

Installations photovoltaïques raccordées au réseau public de distribution

TD DIMENSIONNEMENT SUJET

Composants DC et AC

Dimensionnement des dispositifs de protection et câbles d'une installation PV

Installation:

☐ Puissance-crête : 234 kWc

☐ Modules :

- $P_c = 305 \text{ Wc}$
- $I_{sc \text{ stc}} = 6 \text{ A}$
- $I_{rm} = 15 \text{ A}$
- $I_{mpp \text{ stc}} = 5,6 \text{ A}$
- $U_{mpp} = 54,7 \text{ V}$
- $U_{oc \text{ stc}} = 64,2 \text{ V}$



Dimensionnement en tension DC

- Tous les composants DC sont dimensionnés au minimum :
 - Tension assignée d'emploi: $U_e \geq U_{OCMAX} = k \times U_{OCSTC}$

Température ambiante minimale °C	Facteur de correction (k)
24 à 20	1,02
19 à 15	1,04
14 à 10	1,06
9 à 5	1,08
4 à 0	1,10
-1 à -5	1,12
-6 à -10	1,14
-11 à -15	1,16
-16 à -20	1,18
-21 à -25	1, 20
-26 à -30	1,21
-31 à -35	1,23
-36 à -40	1,25

Exemple : Température ambiante min = - 10°C

Dimensionnement de l'onduleur

❑ Règles de conception :

- $U_{co\ max} < \text{tension d'entrée max. de l'onduleur}$
- $I_{mpp\ max} < \text{Courant max de l'onduleur}$
- $0,8 P_c < P_{dc\ max} < 1,2 P_c$

❑ Critères :

- $U_{co\ max} =$
- $I_{mpp\ max} =$
- $P_{dc\ max} <$

Choix d'un onduleur

Caractéristiques techniques des onduleurs PV SINVERT							
Type d'onduleur *		60 M	80 M	100 M	160 MS	200 MS	240 MS
Raccordement secteur (CA)		3 ~ 230/400 V; 50 Hz					
60 Hz en option				x		x	
Nombre d'appareils individuels	Unités	1 x 60	1 x 80	1 x 100	2 x 80	2 x 100	3 x 80
Puissance nominale (CA)	kW	57	70	100	140	200	210
Puissance maximale (CA)	kW	65	77	105	154	210	231
Courant maximal (CA)	A	94	111	153	222	306	333
Tension MPP (CC)	V	450–750 (350–750 pour SINVERT 80, 160, 240)					
Temp. de service max. (CC)	V	820					
Tension système max. (CC)	V	900 (à ne pas dépasser)					
Puissance d'entrée max. (CC)	kW	68	80	111	160	222	240
Courant d'entrée max. (CC)	A	149	176	243	352	486	528
Courant d'entrée max. (CC)		2	2	1 ou 3	4	2 ou 6	6
Courant max. par entrée CC	A	80		250 / 80	80	250 / 80	80
Rendement eta EU	%	94,1	95	94,9	95	95,6	95
Dimensions (H x L x P) par appareil	mm	1902 x 918 x 834					
Poids unitaire	kg	690	830	850	830	850	2025
Température ambiante	°C	0–50	0–50	0–50	0–50	0–50	0–50
Altitude de service		jusqu'à 1000 m					
Humidité max. de l'air	%	85 (sans condensation)					

* M – Maître
MS – Système maître-esclave

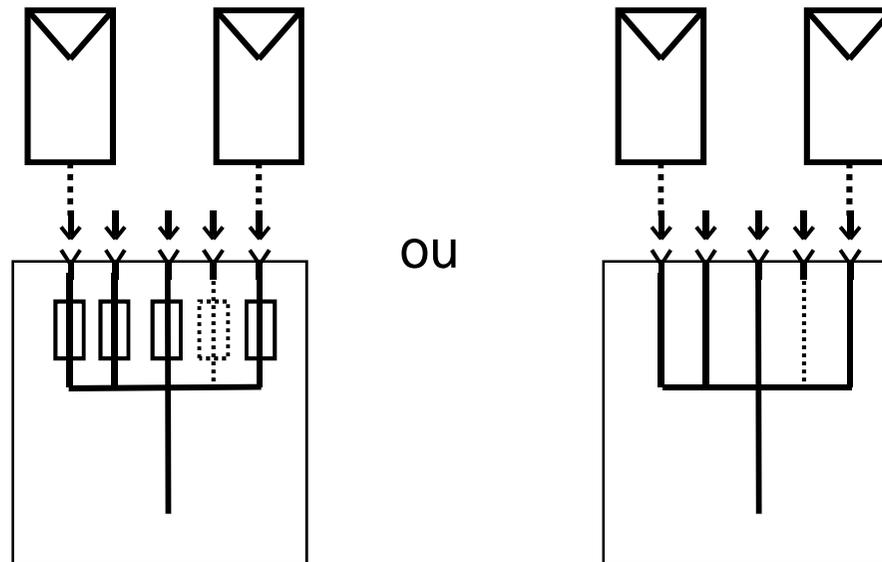
Choix d'un onduleur ?
Nombre de modules en série possible ?
Nombre de groupe ?



Protection des modules PV

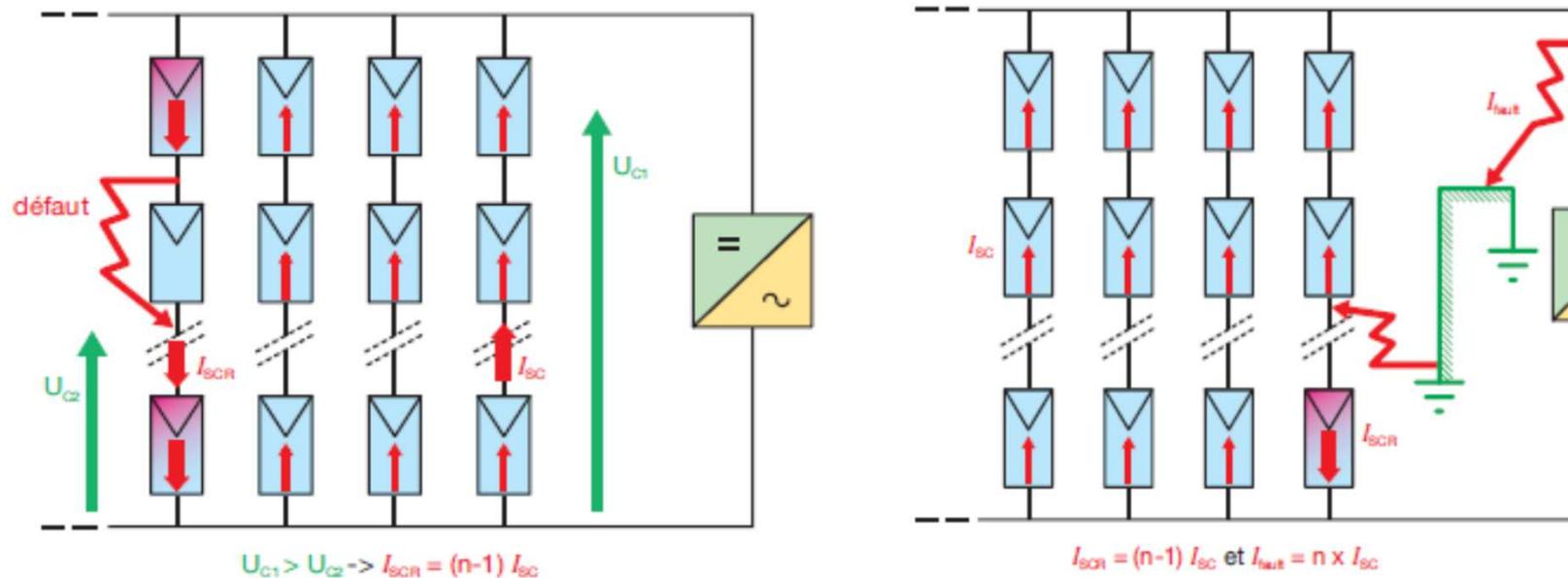
□ Nécessité de protection des modules PV ?

- **Nc** : nombre de chaînes de modules PV en parallèle dans un générateur PV



Protection des modules PV

Problème de surintensité lié au courant inverse

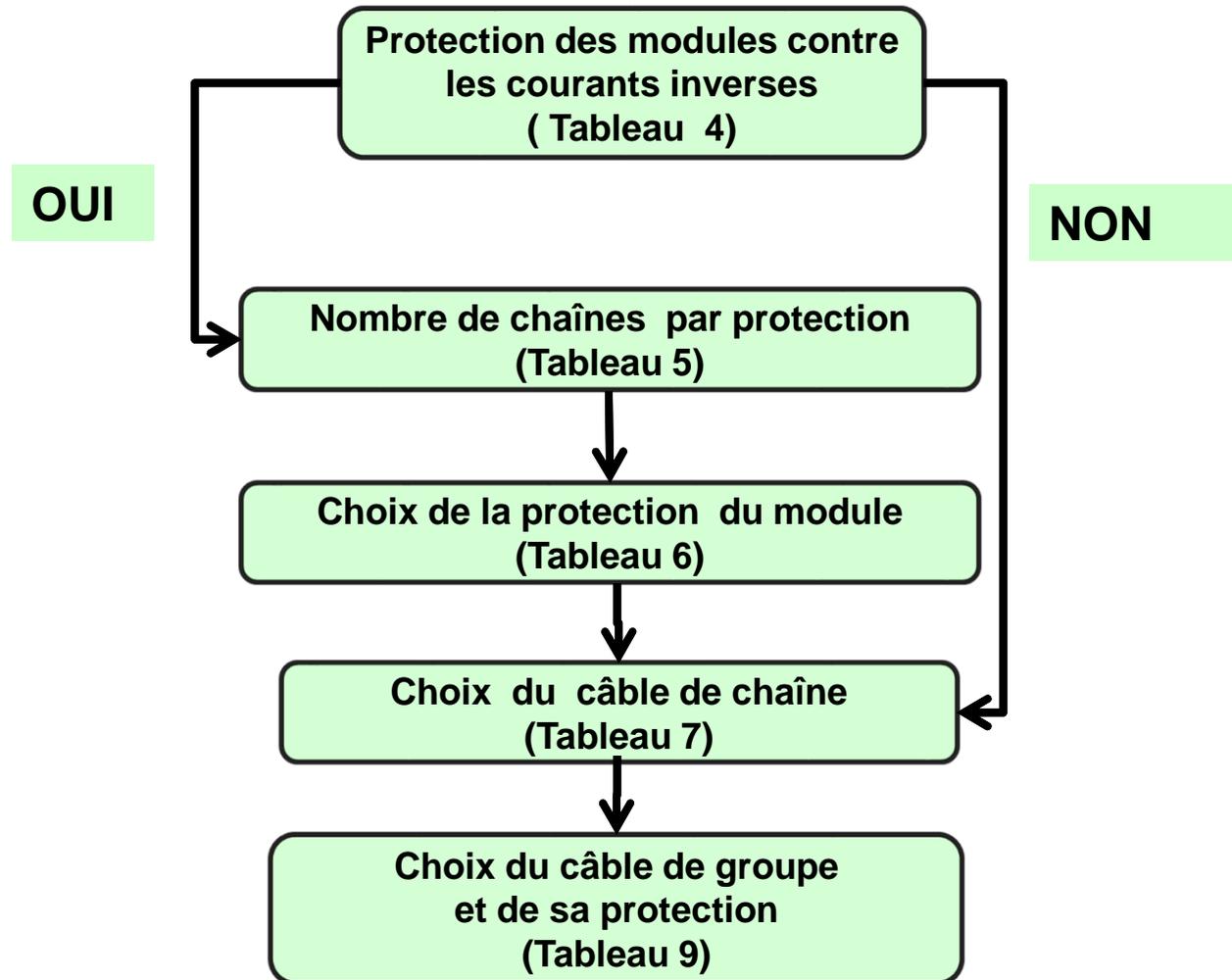


Protection de chaque chaîne et sur chaque polarité par fusible ou disjoncteur suivant la C15-712

Protection des modules PV

- Etape 1** -Nombre Maximal de chaînes en parallèle sans protection
- Etape 2** -Nombre Maximal de chaînes en parallèle par dispositif de protection
- Etape 3** -Dimensionnement des dispositifs de protection (Fusible)
- Etape 4** -Courant admissible des câbles de chaînes PV
Choix des protections associées
- Etape 5** -Courant admissible des câbles de groupe PV
Choix des protections associées
- Etape 6** -Courant admissible du câble principal PV

Méthodologie



Protection des modules PV

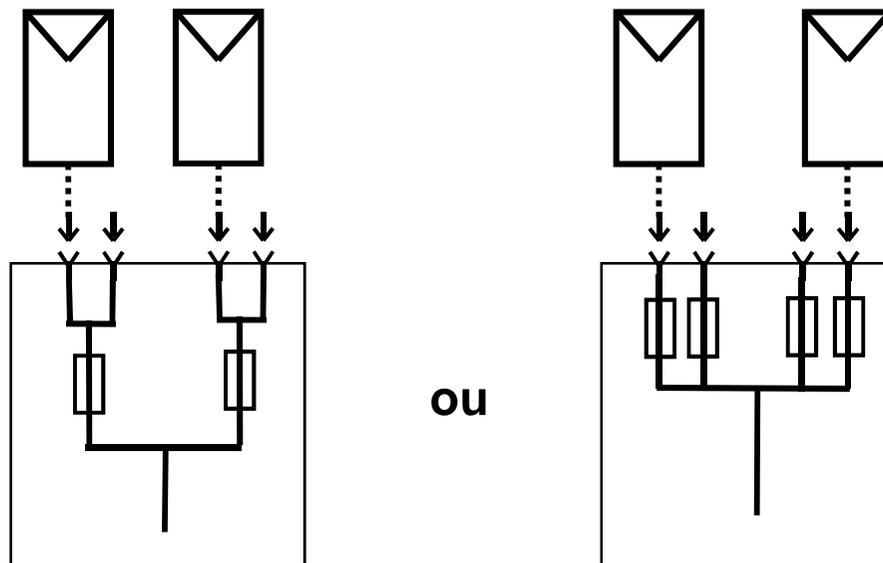
- Détermination du nombre maximal de chaines en // sans protection : Nc_{max} (tableau n°3)

Tenue en courant inverse du module	Nc_{max}
$1 I_{scSTC} \leq I_{RM} < 2 I_{scSTC}$	2
$2 I_{scSTC} \leq I_{RM} < 3 I_{scSTC}$	3
$3 I_{scSTC} \leq I_{RM} < 4 I_{scSTC}$	4
$4 I_{scSTC} \leq I_{RM} < 5 I_{scSTC}$	5
Cas général :	$Nc_{max} \leq (1 + I_{RM} / I_{scSTC})$

- Si $N_c > Nc_{max}$ \longrightarrow Prévoir dispositif de protection contre les courants inverses

Protection des modules PV

- 1 seule protection pour plusieurs chaînes de modules PV ?
 - **N_p** : nombre de chaînes de modules PV en parallèle avec protection unique



Protection des modules PV

- Nombre maximum $N_{p_{max}}$ de chaines en // par protection (tableau n°4)

$I_{scmax} = K_i I_{scSTC}$ avec $K_i \geq 1,25$ (guide C15 712-1 p 62)

Tenue en courant inverse du module	$N_{p_{max}}$
$1,4 I_{scmax} \leq I_{RM} < 3,8 I_{scmax}$	1
$3,8 I_{scmax} \leq I_{RM} < 6,2 I_{scmax}$	2
$6,2 I_{scmax} \leq I_{RM} < 8,6 I_{scmax}$	3
Cas général :	$N_{p_{max}} \leq 0,5 (1 + I_{RM} / I_{scmax})$

Protection des modules PV

□ Dimensionnement des dispositifs de protection des modules PV (tableau 5)

Nc Nombre de chaînes du générateur	Np Nombre de chaînes par dispositif de protection	Courant inverse maximal dans une chaîne	Obligation de Protection	I_n Courant assigné des dispositifs de protection
1	-	-	NON	-
2	-	I_{scmax}		-
$Nc \leq Nc_{max}$	-	$(Nc - 1) I_{scmax}$		-
$Nc > Nc_{max}$	1	$(Nc - 1) I_{scmax}$	OUI	$I_n \geq 1,1 I_{scmax}$ $I_n \leq I_{RM}$
	Np > 1	$(Nc - 1) I_{scmax}$		$I_n \geq Np 1,1 I_{scmax}$ $I_n \leq I_{RM} - (Np - 1) I_{scmax}$

Câbles de chaînes PV

□ Courant admissible dans les câbles de chaînes PV (tableau 6)

N_c Nombre de chaînes du générateur	N_p Nombre de chaînes par dispositif de protection	Courant inverse maximal dans un câble de chaîne	Avec Protection ?	I_n Courant assigné des dispositifs de protection des modules	I_z Courant admissible des câbles de chaînes
1	-	-	NON	-	$I_z \geq I_{scmax}$
2	-	I_{scmax}		-	$I_z \geq I_{scmax}$
N_c	-	$(N_c - 1) I_{scmax}$		-	$I_z \geq (N_c - 1) I_{scmax}$
N_c	1	$(N_c - 1) I_{scmax}$	OUI	I_n déterminé par le tableau 9a	$I_z \geq I_2$ si $N_c < 20$ $I_z \geq I_n$ si $N_c \geq 20$
	N_p > 1	$(N_c - 1) I_{scmax}$			$I_z \geq k_p I_2$ si $N_c/N_p < 20$ $I_z \geq k_p I_n$ si $N_c/N_p \geq 20$

- I_z : courant admissible dans le câble
- $I_2 = 1,45 I_n$ pour les fusibles et $1,3 I_n$ pour les disjoncteurs

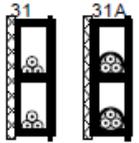
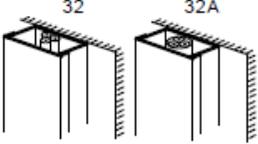
Câbles de chaînes PV

Dimensionnement des câbles de chaînes (exemple)

□ Choix du câble

- Section des câbles de chaînes :
- Câble isolé aux élastomères (famille PR)
- Calcul du courant admissible I_z prenant en compte les conditions suivantes :
 - 2 Câbles unipolaires adjacents sur parois ($T_{\text{âme}} = 90^{\circ}\text{C max}$)
 - Mode de pose : 31 et 32 tableau 52C de la C15-100

Tableau 52C - Exemples de modes de pose (suite)

Exemple	Description	Réf.
	Conducteurs isolés ou câbles mono- ou multiconducteurs dans des goulottes fixées aux parois. - en parcours horizontal,	31
	- en parcours vertical.	32

Choix des câbles de chaînes PV (exemple)

- Courant admissible : tableau 52G : méthode de référence B

Tableau 52G - Choix des méthodes de référence pour les courants admissibles en fonction des modes de pose

Pour chacun des modes de pose décrits dans le tableau 52C, le tableau indique la méthode de référence - repérée par l'une des lettres : B, C, D, E ou F - à appliquer et les facteurs de correction pertinents.

Mode de pose (numéro de référence du tableau 52C)	Méthode de référence	Facteurs de correction	Remarques
1	B	0,77	
2	B	0,70	
3	B	-	
3A	B	0,9	
4	B	-	
4A	B	0,9	
5	B	-	
5A	B	0,9	
11	C	-	
11A	C	0,95	
12	C	-	
13	E, F	-	
14	E, F	-	
15	E, F	-	
17	E, F	-	
18	C	1,21	
21	B	0,95	
22	B	0,95	
22A	B	0,865	
23	B	0,95	
23A	B	0,865	
24	B	0,95	
24A	B	0,865	
25	B	0,95	
31	B	-	
31A	B	0,9	
32	B	-	
32A	B	0,9	
33	B	-	
33A	B	0,9	
34	B	-	
34A	B	0,9	

Choix des câbles de chaînes PV (exemple)

➤ Courant admissible :

MÉTHODE DE RÉFÉRENCE	ISOLANT ET NOMBRE DE CONDUCTEURS CHARGÉS								
	PVC 3	PVC 2		PR 3		PR 2			
B									
C		PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2		
E			PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2	
F				PVC 3		PVC 2	PR 3		PR 2
S (mm ²)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CUIVRE									
1,5	15,5	17,5	18,5	19,5	22	23	24	26	
2,5	21	24	26	27	30	31	33	36	
4	28	32	34	36	40	42	45	49	
6	36	41	43	46	51	54	58	63	
10	50	57	60	63	70	75	80	88	
16	68	78	80	85	94	100	107	115	
25	89	98	101	112	119	127	138	149	161
35	110	119	126	138	147	158	169	185	200
50	134	144	153	168	179	192	207	225	242
70	171	184	196	213	229	246	268	289	310
95	207	223	238	258	278	298	328	352	377
120	239	259	278	299	322	348	382	410	437
150		299	319	344	371	395	441	473	504
185		341	364	392	424	450	506	542	575
240		403	430	461	500	538	599	641	679
300		484	497	530	578	621	693	741	783
400					656	754	825		940
500					749	868	948		1083
630					855	1005	1088		1254

À température ambiante 30° C

Choix des câbles de chaînes PV (exemple)

- Coefficient correction température ambiante 70°C (tableau 52K) :

Tableau 52K - Facteurs de correction pour des températures ambiantes différentes de 30 °C à appliquer aux valeurs de courants admissibles du [tableau 52H](#)

Température ambiante (°C)	Élastomère (Caoutchouc)	Isolation	
		PVC	PR / EPR
10	1,29	1,22	1,15
15	1,22	1,17	1,12
20	1,15	1,12	1,08
25	1,07	1,06	1,04
35	0,93	0,94	0,96
40	0,82	0,87	0,91
45	0,71	0,79	0,87
50	0,68	0,71	0,82
55	-	0,61	0,76
60	-	0,50	0,71
65	-	-	0,65
70	-	-	0,58
75	-	-	0,50
80	-	-	0,41
85	-	-	-
90	-	-	-
95	-	-	-

Choix des câbles de chaînes PV (exemple)

- Coefficient correction 4 circuits enfermés (tableau 52N) :

Tableau 52N - Facteurs de correction pour groupement de plusieurs circuits ou de plusieurs câbles multiconducteurs

REF	DISPOSITION DE CIRCUITS OU DE CÂBLES	FACTEURS DE CORRECTION												METHODES DE REFERENCE	MODES DE POSE
		Nombre de circuits ou de câbles multiconducteurs													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20		
1	Enfermés	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,58	0,55	0,50	0,50	0,45	0,40	0,40	B, C	1, 2, 3, 3A, 4, 4A, 5, 5A, 21, 22, 22A, 23, 23A, 24, 24A, 25, 31, 31A, 32, 32A, 33, 33A, 34, 34A, 41, 42, 43, 71
2	Simple couche sur les murs ou les planchers ou tablettes non perforées	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	Pas de facteur de réduction supplémentaire pour plus de 9 câbles	C	11, 12		
3	Simple couche au plafond	1,00	0,85	0,76	0,72	0,69	0,67	0,66	0,65	0,64		11A			
4	Simple couche sur des tablettes perforées	1,00	0,85	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72		E, F	13		
5	Simple couche sur des échelles à câbles, corbeaux, treillis soudés etc.	1,00	0,88	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78			14, 15, 17		

Choix des câbles de chaînes PV (exemple)

- Câbles posés en 2 couches (tableau 52O) :

H

Tableau 52O - Facteurs de correction pour pose en plusieurs couches pour les références 1 à 5 du tableau 52N

Lorsque les câbles sont disposés en plusieurs couches, les facteurs de correction suivants doivent être appliqués aux valeurs de courants admissibles:

Nombre de couches	2	3	4 ou 5	6 à 8	9 et plus
Coefficient	0,80	0,73	0,70	0,68	0,68

Ces facteurs de correction sont éventuellement à multiplier par ceux du tableau 52N.

- courant admissible I_z prenant en compte les conditions précédentes :

N.B. Attention aux conditions de pose :

- Si nombreux circuits en plusieurs couches : coefficient de correction global = 0,15
- $I_z = 42 \times 0,15 = 6,3 \text{ A} < I_n (10\text{A})$ donc câble non adapté :
=> Augmentation de section et/ou changement type de câble ($T^{\circ}\text{max } 120^{\circ}\text{C}$)

Câbles de groupes PV

- ❑ Courant admissible dans les câbles de groupes PV et choix des dispositifs de protection associés (tableau 7)
- ❑ N_a : nombre de groupes en parallèle

N_a Nombre de groupes du générateur	Courant inverse maximal dans un câble de groupe	Avec protection ?	I_n Courant assigné des dispositifs de protection de groupes	I_z Courant admissible des câbles de groupes
1	-	NON	-	$I_z \geq I_{scmax_Groupe}$
2	I_{scmax_Groupe}		-	$I_z \geq I_{scmax_Groupe}$
$N_a > 2$	$(N_a - 1) I_{scmax_Groupe}$		-	$I_z \geq (N_a - 1) I_{scmax_Groupe}$
$N_a > 2$	$(N_a - 1) I_{scmax_Groupe}$	OUI	$I_n \geq 1,1 I_{scmax_Groupe}$	$I_z \geq I_2$ si $N_a < 20$ $I_z \geq I_n$ si $N_a \geq 20$

Câbles de groupes PV (sans protection chaine)

Câbles de groupes PV sans dispositifs de protection associés (cas 1)

□ Na : nombre de groupes en parallèle = 8

Dimensionnement des câbles :

Iz

Iz corrigé

Cable :

Câbles de groupes PV (protection chaine)

Câbles de groupes PV avec dispositifs de protection associés (cas 2)

- Na : nombre de groupes en parallèle = 8

Dimensionnement des dispositifs de protection

- In
- Calibre de la protection :

Dimensionnement des câbles de groupes

- Iz
- Facteur de correction globale (température, mode de pose, ...) :
- Choix de câbles de groupes

Câble principal PV

- Pour un générateur de N_c chaînes connectées en parallèle, le câble principal DC doit être dimensionné avec le courant admissible suivant :

$$I_z \geq I_{SCMAX_GENERATEUR}$$

NB : Le choix du courant admissible du câble doit tenir compte des différents facteurs de correction (température, mode de pose,...)

- Exemple :

I_z

Facteurs de correction globale (température, mode de pose,...) : $K = 0,7$

Câble cuivre unipolaire :

Sectionneur et interrupteur sectionneur DC

- ❑ Choix des sectionneurs fusible des boites de jonction
 - Calibre , pour fusible taille 10,3 x 38
 - $U_{OCMAX} >$

- ❑ Choix de l'interrupteur-sectionneur boite de jonction
 - $I_n =$
 - Calibre :

- ❑ Choix des sectionneurs fusible de la boite de raccordement
 - Calibre
 - $U_{OCMAX} >$

- ❑ Choix de l'interrupteur-sectionneur boite de raccordement
 - $I_n =$
 - Calibre :

Chute de tension câblage DC

❑ Calcul de la chute de tension cumulée entre modules PV et onduleur

$\Delta V \text{ total} = \Delta V \text{ (câble de chaîne)} + \Delta V \text{ (câble de groupe)} + \Delta V \text{ (câble principal)}$

Chute de tension maximum autorisée : 3 %

❑ Calcul de la chute de tension pour un tronçon

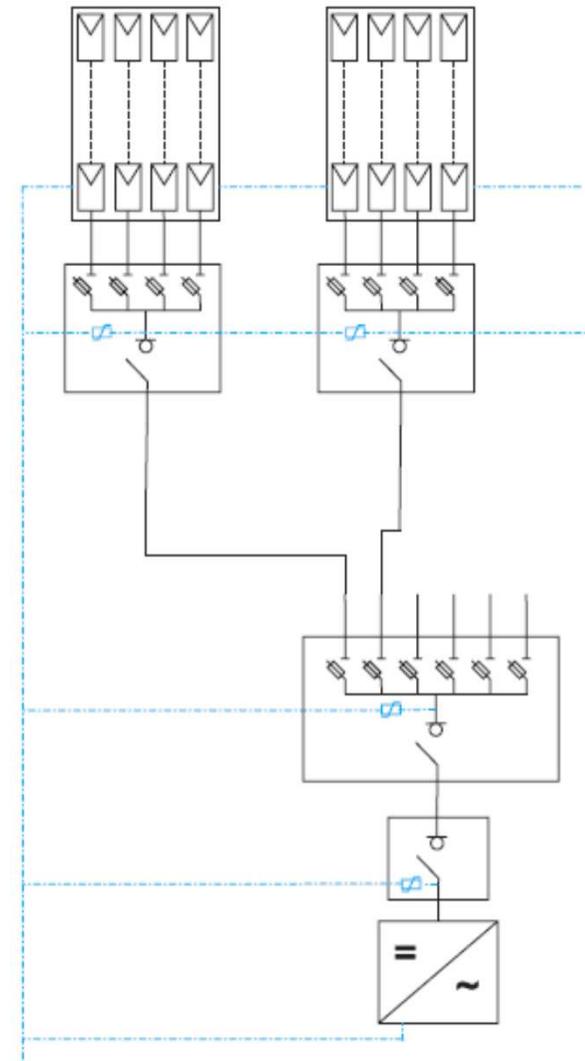
$$\Delta V = 2 (\rho_1 L/S) \times I_{mpp} \text{ (stc)}$$

- ΔV : chute de tension, en volts
- ρ_1 : résistivité du conducteur en service normal, soit 1,25 fois celle à 20 °C ($\rho_1 = 0,023 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ pour le cuivre; $\rho_1 = 0,037 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ pour l'aluminium)
- L : longueur de la canalisation, en mètres
- S : section des conducteurs en mm²
- I_{mppSTC} : courant de référence, en ampères

Chute de tension relative :

$$\Delta V / V \text{ (%) } = 100 \Delta V / U_{mppSTC}$$

- U_{mppSTC} : tension de référence, en volts



Chute de tension câblage DC

- ❑ Résultats du calcul de la chute de tension pour les différents tronçons

Câblage et protection AC

□ Onduleur

- Classe I
- Mise à la terre de la masse par liaison équipotentielle

□ Protection contre les surcharges

- Conformément aux prescriptions de l'article 433 de la norme NF C 15-100
- I_b (courant d'emploi) = I_{max} du fabricant ou $1,1 I_n$ (courant nominal)

□ Exemple

- I_b (courant d'emploi) = $1,1 I_n$ (courant nominal)
- I_b = courant max sortie onduleur :

Câblage et protection AC (exemple)

☐ Dimensionnement du disjoncteur (AGCP)

- $I_n \geq I_b$ soit $I_n \geq$
- Calibre de la protection : $I_n =$

☐ Dimensionnement de l'interrupteur-sectionneur sortie onduleur

- $I_n \geq I_b$ soit $I_n \geq$
- Calibre : $I_n =$



☐ Dimensionnement du câble

- $I_z \geq I_b$ (pas de surcharge possible)
- Facteur de correction globale (température, mode de pose,...) : $K = 0,75$

Choix de câble : cuivre U1000R2V : S =

Chute de tension câblage AC

- ❑ Chute de tension maximale autorisée entre les bornes AC de l'onduleur et le point de livraison (NF C 14-100) de 3 % à puissance nominale du ou des onduleurs
- ❑ Recommandé de limiter cette chute de tension à 1 %
 - Limite les pertes d'énergie
 - Limite les découplages momentanés de l'onduleur

$$\Delta V = b (\rho_1 L/S \cos \varphi + \lambda L \sin \varphi) I_b$$

Avec ΔV : chute de tension, en volts

b : coef de 1 pour triphasé phase-neutre, 2 mono, et racine de 3 pour le tri entre phases.

ρ_1 : résistivité du conducteur en service normal, soit 1,25 fois celle à 20 °C $\rho_1 = 0,0225 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ pour le cuivre; $\rho_1 = 0,036 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ pour l'aluminium

L : longueur de la canalisation, en mètres

S : section des conducteurs, en mm^2

$\cos \varphi$: facteur de puissance

I_b : courant maximal d'emploi, en ampères

λ : réactance linéique des conducteurs. En l'absence d'information, prendre $0,08 \text{ m}\Omega / \text{m}$

$$\Delta V/V (\%) = 100 \Delta V/V_o \quad (V_o : \text{tension entre phase et neutre en volts})$$

Protection contre les surtensions d'origine atmosphérique (exemple)

- ❑ Nécessité de parafoudres DC (suivant guide UTE C 61740-52) ?
 - Installation sans paratonnerre
 - Exemple : $N_g = 4$ (Sud-Est de la France) $L_{crit} = 150$ m, bâtiment industriel
 - Parafoudres DC obligatoires ou non ?