

Utilisation de l'intelligence artificielle pour la reconnaissance des décharges électriques en aéronautique

Raul CARREIRA RUFATO

JCGE

Juin 2024

**Collaborations : Thierry DITCHI, Yacine
OUSSAR, Thierry LEBEY, Cyril VAN DE
STEEN, Robin ACHEEN, Hatem HAJRI**



Plan

01

Introduction

02

Problématique

03

Les décharges partielles

04

Les arcs électriques

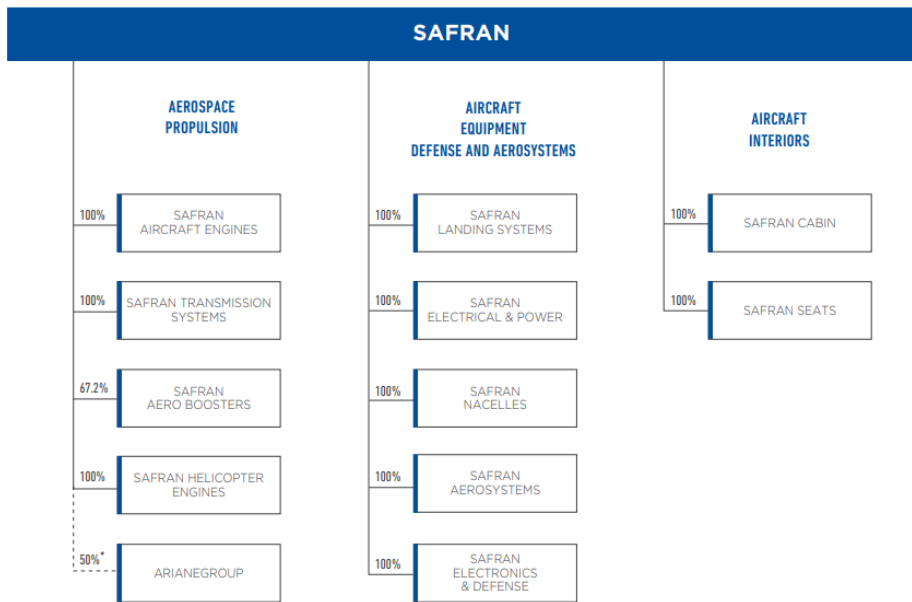
05

Certification de l'IA en aéronautique

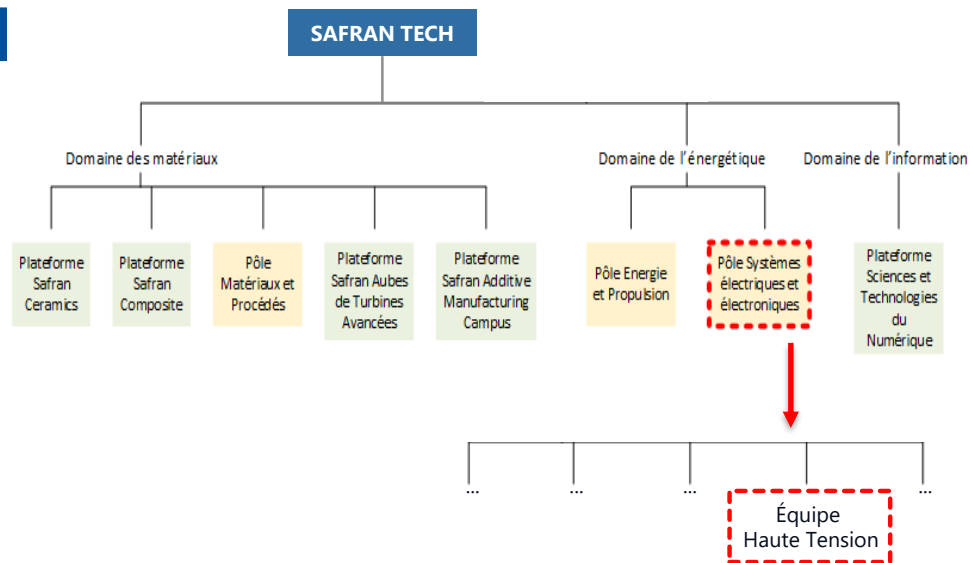
06

Conclusion et perspectives

Safran – Vue d'ensemble

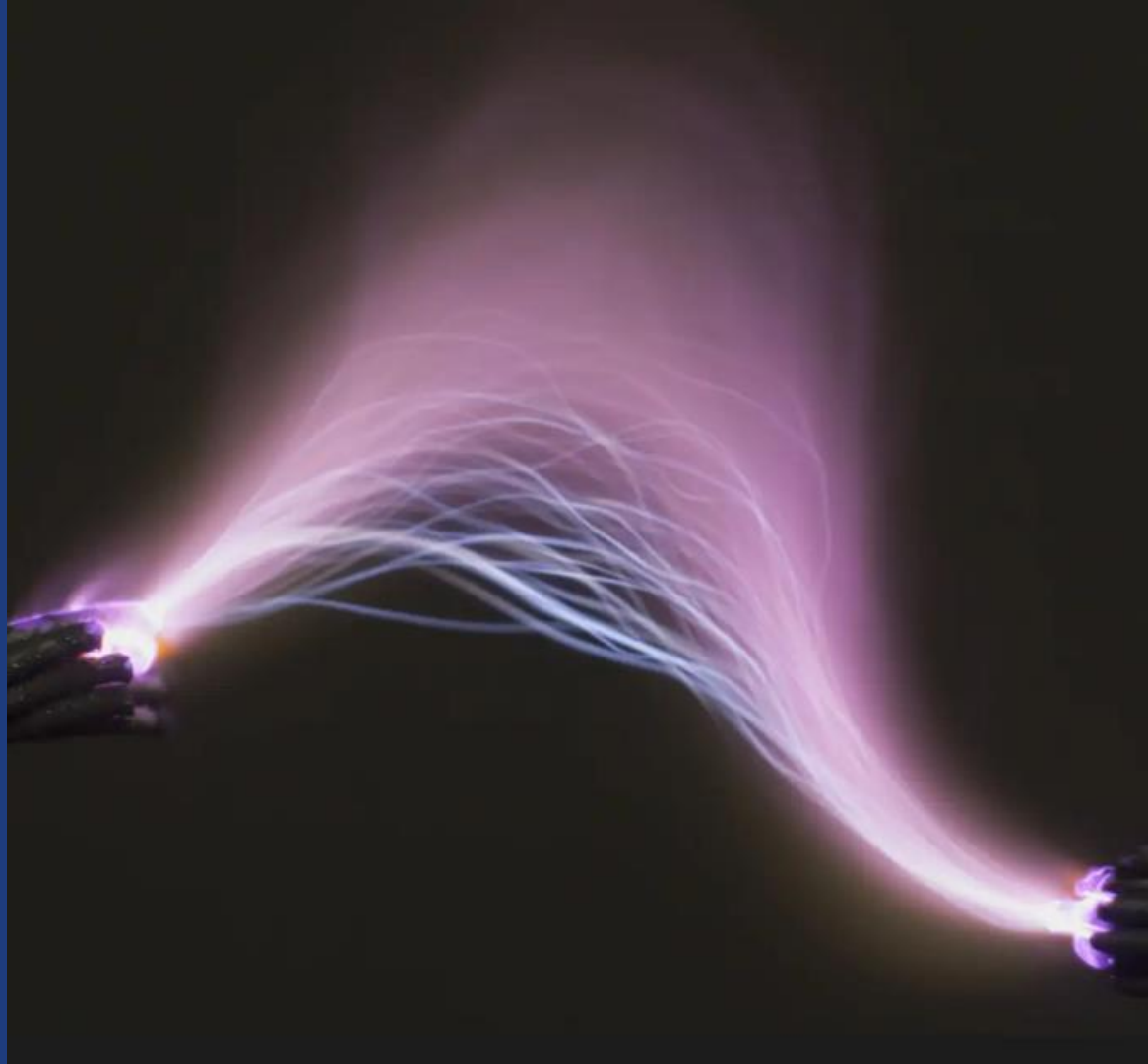


* 50-50 joint venture with Airbus.



Safran est un groupe international dans l'aviation, la défense et l'espace, visant un transport aérien plus vert et accessible. 101 000 employés, 23.2 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2023.

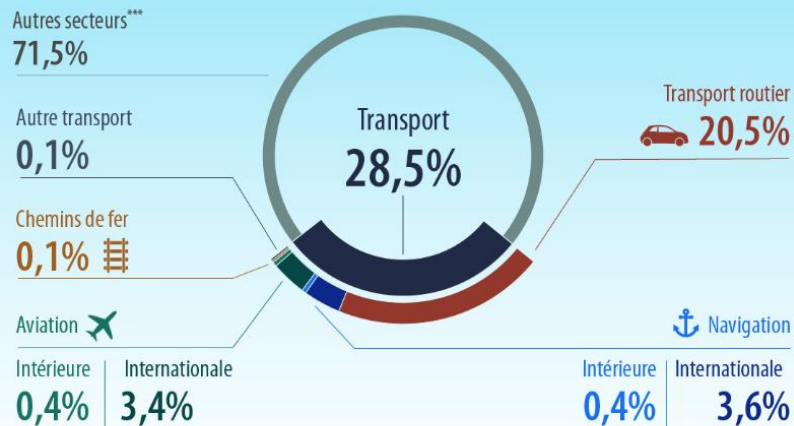
Problématique



Problématique

Émissions des transports

par rapport aux émissions totales de gaz à effet de serre de l'UE* (2019)**



*A l'exclusion du Royaume-Uni (UE-27)

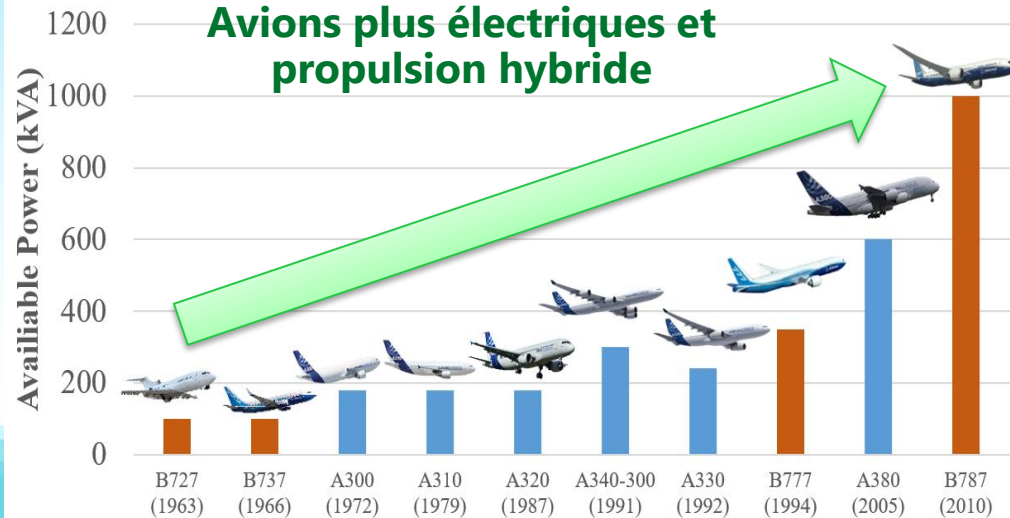
**A l'exclusion de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (LULUCF)

***Energie, industrie, résidentiel, commercial, institutionnel, agriculture, sylviculture, pêche et autres

Source : Agence européenne pour l'environnement (2022)

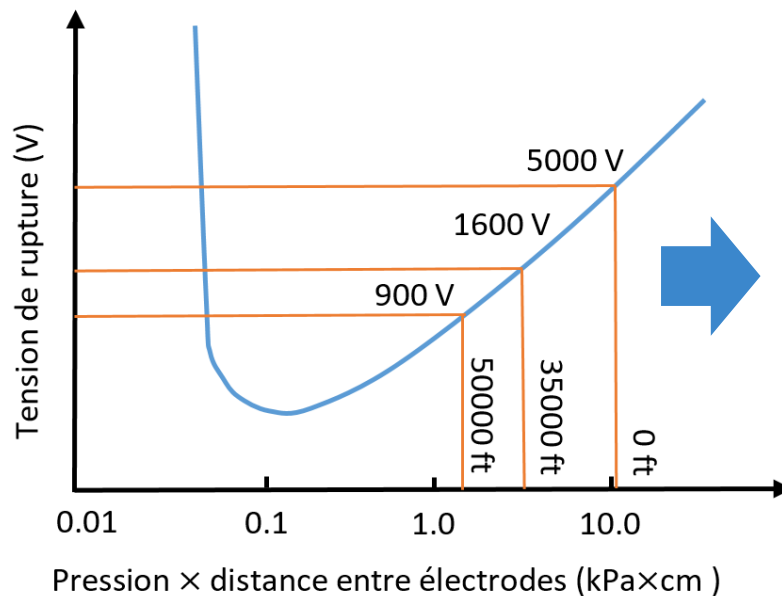
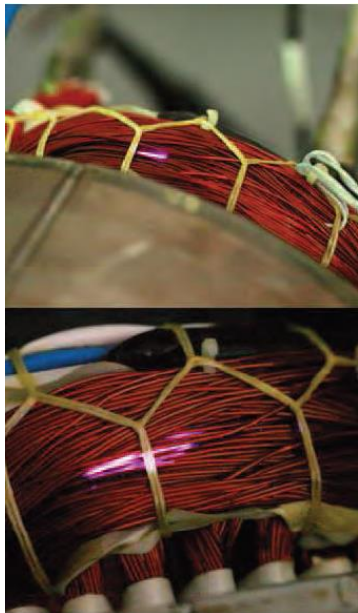


Avions plus électriques et propulsion hybride



Les décharges électriques

Décharges partielles



Arcs électriques

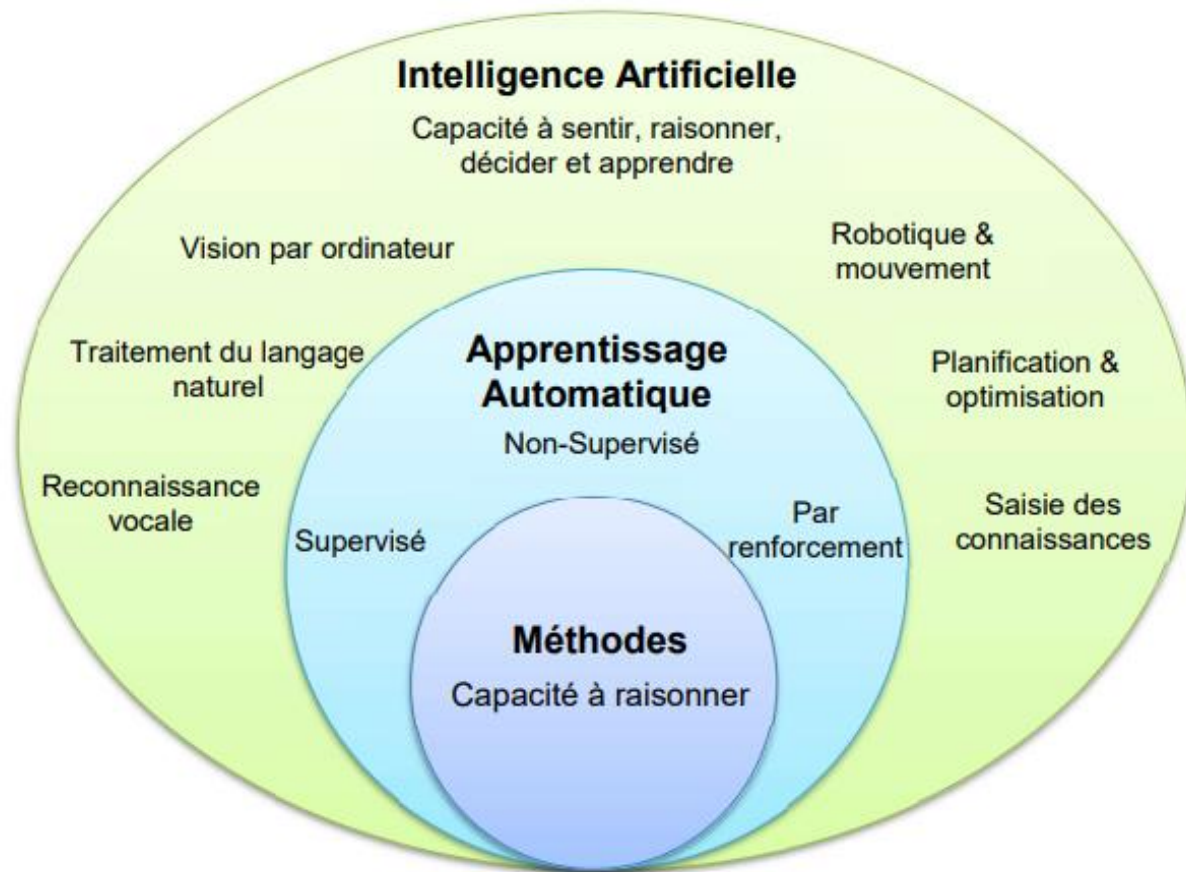


Courbe de Paschen pour l'air. Tension de rupture calculée pour une distance entre les électrodes de 0.1 cm

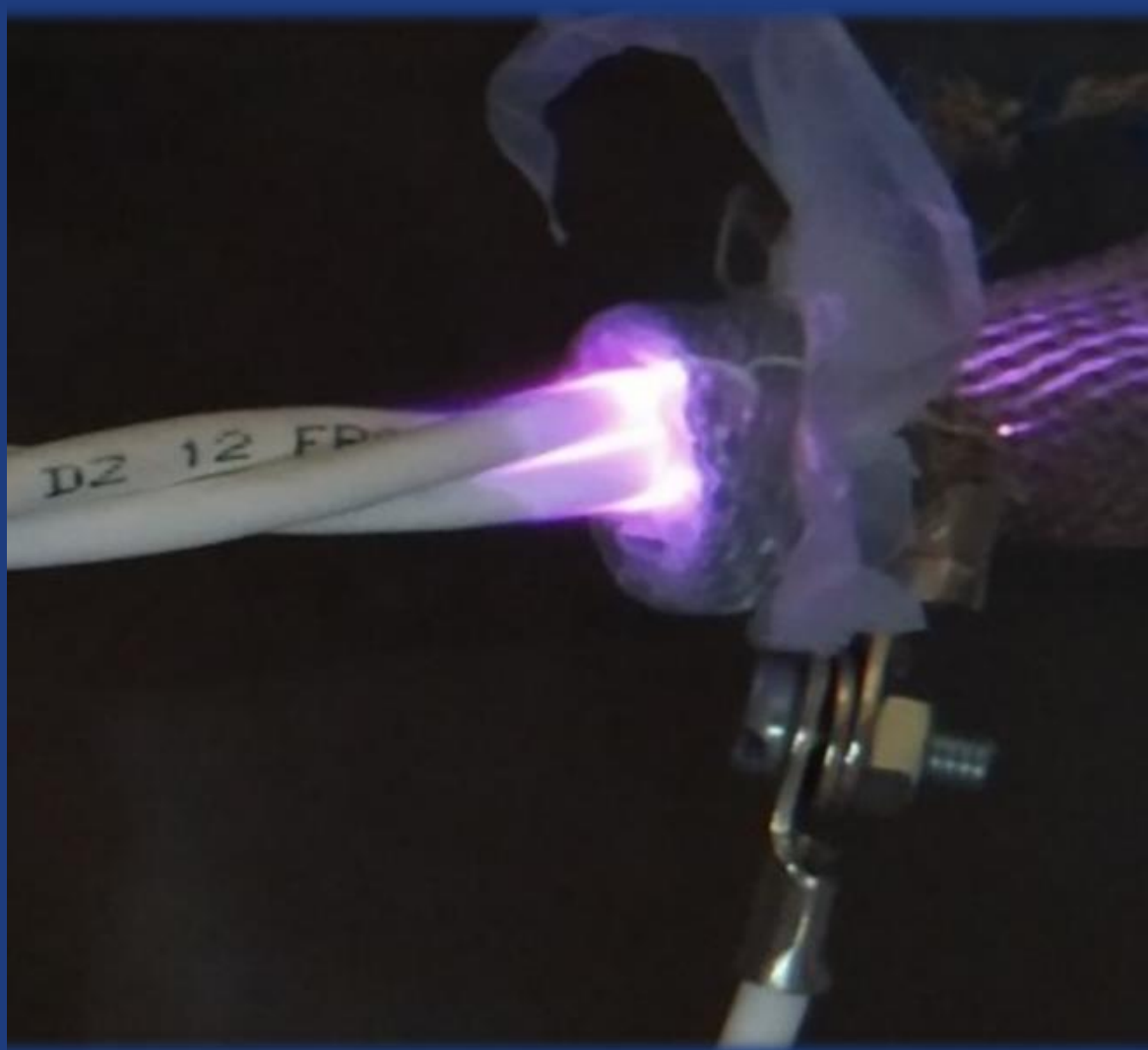
L'intelligence artificielle

◆ Pourquoi l'IA ? -> Attentes élevées en termes de performance

- > Fiabilité
- > Robustesse
- > Temps de reconnaissance

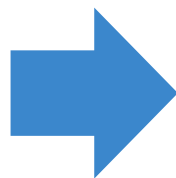


Les décharges partielles

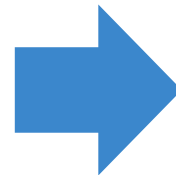


Les DP's en aéronautique

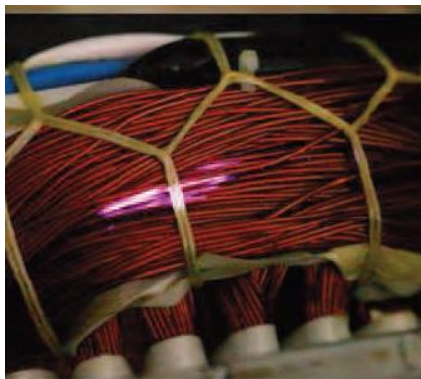
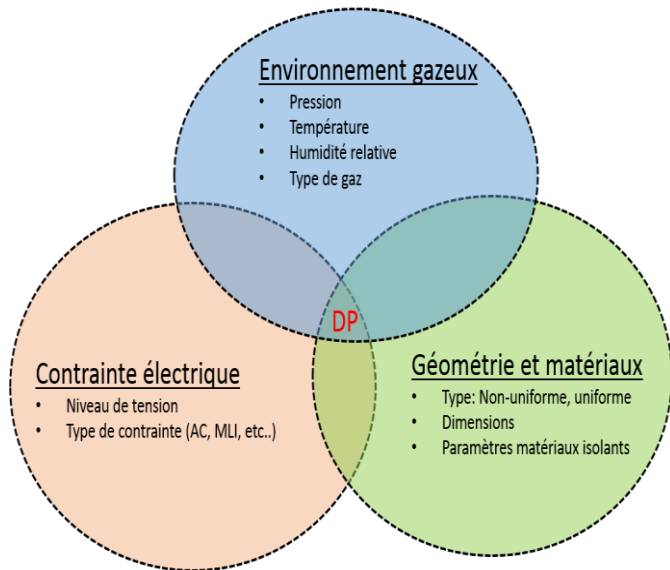
Les systèmes Safran sont conçus pour être exempts de DP's.



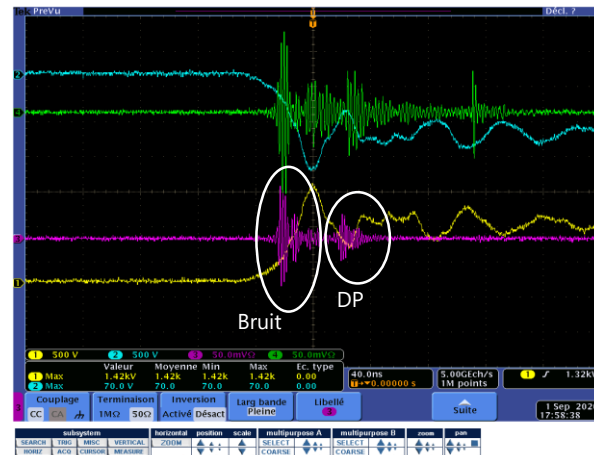
Difficile de garantir pendant toute l'opération



La reconnaissance des DP's devient nécessaire



Dégradation de l'isolation



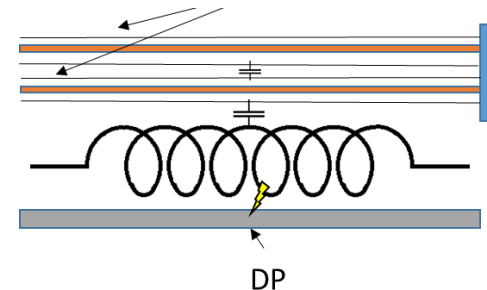
Superposition entre le signal de DP et le bruit de commutation induit par un convertisseur après filtrage.

La reconnaissance des DP

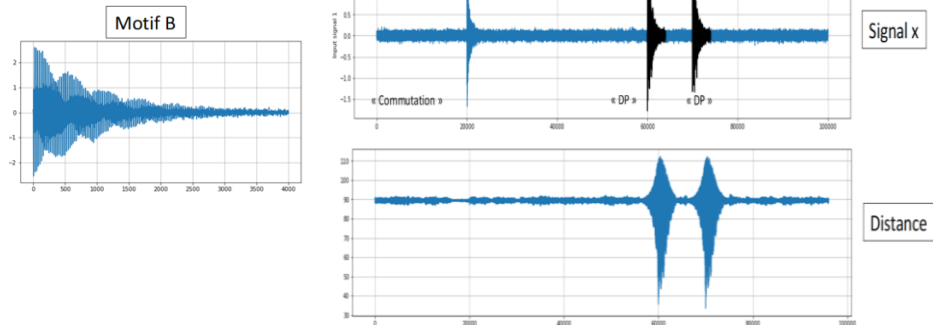
Détection vs reconnaissance des DP

Détection : Mesure de l'impulsion associée à la décharge partielle par le biais d'un capteur et la reconnaître à partir du signal mesuré

Reconnaissance : A partir du signal mesuré, reconnaissance des signatures de décharges partielles à l'aide de méthodes mathématiques

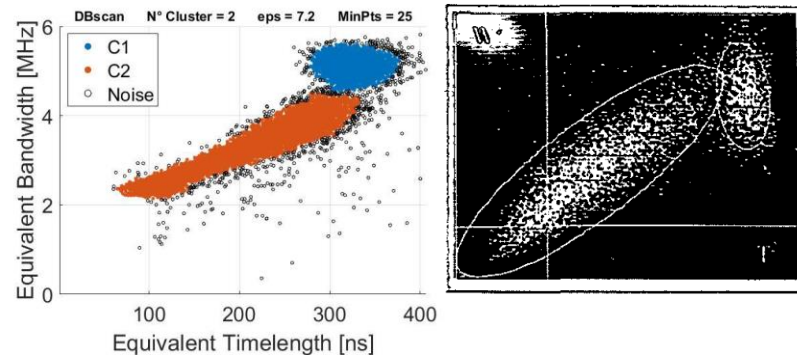


Reconnaissance des motifs



WO2024100363A1 Method for recognizing digitally a partial discharge in electrical equipment in a severe aeronautical environment and computer program product

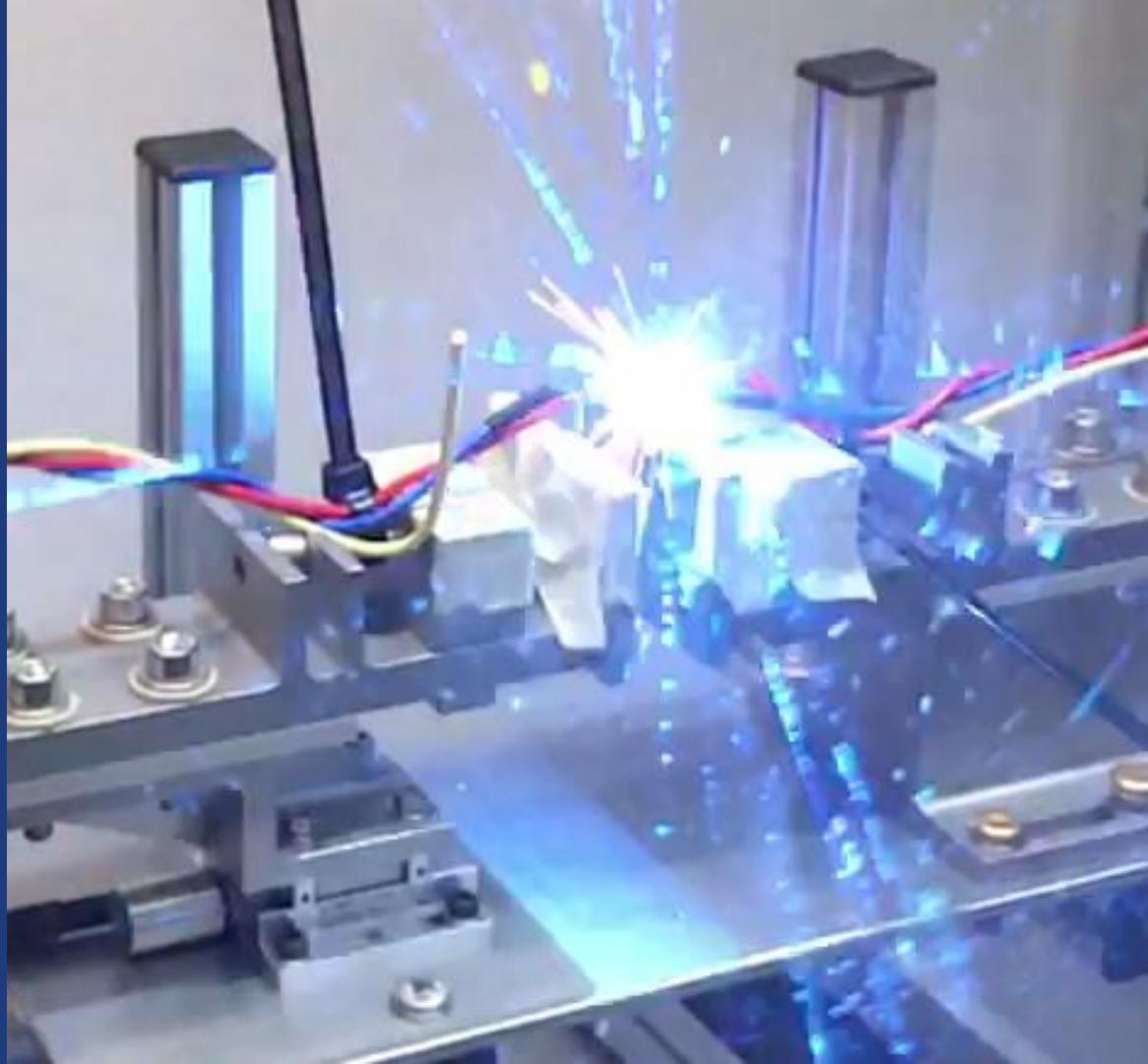
Clustering



A. D. Fatta et al., "Use of Time-Frequency map combined with DBSCAN algorithm for separation of partial discharge pulses under DC voltage," 2022 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Denver, CO, USA, 2022, pp. 427-430, doi: 10.1109/CEIDP55452.2022.9985393.

A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, G. Pasini and F. Puletti, "Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 9, no. 3, pp. 335-348, June 2002, doi: 10.1109/TDEI.2002.1007695.

Les arcs électriques

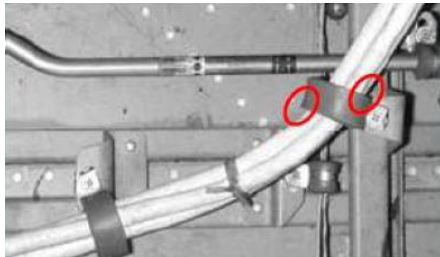


L'arc de défaut en aéronautique

Quelles sont les causes principales?



Défaut d'isolant 31%



Câbles coupés 11%

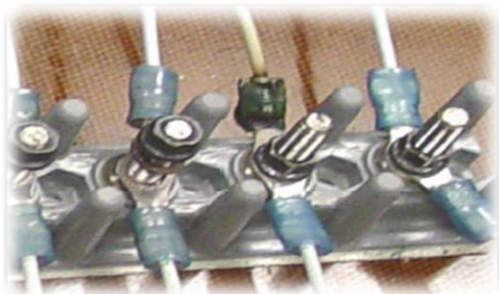
Quels sont les équipements impactés ?



Câbles



Connecteurs soudés



Connecteur défectueux 9%

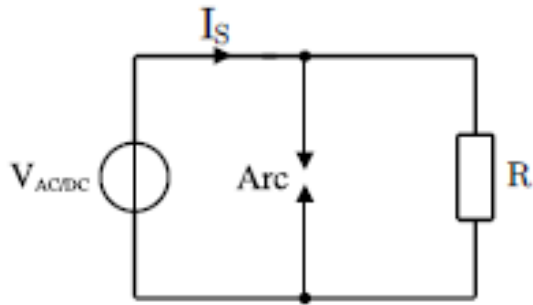


Délamination

État de l'art : L'arc parallèle dans un circuit

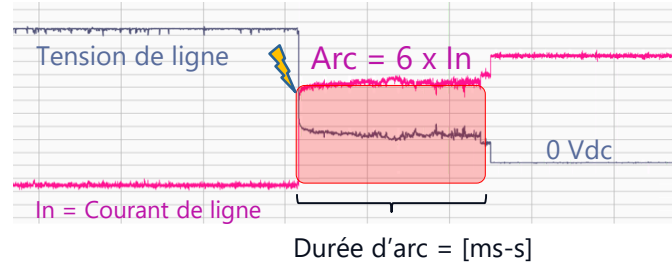
Deux types d'arcs :

1/ L'arc parallèle

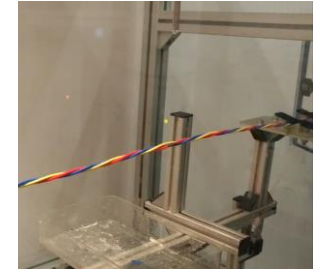
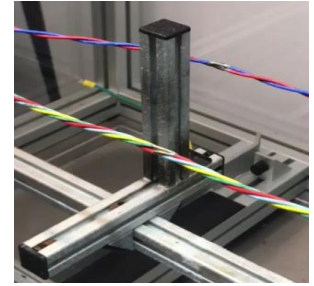


Arc = phénomène faible impédance

L'arc parallèle en tension continue:



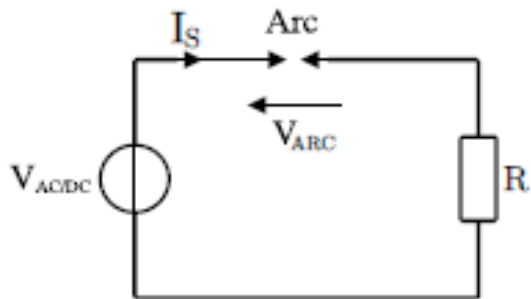
Arc parallèle → forte augmentation du courant de ligne!



État de l'art : L'arc série dans un circuit

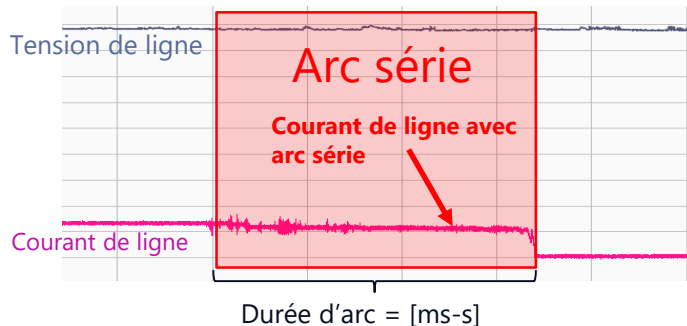
Deux types d'arcs :

2/ L'arc série



Arc = phénomène faible impédance

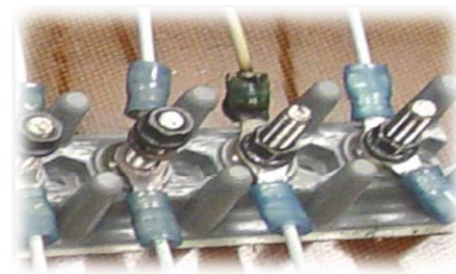
L'arc série en tension continue :



Chute de courant \sim
 $(15/V_{src}) * I_{nom}$



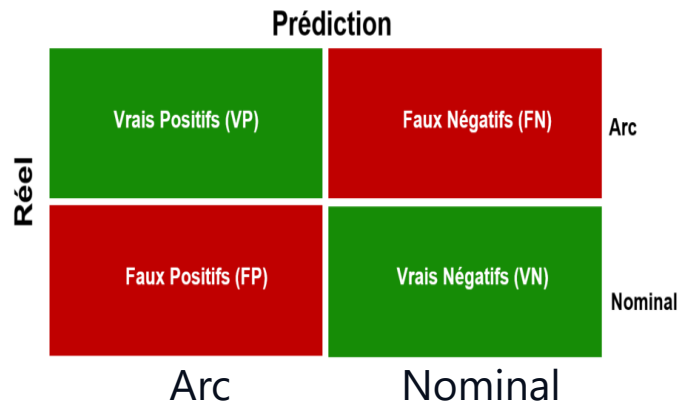
Arc série \rightarrow faible chute du courant de ligne!



Problématique

Attentes élevées en termes de performance

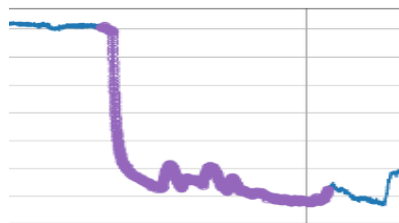
- **Fiabilité**
 - La reconnaissance des tous les arcs est nécessaire
- **Robustesse**
 - Les faux positifs doivent être évités
- **Temps de reconnaissance**
 - L'arc doit être reconnu le plus rapidement possible



Aujourd'hui, il n'existe aucun système satisfaisant pour détecter tous les types d'arcs électriques de défaut à bord des avions !

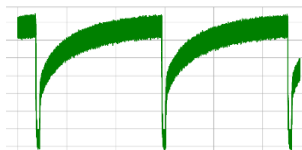
La difficulté à classer les arcs série

Courant d'arc série

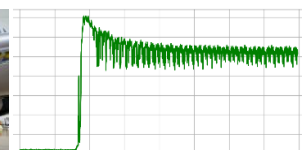


Exemples de courants transitoires de charges avion

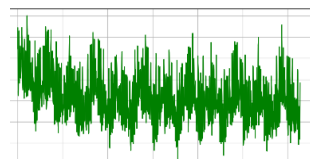
Lampe anti-collision



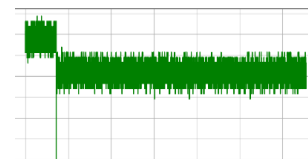
Système de conditionnement d'air



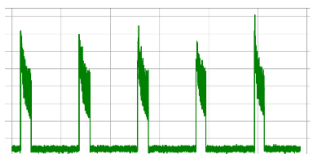
Pompe d'alimentation de l'APU



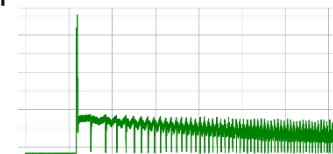
Appel du PNC en cabine



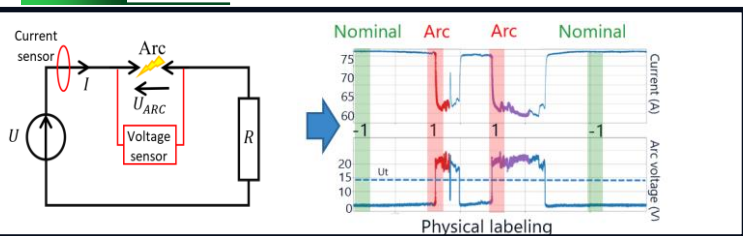
Contrôle de température



Ventilateur de processeur interne



Méthodologie



Acquisition et étiquetage

Extraction de descripteurs

Classement des descripteurs

Conception du classifieur

Cat 1 : Statistics

For instance:

- Autocorrelation
- M3 (Skewness)

Cat 2 : Entropy

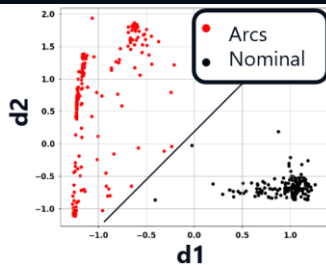
For instance:

- Estimated entropy
- Spectral entropy

Cat 3 : Frequency

For instance:

- Fourier transform
- Wavelet transform

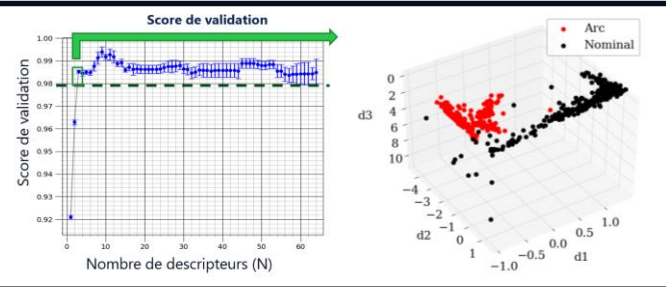


Objectifs:

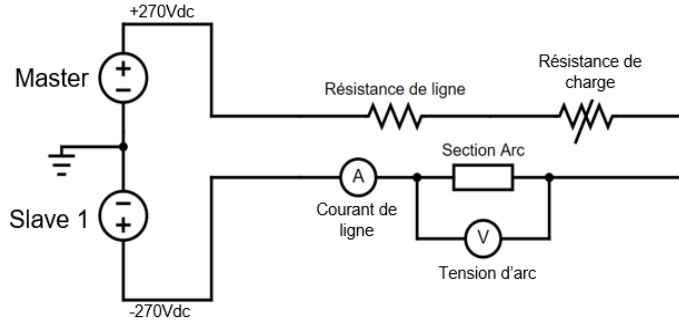
- Choisir les descripteurs les plus pertinents
- Eliminer les descripteurs redondants ou bruités

Méthodes:

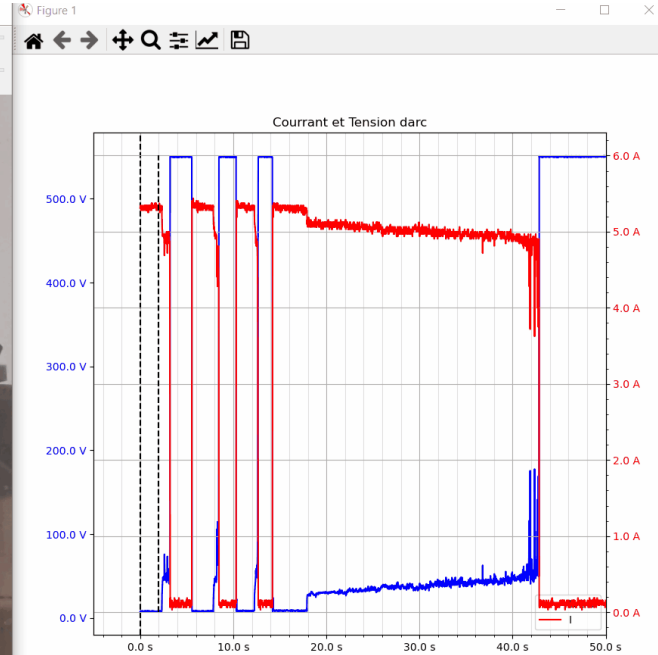
- Classement par orthogonalisation
- SVM RFE



Construction de la base de données - Arcs

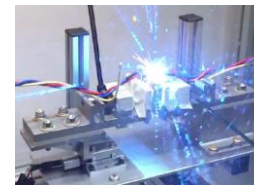


Tension d'arc augmente
Courant de ligne diminue



Construction de la base de données – Régimes nominaux

- Détection d'arcs de défaut en présence d'arcs de coupure :



Stratégie 1

Inhibition du système de détection pendant les ouvertures et fermetures de contacteurs

Possibilité d'avoir un arc de défaut durant d'inhibition du système de détection



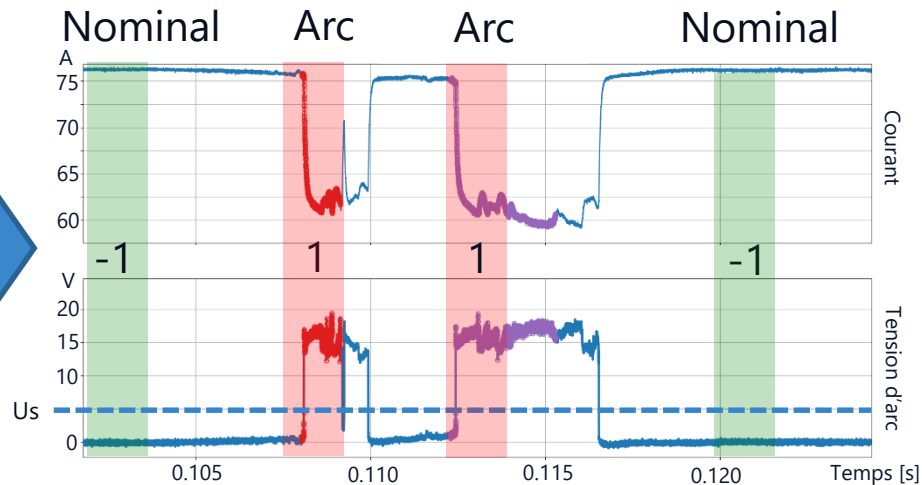
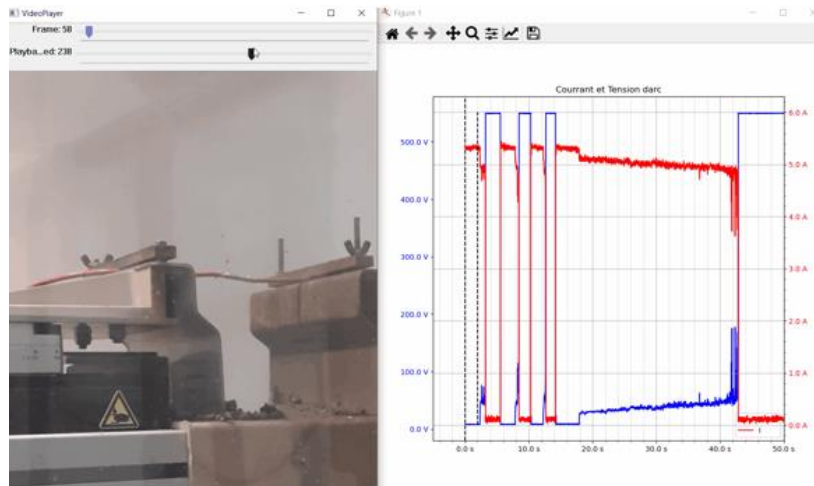
Stratégie 2

Inclure les signatures de courant des arcs de coupure dans la base de données de régime nominal

Possibilité d'avoir des faux positifs

Il a été nécessaire d'inclure les arcs de coupure dans la BDD afin de les considérer comme des régimes nominaux

Etiquetage – présentation du concept



Etiquetage des données expérimentales de courant.
Haut : Courant / Bas : Tension d'arc

La tension d'arc indique la présence d'une décharge
Cela facilite le processus d'étiquetage

Données équilibrées

Acquisition et
étiquetage

Extraction de
descripteurs

Classement de
descripteurs

Conception du
classifieur = fonction de
décision

Extraction de descripteurs

Descripteurs

- Variables pertinentes et informatives capables de séparer les deux classes : "Arc" vs "Nominal"

Cat 1 : Statistiques

Exemples :

- Autocorrélation
- M3 (Skewness)
- ...

Cat 2 : Entropie

Exemples :

- Entropie du signal
- Entropie spectrale
- ...

Cat 3 : Fréquence

Exemples :

- Transformée de Fourier
- Transformée en ondelettes
- ...

Acquisition et
étiquetage



Extraction de
descripteurs



Classement de
descripteurs



Conception du
classifieur = fonction de
décision

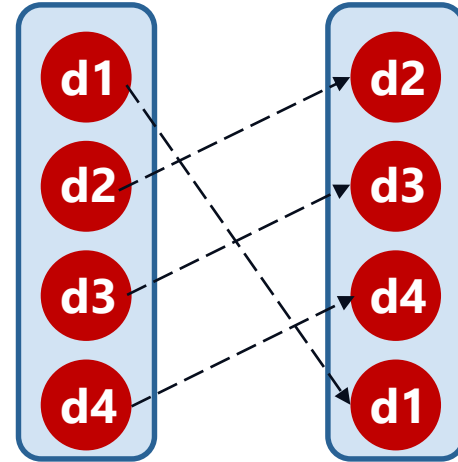
Classement de descripteurs

Objectifs:

- Choisir les descripteurs les plus pertinents
- Eliminer la redondance

Méthodes :

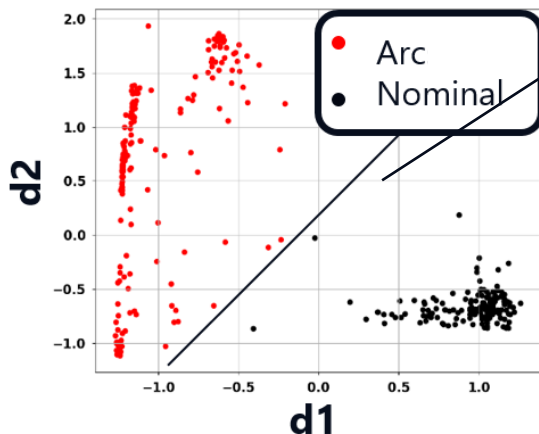
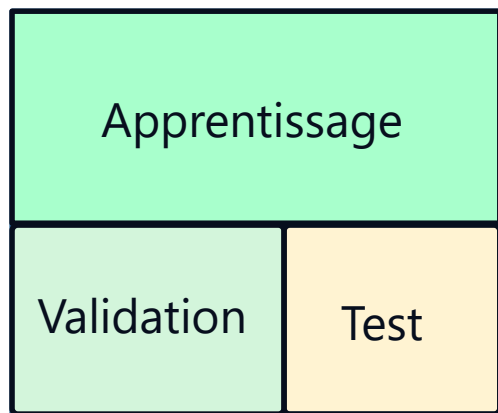
- Orthogonalization par Gram-Schmidt
 - Classement et sélection séparés
- SVM RFE
 - Classement et sélection ensemble



Conception du classifieur – Machines à vecteur support

Objectifs:

- Trouver la fonction permettant de séparer les deux classes



$$f(d1, d2) = w_1 * d1 + w_2 * d2$$



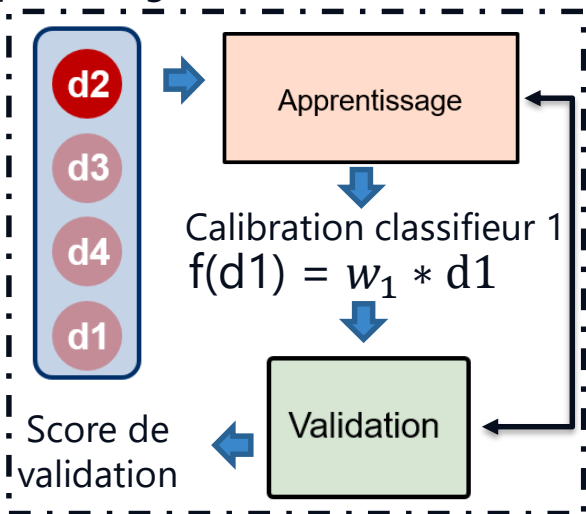
Calibration de w_1 et w_2 à partir des données d'apprentissage et vérification avec données de validation



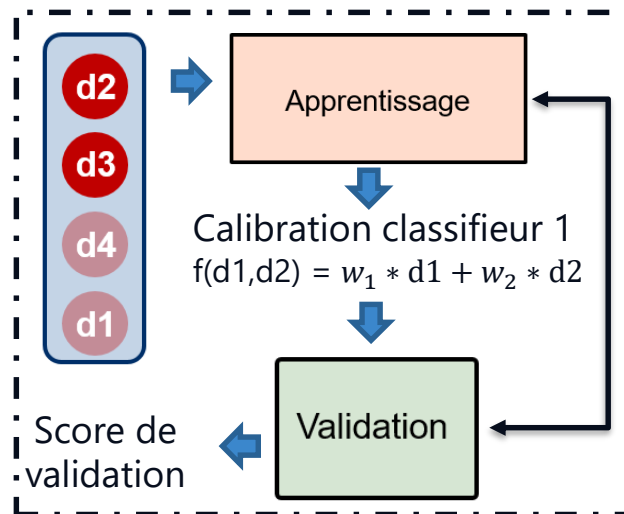
Conception du classifieur

Approche 1 : Classement + Méthode incrémentale de sélection

Apprentissage et validation du Classifieur 1



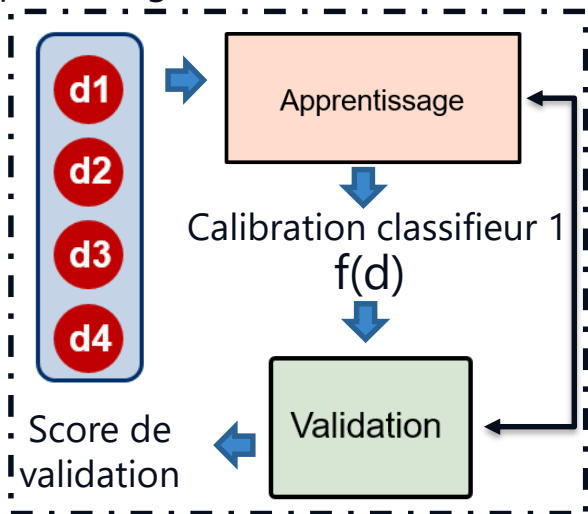
Apprentissage et validation du Classifieur 2



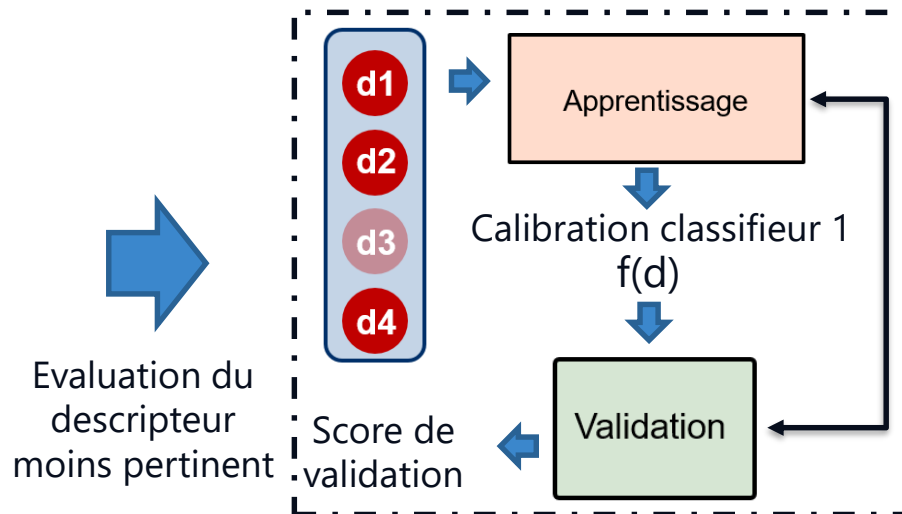
Conception du classifieur

Approche 2 : SVM – RFE (Recursive Feature Elimination)

Apprentissage et validation du Classifieur 1



Apprentissage et validation du Classifieur 2



Acquisition et étiquetage

Extraction de descripteurs

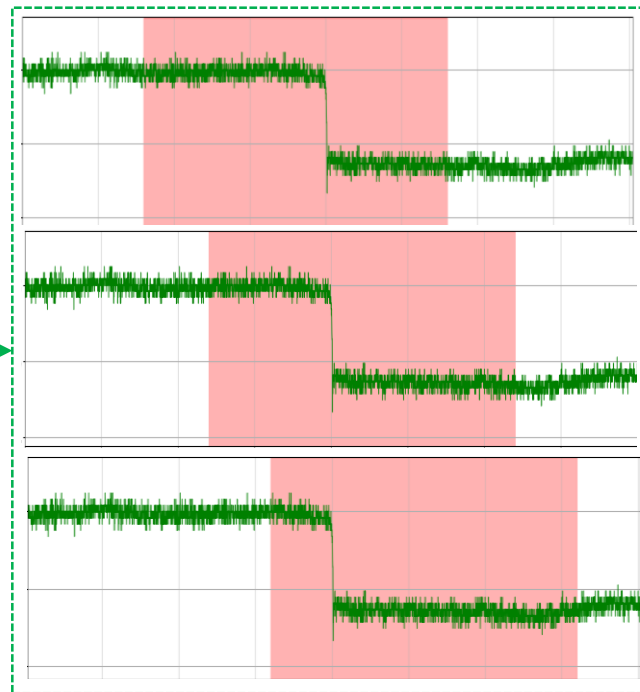
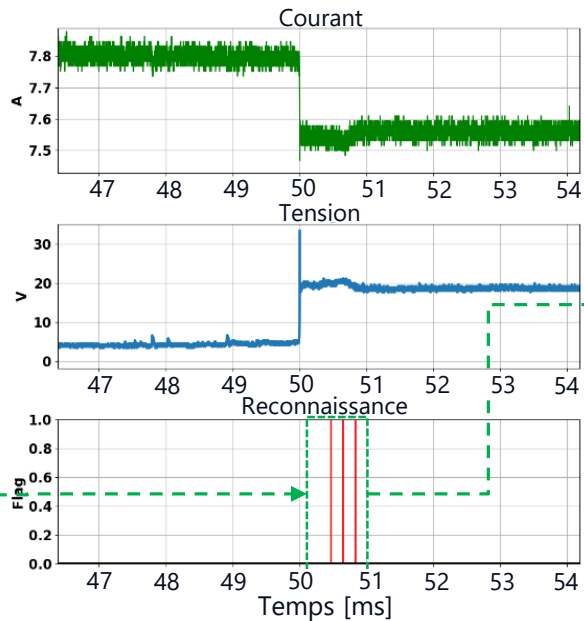
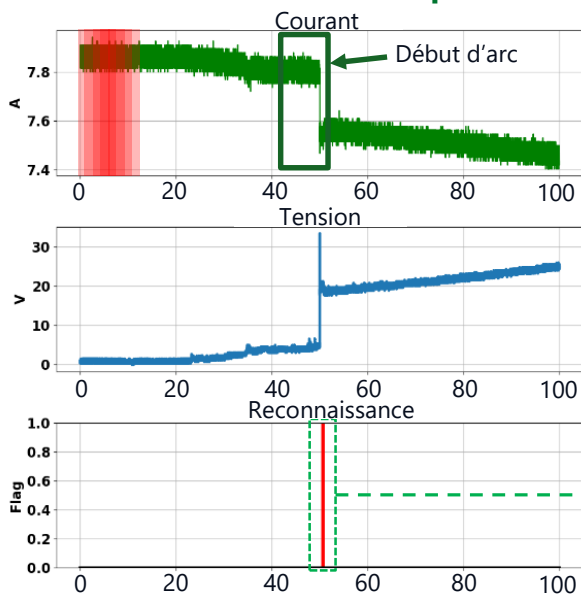
Classement de descripteurs

Conception du classifieur = fonction de décision

Simulation du temps réel



Reconnaissance en temps réel

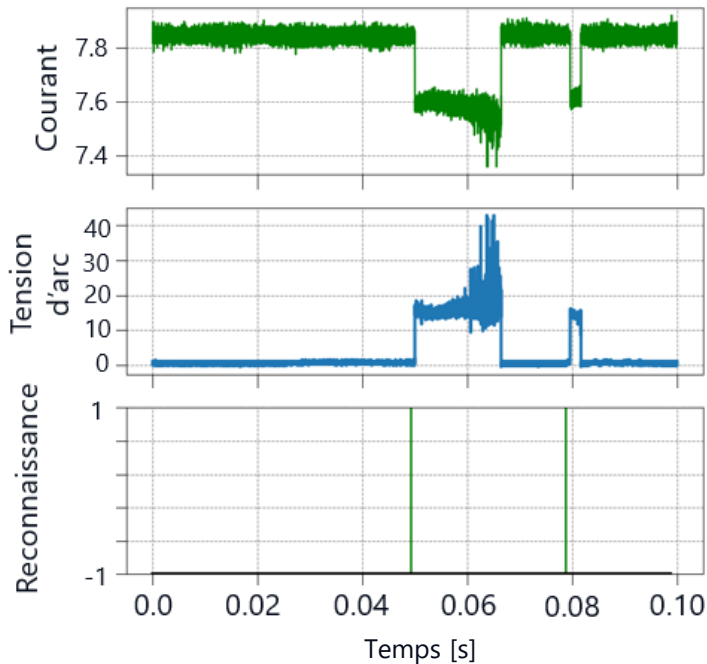


Fenêtre glissante:

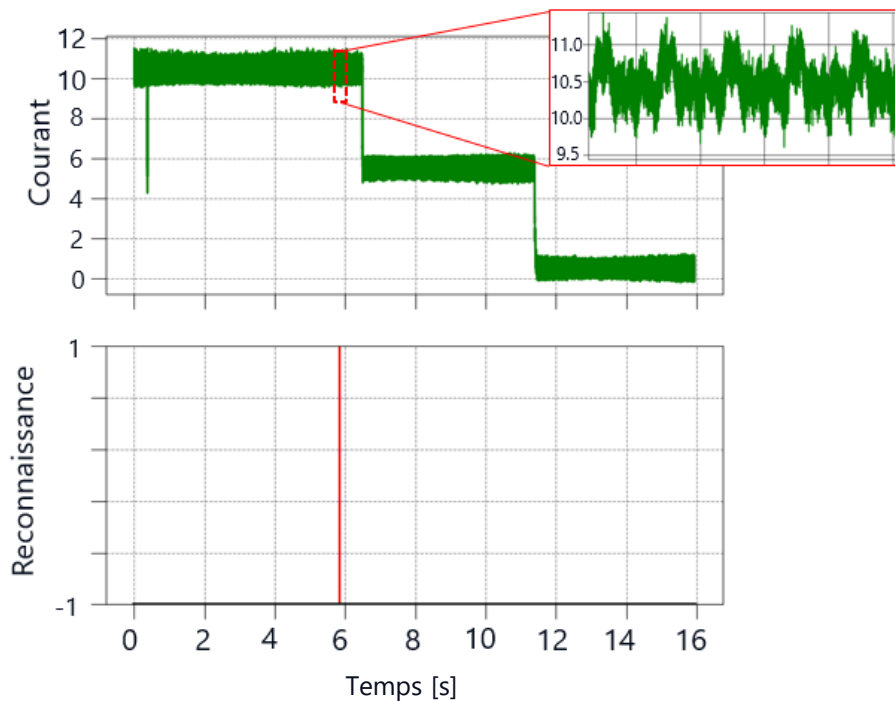
- **Durée : 1 ms**
- **Pas glissement: 0.2 ms**

Simulation du temps réel

Exemple reconnaissance d'arc



Exemple faux positif



Résultats marquants

Recherche de la fréquence d'échantillonnage optimale :

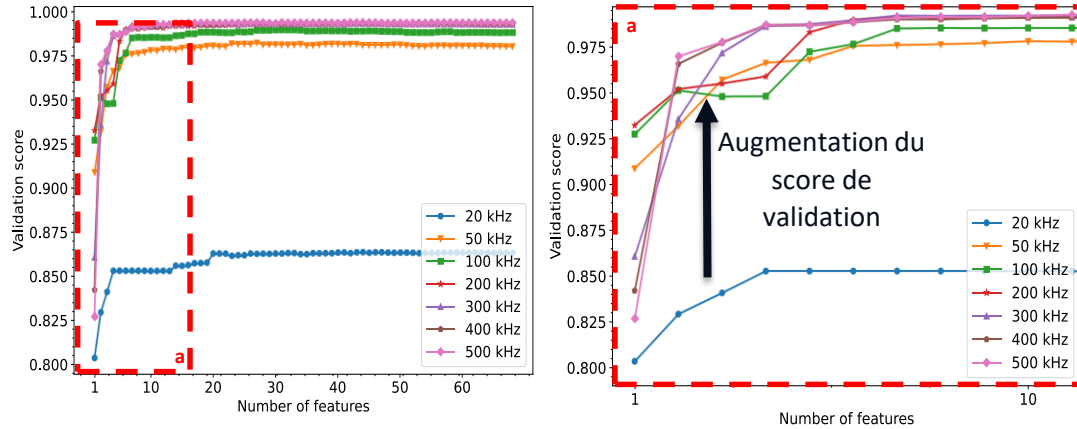
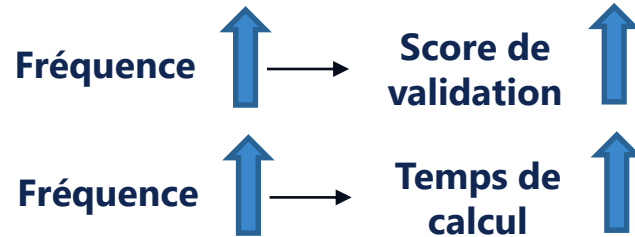


Figure 1. Score de validation obtenu pour les signaux avec les différentes fréquences d'échantillonnage.



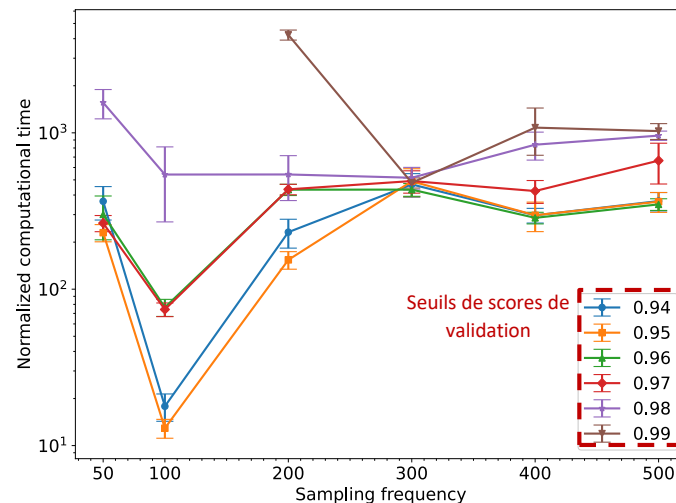
Résultats marquants

Recherche de la fréquence d'échantillonnage optimale afin de:

- Maximiser la robustesse et la fiabilité
- Minimiser le temps de reconnaissance

Seuil score de validation	Fréquence d'échantillonnage optimale
94%	100 kHz
95%	100 kHz
96%	100 kHz
97%	100 kHz
98%	300 kHz
99%	300 kHz

Fréquence d'échantillonnage optimale requise pour chaque score de validation.



Temps de calcul normalisé calculé pour chaque fréquence d'échantillonnage étant donné un score de validation.

Certification de l'IA en aéronautique



Que dit la FAA ?

- FAA -> approche incrémentale pour l'introduction de l'IA dans l'aviation.
- Commencer à certifier et gagner de l'expérience sur des applications à bas-risque.
- L'IA est une grande opportunité pour augmenter l'efficacité et la sûreté de certaines applications.
- Des méthodes déterministes et explicables sont plus envisageables

Learned AI x Learning AI

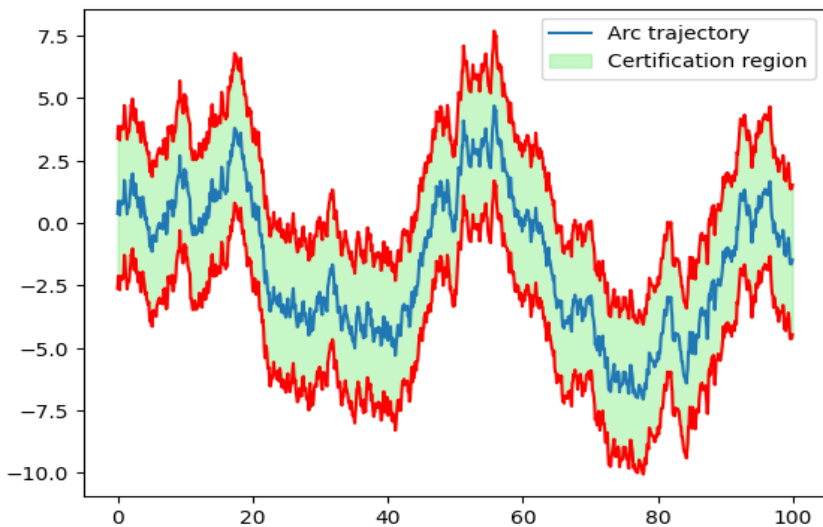
- Offline learning
- Online detection

- Online learning
- Online detection

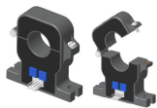
Fonction de décision figée

Comment savoir si l'IA est sûre ?

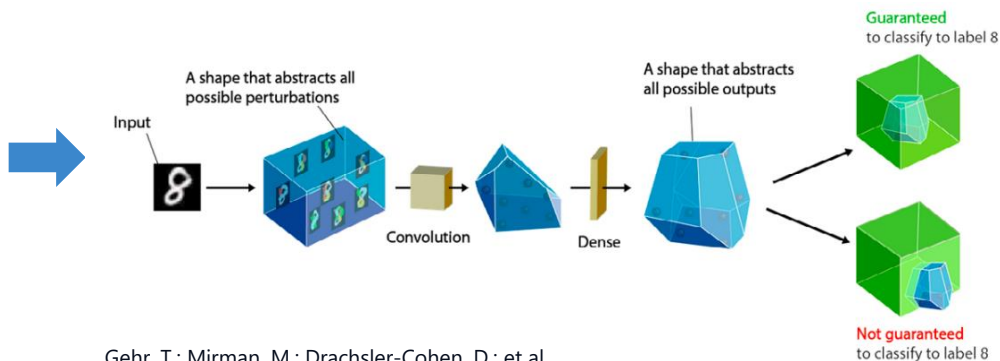
Imperfection des capteurs → Besoin d'algorithmes ϵ - stables



Erreur ϵ dans le signal



Méthode de vérification formelle



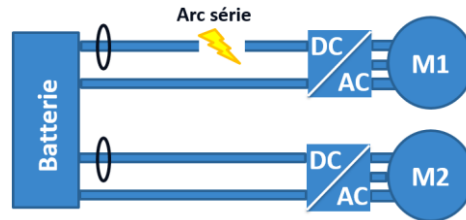
Gehr, T.; Mirman, M.; Drachler-Cohen, D.; et al.
AI2:Safety and robustness certification of neural networks with abstract interpretation. In Proceedings of 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy, San Francisco, CA, USA, 20–24 May 2018; IEEE: New York, 2018; pp. 3–18. doi:10.1109/SP.2018.00058

Conclusions et perspectives



Conclusions et perspectives

- L'IA apporte des solutions performantes pour la reconnaissance des décharges électriques
- Les solutions apportés jusqu'ici se montrent très prometteuses
- La certification de ces types de méthodes en aéronautique est un vrai verrou pour les agences de certification
- Regarder la gestion d'arcs de défaut dans une chaine complexe:
 - Comment détecter l'arc de défaut dans un système réel en présence de perturbations?



Merci pour votre attention !



**POWERED
BY TRUST**