Degré de protection, déconnecté	IP2X
Schutzklasse Safety class Classe de protection	II
Flammklasse Flame class Classe d'inflammabilité	UL94-V0
Kabelzugentlastung gemäss Cable strain relief according to Rétention du câble selon	DIN V VDE 0126-3
Umgebungstemperaturbereich Ambient temperature range Plage de température ambiante max.	-40°C...+90°C (IEC/CEI) -40°C...+75°C (UL)
Obere Grenztemperatur Upper limiting temperature Limite de température supérieure	105°C (IEC/CEI)

(Source : Staubli)

2.2. Câbles double isolation pour les liaisons sur la partie DC

Afin de minimiser les risques de défaut à la terre ou de courts-circuits, le guide UTE C 15-712-1 impose la réalisation de liaison DC à l'aide de câbles double isolation unipolaires spécifiques. Les caractéristiques minimales retenues pour les câbles sont les suivants :

- Isolement équivalent à la classe II ;
- Isolant de type C2 non propagateur de la flamme ;
- Équipé d'un dispositif de blocage permettant d'éviter l'arrachement ;
- Température admissible sur l'âme d'au moins 90°C en régime permanent ;
- Stabilité aux UV répondant à la condition d'influence AN3 (si non protégé par interposition d'écran) ;
- Tension assignée du câble compatible avec la tension maximale $U_{oc,max}$ pouvant être présente aux bornes du circuit DC.

Les câbles prévus seront de type H1Z2Z2-K. Nous donnons ci-dessous les caractéristiques des câbles Solarplast de la marque Omerin qui pourront être employés (ou modèle équivalent chez un autre fabricant).

Applications

La gamme **solarplast®** est conçue pour le câblage des panneaux photovoltaïques entre eux et entre les divers équipements. Idéal pour la connexion des éléments solaires avec le régulateur de charge et du régulateur de charge à l'accumulateur, leur souplesse est appréciée par les fabricants et les installateurs. Unipolaire ou twin, les câbles **solarplast®** offrent les solutions de câblage les mieux adaptées à l'environnement des panneaux ainsi qu'à la solution connectique retenue. Leurs dimensions sont étudiées pour accepter les principaux connecteurs du marché. Les matériaux employés, confèrent à la gamme **solarplast®** une résistance très élevée aux UV.

Ces câbles sont extrêmement performants par tous les temps (pluie, vent, neige, gel, grêle...).

Section [N x mm ²]	Diamètre extérieur nominal [mm]		Résistance linéique [ohm/km]	Masse linéique approximative [kg/km]
	mini	maxi		
solarplast® H1Z2Z2-K				
1 x 2,5	5.2	5.8	8.21	38
1 x 4	5.3	5.9	5.09	55
1 x 6	5.7	6.3	3.39	76
1 x 10	7.1	7.7	1.95	113
1 x 16	8.4	9.2	1.24	174
1 x 25	10.9	12.1	0.795	270



(Source : Omerin)

Câbles pour panneaux solaires photovoltaïques



- Certifié par Lloyd's Register selon la norme EN 50618
- Bonne tenue aux contraintes environnementales (UV, ozone, hydrolyse)
- Très faible dégagement de fumée en cas d'incendie
- Sans halogène et conforme RoHS
- Durée d'utilisation escomptée > 25 ans selon IEC 60216
- Enterrabilité selon UL 854 sections 23 et 24
- Immersion permanente AD8 selon NF C 15-100

Description du produit

Construction du câble

Ame

- Cuivre étamé souple classe 5 IEC 60228

Isolation intérieure

- Compound réticulé LSZH

Gaine extérieure

- Compound réticulé LSZH
- Couleur H1Z2Z2-K : Noir

Conditionnement

- Couronnes, tourets, bobines.

Marquage

- OMERIN SOLARPLAST H1Z2Z2-K 1x section mm²
- Année/Mois - 1.0/1.0 kV A.C

Normes de référence

- Conforme à la norme EN 50618
- Opacité des fumées selon IEC 61034-2 (Low Smoke)
- Gaz de combustion et corrosivité des fumées selon les normes IEC 60754-1 et IEC 60754-2 (Zéro Halogène)
- Résistance aux UV et à l'ozone selon la norme EN 50618
- Résistance aux chocs selon UL 854.23 (Impact-Resistance Test)
- Résistance aux écrasements selon UL 854.24 (Crushing-Resistance Tests)

Directive RoHS

- Certificat de conformité selon la directive européenne 2002/95/EC

Caractéristiques thermiques et mécaniques

- Température ambiante -40 °C à +90 °C
- Température maximale du conducteur +120 °C
- Température de court circuit +250 °C
- Vieillessement 20 000 h à 120 °C Selon norme IEC 60216
- Rayon de courbure 6 x Diam. extérieur [mm]

Caractéristiques électriques

- Résistance linéique à 20 °C Voir tableau
- Tension assignée 1.0 / 1.0 kV A.C. - 1.5 / 1.5 kV D.C.
- Tension maximale 1.2 kV A.C. - 1.8 kV D.C.
- Tension d'essai 6.5 kV A.C. - 15 kV D.C.
- Intensité admissible Selon la norme EN 50618

2.3. Protection des branches PV par fusible

Le Guide UTE C 15-712-1 impose une protection omnipolaire des branches contre les courts-circuits lorsque plus de 2 chaînes de modules sont mises en parallèle, afin de se prémunir face à un phénomène pouvant provoquer un départ d'incendie. Lorsque c'est le cas, des fusibles seront installés pour protéger à la fois la polarité positive et négative de chaque chaîne ou de chaque câble de groupe et ces derniers répondront aux spécifications suivantes :

- Être de type gPV et conforme à la norme NF EN 60269-1 ;
- Avoir une tension assignée compatible avec la tension maximale $U_{oc,max}$;
- Posséder un courant conventionnel de fonctionnement $I_2 = 1,45 I_n$ (avec I_n , le courant nominal dans le câble).

Les fusibles employés seront donc de type gPV (tension nominale 1000 Vdc). Nous donnons ci-dessous les caractéristiques des fusibles PVxxA-10F de la marque Cooper Bussmann qui pourront être employés (ou modèle équivalent chez un autre fabricant).

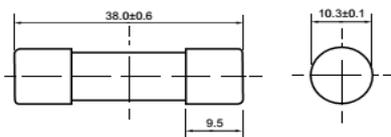
Specifications:

Catalog numbers / configurations										
Cylindrical ferrule	PCB fixing				Current rating (amps)	Voltage rating (Vdc)	Energy integrals I ² t (A ² s)		Watts loss (W)	
	Bolt fixing	Single pin	Double pin	In-line with crimp terminal			Pre-arcing	Total @ 1000V	0.8I _n	I _n
PV-1A10F	PV-1A10-T	PV-1A10-1P	PV-1A10-2P	PV-1A10F-CT	1	1000	0.15	0.4	0.8	1.5
PV-2A10F	PV-2A10-T	PV-2A10-1P	PV-2A10-2P	PV-2A10F-CT	2	1000	1.2	3.4	0.6	1.0
PV-3A10F	PV-3A10-T	PV-3A10-1P	PV-3A10-2P	PV-3A10F-CT	3	1000	4	11	0.8	1.3
PV-3-5A10F	PV-3-5A10-T	PV-3-5A10-1P	PV-3-5A10-2P	PV-3-5A10F-CT	3.5	1000	6.6	18	0.9	1.4
PV-4A10F	PV-4A10-T	PV-4A10-1P	PV-4A10-2P	PV-4A10F-CT	4	1000	9.5	26	1.0	1.5
PV-5A10F	PV-5A10-T	PV-5A10-1P	PV-5A10-2P	PV-5A10F-CT	5	1000	19	50	1.0	1.6
PV-6A10F	PV-6A10-T	PV-6A10-1P	PV-6A10-2P	PV-6A10F-CT	6	1000	30	90	1.1	1.8
PV-8A10F	PV-8A10-T	PV-8A10-1P	PV-8A10-2P	PV-8A10F-CT	8	1000	3	32	1.2	2.1
PV-10A10F	PV-10A10-T	PV-10A10-1P	PV-10A10-2P	PV-10A10F-CT	10	1000	7	70	1.2	2.3
PV-12A10F	PV-12A10-T	PV-12A10-1P	PV-12A10-2P	PV-12A10F-CT	12	1000	12	120	1.5	2.7
PV-15A10F	PV-15A10-T	PV-15A10-1P	PV-15A10-2P	PV-15A10F-CT	15	1000	22	220	1.7	2.9
PV-20A10F	PV-20A10-T	PV-20A10-1P	PV-20A10-2P	PV-20A10F-CT	20	1000	34	350	2.1	3.6
PV10M-25	—	—	—	—	25	1000	325	1860*	1.65	2.91
PV10M-30	—	—	—	—	30	1000	536	3360*	1.65	3.31

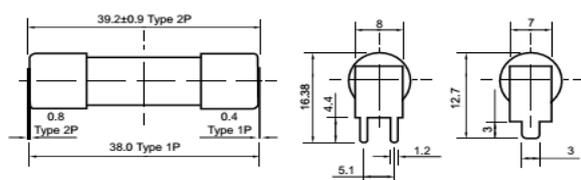
* Total I²t @ 20kA IR.

Dimensions/configurations - mm:

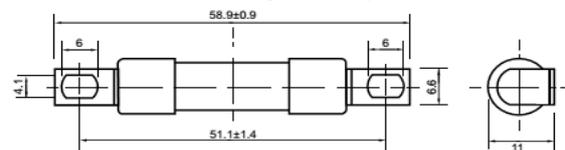
Cylindrical PV-(amp)A10F, PV10M-(amp)



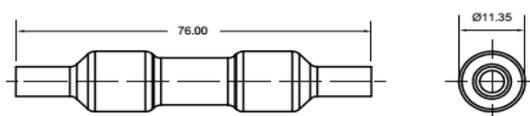
Cylindrical with PCB tabs PV-(amp)A10-1P (single pin), PV-(amp)A10-2P (double pin)



Cylindrical with bolt fixings PV-(amp)A10-T



In-line with crimp terminals PV-(amp)A10F-CT (1-20A)



The in-line crimp terminal version can be electrically insulated with customer supplied overmolding or approved heat-shrink.

Operating temperature range

- -40°C to 90°C

(Source : Cooper Bussmann)

2.4. Protection des branches PV par parafoudre

Les installations photovoltaïques sont soumises, comme tout système électrique, aux risques induits par la foudre. Régulièrement, des composants de ces installations sont détruits (onduleur, modules PV) à cause de ses effets directs ou indirects, induisant une augmentation du risque électrique et du risque incendie.

Le Guide UTE C 15-712-1 impose donc une protection par parafoudre DC au niveau des boîtiers de jonction et à proximité des entrées des onduleurs, ainsi qu'une protection par parafoudre AC au niveau de la sortie de la chaîne de conversion PV.

Le site visé comportant un paratonnerre auquel doivent être reliées les parties conductrices du champ photovoltaïque, le choix et la mise en œuvre des parafoudres sont faits conformément au guide UTE C 61-740-52. Il est ainsi prévu d'employer des parafoudres de Type I côté DC répondant aux critères suivants :

- Posséder un courant de décharge $I_n = 20 \text{ kA}$;
- Posséder un courant de choc par pôle $I_{imp} = 8 \text{ kA}$;
- Posséder un courant max de court-circuit $I_{scwpv} \gg I_{sc,max}$ (typique 1000 A) ;
- Posséder un niveau de protection $U_p > 80 \% U_{oc,max}$;
- Posséder une tension de tenue assignée $U_w > 6 \text{ kV}$.

Les parafoudres DC employés auront des caractéristiques similaires à ceux de la gamme DS60VGPV-1000G/51 de la marque Citel (ou modèle équivalent chez un autre fabricant).

Caractéristiques

Référence CITEL		DS60VGPV-600G/51	DS60VGPV-1000G/51	DS60VGPV-1500G/51
Description		Parafoudre PV de type 1+2	Parafoudre PV de type 1+2	Parafoudre PV de type 1+2
Réseau	Uocstc	Réseau PV 600 Vdc	Réseau PV 1000 Vdc	Réseau PV 1250 Vdc
Mode de connexion		+/-/PE	+/-/PE	+/-/PE
Mode de protection		MC/MD	MC/MD	MC/MD
Tension de régime perm. max	Ucpv	720 Vdc	1200 Vdc	1500 Vdc
Tenue au courant de court-circuit PV	Iscpv	1000 A	1000 A	1000 A
Courant de fonct. permanent - <i>courant de fuite à U_c</i>	Icpv	aucun	aucun	aucun
Courant résiduel - <i>courant de fuite à U_{cpv}</i>	Ipe	aucun	aucun	aucun
Courant de décharge maximal - <i>tenue max. 8/20 μs</i>	I _{max}	40 kA	40 kA	40 kA
Courant de choc par pôle - <i>tenue max. 10/350 μs</i>	I _{imp}	12.5 kA	12.5 kA	12.5 kA
Courant de choc total - <i>tenue max. 10/350 μs</i>	I _{total}	25 kA	25 kA	25 kA
Niveau de protection MC/MD @ I _n	U _p	2.2/2.8 kV	4.7/5.4 kV	4.7/5.4 kV
Courant de court-circuit admissible	Iscpv	1000 A	1000 A	1000 A
Déconnecteurs				
Déconnecteur thermique		interne		
Fusibles associés		sans		
Caractéristiques mécaniques				
Dimensions		voir schéma		
Raccordement au réseau		bornier vis : 6-35mm ²		
Indicateur de déconnexion		1 indicateur mécanique		
Télésignalisation		Sortie sur contact inverseur - 250V/3,5 A (AC) - 125V/3A (DC)		
Montage		Rail DIN symétrique 35 mm [EN60715]		
Température de fonctionnement		-40/+85°C		
Indice de protection		IP20		
Boîtier		Thermoplastique UL94-V0		
Conformité aux normes		EN60539-11 / UTE C61740-51		

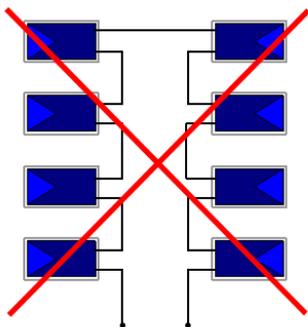
(Source : Citel)

Il est également prévu d'employer un dispositif parafoudre de type I côté AC, positionné au plus près de la sortie d'onduleur, dont les règles de sélection sont définies par le guide UTE C 61-740-52.

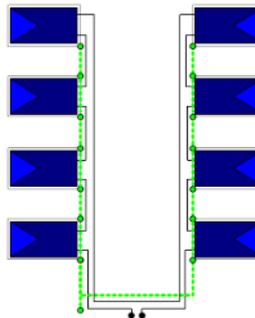
3. MISE EN ŒUVRE DU CIRCUIT DC

3.1. Circulation des câbles inter-modules

Les liaisons inter-modules seront réalisées avec les câbles et connecteurs détaillés plus haut. Ils circuleront sous le champ solaire, évitant ainsi une exposition directe au soleil et à la pluie. On veillera à minimiser la surface de boucle afin de minimiser les risques de tensions induites dues à la foudre, conformément aux dispositions du Guide UTE C 12-712-1.



Exemple de mauvais câblage : boucle induite entre polarités



Exemple de bon câblage : limitation des aires de boucles induites

3.2. Circulation des câbles jusqu'à l'entrée DC de l'onduleur

Pour les autres liaisons, les câbles circuleront dans des conduits métalliques positionnés à l'extérieur des volumes, de degré coupe-feu égal au degré de stabilité au feu du bâtiment, les protégeant contre d'éventuels chocs mécaniques.

Ces chemins de câbles seront capotés afin de protéger les câbles d'une exposition directe au soleil et aux intempéries, les capots sont maintenus par l'intermédiaire de colliers de serrage anti-UV rapidement sectionnables à l'aide d'une pince coupante. Enfin, les conduits métalliques seront mis à la terre.

3.3. Dimensionnement des câbles DC

Le réseau de câbles DC sera dimensionné conformément aux dispositions du Guide UTE C 15-712-1 :

- Chute de tension entre les modules et l'entrée DC de l'onduleur < 3% ;
- Câbles dimensionnés suivant la norme NF C 15-100, tenant compte des différents facteurs de correction définis dans la partie 5-52 de cette même norme ;
- Protections des lignes dimensionnées en tenant compte des caractéristiques des modules et du réseau, conformément au paragraphe 8 du Guide UTE C 15-712-1.

FIN DU DOCUMENT