



**HAL**  
open science

## Démarche EDF R / Fournisseurs, et retour d'expérience en exploitation, pour la fiabilité des onduleurs DC/AC des fermes photovoltaïques

Philippe Carer, Ismet Zenuni, Bercegol Adrien, Benoit Braisaz Dit Sesquet, Gerald Kwiatkowski, Marouane EL MERNISSI, Djamel Hadbi, Minh Tuan Nguyen, Dinesh Vasanthakumar

### ► To cite this version:

Philippe Carer, Ismet Zenuni, Bercegol Adrien, Benoit Braisaz Dit Sesquet, Gerald Kwiatkowski, et al.. Démarche EDF R / Fournisseurs, et retour d'expérience en exploitation, pour la fiabilité des onduleurs DC/AC des fermes photovoltaïques. Congrès Lambda Mu 23 " Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable " - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. hal-03877985

**HAL Id: hal-03877985**

**<https://hal.science/hal-03877985>**

Submitted on 29 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Démarche EDF R / Fournisseurs, et retour d'expérience en exploitation, pour la fiabilité des onduleurs DC/AC des fermes photovoltaïques

CARER Philippe  
ZENUNI Ismet  
*Département SYSTÈME,*  
*EDF Lab Paris-Saclay*  
*91120 Palaiseau*  
[philippe.carer@edf.fr](mailto:philippe.carer@edf.fr)

BRAISAZ DIT SESQUET Benoit  
KWIATKOWSKI Gerald  
*Département TREE,*  
*EDF Lab Les Renardières*  
*77250 Moret-Sur-Loing*

HADBI Djamel  
NGUYEN TUAN Minh  
*Département LME*  
*EDF Lab Les Renardières*  
*77250 Moret-Sur-Loing*

BERCEGOL Adrien  
*EDF-Usine DAP*  
*Paris La Défense*

EL MERNISSI Marouane  
*Stagiaire 2021 Polytech Angers*

VASANTHAKUMAR Dinesh  
*Stage 2022 DUT GEII Ville d'Avray*

**Résumé** — Cet article décrit la démarche mise en œuvre par EDF R et EDF R&D, vis-à-vis des fournisseurs d'onduleurs pour définir et contrôler la fiabilité des onduleurs DC/AC des fermes photovoltaïques (PV). On applique les démarches classiques de définition d'objectifs de fiabilité et définition des études de fiabilité prévisionnelle à réaliser par les fournisseurs sur les onduleurs DC/AC. On décrit l'intérêt du recueil de fiabilité FIDES pour les IGBT. On présente les calculs de fiabilité « hybride » avec prise en compte des paramètres tension électrique et température pour les composants d'électronique de puissance IGBT. On décrit également le retour d'expérience mis en place par l'exploitant EDF R pour le suivi des pannes des onduleurs DC/AC déjà en exploitation dans des fermes PV en France. On présente différentes méthodes potentielles (machine learning) pour diagnostiquer l'état des onduleurs par le suivi des alarmes générées par les onduleurs DC/AC.

**Mots-clefs** — *Onduleur DC/AC, Ferme Photovoltaïque, fiabilité électronique de puissance, Démarche de fiabilité EDF /fournisseur*

**Abstract**— The paper presents the reliability approach for inverter of PV farm of EDF R. The reliability requirement for the inverter is described. This document has been sent to manufacturer of DC/AC Inverter. Some element for reliability of power electronic (with FIDES) and inverter are indicated. Some issue to compute reliability of inverter could be solve with "hybrid reliability" model with Modelica or Pychatshoo [5], and Monte Carlo Simulation to generate the failure of inverter. Some element about machine learning method to detect correlation between failure or alarm of inverter with outliers operational behavior of inverter are indicated.

**Keywords** — *DC/AC inverter, PV farm, reliability of power electronic, reliability requirement for manufacturer*

### I. INTRODUCTION

Le groupe EDF a un plan important de développement de l'énergie photovoltaïque à l'international et en France, notamment à travers le développement du plan Solaire annoncé par l'entreprise en 2018 et qui prévoit l'installation d'au moins 10GWc en France à horizon 2028.

L'installation et la gestion des fermes photovoltaïques sont effectués par la filiale EDF R. Les différents composants d'une ferme photovoltaïque [1] sont les panneaux photovoltaïques (qui produisent de l'énergie DC), les onduleurs DC/AC, les câbles (entre panneaux et onduleurs) puis les transformateurs pour injecter l'énergie sur le réseau HTA (20 kV) ou HTB. Les fermes photovoltaïques sont pilotées à distance depuis des centres de contrôle.

Le coût d'investissement dans une ferme photovoltaïque dépend principalement des coûts des panneaux photovoltaïques et des onduleurs DC/AC. EDF Lab (EDF R&D) effectuait déjà depuis plusieurs années des tests en laboratoire sur les onduleurs DC/AC du marché industriel.

En 2018 EDF R a décidé d'ajouter une démarche structurée de fiabilité [6-8] entre EDF R et les fournisseurs d'onduleurs DC/AC avec :

- Définition d'une spécification de fiabilité pour les onduleurs DC/AC
  - Objectif probabiliste de fiabilité pour les onduleurs et définition du profil de mission
  - Demande d'étude de fiabilité prévisionnelle aux constructeurs d'onduleurs
- Analyse du REX (retour d'expérience) collecté sur les pannes observées sur le terrain pour les onduleurs DC/AC déjà en exploitation dans les fermes photovoltaïques.

Il se trouve de plus, que les onduleurs DC/AC sont conçus pour émettre des alarmes lorsqu'ils fonctionnent en mode dégradé. Le suivi de ces informations au travers de la supervision des fermes photovoltaïques qui sont pilotés depuis un centre de contrôle d'EDF R, permet de gérer la maintenance des onduleurs DC/AC.

## II. OBJECTIF DE L'ARTICLE

L'objectif de l'article est de décrire la démarche de sûreté de fonctionnement définie par EDF R et EDF R&D depuis 2018 pour le contrôle de la fiabilité des onduleurs DC/AC fabriqués par les constructeurs d'onduleurs pour le domaine des fermes photovoltaïques.

On présente dans cet article les structures des fermes photovoltaïques et les onduleurs DC/AC associés. Puis on indique la méthode adoptée pour définir une spécification de fiabilité et les études de fiabilité prévisionnelle demandées aux fournisseurs. Le suivi des pannes des onduleurs déjà en exploitation dans les fermes photovoltaïques gérées par EDF R est un élément très important pour valider la spécification de fiabilité des onduleurs DC/AC.

Le suivi des alarmes générées par les onduleurs pourrait être potentiellement intéressant, pour la maintenance conditionnelle des onduleurs DC/AC. On indiquera les méthodes potentielles de traitement de ces données testées par EDF R&D ou d'autres entités d'EDF comme le département « Usine DAP ». Notamment on a testé l'application de méthodes de « machine learning » pour traiter les alarmes venant des onduleurs dans un objectif d'optimisation de la maintenance conditionnelle des onduleurs DC/AC.



Fig 1 : Exemple de prototype de ferme « Agri-PV » équipée d'onduleurs DC/AC « String » sur le site EDF Lab Les Renardières Moret-sur Loing

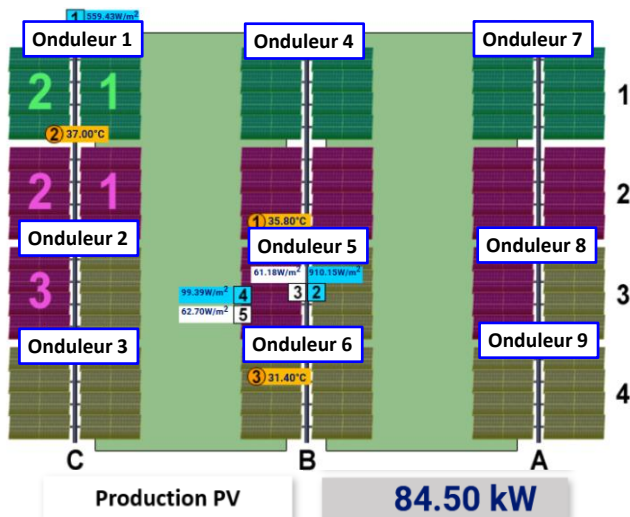


Fig 2 : Synoptique de pilotage de la ferme Agri-PV par lequel peuvent remonter des informations sur la production photovoltaïque et potentiellement les états fonctionnel ou dégradé des onduleurs DC/AC

## III. DESCRIPTION DES ONDULEURS DC/AC UTILISES DANS DIFFERENTES DIRECTIONS D'EDF

On indique tout d'abord que les onduleurs DC/AC sont utilisés dans différents réseaux électriques gérés ou étudiés par différentes directions d'EDF :

- Premièrement les onduleurs DC/AC installés dans les fermes photovoltaïques gérées par EDF R.
- Mais il y a aussi des onduleurs DC/AC dans les réseaux électriques internes des centrales nucléaires gérés par EDF/Direction de la Production Nucléaire.
- EDF R&D étudie la fiabilité de réseaux électriques de clients industriels comme les réseaux électriques de « Data Center » dans lesquels on retrouve aussi des onduleurs DC/AC.

C'est ainsi qu'avant de travailler pour EDF R, EDF R&D disposait d'exemple d'étude de fiabilité prévisionnelle réalisée par des constructeurs d'onduleurs pour le domaine des réseaux électriques des centrales nucléaires gérées par EDF /DPN. Cela donnait un exemple de dossier de fiabilité que l'on pouvait demander aux fournisseurs d'onduleurs DC/AC. Ainsi dans ces dossiers d'étude prévisionnelle des onduleurs figuraient : un objectif de fiabilité défini par EDF, une description fonctionnelle de l'onduleur, une AMDEC (analyse des modes de défaillances et de leur effets et criticité) et un calcul de fiabilité prévisionnelle basé sur la liste des composants et la somme des taux de pannes des composants obtenus à partir d'un recueil de données de fiabilité pour les composants électronique et d'électronique de puissance.

Dans le domaine des réseaux électriques des centrales nucléaires un retour d'expérience est bien réalisé sous forme de fiches d'anomalies dès qu'une panne est observée sur un onduleur dans les réseaux électriques BT fournissant des tensions 220V ou 400 V AC dans une centrale nucléaire.

Néanmoins les conditions d'exploitation des onduleurs en centrale nucléaire (dans des bâtiments dédiés) ou dans des fermes photovoltaïques (en plein air) ne sont pas les mêmes. Donc les données de retour d'expérience (taux de pannes des onduleurs) sont propres à chaque domaine d'utilisation.

## IV. DESCRIPTION DES FERMES PHOTOVOLTAÏQUES

### A. Composants des fermes photovoltaïques

Les fermes photovoltaïques intègrent les composants suivants : des panneaux photovoltaïques, une capacité DC, un onduleur DC/AC (en anglais, DC/AC inverter), des filtres, des interrupteurs, et un transformateur pour injecter l'énergie sur le réseau électrique AC.

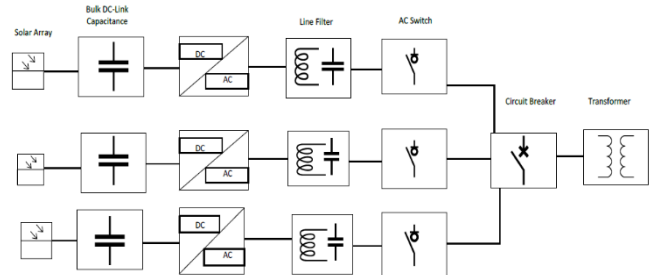
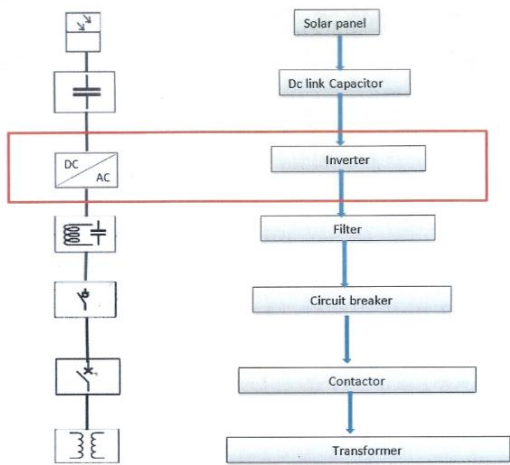


Figure 3 : Schéma d'une ferme PV avec panneaux photovoltaïques, capacité DC, onduleurs DC/AC, filtre, interrupteur, transformateur [1]



Component of the PV Farm

Figure 4 : Principaux composants d'une ferme PV avec les onduleurs DC/AC (en anglais DC/AC inverter) [1]

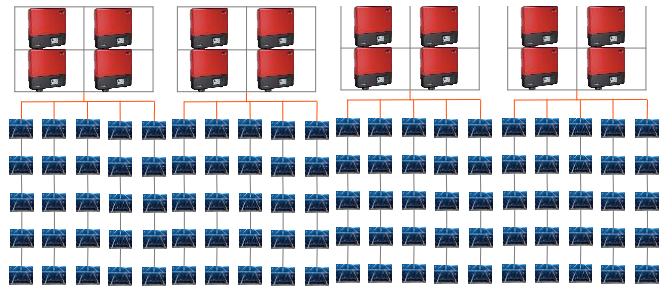


Fig 7 : Ferme PV avec onduleurs modulaires

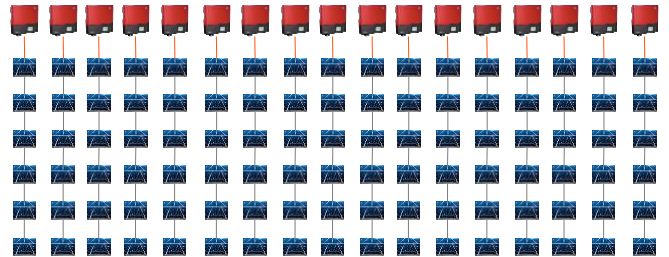


Fig 8 : Ferme PV avec onduleurs « string »

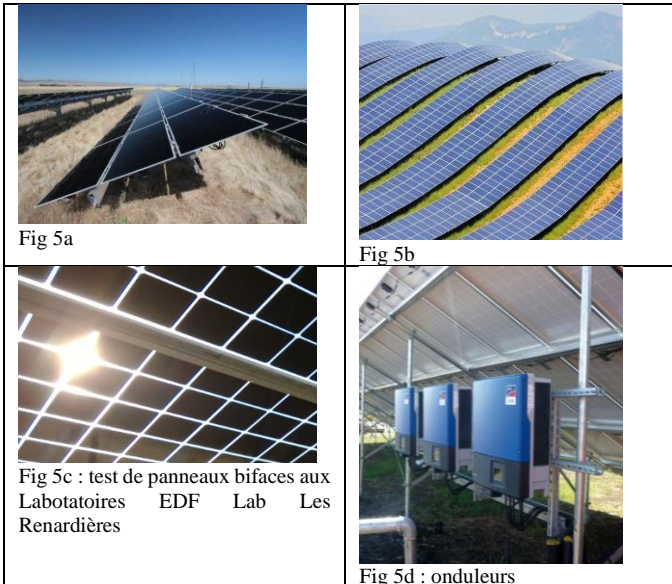


Fig 5a

Fig 5b

Fig 5c : test de panneaux bifaces aux Labotatoires EDF Lab Les Renardières

Fig 5d : onduleurs

Figure 5 : Exemples de composants de fermes photovoltaïques panneau monoface, ou panneau biface ou des onduleurs

### B. Différentes architecture de fermes photovoltaïques

On peut avoir différentes architectures de fermes photovoltaïques avec des onduleurs centralisés, ou des onduleurs modulaires, ou des onduleurs dits « string » (qui sont associés à une seule file de panneaux photovoltaïques).

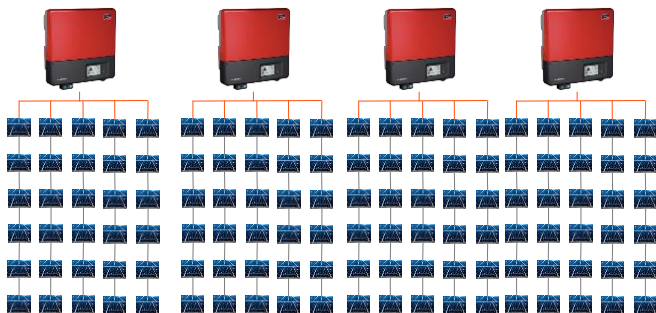


Fig 6 : Ferme PV avec onduleurs centralisés

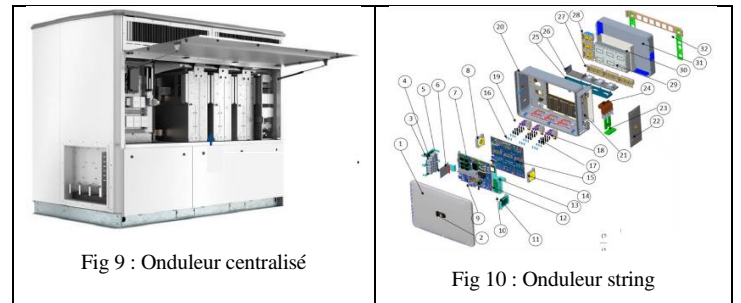


Fig 9 : Onduleur centralisé

Fig 10 : Onduleur string

### C. Quelques données quantitatives à titre d'illustration

On donne un exemple de nombre d'onduleurs suivant les types d'architecture pour une ferme PV.

Architectures avec onduleurs	Nombre d'onduleurs	Puissance d'un onduleur kW
Centralisés	14	642
Modulaires	84	107
«String »	177	51

Tab 1 : Exemple de nombre d'onduleurs pour une ferme PV type

### V. DETAIL D'UN ONDULEUR DC/AC

#### A. Principe de fonctionnement d'un onduleur

Les transistors de puissance ou les thyristors fonctionnent en commutation (O/F) piloté par une carte de contrôle (une diode est associée au transistor de puissance pour éviter une surtension sur le transistor lors de la commutation). Ainsi à partir d'une tension continue (DC) les transistors en commutation vont générer une tension en créneaux.

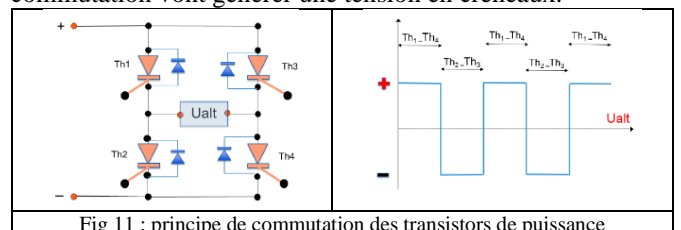


Fig 11 : principe de commutation des transistors de puissance



Ensuite on filtre la tension en créneau pour en extraire le AC à 50 Hz (fig.12). Pour les onduleurs avec commande MLI (modulation de largeur d'impulsion) on peut piloter les commutations de transistors de façon à pouvoir filtrer plus facilement le 50 Hz.

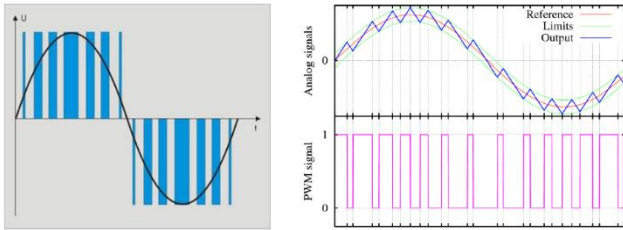


Figure 12 : Algorithme MLI (modulation de largeur d'impulsion)

### B. Structure interne d'un onduleur DC/AC

Les principaux composants des onduleurs DC/AC sont les transistors de puissance IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) [2], [3], [4] qui font partie du domaine de l'électronique de puissance.

#### 1) Exemple de partie puissance de l'onduleur

Pour certain type d'onduleur on distingue une partie puissance avec tout d'abord un convertisseur DC/DC (« boost converter » : élévateur de tension) puis les ponts de l'onduleur (full-Bridge inverter). Ensuite le filtre et l'injection sur le réseau.

#### 2) Exemple de partie contrôle de l'onduleur

Pour certain type d'onduleur, la partie contrôle de l'onduleur comprend (figure 13) les éléments : MPPT (maximum power point tracking) ; PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (modulation de largeur d'impulsion) ; PLL (phase loop lock) ; PI proportional integral ; PR proportional resonant.

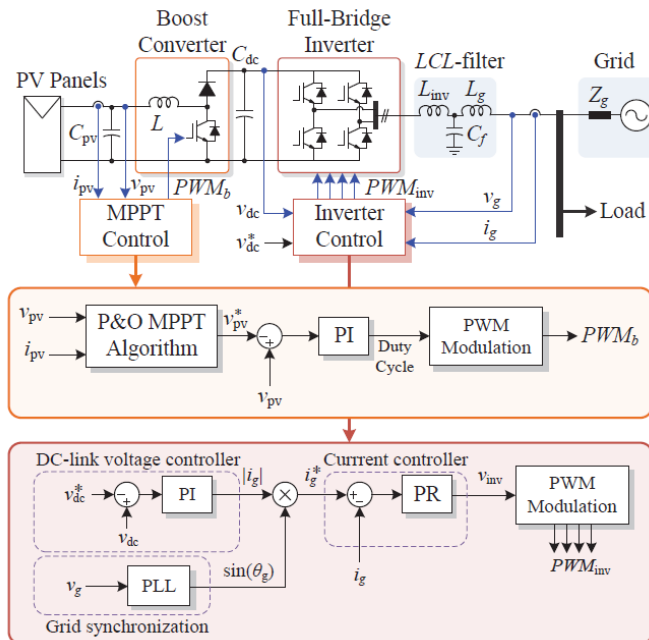


Fig 13 : Parties puissance et contrôle d'un onduleur DC/AC [4]

Le profil d'emploi de l'onduleur est un aspect important qui joue un rôle sur la durée de vie de l'onduleur (voir figure 14).

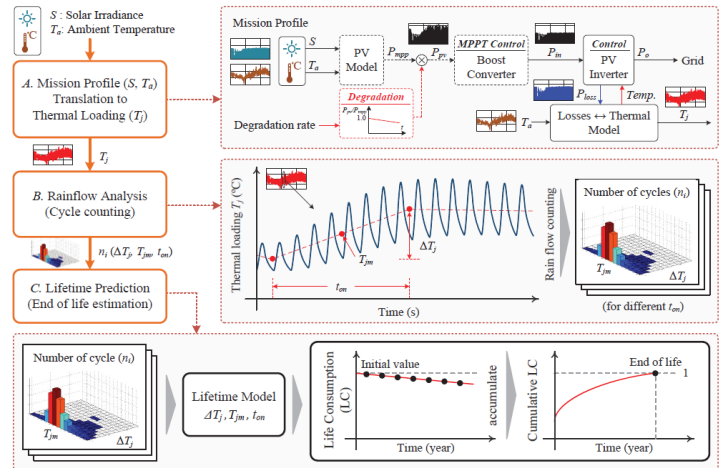


Fig 14 : Profil de mission et facteur d'influence sur la fiabilité d'un onduleur avec prise en compte du vieillissement [4]

## VI. RAPPELS SUR LES DEMARCHES DE FIABILITE DES COMPOSANTS POUR DIFFERENTES DIRECTIONS D'EDF

EDF a déjà mis en œuvre des démarches de fiabilité pour les nouveaux composants de réseau électrique : disjoncteurs contrôle commande de poste ou compteurs [6-8].

On peut noter aussi que la direction EDF/DPN qui gère les centrales nucléaires impose des études de fiabilité prévisionnelle pour les onduleurs installés dans les réseaux électriques des centrales nucléaires.

De même pour le domaine des centrales nucléaires, toutes les pannes des composants touchant à la sûreté comme les composants électriques font l'objet de fiches d'anomalies. Les traitements statistiques de ces fiches sont guidés par les besoins des EPS (étude de probabiliste de sûreté) des centrales nucléaires.

## VII. DEMARCHE DE FIABILITE POUR LES ONDULEURS DE FERMES PHOTOVOLTAÏQUES POUR EDF R

La démarche développée pour le contrôle de fiabilité des onduleurs à EDF R, reprend les phases classiques suivantes :

- Définition d'un objectif probabiliste de fiabilité pour l'onduleur qui puisse servir de spécification de fiabilité dans les cahiers des charges à destination des fournisseurs
- Analyse des différentes informations disponibles en interne EDF R sur les pannes des onduleurs déjà en exploitation. On verra que (dans la mesure de l'accès aux données), ce point comprendra deux parties :
  - Analyse des fichiers de pilotage des fermes photovoltaïques depuis des centres de contrôle supervisant (à distance) plusieurs fermes photovoltaïques. L'analyse peut révéler des corrélations entre une augmentation d'information de pannes en cascade et des contraintes climatiques sur les fermes PV (vent, foudre ..)
  - L'analyse des fichiers de pannes collectées sur les onduleurs dans les fermes photovoltaïques en exploitation à EDF R.

A. Définition de l'objectif de fiabilité sur l'onduleur à partir d'un objectif de disponibilité de la ferme PV

EDF R a défini un objectif global de disponibilité des fermes photovoltaïque  $A_{\text{ferme\_PV}}$  (on ne donne pas l'objectif défini par EDF R). Et ensuite il faut identifier par l'analyse du retour d'expérience un ordre de grandeur du pourcentage ( $\alpha\%$ ) de l'indisponibilité globale de la ferme PV due aux pannes des onduleurs. On obtient ainsi un objectif global de disponibilité pour les onduleurs de la ferme photovoltaïque.

Cette démarche d'allocation de l'objectif de disponibilité globale de la ferme PV et objectif de disponibilité sur l'onduleur est réalisée pour les différentes structures de fermes PV (avec onduleurs centralisés, modulaires ou répartis comme les onduleurs « string »).

Ensuite si on désigne  $\lambda_{\text{ond}}$  le taux de défaillance d'un onduleur et  $\mu_{\text{ond}}$  le taux de réparation d'un onduleur. On a ainsi la disponibilité d'un onduleur égal à :  $A_{\text{ond}} = \frac{\mu_{\text{ond}}}{\lambda_{\text{ond}} + \mu_{\text{ond}}}$

On peut ainsi calculer avec la loi de Poisson le nombre d'onduleur en pannes simultanément sur un parc de N onduleurs. On peut ainsi établir le lien entre le taux de pannes de l'onduleur et l'indisponibilité de la ferme au niveau global. On en déduit ainsi le taux de pannes de l'onduleur à spécifier.

B. Contenu global de la spécification de fiabilité de l'onduleur à destination des constructeurs d'onduleurs

La spécification de fiabilité de l'onduleur comprend :

- Le profil d'emploi de l'onduleur (conditions température humidité ...).
- l'objectif de fiabilité pour l'onduleur.
- les études de fiabilité demandées aux constructeurs pour démontrer la fiabilité de l'onduleur : description fonctionnelle de l'onduleur, AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leur effet et criticité), Calcul de fiabilité prévisionnelle de l'onduleur avec une base de données de fiabilité dédiée à l'électronique.

C. Détail de la spécification de fiabilité pour les onduleurs (On reproduit dans ce sous-chapitre la spécification de fiabilité de l'onduleur qui a été rédigée en anglais. Certaines valeurs  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  ne sont pas indiquées car elles sont de diffusion restreinte).

Definition of operating mode for the inverter

	User Mode	Function
A	Daily operation	Convert DC power into AC power, with DC/AC ratio up to 1.6
B	Night operation	Q@night function
C	Warning operation	Warn the monitoring for any abnormal operation or failure
D	Cybersecurity	Insure the cyber security of the inverter

Potential uses case profile of a PV inverter:

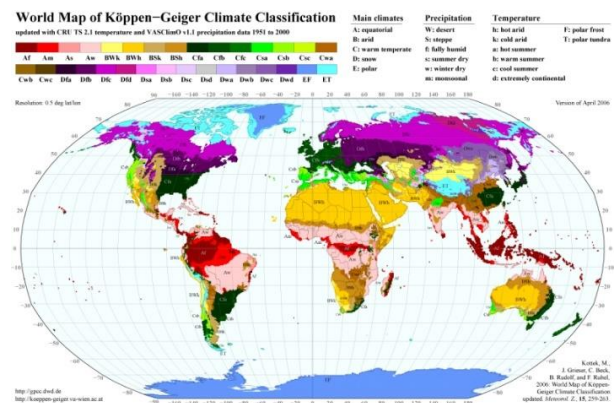
- Test, Installation, and commissioning
- Day and Night operation
- Maintenance
- Storage of the system and the spare parts

- Return to factory for service in case of significant faults

Lifetime duration	Central Inverter	String Inverter
Scenario for the lifetime duration for the inverter	20 / 25 / 30 / 35 years	20 / 25 / 30 / 35 years
Operational Availability Target	Value close to 1, but <1	Value close to 1, but <1

Suppliers have to provide failure rates for different climate areas. According to "Koeppen Geiger" classification, two main climate areas are specified:

- Cfb (France)
- BWh (Oman)



The reliability target for the inverters are :

Reliability requirement for inverter		
Failure rate ( $\lambda$ ) per hour	Environment	
	Cfb area	BWh area
$\lambda_{\text{central inverter}}$	$\lambda_1$	$\lambda_1 \cdot C_{th}$
$\lambda_{\text{string inverter}}$	$\lambda_2$	$\lambda_2 \cdot C_{th}$
	<i>C<sub>th</sub> : thermal</i>	<i>Parameter</i>
		<i>With C<sub>th</sub> &gt; 1</i>
Requirement SIL for the software (IEC 61508)	SIL = 3	SIL = 2

The suppliers should explicit, explain and argue the hypothesis and assumptions they consider for the average time to repair the failure of the inverter :

	Central Inverter	String Inverter
Average Time to repair on site	...	...
Logistical maximum time to fix the failure	...	...

In order to justify the failure rates previously indicated, the manufacturer should align to the following reliability standards:

- IEC 60812 (FMEA: Failure mode and effect analysis), CEI 6050\_12
- Reliability MIL HDBK-217 F
- IEC 62380 or UTE C 80 811, or FIDES Guide "Reliability Methodology for Electronic Systems"

- IEC 61508 (Dependability of digital system)

The manufacturer should provide:

- Functional description of the inverter
- Projection of the inverter's functions on its hardware and software parts of the converter
- List of electronic component
- List of reliability standard used in the predicting study
- FMEA analysis (Failure mode and Effect analysis, see appendices)
- Analysis of the result of the stress test performed by the manufacturer on the converter with accelerated reliability model FIDES
  - If the manufacturer has realized accelerated stress test (humidity and temperature) on the converter or on the component of the converter, the manufacturer should use these result to estimate the failure rate
- Clearly identified hypothesis for the reliability computation (See appendices)
- Contribution of the manufacturer to the process of collection of the failure report during operation phase
- The manufacturer should analyze the risk of common cause failure for several inverters in the same photovoltaic system
- A recommended maintenance plan including:
  - Control and inspection
  - Replacement,
  - Stock of spare parts,
  - Warranty plan.
  - And associated cost
- List of any specific stress with influence on reliability results (example: altitude, DC/AC ratio...)

#### VIII. ENSEIGNEMENTS DE LA DEMARCHE DE FIABILITE AUPRES DES FOURNISSEURS D'ONDULEURS

##### A. Intérêt pour la spécification de fiabilité pour les onduleurs DC/AC

Cette spécification de fiabilité pour les onduleurs a été transmise à plusieurs fournisseurs d'onduleurs européens et asiatiques (SMA, Power Electronic, SunGrow, Huawei). Cette exigence de fiabilité était nouvelle pour les fournisseurs d'onduleurs pour le domaine des fermes photovoltaïques.

Tous les fournisseurs font beaucoup d'effort de tests sur les onduleurs, notamment des essais de fiabilité accélérés [9] ou du contrôle qualité sur les onduleurs fabriqués. Certains constructeurs font des calculs de fiabilité avec des bases de données de type FIDES, d'autres renforcent en amont les tests ou essais sous contraintes. Certains constructeurs qui ne connaissaient pas la base FIDES étaient intéressés pour rejoindre le groupe FIDES.

La démarche globale est jugée très intéressante par EDF R. Mais il faut absolument compléter cette approche par

l'analyse des pannes d'onduleurs constatées sur le terrain en exploitation dans les fermes PV gérées par EDF R.

##### B. Répartition des tâches de maintenance entre EDF R et les constructeurs

Les contrats de maintenance entre EDF R et un constructeur, peuvent définir des tâches de maintenance à réaliser par les agents d'EDF R, et d'autres qui nécessitent des interventions de maintenance réalisées par le constructeur.

#### IX. DIFFICULTES POUR ESTIMER LA FIABILITE DE CERTAINES ARCHITECTURES D'ONDULEUR

Sous l'angle des études de fiabilité probabilistes proprement dites des onduleurs DC/AC, l'état de l'art en fiabilité des systèmes [9], [10] permet de calculer la fiabilité de différentes structures d'onduleurs. Néanmoins on peut avoir des configurations qui nécessitent du calcul de fiabilité « hybride » [11], [12], [14] ou des analyses spécifiques de modes dégradés de convertisseurs [2], [3]. On va illustrer dans le sous-chapitre suivant une difficulté pour le calcul de fiabilité d'un onduleur. Pour donner des exemples de calcul de fiabilité sur les onduleurs on se réfère à la référence [13]

##### A. Exemple de taux de pannes d'un IGBT issu de la référence de 2013 [13]

Le taux de panne d'un IGBT dépend de la technologie et de la tension électrique et des conditions thermiques de fonctionnement du transistor ( $V_{ce\_off\_state}/V_{ce\_rating}$ ,  $V_{ge\_max}/V_{ge\_rating}$  et  $T_{j\_max}$  ou température de la jonction du transistor). Le taux de défaillance à la forme suivante :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot 10^{-9}/h$$

Où  $\lambda_0$  est le taux de défaillance de référence à  $T_j=100^\circ C$  qui dépend de la technologie. En général la valeur de  $\lambda_0$  est de 50 FIT pour un MOSFET de faible puissance, et de 500 FIT pour une MOSFET de moyenne puissance et de 5000 FIT pour un module avec « driver » (1 FIT ou « Failure in time » =  $10^{-9}/h$ ). Les facteurs  $\pi$  d'accélération sont de la forme suivante :

$$\text{Température (Loi d'arrehnuiis)} \pi_T = e^{K(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})}$$

$$\text{Tension électrique } \pi_S = A \cdot e^{B(\frac{V_{ce\_off\_state}}{V_{ce\_rating}})}$$

##### B. Evolution des taux de pannes des transistors de puissance avec la version FIDES 2021

Il faut tenir compte du nouveau modèle pour les transistors de puissance du recueil de données FIDES 2021. Modèle composants MOSFET et IGBT en technologie Si

$$\lambda = \lambda_{physique} \cdot \Pi_{induit} \cdot \Pi_{PW} \cdot \Pi_{part} \cdot \Pi_{process}$$

New : facteur  $\Pi$  power afin de prendre en compte l'impact sur la fiabilité des règles de conception

Evolution des  $\lambda_{0\_TH}$  (en FITS)

	FIDES 2009	FIDES 2020
MOSFET	0,0202	0,0202
IGBT	0,3021	0,0202

Avec modification de la température de référence :  $60^\circ C$  au lieu de  $20^\circ C$

	FIDES 2020	FIDES 020
Température de reference	$20^\circ C$	$60^\circ C$



$\lambda_{0th}$ MOSFET	0,0202	0,56
$\lambda_{0th}$ IGBT	0,0202	0,56

En phase de fonctionnement

$$\Pi_{thermique} = e^{11604,07 \cdot \left[ \frac{1}{T_{ref}+273} - \frac{1}{T_{j\_composant}+273} \right]}$$

En phase de non-fonctionnement :  $\Pi_{thermique} = 0$

Avec  $T_{ref} = 60^\circ\text{C}$

$T_{j\_composant}$ , température de jonction du composant lors d'une phase de fonctionnement ( $^\circ\text{C}$ ). Cette température sera au maximum égale à  $175^\circ\text{C}$

### C. Exemples de schémas d'onduleur pour les calculs de fiabilité [13]

Pour illustrer des difficultés spécifiques de calculs de fiabilité pour les onduleurs, on considère des schémas d'onduleurs issus de la publication [13]. Les schémas d'électronique de puissance d'onduleur sont faciles à comprendre puisqu'ils sont représentés sous forme de « blocks diagram » (formalisme largement utilisé en fiabilité des systèmes).

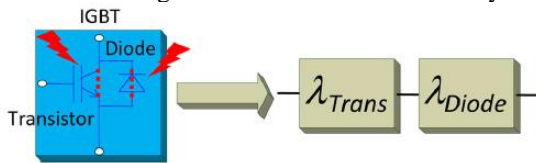


Fig 15 : IGBT et diode de retour (pour éviter les surtensions lors de la commutation de l'IGBT) [13]

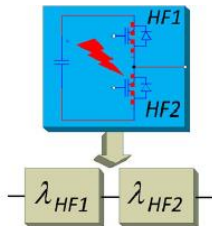


Fig 16 : Block diagram des deux « bras de l'onduleur » [13]

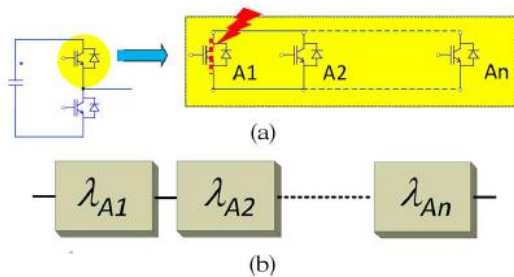


Fig 17 : Block diagram d'un bras avec une structure série d'IGBT [13]

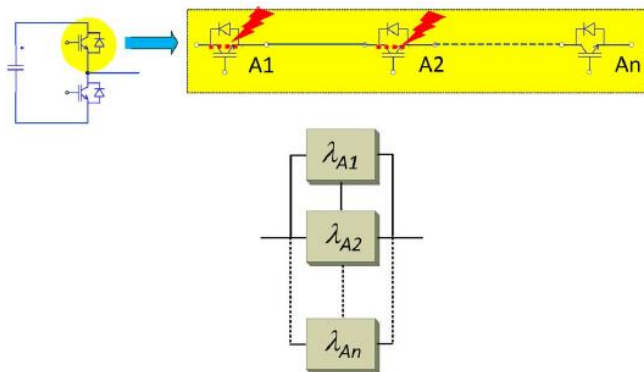


Fig 18 : Block diagram d'un bras avec une structure parallèle d'IGBT [13]

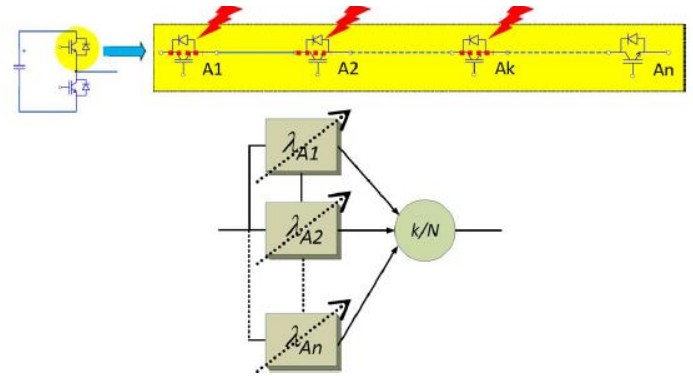


Fig. 19 : Block diagram avec un bras en structure de porte k/N pour les IGBT [13]

C'est ce dernier schéma figure 19, qui pose problème pour les calculs de fiabilité système. En effet on a une porte en k/N (ce qui est très classique en fiabilité système). Mais en supplément on a des « flèches » dans les blocks, qui sont censées représenter le fait que les taux de pannes vont être variables en fonction des pannes des autres composants dans la porte. En effet chaque block a un taux de défaillance fonction de la tension aux bornes de l'ensemble des transistors. Si tous les composants sont opérationnels, cette tension se répartie sur tous les transistors. Si un transistor est en panne (en court-circuit) alors la tension se répartie sur moins de composants. Donc chaque composant restant en fonctionnement aura une tension plus grande à ses bornes. Selon la formule suivante :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_E \cdot \pi_q \cdot 10^{-9} / h$$

$$\text{Avec } \pi_S = A \cdot e^{B \left( \frac{V_{ce \text{ off state}}}{V_{ce \text{ rating}}} \right)}$$

Ainsi les transistors restant en fonctionnement auront un taux de défaillance plus élevé. Il faut donc, en même temps que la modélisation de fiabilité des composants, modéliser aussi les niveaux de tension aux bornes des composants en fonction des pannes.

### X. PROBLEME A RESOUDRE POUR CALCULER LA FIABILITE DE CERTAINES ARCHITECTURES D'ONDULEUR

Les onduleurs centralisés sont refroidis par ventilation ou par la circulation d'un fluide. En cas de pannes de ces systèmes de refroidissement, la température des transistors va augmenter. Ainsi pour modéliser la fiabilité de la structure d'une porte k/N avec risque de perte du système de refroidissement, il faut prendre un facteur d'accélération AF du taux de défaillance de l'onduleur de type :

$$AF(V, T) = \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \cdot \text{Exp} \left[ - \frac{E_a}{k_B} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Et modéliser dans le même temps la variation de température avec une équation de la forme suivante :

$$\frac{dT}{dt} = 0,1 \times (T_{\text{outside}} - T) - 5 \times \text{Cooling}_{\text{ison}} + \text{HeaterTransistor}$$

Avec :

- si le système refroidissement marche  $\rightarrow$   $\text{Cooling}_{\text{ison}} = 1$
- si le système refroidissement marche  $\rightarrow$   $\text{Cooling}_{\text{isout}} = 0$

Pour résoudre ce cas d'étude il est nécessaire de faire de la fiabilité « hydride » avec Modelica [12], [14] ou Pychatshoo [5], [11] (Python voire [PyCATSHOO](#)) et de la génération de pannes des onduleurs par simulation de Monte Carlo.



## XI. SUIVI DE LA CONDUITE DES FERMES PV ET ANALYSE DU REX DES ONDULEURS EN EXPLOITATION

### A. Suivi de la conduite des fermes PV

Il est classique dans de nombreux de secteurs techniques (électricité, eau gaz, pétrole ..), que les installations techniques réparties sur tout le territoire soient pilotées depuis des « centres de contrôle ». Ainsi toutes les centrales photovoltaïques d'EDF R sont pilotées depuis des centres de supervision par EDF R. Par exemple (fig. 20) l'analyse suivante du cumul des pertes de liaison entre la ferme et le centre de contrôle en fonction du temps pose question, car on voit des sauts dont il s'agit d'en déterminer les origines (contraintes météorologiques, erreur de spécification, de réalisation...).

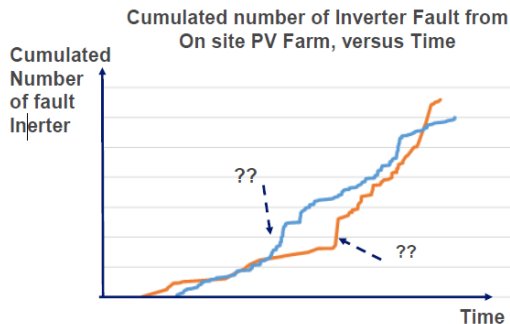


Fig 20 : cumul d'événement en fonction du temps pour les pannes des onduleurs

### B. Exemple de Fichier des pannes des onduleurs

On indique ci-dessous à titre d'exemple un tableau en deux parties sur des pannes d'onduleurs collectées par EDF R.

N° fiche	Date Début	Date Fin	Location PV farm	Inverter (onduleur) NO = i
001	05/01/2017	05/01/2017	A	2
002	07/01/2017	07/01/2017	C	1
003	07/01/2017	07/01/2017	B	8
004	10/01/2017	11/01/2017	A	10
005	25/01/2017	25/01/2017	B	3
006	28/01/2017	28/01/2017	B	6
007	25/01/2017	02/02/2017	C	4
008	10/02/2017	10/02/2017	A	14

Tableau 2 : 1ere et 2eme partie, exemple de REX de pannes onduleurs

N° fiche	Fault type	Designation	Action or repair
001	Inverter fault	Overvoltage	Reset BT et relance =OK
002	Inverter fault	Retrofit de câble	Câble endommagé
003	Inverter fault	110 UVW range	Mauvaise position de la bobine (du au vibration)
004	Inverter fault	110 UVW range	Remplacement du condensateur
005	Inverter fault	Ground fault or overheating	Modification paramétrage capteur d'isolation électrique
006	Inverter fault	Ne fournit plus de réactif	Reset BT et relance onduleur = OK
007	Inverter fault	Modification paramètre onduleurs	Modification paramétrage
008	Inverter fault	Tripped or door	Reset BT et relance onduleur = OK

L'analyse statistique de ces fichiers de pannes avec les données de parc des onduleurs, permet d'obtenir des taux de pannes opérationnels des onduleurs.

### C. Question de mutualisation de données de pannes des onduleurs entre différentes applications ou des recueils de données de fiabilité

On voit donc que l'on aurait plusieurs sources de données pour avoir des informations sur les modes de pannes et/ou taux de défaillance des onduleurs :

- EDF R est en mesure compte tenu de son retour d'expérience (REX) d'établir des taux de pannes des onduleurs des fermes photovoltaïques.
- EDF/Direction de la Production Nucléaire, est également en mesure d'estimer les taux de pannes des onduleurs pour les réseaux électriques des centrales nucléaires (les conditions ne sont pas les mêmes mais il s'agit dans les deux cas d'onduleur).
- Les bases de données de fiabilité comme FIDES fournissent des taux de pannes sur les composants d'électronique de puissance des onduleurs.
- Les constructeurs d'onduleur disposent parfois aussi de REX via leur service après-vente.

On voit donc les intérêts potentiels à organiser, dans la mesure du possible, des échanges de données entre ces différents domaines d'application pour mieux estimer les taux de défaillance opérationnel des onduleurs DC/AC.

## XII. RAPPEL OBJECTIF DE MAINTENANCE PREVENTIVE POUR LES ONDULEURS ET LIEN AVEC LE MONITORING

### A. Alarmes définies à la conception de l'onduleur

Les onduleurs sont des systèmes complexes ainsi le constructeur a défini de nombreuses alarmes caractérisant des fonctionnements de tension ou de courant aux limites ou hors des limites des plages de bon fonctionnement. Certaines alarmes peuvent entraîner la mise en repli de l'onduleur. Normalement il faut qu'il y ait un lien entre la définition des alarmes de l'onduleur, et l'étude de fiabilité de l'onduleur réalisée par le fournisseur.

Toutes ces informations peuvent être remontées au niveau du centre de conduite des fermes photovoltaïques. On comprend que l'exploitation de ces données peut constituer des informations pour optimiser la maintenance des onduleurs.

Au cours de l'exploitation des onduleurs il est important de savoir où remonte ces alarmes, et si ces informations sont stockées. Si cela est le cas l'analyse de ces alarmes pourrait permettre de suivre les modes de dégradation des onduleurs et cela serait utile pour la maintenance conditionnelle des onduleurs.

### B. Exemple de dysfonctionnement d'onduleurs sur deux centrales solaires aux Etats-Unis gérées par EDF R

#### 1) Contexte

On décrit un exemple concret concernant deux centrales solaires photovoltaïques exploitées par la filiale d'EDF R aux Etats-Unis. Les onduleurs de ces deux fermes généraient beaucoup d'alarmes avec des défaillances et/ou mise en rempli des onduleurs. Cela conduisait depuis un an à la perte de 10% de la production sur ces fermes PV.

## 2) Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude était de réduire le taux d'alarmes des onduleurs en développant un algorithme capable de prédire ces alarmes et/ou défaillances associées, de façon à pouvoir, dans la mesure du possible intervenir, sur l'onduleur avant la panne.

Value	Meaning
66	Vbus unbalanced
83	Mod. Multiple derivation
98	Mod. Idc derivation
99	Mod. Iac derivation
105	Pac/Pdc unbalanced
106	Vbusunbalanced
107	Idc not reached
108	Half bus Vmax
112	OCAC emergency

Tab 3 : Exemple d'alarmes d'onduleur et code associé. Le Code 106 correspond à un déséquilibre de tension.

### Distribution of "Value Big Faults"

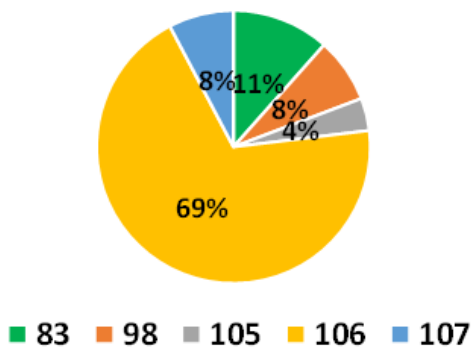


Fig 21 : Répartition des alarmes d'onduleurs pour 2 fermes PV aux US

## XIII. TEST DE METHODES STATISTIQUES OU MACHINE LEARNING POUR PREVOIR LES ALARMES DES ONDULEURS

### A. Proposition de méthodes pour traiter le problème

On souhaite élaborer un modèle de prévision des alarmes d'onduleur en fonction des différents paramètres de fonctionnement (nominal ou dégradé) de l'onduleur.

On a eu des fichiers de relevés toutes les heures de fonctionnement et production des onduleurs (valeur de courant et de tension ou de critères physiques autour des onduleurs comme la température et l'humidité...).



Fig 22 : Production des onduleurs sur plusieurs jours

### B. Méthode potentielles statistique et/ou de « machine learning »

On souhaite tester l'intérêt potentiel des méthodes de « machine learning » pour élaborer un modèle de prévision d'alarmes des onduleurs. Les différentes méthodes potentielles pour élaborer le modèle sont les suivantes : Gaussian Model, (Gaussian model + Random Forest), Survival Model, Logistic Regression, Random Forest, XGBoost.

Les Critères de jugement de l'efficacité d'un modèle de « Machine Learning » sont : la « precision » et le « recall ».

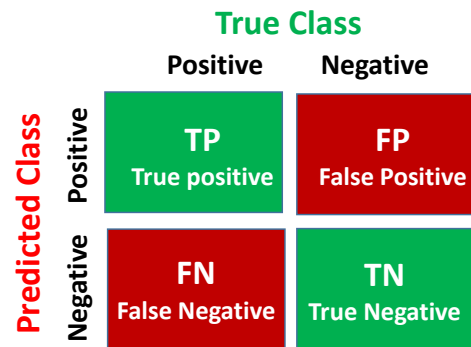


Fig 23 : Matrice de confusion

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

### C. Limites des méthodes précédentes pour le problème considéré de détection des valeurs aberrantes

Le problème à traiter par « machine learning » pour élaborer un modèle de prédiction des alarmes d'onduleur, peut être catégorisé par rapport au sujet de la détection de « valeurs aberrantes (Outliers, en anglais) » dans un ensemble de valeurs. Ce type de problème peut se rencontrer dans :

- Le nettoyage des données
- Finance : détection de Fraudes
- Médecine : vision par Ordinateur

Les définitions des « Inliers » et « outlier » sont les suivantes :

- Les « inliers » sont des données générées selon un processus normal. Les « outliers » (ou données aberrantes) sont l'opposé des « Inliers ».

Ainsi il va falloir trouver des éléments aberrants dans un ensemble de données dont :

- L'effectif est faible (<5% de l'échantillon)
- Les caractéristiques des valeurs aberrantes diffèrent des autres observations.

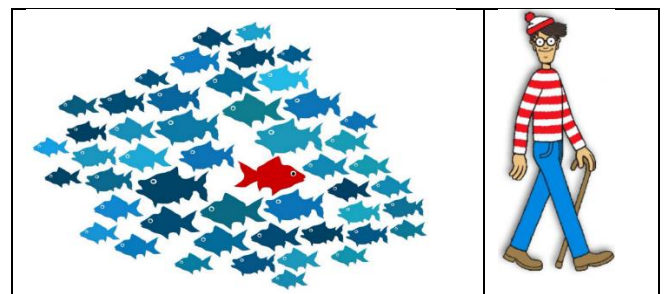


Fig 24 : Exemple de recherche de données aberrantes dans un ensemble d'éléments

#### D. Méthodes de « machine learning »

L'application d'une méthode de « machine learning » est basée sur l'apprentissage.

##### 1) Problème du déséquilibre des classes

L'apprentissage supervisé d'algorithme de « machine learning » sur des données déséquilibrées (ex : 90% versus 10 %) est difficile :

- Solution possible : sur-échantillonnage
  - Inconvénient → méthode inefficace si le déséquilibre est trop grand quand la classe minoritaire à un très faible effectif (<5% de l'échantillon)
- Solution retenue : méthodes de détection « d'Ouliers » (valeur aberrante)

##### 2) Apprentissage supervisé ou non supervisé

On peut avoir un apprentissage

- Supervisé
- ou Non Supervisé

#### Supervisé

- Outliers présents dans la base d'apprentissage
- Données d'apprentissage labellisées
- Séparation des « outliers » et « inliers »
- $\begin{cases} Y = 1 \text{ si outlier} \\ Y = 0 \text{ sinon} \end{cases}$
- $Y \sim X_1, \dots, X_p$

#### Non Supervisé

- Données d'apprentissage non contaminées
- Données d'apprentissage non labellisées
- Modélisation du comportement normal des données
- $X_1, \dots, X_p$

Intérêt de l'apprentissage non supervisé

- Labellisation des données coûteuse et nécessite une expertise
- Méthode supervisée requiert des méthodes de « sampling »
- Inconvénient → méthode non efficace si la classe minoritaire a un très faible effectif (< 5% de l'échantillon)

Solution retenue : utiliser des méthodes non supervisées

#### E. Informations complémentaires sur la méthode de détection des outliers

Les modèles de détection « d'outliers » sont basés sur une **métrique** capable d'isoler dans l'espace les « outliers » des « inliers » ⇔ distance euclidienne, de Mahalanobis, « Collusive Displacement » ...

##### 1) Exemple de difficulté : « le masking »

Quand les « outliers » ont des caractéristiques similaires, ils forment un cluster dans l'espace. L'algorithme considère les données de ce cluster comme des « inliers » (fig 25).

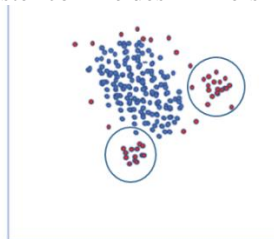


Fig 25 : Exemple de traitement de données

##### 2) Précision sur la méthode « isolation forest »

On donne des informations sur la méthode « isolation forest »

- Création successive d'arbres de décision (CART)
- Score attribué par chaque arbre à chaque observation
- Règle de décision « outlier/inlier » basée sur les scores

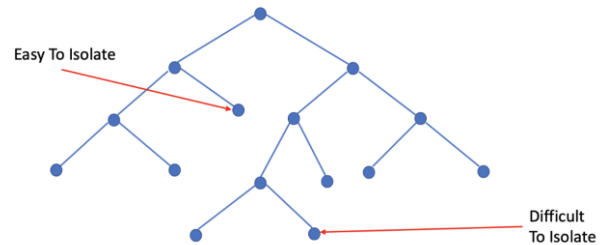


Fig 26 : exemple de CART

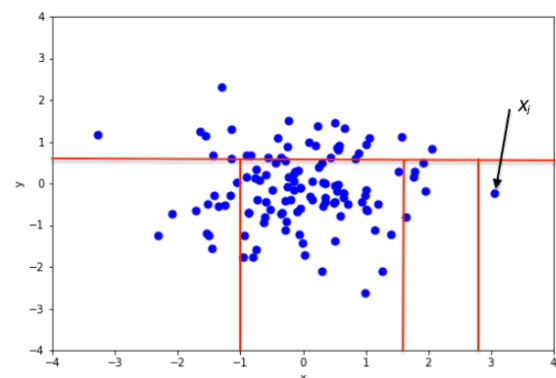


Fig 27 : Isolation d'un « outlier » dans un CART

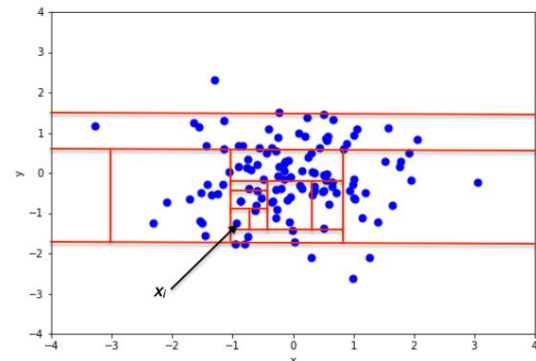


Fig 28 : Isolation d'un « inlier » dans un CART

##### 3) Modèles de « machine learning » potentiellement applicables pour détecter les valeurs aberrantes (Outlier)

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des différents modèles potentiels pour identifier des valeurs aberrantes.

Modèle	Description
Isolation Forest	Variante de forêt aléatoire
One-Class SVM	Variante de la « support vector machine (SVM) »
Local Outlier Factor	Détection basée sur le voisinage des points
Gaussian Mixture Model	Modélisation des inliers par combinaison des lois gaussiennes

Tableau 4 : modèles de « machine learning » pour la détection « d'Outlier »



Ces modèles peuvent être appliqués au travers des Package PyOD et Scikit-learn (sklearn) pour instancier ces méthodes en Python.

En parallèle à l'approche précédente de nouveaux traitements statistique classiques et de nouvelles informations sont intervenues que l'on va décrire dans le chapitre suivant.

#### XIV. APPROCHE COMPLEMENTAIRE ET NOUVELLES INFORMATIONS SUR LA FIABILITE DES ONDULEURS SUR LA FERME PV AUX ETATS UNIS

En parallèle aux réflexions sur l'application des méthodes de « machine learning » on a effectué des comparaisons de taux d'occurrence des pannes ou d'alarmes des onduleurs DC/AC. A partir du nombre de pannes et du parc des composants et du temps d'observation on peut calculer le taux moyen de pannes des onduleurs.

$$\lambda = \frac{\text{Number of failure observed}}{\text{Number of component observed} \times \text{Time duration of observation}}$$

Puis on peut calculer les intervalles des confiances "[ $\lambda_{lower}$ ,  $\lambda_{upper}$ ]" à 90% (avec valeur haute "upper level" et valeur basse "lower level") pour le taux de défaillance  $\lambda$  :

$$\lambda_{lower} = \frac{\chi_{0,05}^2(2N)}{2 \cdot P \cdot T} \quad \lambda_{upper} = \frac{\chi_{0,95}^2(2N + 2)}{2 \cdot P \cdot T}$$

N : nombre de pannes ; P : Parc des onduleurs ; T temps d'observation

Sur la figure 29 ci-dessous à droite on a tracé les valeurs de taux de pannes des onduleurs spécifié, au milieu le taux de pannes observés sur des onduleurs en France.

Le tracé de la barre à gauche correspond aux fréquences des alarmes des onduleurs dans une des fermes PV observée aux US sur une année.

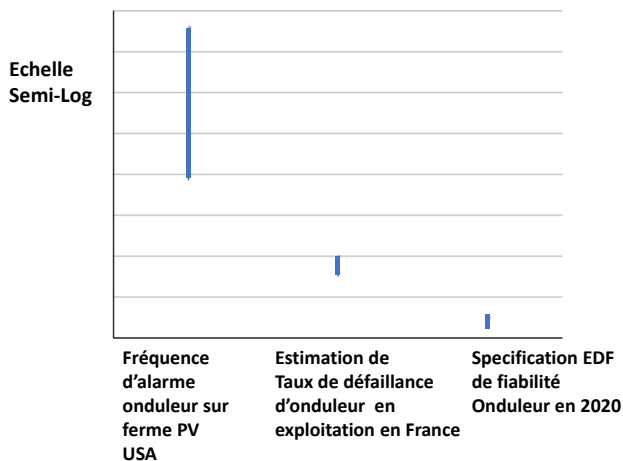


Figure 29 : Comparaison des taux d'alarmes dans les onduleurs de deux fermes photovoltaïques et les niveaux de fiabilité en exploitation ou spécifiés

Il apparaît donc un problème sur le taux d'occurrence des alarmes des onduleurs, sur la ferme PV aux USA, qui est trop important.

Suite à des échanges sur ce sujet avec EDF R aux USA, il est en effet apparu que les onduleurs installés dans les fermes photovoltaïques étudiées, avaient été mal paramétrés à l'installation. Le constructeur des onduleurs est donc intervenu au bout d'une année pour reparamétrer les onduleurs, et les alarmes ont disparu.

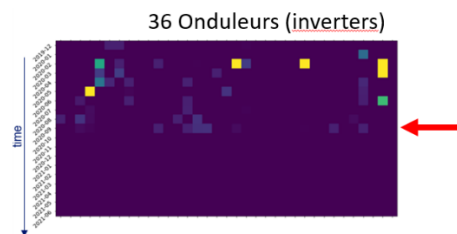


Fig 30 Disparition des alarmes sur les onduleurs après l'intervention du constructeur

#### XV. CONCLUSIONS

Cet article a permis de présenter la démarche mise en œuvre par EDF R et EDF Lab pour la spécification de la fiabilité des onduleurs DC/AC qui est à destination des constructeurs d'onduleurs. On présente également quelques difficultés concernant les calculs de fiabilité d'onduleurs avec des architectures redondantes. On peut effectuer ce type de calcul avec l'outil Pycatshoo [5]. On présente quelques éléments sur le retour d'expérience des onduleurs en exploitation. Certaines méthodes de « machine learning » pourrait être utiles pour détecter des fonctionnements aux limites des onduleurs.

#### REFERENCES

- [1] A. Alferidi, R. Karki « Development of probabilistic reliability models of photovoltaic systems topologies for system adequacy evaluation Applied Sciences 2017 7,176
- [2] S-H Chung et al. « Reliability of power electronic converter systems" IET Power and Energy series 80, 2006
- [3] B. Zhang, D.Qiu "Sneak circuits of power electronic converters" IEEE Press Wiley 2015
- [4] A. Sangwogwanish et al."Lifetime evaluation of grid-connected PV inverters considering panel degradation rates ans installation sites" IEEE Transactions on power electronics, Vol PP, NO 99, 2017
- [5] H. Chraïbi, J-C Houdebine « Utilisation du standard FMI (Functional Mock-up Interface) 23eme colloque de fiabilité Lambda Mu, EDF Lab Paris Saclay 2022
- [6] P. Carer et al. « Démarche de sûreté de fonctionnement appliquée au système de protection et de contrôle commande numérique HT/MT (ou HTB/HTA) à EDF » 10eme colloque de fiabilité (Lambda mu 10) Saint Malo 1996 tome 1 pp. 1-15
- [7] P. Carer et al. « Retour d'expérience méthodologique en sûreté de fonctionnement dans le projet de nouveau contrôle commande numérique des postes électriques HTB/HTA d'EDF » 14eme Colloque national de fiabilité et maintenabilité (Lambda Mu14) 2004 Bourges
- [8] P. Carer « Methods of exchange between network operator and manufacturers to control dependability indices of new electrical equipment" ELTEE 2018 Grenoble Octobre 2018
- [9] P. Lyonnet « Ingénierie de la fiabilité » Lavoisier Tech & Doc 2006
- [10] A. Villemeur "Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels" Collection EDF R&D n°67 Eyrolles 1988
- [11] G. Chenetier, H. Chraïbi, A. Dutfoy & J. Garnier, "Importance Sampling and Sensitivity Analysis for Reliability Assessment of Hybrid Dynamic Systems Represented by Piecewise Deterministic Markov Processes", 31st ESREL conference, 19-23 Sept. 2021, Angers, France
- [12] J-P. Tavella, M. Bouissou, P. Carer « Calcul de fiabilité dynamique par simulation Monte Carlo : gains apportés par la cosimulation » 23ème Congrès Lambda Mu, EDF Lab Paris Saclay, Palaiseau 2022
- [13] F. Richardeau, T.T.L. Pham « Reliability calculation of multilevel converters theory and applications" IEEE Transaction on Industrial electronics Vol 60,, NO.10 October 2013.
- [14] Philippe Carer, Xavier De Bossoreille, Martin Otter, « Modelica et simulation de Monte Carlo pour l'étude de fiabilité d'un Data Center », 20ème congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement - Saint-Malo, 11-13 octobre 2016