



CITEL

PARAFONDRES

POUR

Éoliennes

ÉOLIENNES : PRINCIPES DE PROTECTION CONTRE LA Foudre



Les éoliennes sont généralement installées dans des zones exposées pour profiter de vents plus favorables : les éoliennes terrestres de préférence sur des terrains au relief montagneux et les éoliennes offshore le long du littoral. Du fait de leur emplacement et de la hauteur de leur structure, les éoliennes ont un risque accru d'être frappées par la foudre.

Un impact foudre sur une éolienne peut créer un endommagement des pales et des dysfonctionnements des systèmes électriques et de commande. Les réparations et les temps d'arrêt seront extrêmement coûteux en cas de remplacement des composants endommagés, notamment dans les installations offshore.

Comparés au foudroiement direct, les effets indirects de la foudre menacent davantage d'augmenter les coûts de défaillance des éoliennes. Ils sont principalement dus :

- au précurseur ascendant créé à partir des éoliennes,
- aux éclairs touchant les éoliennes,
- aux foudroiements indirects (résultant de l'impulsion électromagnétique de la foudre sans que celle-ci n'ait directement touché l'éolienne).

Tous les types d'éclairs génèrent des impulsions électromagnétiques de foudre (IEMF) qui induisent des surtensions impulsionnelles sur les câbles de raccordement reliant les équipements. Les dommages que les équipements subissent résultent principalement d'une tenue insuffisante des matériels aux surtensions impulsionnelles.

Les dysfonctionnements et pannes des systèmes électriques et électroniques sont principalement dus à ces surtensions. Le meilleur moyen de réduire les défaillances dues à ces phénomènes consiste à utiliser une solution contre les surtensions, c'est à dire un ensemble de parafoudres (SPD) correctement sélectionné.

NORMALISATION

Les principes essentiels de protection contre la foudre des éoliennes doivent respecter les normes internationales IEC 61400-24:2019 et IEC 62305.

La norme IEC 61400-24 s'applique à la protection contre la foudre des génératrices éoliennes. La norme IEC 62305 introduit les principes généraux de protection contre la foudre.

ÉOLIENNES : PRINCIPES DE PROTECTION Foudre

Niveau de protection contre la foudre (NPF)

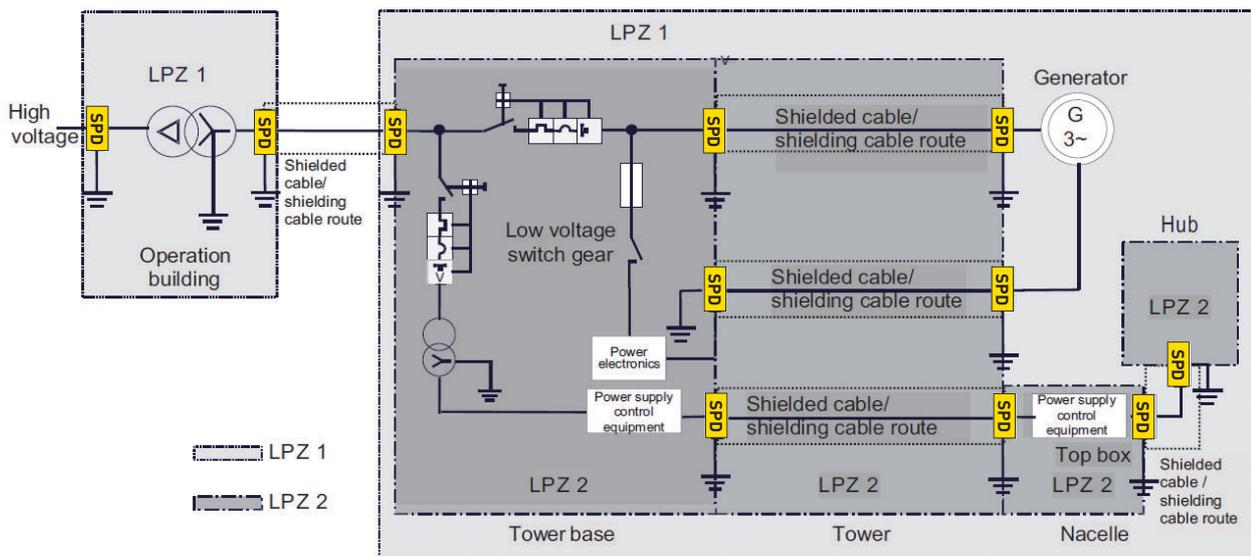
La norme IEC 62305 a introduit quatre Niveaux (I à IV) de Protection contre la Foudre (NPF). Un ensemble de paramètres de courant maximal et minimal est déterminé pour chaque NPF.

La norme IEC 61400-24 impose de protéger tous les sous-composants conformément au NPF, à moins qu'une évaluation des risques complète et documentée ne démontre qu'un niveau de protection inférieur au NPF est économiquement optimal en fonction d'emplacements et d'éoliennes spécifiques.

Valeurs maximales des paramètres relatifs à la foudre conformément au NPF

Choc foudre			Niveau de protection foudre (NPF)			
Paramètres du courant	Symbole	Unité	1	2	3	4
Courant de crête	I	kA	200	150	100	
Charge	Q _{SHORT}	C	100	75	50	
Energie spécifique	W/R	MJ/Q	10	5,6	2,5	
Paramètres temps	T ₁ /T ₂	µs/µs	10/350			

ZONE DE PROTECTION CONTRE LA FOUDRE (ZPF)



Mesures de protection contre les surtensions des équipements par zone de protection

Les mesures de protection (système de protection contre la foudre/paratonnerre, câbles blindés, écrans magnétiques) déterminent les Zones de Protection contre la Foudre (ZPF) et les parafoudres sont installés aux transitions entre zones. Pour des informations détaillées voir la norme IEC 62305-1, clause 8.3.

Pour les éoliennes, des méthodes ZPF types sont appliquées pour s'assurer que les composants (pièces des pales, machinerie, systèmes électriques ou systèmes de commande) peuvent supporter les effets des champs magnétiques et électriques, ainsi que le courant de foudre partiel ou total susceptible de pénétrer dans la zone d'installation des composants.

Tour

La tour tubulaire en acier, principalement utilisée pour les grandes éoliennes, répond généralement aux exigences requises pour les conducteurs de descente tel qu'indiqué dans la norme IEC 62305-3. Elle peut être considérée comme une cage de Faraday offrant un blindage électromagnétique presque parfait. En effet, elle est presque fermée électromagnétiquement tant au niveau de l'accès à la nacelle qu'au niveau du sol. Dans la plupart des cas, l'intérieur de la tour peut donc être défini en ZPF 1 ou ZPF 2.

Nacelle

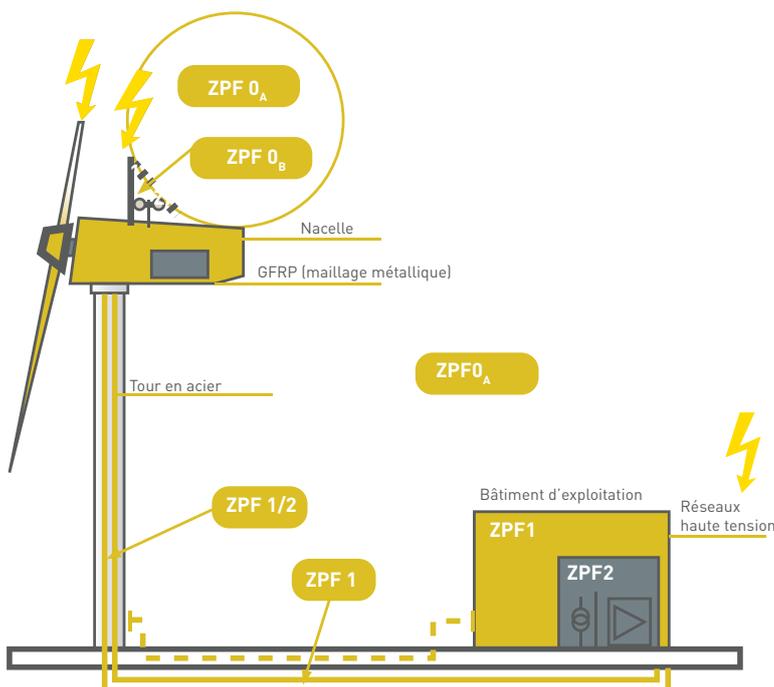
Les nacelles avec capotage GFRP ou similaires doivent inclure un système de capture foudre (pointe paratonnerre) et des conducteurs de descente qui constituent une cage autour d'elles. En règle générale, le niveau ZPF 1 est adapté.

Bâtiment d'exploitation

Le bâtiment d'exploitation possède un effet de blindage le plaçant en ZPF 1. Si l'armoire de distribution se trouve dans la tour, il peut basculer en ZPF 2.

Moyeu

Le moyeu entre en ZPF 1 grâce à ses bonnes performances en terme de blindage. Le système de tangage est toujours installé dans cette zone. Comme le système de tangage est alimenté par la bague collectrice du générateur et les câbles traversant les zones ZPF1/2, un parafoudre de Type 2 est généralement installé.



PROTECTION CONTRE LES SURTENSIONS : LES PARAFONDRES

Les normes de robustesse (IEC60664-1) et d'immunité (IEC 61400-4-5) définissent la tenue des matériels aux surtensions transitoires. Néanmoins ces exigences sont insuffisantes pour assurer le fonctionnement fiable lors de surtensions d'origine foudre dans un environnement éolien.

La mise en oeuvre de parafoudres appropriés et conformes aux normes IEC 61643-11 (réseau AC) et IEC 61643-21 (réseaux de communication) est nécessaire.

SÉLECTION DES PARAFONDRES

les paramètres essentiels nécessaires à la sélection des parafoudres pour réseau AC :

U_c

La tension maximale de fonctionnement du parafoudre [U_c] doit être supérieure à la tension nominale de réseau AC (généralement $> +10\%$). Dans le cadre d'éoliennes, vous devez tenir compte de deux autres paramètres :

- U_c doit pouvoir supporter la répétition des surtensions transitoires de manœuvre superposées aux tensions de fonctionnement.
- Pour les éoliennes offshore, du fait du coût de maintenance très élevée, le parafoudre doit supporter une surtension temporaire supérieure sans basculer en mode de défaillance sécurisé. Une valeur U_c supérieure est donc recommandée.

U_p

La norme CEI 60664-1 définit la tension de tenue au choc (U_w) d'un équipement électrique et varie en fonction du réseau AC:

Une valeur $U_w = 2,5$ kV est préconisée pour les systèmes connectés aux alimentations 400/690 Vac alors qu'une valeur $U_w = 1,5$ kV est obligatoire pour les équipements raccordés aux réseaux 230/400 Vac.

Le niveau de protection [U_p] du parafoudre doit donc être inférieur à la tension U_w du matériel qu'il protège pour assurer une protection efficace.

I_{imp} et I_n

La valeur minimale de tenue des parafoudres aux courants impulsifs (paramètres I_n pour Type 2 et I_{imp} pour Type 1) est définie dans la norme IEC 60346-5-534 (ci-contre).

Néanmoins, afin de prolonger la durée de service des parafoudres en cas de risque élevé de foudroiement, des valeurs supérieures peuvent être choisies.

Courants de décharge recommandés

Type de Parafoudre	Courant de décharge
Parafoudre Type 1	$I_{imp} = 12,5$ kA/pôle @ 10/350 μ s
Parafoudre Type 2	$I_n = 5$ kA/pôle @ 8/20 μ s

Les circuits connectés à l'équipement situé dans la zone de protection ZPF 0b doivent être considérés comme des circuits particulièrement exposés. Il est donc recommandé que les parafoudres intégrés aux éoliennes soient conformes aux exigences ci-après.

Courants de décharge recommandés pour les circuits exposés

Type de Parafoudre	Courant de décharge
Parafoudre Type 1	$I_{imp} = 25$ kA/pôle @ 10/350 μ s
Parafoudre Type 2	$I_n = 15$ kA/pôle @ 8/20 μ s

CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Les parafoudres, utilisés dans un environnement éolien, doivent supporter les contraintes environnementales correspondant au site d'installation, parmi lesquelles :

- Température ambiante
- Humidité
- Atmosphère corrosive
 - Test de brouillard salin (offshore)
- Vibration et choc mécanique :
 - Fréquence : 0,1 Hz à 10 Hz ;
 - Accélération : 0,5 m/s².

SPÉCIFICITÉS DES PARAFOUDRES POUR L'ÉOLIEN

PERTURBATIONS HARMONIQUES

Le côté "Générateur" du Convertisseur (généralement localisé à la base de la tour) est connecté au générateur (situé dans la nacelle) par un câble qui dépasse fréquemment les 100 mètres. Du fait des caractéristiques de distribution (inductance distribuée et capacité de couplage du long câble), une surtension induite générera une oscillation atténuée à fréquence élevée côté rotor du générateur (voir la figure ci-dessous).

L'oscillation harmonique du générateur d'induction à double alimentation (DFIG) apparaît principalement à deux endroits :

- Côté générateur du convertisseur
- Côté rotor du générateur

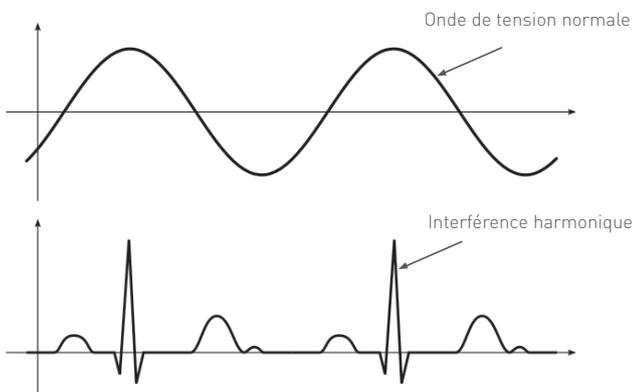
Du côté rotor du générateur DFIG, des transitoires répétitives typiques superposées aux tensions de fonctionnement peuvent atteindre 2,95 kV (L-L) et la valeur dV/dt des transitoires répétitives superposées à la tension de fonctionnement normale est de 1,4 kV/ μ s (voir norme EN 50539-22).

Par conséquent, le parafoudre doit être dimensionné pour supporter sans fonctionner ces surtensions impulsives élevées.

CITEL a développé plusieurs types de parafoudres spécifiques, compatibles avec la perturbation harmonique, basés sur un éclateur à gaz dédié haute énergie.

Les produits correspondants, DU33S-1000G/WD et DAC50S-31-760-2600DC, sont à installer côté générateur pour l'un et côté convertisseur pour l'autre.

Interférence harmonique type



COMPORTEMENT TOV (HVRT)

Les éoliennes doivent intégrer une alimentation sans panne (FRT), tant en basse tension (LVRT) qu'en haute tension (HVRT). En cas de mode HVRT, une surtension temporaire (TOV) sera appliquée au parafoudre situé au niveau du générateur DFIG ou PMSG. Le parafoudre devra donc être dimensionné pour supporter sans défaillance ces surtensions temporaires (voir tableau ci-dessous)

Parafoudres CITEL conformes aux exigences HVRT pour éoliennes

NO.	Tension Réseau	Exigences TOV HVRT	Références CITEL	Paramètres SPD	Conclusion
1	400/690Vac	400*1.1=440Vac permanent	DAC50S-30-530	U _c =530Vac permanent	Conforme
2		400*1.3=520Vac 500ms		U _r =700Vac permanent	Conforme
3		400*1.1=440Vac permanent	DAC50S-31-760-2600DC	U _c =800Vac permanent	Conforme
4		400*1.3=520Vac 500ms		U _r =2200Vac 5s tenue	Conforme
5	230/400Vac	230*1.1=253Vac permanent	DAC50S-40-440	U _c =440Vac permanent	Conforme
6		230*1.3=299Vac 500ms		U _r =580Vac 5s tenue	Conforme

RÈGLES DE SÉLECTION DES PARAFONDRES

GÉNÉRATEUR

Le générateur situé dans la nacelle peut être de 2 technologies différentes :

- Générateur d'induction à double alimentation (DFIG)
- Générateur synchrone à aimants permanents (PMSG)

La sortie d'alimentation se situe toujours côté stator. La tension de fonctionnement est généralement de 400/690 Vac.

Côté rotor DFIG avec une alimentation 400/690 Vac, la valeur $U_c = 1000$ V est recommandée pour atteindre une tolérance aux tensions élevées et une tenue aux surtensions temporaires (TOV) et aux perturbations harmoniques, évitant ainsi d'accélérer le vieillissement du parafoudre et d'affecter sa durée de service.

Le parafoudre spécifique CITEL DU33S-1000G/WD est basé sur une combinaison « 3MOV+GSG » s'appuyant sur un éclateur à gaz à haute énergie (GSG) connecté à la Terre. Une valeur $U_{tov} = 2,2$ kV est requise pour éviter un déclenchement trop fréquent due aux sutensions de commutation. Le DU33S-1000G/WD doit être installé côté rotor.

Côté stator DFIG, suivant la tension du stator, une valeur $U_c = 660$ V ou 760 V est requise pour protéger les systèmes d'alimentation 400/690 Vac. Le parafoudre DAC50S-30-760 intègre une fonction de verrouillage de son module débrochable pour une meilleure prise en charge des vibrations et la valeur $U_p = 3,5$ kV est adaptée à la tenue de choc U_w du matériel (IEC 60664-1). Concernant la protection côté stator PMSG, reportez-vous aux exigences côté rotor DFIG.



DU33S-1000G/WD

Protection de l'enroulement du rotor du générateur avec schéma « 3MOV+GSG »

DAC50S-30-760

Protection côté stator du générateur. gamme DAC

CONVERTISSEUR

L'armoire du convertisseur se trouve généralement à la base de la tour. La tension de fonctionnement est généralement de 690 Vac. Cependant, elle atteint désormais fréquemment 1140 Vac voire plus dans certaines éoliennes offshore dont la capacité est supérieure. Les convertisseurs d'éolienne PMSG possèdent une capacité plus élevée (une capacité nominale de 120 % est généralement requise), tandis que les convertisseurs DFIG possèdent habituellement une capacité nominale de 25 %. La protection des convertisseurs est normalement scindée en deux : côté rotor et côté réseau d'alimentation.

Côté rotor du convertisseur, la variation de tension résulte généralement du contrôle du courant MLI. Une valeur U_c et une prise en charge des surtensions temporaires supérieures s'imposent donc. Du fait de l'effet isolant du convertisseur de réseau électrique, le système TN-C requiert généralement un parafoudre de type 2 avec une combinaison « 3 MOV+GSG ». Le DAC50S-30-760-2600DC est dédié au côté rotor du convertisseur grâce à son design compact (72 mm de large) et son éclateur à gaz à très haute énergie (GSG), afin d'offrir une protection adéquate.

Côté réseau d'alimentation du convertisseur, tout dépend de la situation sur le terrain. Dans certains cas, un parafoudre à haut efficacité est requis lorsque le site est soumis à de fréquentes impulsions électromagnétiques de la foudre. En règle générale, un parafoudre de Type 2 avec un I_n de 15 kA et conforme à la norme IEC 61643-11 suffit. Le DAC50S-30-530 intègre une fonction de verrouillage pour une meilleure prise en charge des vibrations et la valeur $U_p = 2,5$ kV est suffisante pour protéger les équipements sensibles comme les IGBT conformément à la norme IEC 60664-1.



DAC50S-30-760-2600DC

Protection côté rotor du convertisseur avec schéma « 3 MOV+GSG »

DAC50S-30-530

Protection côté réseau d'alimentation du convertisseur avec schéma « 3 MOVs »

RÈGLES DE SÉLECTION DES PARAFOUDRES

SYSTÈME D'ORIENTATION DES PALES

Le système d'orientation des pales est installé dans le moyeu. Il utilise une tension de fonctionnement de 230/400 Vac et les systèmes de communication reposent habituellement sur les systèmes Profibus, CAN ou RS485. Le moyeu présentant un excellent effet de blindage et étant alimenté par la bague collectrice de la nacelle, les câbles sont habituellement installés en ZPF 1 ou dans une zone de protection blindée supérieure. Les parafoudres de Type 2 sont donc applicables.

Comme le conducteur de puissance et les câbles de communication sont sensibles aux impulsions électromagnétiques de la foudre, la coordination avec le parafoudre en amont est primordiale.

Pour la protection du réseau 230/400V, Des parafoudres avec une valeur U_p inférieure à 1,5 kV sont recommandés. Le DAC50S-40-320 est recommandé pour le système TN pour sa bonne résistance aux vibrations et ses excellents caractéristiques de protection.

Pour les circuits de signalisation entre le système d'orientation des pales (moyeu) et le système de commande principal (nacelle), des parafoudres dédiés, conformes IEC 61643-21, de catégorie C2 sont applicables (ZPF 1). La tension de fonctionnement U_c du parafoudre dépend de la tension de fonctionnement de la ligne (généralement 24 Vdc). La gamme de parafoudres DLA/DLU couvre une large étendue de tension et convient aux zones ZPF 0b à ZPF 2.

SYSTÈME DE COMMANDE PRINCIPAL

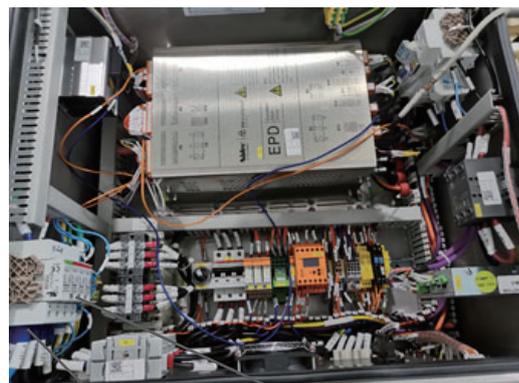
L'armoire de commande principale se trouve généralement dans la nacelle et permet l'alimentation électrique et l'échange d'informations avec l'équipement. Elle contient le système d'alimentation électrique et de signalisation. La tension de fonctionnement est généralement de 230/400 Vac monophasé ou triphasé.

L'équipement météorologique (anémomètre) alimenté par le système de commande principal se trouve habituellement en zone ZPF 0b et les câbles blindés passent en ZPF 1. Le système de commande principal intègre de nombreux systèmes électroniques (pour les processus de signalisation, le convertisseur, les actionneurs, etc.) qui communiquent par longs câbles, qui peuvent être affectés par l'effet électromagnétique d'un impact foudre. La gamme de parafoudres DLA/DLU est disponible en 1 ou 2 paires et en multiples tensions. La protection est efficace même si les câbles passent en zone ZPF 0B, comme une zone de station météorologique, car ces gammes atteignent en Catégorie D1 un courant de choc I_{imp} de 5 kA.

BÂTIMENT D'EXPLOITATION

Le bâtiment d'exploitation se trouve généralement en dehors de la tour (parfois à l'intérieur). Le côté primaire du transformateur est habituellement équipé d'un parafoudre haute tension et le côté secondaire d'un parafoudre basse tension de Type 1 à cause des risques de foudroiement direct des câbles externes et des autres installations auxiliaires. La valeur I_{imp} doit être conforme aux normes IEC 61400-24 et IEC 60364-5-534 (typiquement 25 kA).

Le DS253VG-690/WD avec 4 modules « Varistance + GSG » (Technologie VG de CITEL) permet d'obtenir d'excellentes performances avec une valeur U_p réduite et d'améliorer la coordination avec le parafoudre situé en aval dans la tour. De plus, ce parafoudre "VG" ne génère pas de courant de fuite (pas de vieillissement) et dispose d'une tenue renforcée aux surtensions temporaires.



DAC50S-40-320



DS44S-440

Protection pour système d'orientation des pales



DAC50S-40-320
Parafoudre Type 2
débrochable
pour réseau AC



DLA : parafoudre
débrochable pour
ligne de données



DLU : parafoudre
monobloc pour
ligne de données

Protection de système de commande principal



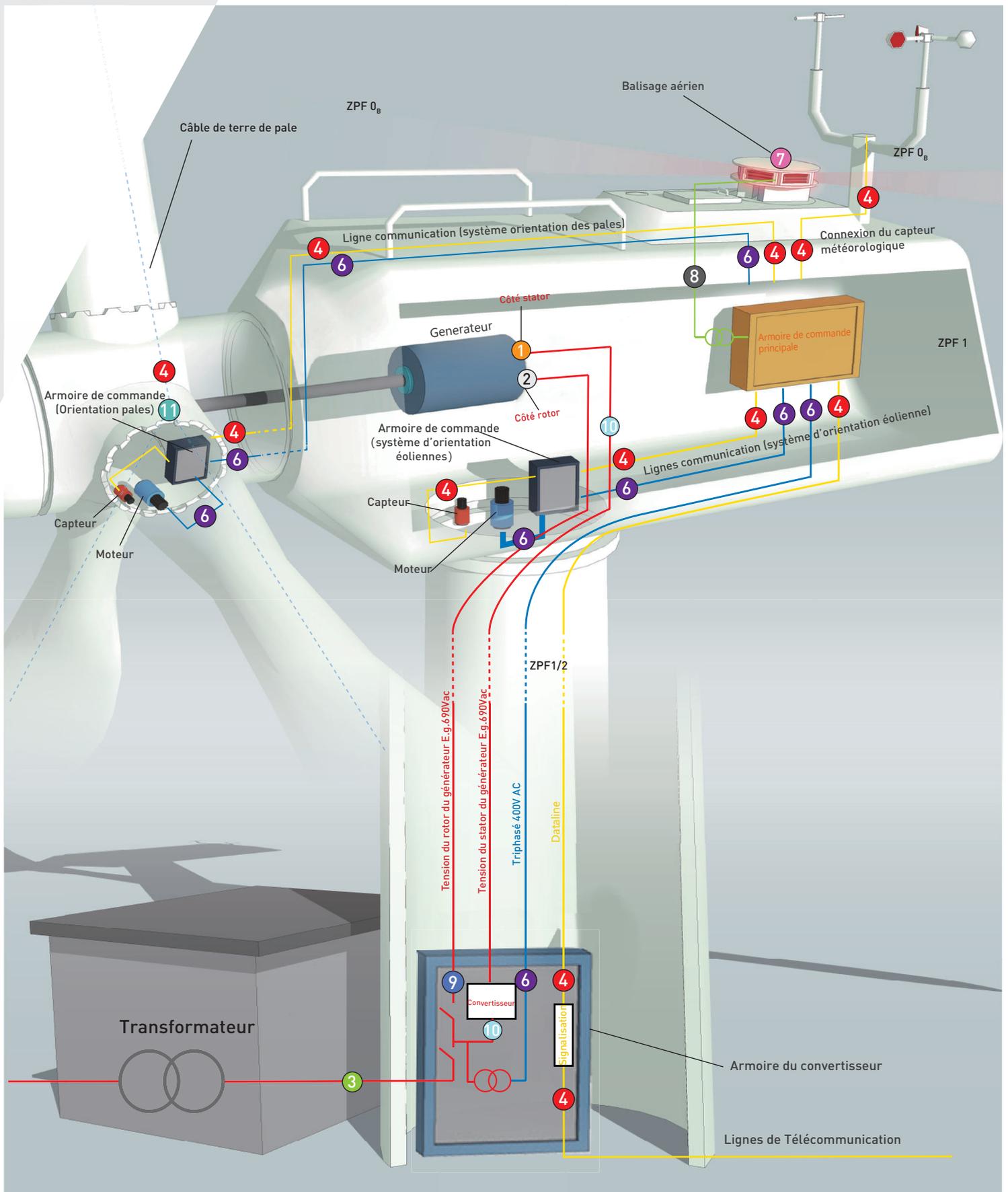
DS253VG-690/WD
Parafoudre Type 1
pour réseau 690 Vac



DS150E-480
Parafoudre Type 1
 U_c 440 Vac

Protection du bâtiment d'exploitation

PARAFOUDRES POUR GÉNÉRATEUR A INDUCTION À DOUBLE ALIMENTATION (DFIG)



PARAFONDRES CITEL POUR EOLIENNES

N°	Equipement à protéger	Références CITEL		Courants de décharge	Caractéristiques
1	Générateur : côté stator Convertisseur : côté rotor et réseau	DU33S-1000/WD DS41S-1000		I_n : 15kA/20kA	$U_c \geq 1000V_{ac}$ Haute tenue TOV
2	Générateur : côté stator Convertisseur : côté rotor	DU33S-1000G/WD DS43S-690/100G		I_n : 15kA	Technologie GSG haute énergie $U_c \geq 1000V_{ac}$ Convient à l'oscillation harmonique
3	Bâtiment d'exploitation/ Convertisseur : côté réseau	DS253VG-690/WD DS150E-480		I_{imp} : 25kA/15kA	Zone très exposée Technologie VG haute énergie
4	Système de commande principal Système d'orientation des pales Convertisseur	DLA DLU		I_{imp}/I_n : 5kA	SPD pour dataline 1/2 paires Convient aux zones ZPF 0B à ZPF2
5	Système d'orientation des pales Système de commande principal Convertisseur	DS42S-320/G DAC50VGS-11-320		I_n : 20kA	Technologie VG (DAC50VG) U_p 1.5kV Fonction de verrouillage (DAC)
6	Système de commande principal Système d'orientation des pales	DS44S-400/G DAC50S-31-440		I_n : 20kA	Système d'alimentation TT Tenue optimisée aux TOV Fonction de verrouillage (DAC)
7	Sommet de la nacelle	OBSTA Balisage aérien		NA	Balisage Longue durée de vie Prise en charge des surtensions élevées
8	Système de commande principal Alimentation du système météorologique	DS230-48DC DCC30S-20-65		I_n : 15kA	48Vdc Faible U_p Fonction de verrouillage (DCC)
9	Convertisseur : côté rotor	DAC50S-31-760-2600DC		I_n : 20kA	tenue en perturbation harmonique Fonction de verrouillage Design compact (72 mm)
10	Convertisseur : côté réseau d'alimentation	DAC50S-30-660 DS73RS-600/YG		I_n : 20kA/30kA	Tenue optimisée aux TOV Capacité de décharge élevée Fonction de verrouillage (DAC)
11	Système d'orientation des pales dans le moyeu	LSCM-D LSC-B		I_{max}/I_{imp} : 100kA/50kA	Compteurs intelligents de courants de décharge (pales ou parafoudres)


CITEL

France

Siège Social

Services Commerciaux

Tél. : +33 1 41 23 50 23

e-mail : contact@citel.fr

Web : www.citel.fr

