

## 1 Introduction

Dans un contexte industriel, la gestion efficace de la maintenance des équipements est un enjeu majeur. Les maintenances préventives, c'est-à-dire des interventions planifiées à intervalles réguliers peuvent s'avérer coûteuses et parfois inutiles, tandis que les pannes imprévues peuvent entraîner des arrêts de production, des coûts élevés et des risques pour la sécurité.

À l'ère de la digitalisation, la maintenance prédictive est une stratégie essentielle pour optimiser la durée de vie des équipements et minimiser les temps d'arrêt. Son principal objectif est d'anticiper les défaillances en analysant l'état des équipements à l'aide de capteurs intelligents. Cela permet d'optimiser la durée de vie des dispositifs, de réduire les maintenances préventives excessives, tout en évitant les pannes critiques. C'est dans cette logique que Schneider Electric cherche à développer des solutions numériques permettant à ses clients de surveiller leurs installations électriques de manière plus fiable et proactive.

Dans ce cadre, le projet s'appuie sur l'analyse de données vibratoires pour évaluer l'état de disjoncteurs et anticiper leur usure. L'objectif est de développer des modèles de machine learning capables d'identifier des signes précoces de défaillance, ainsi que de détecter et classifier différents défauts.

Ce rapport propose une vue d'ensemble claire et détaillée du projet, en mettant en lumière les principales étapes et les différents aspects du projet. Il commencera par une présentation générale du contexte, permettant de situer mon environnement et celui du projet, en décrivant l'origine du projet, ainsi que les différents produits et acteurs concernés. Ensuite, la problématique du projet sera exposée afin de bien comprendre les attendus, les enjeux et défis techniques à relever.

## 2 Contexte

L'objectif de ce chapitre est d'introduire des éléments de contexte, afin de mieux situer la mission dans son environnement et d'avoir les informations nécessaires pour comprendre la problématique du projet. En premier lieu la présentation du service dans lequel j'évolue, puis l'explication de l'origine du projet, qui est bien antérieure à mon arrivée chez Schneider Electric.

### 2.1 Présentation de l'entreprise d'accueil

#### 2.1.1 Schneider Electric

Présentation (très rapide) de Schneider Electric de manière générale, et particulièrement de la BU Energy Management et de leur volonté de s'appuyer plus sur le software pour rester à la pointe et notamment l'IA.

#### 2.1.2 Présentation de l'équipe

Dans le cadre de mon alternance, j'ai évolué dans l'équipe Digital Cluster de Schneider Electric. Notre équipe a pour mission de digitaliser les laboratoires d'essais de l'entreprise, en développant des

solutions autour de la collecte, la gestion, l'exploitation et la valorisation des données issues des tests produits.

Le Digital Cluster est structuré en trois équipes principales, qui travaillent en étroite collaboration :

- ATOL : qui conçoit et déploie des logiciels pour des bancs de test automatisés
- RDITS : qui est responsable de l'infrastructure informatique des laboratoires. Cela comprend la gestion des data centers, la sécurité réseau, la cybersécurité des données, mais aussi le développement d'outils web pour la visualisation, le suivi et l'organisation des données de test.
- L'équipe Data : qui veille à la qualité, la traçabilité et l'accessibilité des données. Elle intervient notamment dans la création de métadonnées, la connexion des nouveaux bancs de test à l'infrastructure de données par exemple.

Historiquement, les essais en laboratoire étaient réalisés pour des besoins ponctuels et concrets comme dans le cadre des plans de surveillance et de qualité pour des usines, des essais pour des clients externes, etc. Mais récemment, une nouvelle démarche a émergé : tirer parti de l'énorme volume de données générées par les tests pour aller plus loin que la simple validation.

L'idée est donc de valoriser ces données de test en menant des projets d'analyse et de data science. C'est exactement dans cette dynamique que mon projet s'inscrit.

## 2.2 Origine du projet (2020)

Au départ, l'idée d'un projet de maintenance prédictive est née d'un constat sur le terrain. Sur une certaine gamme de disjoncteurs de haute puissance, les MasterPacT MTZ, les documentations techniques du constructeur spécifient une durée de vie exprimée en nombre de cycles, généralement comprise entre 2000 et 10 000 cycles selon le modèle et les conditions d'utilisation (charge, environnement, fréquence de manœuvre...). Ces valeurs servent de référentiel pour planifier les maintenances ou le remplacement des disjoncteurs ou de certains composants critiques.

Mais sur le terrain, les constats sont souvent plus nuancés. Certains disjoncteurs dépassent largement ces recommandations sans dégradation apparente, tandis que d'autres montrent des signes de faiblesse avant. Cette variabilité inter-produit et inter-usage pose une question : comment affiner les recommandations de maintenance pour éviter à la fois les remplacements prématurés et les défaillances imprévues ? Il devenait alors pertinent d'envisager un moyen de mieux suivre l'évolution de l'état de santé réel des produits, afin d'espacer les maintenances inutiles et allonger la durée de vie effective des équipements en exploitant pleinement son potentiel.

C'est dans ce contexte que le projet de diagnostic vibratoire pour la maintenance prédictive des disjoncteurs a vu le jour en 2020, à l'initiative de Matthieu Favre, expert technique en vibration chez Schneider Electric. Il a été proposé d'explorer une nouvelle voie sur cette gamme de disjoncteurs, via l'analyse des vibrations générées par le mécanisme interne des disjoncteurs lors de leurs manœuvres.

Plus précisément, l'objectif initial était de déterminer si des signaux vibratoires, captés au moment de l'ouverture ou de la fermeture du disjoncteur, pouvaient permettre de détecter ou

anticiper une dégradation mécanique progressive, et donc de mieux prévoir les maintenances ou éviter les casses.

Pour bien cerner les enjeux de ce projet et en comprendre la démarche, une première partie sera consacrée au fonctionnement des produits concernés, ainsi qu'à leurs mécanismes internes. Puis, nous reviendrons sur l'historique des travaux effectués dans le cadre de cette étude.

### 2.2.1 Présentation des disjoncteurs et de leur fonctionnement

Les produits au cœur de cette étude sont les MasterPacT MTZ, une gamme de disjoncteurs de très haute intensité. Afin de mieux comprendre les enjeux techniques du projet, cette section présente d'abord le fonctionnement des disjoncteurs de manière générale, avant de se concentrer plus spécifiquement sur les particularités de la gamme MasterPacT MTZ.

#### 2.2.1.1 Définition et mode de fonctionnement des disjoncteurs

Les disjoncteurs ont pour rôle principal d'assurer la protection des circuits électriques contre différents types de défauts susceptibles de causer des dommages matériels ou humains. Lorsqu'un défaut est détecté, le disjoncteur interrompt automatiquement le courant pour sécuriser l'installation. On distingue principalement trois types de défauts :

Les courts circuits : qui sont des défauts électriques majeurs, correspondant à une mise en contact directe entre deux points de potentiel différent (ex. phase et neutre). Ce phénomène génère un courant très élevé, quasi instantané, qui peut provoquer des dégâts considérables si non interrompu immédiatement. Pour ce type de défaut, les disjoncteurs sont équipés d'un déclencheur magnétique, basé sur une bobine. Lorsque le courant dépasse un certain seuil, le champ magnétique généré active mécaniquement le mécanisme d'ouverture du disjoncteur.

Les surcharges : qui se produisent lorsque le courant dépasse de manière prolongée la capacité nominale du circuit, sans atteindre les niveaux extrêmes d'un court-circuit. Ce phénomène provoque une élévation de température dans les câbles et équipements, risquant de les endommager à terme. Pour ce type de défaut, les disjoncteurs utilisent un déclencheur thermique, souvent un bilame bimétallique. La chaleur dilate ce bilame, qui se déforme progressivement et déclenche l'ouverture du circuit lorsque la surcharge devient critique.

Les défauts d'isolement et les défauts à la terre : un défaut à la terre survient lorsqu'un conducteur sous tension entre en contact avec une masse métallique reliée à la terre, ce qui peut provoquer des fuites de courant dangereuses. Ces défauts sont particulièrement sensibles dans les environnements humides ou industriels. Pour les détecter, la plupart des disjoncteurs sont capables de comparer en temps réel le courant entrant et le courant sortant d'un circuit : en cas de déséquilibre (courant de fuite vers la terre), l'appareil déclenche immédiatement. Ce mécanisme protège notamment les personnes contre les risques d'électrocution.

Dans les disjoncteurs les plus sophistiqués, comme la gamme MasterPacT MTZ, les protections sont gérées par une unité de contrôle électronique embarquée. Cette unité utilise des capteurs intégrés (courant, tension, fréquence, température, etc.) pour mesurer en continu les paramètres électriques et détecter une plus grande variété de défauts avec une précision accrue. Elle permet aussi une configuration personnalisée des seuils de déclenchement et une analyse en temps réel de la qualité de l'alimentation ainsi qu'une surveillance intelligente de l'état du disjoncteur.

### 2.2.1.2 Focus sur la gamme MasterPacT MTZ

Comme indiqué précédemment, le projet porte sur l'étude de disjoncteurs MasterPacT MTZ. Ce type de disjoncteur, dit « de tête », constitue le point d'entrée principal pour un tableau général basse tension, et se situe en amont de toute l'installation électrique d'un bâtiment. Son bon fonctionnement est donc essentiel.

Comme la plupart des disjoncteurs, le MasterPacT MTZ est composé d'un contact fixe et d'un contact mobile, ce dernier se déplaçant pour établir (fermer) ou interrompre (ouvrir) le circuit électrique. Étant donné qu'il s'agit d'un disjoncteur à très haute puissance, il ne peut pas être actionné manuellement par un simple levier, comme un disjoncteur classique. Il existe deux méthodes pour le manipuler : manuellement, à l'aide de deux boutons "ON" et "OFF", ou automatiquement, via un signal électronique qui commande l'ouverture et la fermeture à distance.



Figure 1 : Disjoncteur MasterPacT MTZ

Comme expliqué auparavant, la gestion des défauts est gérée uniquement de manière électronique, par une unité de contrôle appelée MicroLogic. En plus de gérer les déclenchements, elle permet de surveiller en continu la performance électrique et l'état du disjoncteur.



Figure 2 : Unité de contrôle MicroLogic X

Pour bien saisir l'intérêt du projet, comprendre les mécanismes de défaillance et interpréter les signaux vibratoires, il est indispensable de connaître en détail le fonctionnement mécanique

interne du disjoncteur MasterPacT MTZ. C'est pourquoi il est vivement conseillé de consulter les annexes 1 à 5, qui présentent de manière détaillée l'ensemble du mécanisme interne, illustrent les signatures vibratoires associées aux opérations d'ouverture et de fermeture, et définissent les différentes notions abordées tout au long du rapport.

## 2.2.2 Première étude exploratoire sur le diagnostic vibratoire (2020)

Une première étude avait été menée en 2020 dans le cadre d'un projet de fin d'études sur le traitement de signal. L'objectif principal était de détecter et d'évaluer des indicateurs de la perte d'énergie excédentaire dans le mécanisme de fermeture des MasterPacT MTZ, en analysant les signaux vibratoires produits par le mécanisme.

Les travaux menés ont démontré qu'il est effectivement possible de détecter une fermeture incomplète d'un disjoncteur en analysant ses vibrations. Cependant, les enregistrements obtenus ont révélé que la perte d'énergie excédentaire n'est pas linéaire au fil du temps, et qu'il pouvait être très complexe d'établir un indicateur fiable avec les données actuelles.

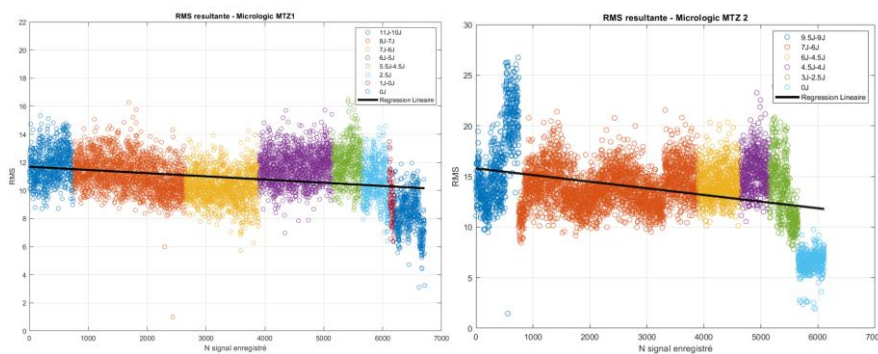


Figure 3 : Indicateur de la dégradation des deux produit testés – PFE de Cheikh (2020)

Ces deux graphiques sont extraits du rapport de PFE de Cheikh, l'étudiant qui a réalisé cette première étude, en 2020. Ici, il y utilise comme indicateur la RMS (pour Root Mean Square, ou « valeur quadratique moyenne » en français), une mesure couramment utilisée en traitement du signal.

Concrètement, on peut dire que la RMS représente l'amplitude d'un signal, elle donne une estimation de l'énergie contenue dans le signal vibratoire : plus la RMS est élevée, plus la vibration mesurée est intense. Dans notre cas, elle permet donc de mesurer indirectement l'énergie des vibrations émises par le mécanisme lors de la fermeture du disjoncteur.

Les résultats montrent que lorsque l'énergie excédentaire du produit chute à 0J, ce qui correspond à une fermeture incomplète, la RMS du signal chute également de façon significative. Cela prouve que cet indicateur permet bien de détecter un défaut critique.

En revanche, la tâche se complique lorsqu'on cherche à suivre l'évolution de la RMS au fil du temps pour anticiper la défaillance. Le comportement observé est irrégulier : les valeurs de la RMS ne décroissent pas de façon stable ou prévisible.

De plus, les deux disjoncteurs testés dans l'étude montrent des profils de dégradation différents. Cela suggère qu'il existe une variabilité d'un produit à l'autre, rendant difficile la définition d'un modèle unique de vieillissement basé uniquement sur la RMS.

### 2.2.3 Limites rencontrées et ouverture vers une nouvelle approche

Ces premiers travaux ont permis de démontrer qu'il était possible de détecter une fermeture incomplète d'un disjoncteur à partir de ses signaux vibratoires. C'est une avancée importante, car elle montre que la vibration peut être un bon indicateur de défaut. Cependant, ils ont également mis en évidence une limite majeure : l'incapacité à modéliser de façon fiable la dégradation progressive du mécanisme.

En effet, les données recueillies sont très variables d'un produit à l'autre, et l'évolution de l'état du disjoncteur ne suit pas une trajectoire claire. Les signatures vibratoires montrent une dégradation difficile à caractériser, jusqu'à une rupture soudaine, sans signe précurseur évident.

Pour approfondir l'exploration, une nouvelle campagne de tests a été proposée. Elle consiste à réaliser de nouveaux enregistrements, avec l'ajout de capteurs supplémentaires et une acquisition de données plus riche. L'objectif est double : valider les résultats obtenus précédemment, et approfondir l'analyse de la dégradation grâce à un jeu de données plus complet et plus précis.

Dans cette optique, une approche basée sur le machine learning a été envisagée, avec l'objectif de détecter plus finement les signes précurseurs d'une défaillance, et plus généralement de continuer l'exploration des données vibratoires, qui pourrait mener au développement de solutions innovantes pour la maintenance prédictive des MasterPact MTZ.

## 3 Problématique du projet

Explique en détail quels sont les données dont je dispose au début du PFE, les objectifs attendus et la démarche / différentes étapes du projet, à travers une **roadmap**.

**Commenté [RP1]:** Rajouter la roadmap en annexe

### 3.1 Données à disposition

Les données sont le cœur de tous les projets d'analyse et de machine learning. Il est donc primordial d'avoir à disposition des données fiables pour développer des modèles précis. Cette section définit les nouvelles campagnes d'essais effectués, afin de comprendre concrètement quelles données seront manipulées au cours du projet. Tout d'abord, deux campagnes d'essais d'endurance mécanique ont été réalisées pour recueillir des données vibratoires sur des disjoncteurs MTZ. Enfin, en ce qui concerne la partie de classification de défauts, les données vibratoires sont issues d'un autre test assez **différent**.

**Commenté [RP2]:**  
Tests de 2022 => Expliquer le but principal, donc avant mon arrivée, endurance mécanique = uniquement le mécanisme

#### 3.1.1 Deux types de capteurs

Pour mesurer les signatures vibratoires, il nous faut des capteurs qui mesurent la vibration sous forme d'accélération sur les trois axes X, Y et Z. Lors des différents essais, deux types de capteurs ont été utilisés, chacun présentant des caractéristiques et des avantages spécifiques :

- Les accéléromètres piézoélectriques industriels de haute précision. Ce sont des capteurs filaires qui doivent être vissés directement sur le disjoncteur, ce qui nécessite une installation complexe. Ils sont connectés directement au banc de test, ce qui permet un déclenchement automatique via un signal envoyé au moment de l'ordre d'ouverture et de fermeture, ce qui garantit l'enregistrement complet et synchronisé du signal vibratoire.
- Les capteurs CB110, développés en interne par Schneider Electric, qui sont plus faciles à installer grâce à leur fixation aimantée. Moins précis que les capteurs piézoélectriques, ils ont l'avantage d'être sans fil, et transmettent les données à un PC équipé d'un dongle de réception. Leur déclenchement se fait automatiquement lorsqu'un seuil de vibration est dépassé (déclenchement sur front montant), ce qui rend leur utilisation rapide et non intrusive. Ils sont également équipés de capteurs de température.

L'objectif est double, l'idée est de récupérer un maximum de données fiables avec les capteurs piézoélectriques, et de comparer leur performance avec les CB110, pour évaluer leur potentiel pour un usage pratique sur le terrain. En effet, si ces derniers s'avèrent suffisamment sensibles et cohérents, ils pourraient offrir une solution simple et efficace pour diagnostiquer l'état du disjoncteur en conditions réelles, simplement en étant fixés à des points clés de l'appareil.

### 3.1.2 2022 : Essais d'endurance mécanique

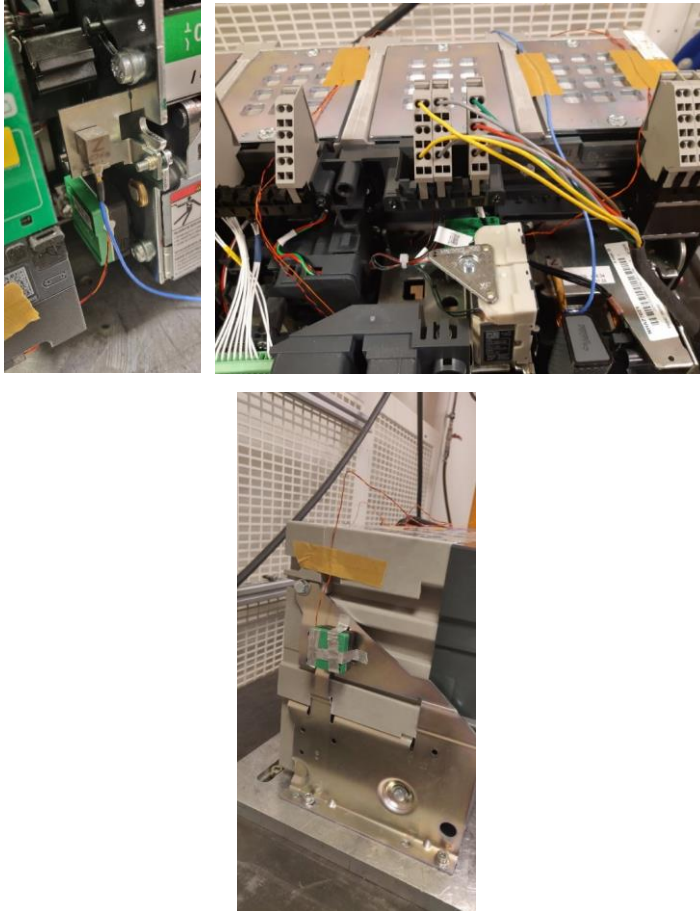
Une première campagne de tests, menée fin 2022, visait à évaluer l'endurance mécanique des MTZ de manière complètement automatisée. Cette campagne consistait à effectuer un grand nombre de cycles, alternant ouverture et fermeture, jusqu'à ce que le disjoncteur atteigne sa fin de vie, c'est-à-dire qu'il n'y ait plus d'énergie excédentaire. Ainsi, on pourrait observer l'évolution des signaux vibratoires dans le temps, en lien avec l'usure progressive du mécanisme. Quatre disjoncteurs ont été testés.

Le déroulement du test est simple. Toutes les 30 secondes environ, un signal d'ouverture ou de fermeture est envoyé de manière alternée. Après chaque fermeture, la grenade du disjoncteur est rechargée automatiquement via un moteur intégré. Conformément à l'utilisation classique du disjoncteur, à chaque cycle de fermeture, la grenade du disjoncteur était automatiquement réarmée via le moteur intégré (MCH). A chaque opération, les données sont mesurées par les capteurs et enregistrées dans un fichier. On obtient donc une base de données très dense, avec un fichier par opération (soit 2 par cycle) et par capteur.

Quatre capteurs sont placés sur chaque produit, avec pour objectif de placer les deux types de capteurs (CB110 et piézoélectrique) dans des zones similaires pour pouvoir les comparer :

- Au niveau du moteur MCH, qui assure le réarmement de la grenade
- Au niveau de la platine des auxiliaires, qui se situe au-dessus du mécanisme, au niveau des bobines (voir Annexe 2)

Commenté [RP3]: Photos de piezo et CB110



Concrètement, les données mesurées sont des accélérations (en g) enregistrées sur une période très courte d'environ 300ms. Avec l'aide des experts produits, nous avons pu identifier les sources des chocs principaux, et associer certains pics de vibration à des événements mécaniques précis. Des exemples typiques de signaux bruts à l'ouverture et à la fermeture sont représentés dans les annexes 4 et 5, accompagnés d'un schéma de correspondance avec les mouvements mécaniques internes du disjoncteur.

Le but était de détecter dans ces signaux vibratoires des signes de dégradation progressive.

L'indicateur principal étant l'énergie excédentaire, elle a été mesurée pendant les tests. Toutefois, comme expliqué précédemment, la mesure est longue et contraignante à réaliser, ce qui la rend impossible à suivre en continu. Elle a donc été mesurée tous les 1000 à 3000 cycles environ, afin d'avoir une estimation globale de la perte d'énergie au fil du temps.

Au final, les quatre produits testés ont eu une période de vie de 10 000 à 20 000 cycles, et plusieurs problèmes ont été rencontrés pendant les essais. Tout d'abord, étant soumis à des chocs répétés, les capteurs CB110, simplement aimantés, ont eu tendance à pivoter légèrement, modifiant



ainsi leur orientation initiale et introduisant des variations non désirées dans les signaux mesurés. Du côté des capteurs piézoélectriques, bien que vissés, les chocs répétés ont fini par desserrer certains câbles, provoquant une perte complète de signal. Dans certains cas, cela a conduit à des interruptions prolongées, pouvant aller jusqu'à des milliers de cycles sans aucune donnée enregistrée.

Un autre problème a été observé : dans certains cas, le moteur de recharge (MCH) présente un défaut et ne réarme pas correctement la grenade. Cela entraîne l'envoi d'un ordre de fermeture qui échoue, car le disjoncteur n'est pas armé. Or, les deux types de capteurs ne réagissent pas de la même manière. Les CB110, déclenchés uniquement lorsqu'un seuil de vibration est dépassé (front montant), ne s'activent pas puisqu'aucun choc n'a lieu. En revanche, les capteurs piézoélectriques, déclenchés à chaque envoi d'ordre (via le banc de test), s'activent même si le mouvement échoue. Ce décalage engendre une désynchronisation entre les jeux de données, certains cycles étant enregistrés uniquement par les piézos, faussant ainsi l'alignement des mesures et compliquant l'analyse comparative des capteurs.

Un dernier problème majeur est survenu lors des tests : tous les disjoncteurs ont subi une casse d'un ressort de rappel de pôles (voir annexe). Ce composant est essentiel au bon fonctionnement du mécanisme, et sa rupture n'est pas considérée comme un signe normal d'usure, mais plutôt comme un défaut prématuré du produit. Cette casse a eu deux conséquences importantes. D'une part, le produit continue de fonctionner, mais les chocs deviennent bien plus violents, ce qui entraîne une usure accélérée du mécanisme et des dommages potentiellement irréversibles. D'autre part, cela fausse complètement la mesure de l'énergie excédentaire : en l'absence de la contrainte d'un des ressorts, les mesures montrent une hausse anormale, dépassant les 12 joules, ce qui rend cet indicateur inexploitable pour suivre une dégradation progressive. Dans un des cas, le ressort s'est même coincé dans le mécanisme, ce qui a provoqué l'arrêt immédiat du produit, mettant fin à l'essai.



*Figure 4 : Un ressort de rappel de pôle cassé*

Cette rupture est donc considérée comme un défaut du produit plutôt qu'un signe de vieillissement progressif. Même si cela pourrait faire l'objet d'une analyse spécifique pour détecter ce

type de défaillance, cela biaise l'étude de la dégradation naturelle du mécanisme, en introduisant un événement prématuré qui n'est pas représentatif d'un comportement normal d'usure.

### 3.1.3 2023 : Essais d'endurance mécanique sous contrainte de température

La deuxième campagne d'essais, réalisée courant 2023, visait à approfondir l'analyse des disjoncteurs MTZ, en introduisant cette fois une contrainte thermique. L'idée était de reproduire un vieillissement accéléré, en combinant des cycles mécaniques répétés à des températures élevées, afin d'étudier l'impact de la chaleur sur les performances et les signatures vibratoires des produits. Elle a donc été menée sur les mêmes produits que précédemment, mais avec une nouvelle variable : la température.

La procédure était similaire à celle de la première campagne, cette fois-ci dans une enceinte thermique, avec la possibilité de piloter manuellement la température entre 20 et 75°C. Trois produits ont été testés simultanément. Cette fois-ci, un seul accéléromètre piézoélectrique a été placé dans le produit du milieu, au niveau de la platine des auxiliaires, comme dans les essais d'endurance mécanique. Et un CB110 a été installé dans chaque produit, un au niveau de la platine des auxiliaires également. Malheureusement, pour des raisons de temps, l'essai n'a pas pu être mené jusqu'à la non-fermeture du disjoncteur, et aucune casse franche du mécanisme n'a été constatée. De plus, les valeurs d'énergie excédentaire n'ont pas pu être mesurées durant cette campagne, ce qui nous prive d'un indicateur important de la dégradation.

### 3.1.4 2024 : Classification des défauts

En plus des tests d'endurance mécanique, un autre essai exploratoire a été effectué sur la même gamme de contacteurs MTZ, qui visait à identifier des différences dans les signaux vibratoires en présence de certains défauts connus du produit.

Pour ce faire, les experts ont identifié et listé quelques défauts parmi les plus courants. Le test consistait à reproduire ces défauts manuellement dans le produit, avant d'effectuer une dizaine d'opérations, tout en enregistrant les signaux vibratoires associés.

Ces enregistrements ont été réalisés avec les mêmes capteurs que ceux utilisés dans les campagnes précédentes. L'objectif était de constituer une première base de données étiquetée, permettant de visualiser et comparer les signatures vibratoires associées à chaque type de défaut.

Au final, ce test a permis de valider le principe : plusieurs défauts montrent effectivement des signaux vibratoires distincts, détectables visuellement ou par des premiers traitements simples. Toutefois, le nombre limité de cycles et de répétitions ne permet pas encore de tirer des conclusions solides en termes de performance de classification.

### 3.1.5 Conclusion sur les données disponibles

Les données disponibles au début du projet sont précieuses, mais présentent plusieurs limitations, tant en termes de qualité que de quantité.

Les tests de classification des défauts ont fourni des données relativement propres, mais très limitées en volume : chaque défaut n'est représenté que par quelques cycles, ce qui complique toute approche de classification robuste.

Concernant les tests d'endurance mécanique (ainsi que sous contrainte thermique), du fait du grand nombre de manœuvres nécessaires, ils ont nécessité une automatisation sur de longues périodes. Les essais pouvaient tourner les soirs comme les weekends, ce qui rendait la supervision totale impossible, et cela a généré de nombreux aléas techniques. Certains capteurs se sont déplacés ou dévissés, rendant leurs mesures partiellement voire totalement inutilisables. Des interruptions matérielles ou logicielles (saturation de disques, défaillances ponctuelles) ont aussi causé des pertes de données sur des milliers de cycles, y compris dans des phases critiques proches de la casse.

Concrètement, pour le premier test, les données des CB110 sont presque toutes inutilisables en raison de leur instabilité. Sur les deux capteurs piézoélectriques installés par produit, un seul a fourni des données exploitables, bien que celles-ci contiennent quelques valeurs aberrantes à corriger. De plus, une perte de données à la fin du test du troisième produit, due à un disque dur saturé, a malheureusement entraîné la perte des 3 000 derniers cycles, moment critique où l'on passe le point de casse, et où les informations sont les plus précieuses. Lors du deuxième test avec contrainte thermique, les capteurs ont généralement bien fonctionné, bien que des problèmes liés au moteur et quelques valeurs aberrantes aient été observés.

En définitive, nous disposons de 8 ensembles de données vibratoires, provenant de 7 produits, car l'un des produits disposait des deux types de capteurs. Cela inclut 5 ensembles de données de capteurs piézoélectriques et 3 de CB110. Ces données sont très hétérogènes, issues de capteurs aux caractéristiques différentes et de tests réalisés dans des conditions variées. Ce projet représente donc un gros défi en matière de data science, étant donné la complexité et la disparité des données avec le peu d'occurrences exploitables. De plus, aucun exemple de fin de vie « naturelle » n'est présent, ce qui complexifie la détection de fermeture incomplète, même si elles restent néanmoins utiles pour analyser la dégradation progressive et identifier certains signes précurseurs. Une des principales difficultés est de réussir à composer avec ces limitations et de s'adapter en fonction.

## 3.2 Attendus initiaux

Les données de test qui viennent d'être exposées sont le pont de départ de ce nouveau projet. Ces enregistrements, aussi hétérogènes soient-ils, vont nous permettre d'explorer des pistes et de poser les premières briques d'une approche fondée sur l'analyse vibratoire.

En effet, le but de ce projet n'est pas de développer un outil abouti pour la maintenance prédictive, mais plutôt d'explorer plusieurs options et approches pour démontrer la faisabilité et le potentiel des méthodes proposées, afin d'établir une sorte de preuve de concept. Le projet se concentre donc initialement sur deux aspects distincts mais complémentaires : l'analyse de la dégradation progressive des disjoncteurs, et la classification de défauts mécaniques.

### 3.2.1 Étude de la dégradation (maintenance prédictive)

La première partie du projet consiste à établir une méthode pour évaluer la dégradation des disjoncteurs. La problématique du point de vue de l'application client est simple : fournir un état de santé du disjoncteur lors des opérations de maintenance, en venant poser simplement un capteur vibratoire aimanté comme le CB110. Plusieurs pistes peuvent être envisagées, par exemple en catégorisant les différents états du disjoncteurs (neuf, bon état, mauvais état), directement en estimant le pourcentage de vie restante, ou envoyant un signal d'alerte lorsque le capteur détecte une fin de vie dans les prochains cycles. Le champ des possibles est vaste, et chaque méthode a ses

propres spécificités en termes de mise en place et de fonctionnement. Il existe de nombreuses méthodes possibles pour y parvenir et chacune a ses propres avantages et inconvénients. L'objectif est donc également de tester différentes approches pour identifier celles qui pourraient offrir le meilleur potentiel pour une application pratique.

En pratique les disjoncteurs ne sont presque jamais utilisés jusqu'à leur fin de vie théorique. En effet, ces disjoncteurs industriels sont généralement destinés à rester fermés la majorité du temps. Ils effectuent donc rarement des opérations d'ouverture et de fermeture, au maximum un par jour dans certains cas. Pour un disjoncteur dont la spécification garantit 10 000 cycles, on peut rapidement se rendre compte qu'il faudrait des dizaines d'années pour atteindre cette garantie, et les clients remplacent souvent le disjoncteur avant leur maximum théorique, à cause du vieillissement des composants ou des technologies. Les applications concrètes les plus intéressantes de ce projet consisteraient donc à utiliser l'étude de la dégradation du produit pour faire de la détection précoce des défaillances, ou pour pouvoir garantir lors de la maintenance que le produit est encore en bon état et n'a pas besoin d'être remplacé pour l'instant, et ce de manière simple et rapide.

### 3.2.2 Classification de défauts mécaniques

La deuxième partie du problème concerne la classification des défauts mécaniques. Une problématique supplémentaire a été identifiée du côté de la maintenance : la nécessité d'alerter sur certains dysfonctionnements mécaniques, tels que la détection d'un composant cassé ou en mauvais état, ou la fermeture incomplète du disjoncteur. L'intérêt est que le client puisse pouvoir diagnostiquer le problème rapidement, à distance, et sans avoir besoin de l'intervention d'un expert du produit.

L'objectif ici est de trouver une méthode pour classer ces défauts de manière fiable. Pour l'instant, aucune étude n'a été effectuée sur ces nouvelles données collectées. Comme pour la première partie, la recherche reste ouverte, et il s'agit de déterminer comment identifier et catégoriser ces défauts de manière efficace.

### 3.2.3 Méthodologie générale et axes de travail

Pour répondre à la problématique de ce projet exploratoire, plusieurs axes ont été définis au début du projet :

- Collecter plus de données : Les données initialement disponibles étant limitées, une nouvelle campagne de tests est envisagée pour collecter davantage de données fiables, à la fois pour l'étude de la dégradation (tests d'endurance) et pour la classification des défauts. Cela inclut la définition des protocoles et la supervision des essais en lien avec les équipes de test.
- Analyse de l'existant : L'étude des travaux déjà menés en interne chez Schneider Electric sur ce projet est un point principal. Ces travaux constituent une base solide pour explorer de nouvelles approches, en s'appuyant sur les conclusions tirées initialement.
- Exploration : L'approche du projet étant avant tout exploratoire, l'objectif principal est de tester plusieurs pistes techniques et d'évaluer leur potentiel pour aboutir à une preuve de concept sur la faisabilité du diagnostic vibratoire des disjoncteur MasterPacT MTZ. Cela inclut l'expérimentation de différentes méthodes de traitement du signal et d'analyse de données, dans une logique comparative et itérative.

*Ces axes ont été mis sous forme de roadmap pour garder un cadre : Présenter*

## 4 Analyse exploratoire des signaux vibratoires

L'exploration des données constitue le point de départ essentiel de tout projet de data science, en particulier dans un contexte aussi peu balisé que celui de la maintenance prédictive par analyse vibratoire. Elle s'inscrit ici dans une démarche itérative, où chaque observation ou difficulté rencontrée oriente les étapes suivantes.

Cette phase d'analyse préliminaire vise à identifier les limitations, les opportunités, et à guider les choix pour la suite du travail. Elle est d'autant plus cruciale ici que les données sont issues de campagnes de tests variées, réalisées avec des capteurs aux caractéristiques différentes et dans des conditions parfois hétérogènes. Juste après les tests d'endurance mécanique réalisés, une première analyse exploratoire avait déjà été réalisée en interne par Marta. Ces premiers travaux ont servi de point de départ pour orienter la suite de l'analyse. Ce chapitre présente dans un premier lieu les premières analyses de Marta sur ces signaux vibratoires, puis détaillera les choix effectués au niveau de la préparation des données dans cette phase d'exploration.

Ce chapitre présente dans un premier lieu les premières analyses de Marta sur ces signaux vibratoires, puis détaillera les choix effectués au niveau de la préparation des données dans cette phase d'exploration.

### 4.1 Contexte initial et premiers signes de dégradation (Marta, 2023)

Juste après les campagnes de tests mécaniques réalisées en 2022 et 2023, une première analyse exploratoire des signaux vibratoires a été menée en interne par Marta. Son travail portait principalement sur l'ouverture, où les signaux semblaient les plus riches en information. Ces premières observations ont permis d'orienter les choix méthodologiques présentés dans les sections suivantes.

#### 4.1.1 Signaux d'ouverture, le rebond de l'arbre de pôle après la casse (Supofo)

En analysant les signaux bruts du premier essai (Supofo), on se rend compte que le premier indice de dégradation se situe dans le 3<sup>e</sup> choc, le rebond de l'arbre de pôle (voir annexe 5). Ce pic de vibration apparaît après l'ouverture des contacts, lorsque l'arbre rebondit sur sa butée après l'avoir heurté une première fois. On observe qu'après la casse du ressort de rappel de pôle, ce rebond survient avec un décalage d'environ 40 ms.

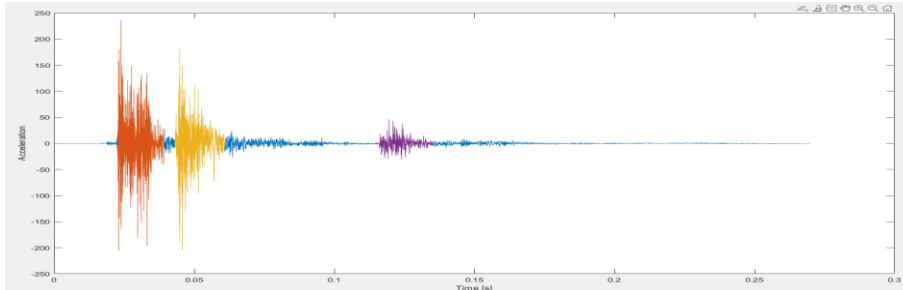


Figure 5 : Signal brut d'ouverture avant la casse

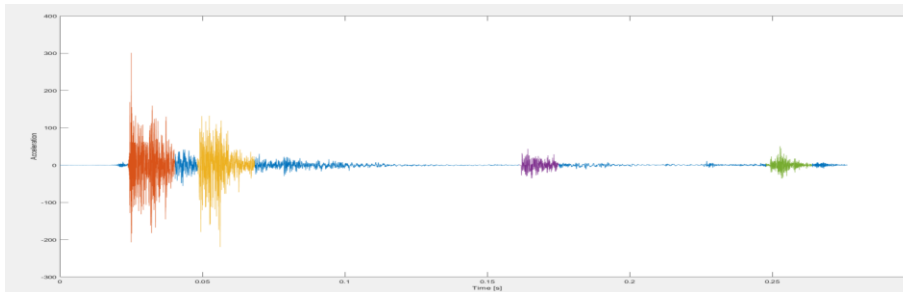


Figure 6 : Signal brut d'ouverture après la casse

Ce comportement est cohérent avec la perte de force exercée par le ressort défectueux. En effet, l'arbre de pôle est rappelé mécaniquement par deux ressorts de rappel, situés de part et d'autre. Lorsque l'un des deux casse, la force totale exercée pour ramener l'arbre en position est fortement réduite, ce qui ralentit son mouvement et décale le rebond dans le temps.

Ce décalage dans le signal est très net et constitue une signature claire de la casse du ressort. Cependant, il n'a pas d'intérêt direct dans le cadre de l'analyse de la dégradation, car elle traduit plutôt un défaut survenu brutalement et pas progressivement. Aussi, cette casse est immédiatement visible à l'œil nu lors de l'inspection du disjoncteur, il y a donc peu d'intérêt de la détecter dans le cadre d'un diagnostic de défaut. En revanche, on peut noter que cela pourrait être exploité dans une optique de détection de défaut à distance, par exemple pour générer une alerte automatique dès qu'un tel changement soudain est détecté dans les vibrations.

#### 4.1.2 Le découpage automatique des chocs

Après avoir mis en évidence le décalage temporel du rebond de l'arbre de pôle suite à la casse du ressort, on a cherché à voir si suivre l'évolution du décalage temporel des chocs peut nous donner d'autres indices sur la dégradation mécanique. Pour cela, il est nécessaire d'isoler les chocs caractéristiques de l'ouverture dans chaque signal, notamment le troisième choc associé au rebond de l'arbre de pôle.

Cependant, cette tâche s'est révélée relativement complexe. En effet, les chocs ne sont pas toujours bien séparés. Le signal vibratoire est souvent bruité, et certains chocs peuvent se superposer ou se confondre, rendant leur détection difficile. De plus, la définition même de ce qu'est un "choc"

est ambiguë. Le début d'un choc peut être progressif, la fin du choc est difficile à fixer objectivement, car l'amplitude décroît sans seuil net, et l'amplitude des chocs peuvent varier d'une opération à l'autre et surtout au sein d'une opération. Par exemple, on ne peut pas simplement dire qu'un choc survient quand on dépasse le seuil de 100g, car ce n'est pas le cas pour tous les chocs dans un signal, et l'amplitude des signaux pourraient évoluer au fil du temps.

Il est donc impossible d'utiliser un simple seuil fixe basé sur l'amplitude pour délimiter les chocs. La solution que Marta a développé est un algorithme de découpage basé sur des seuils dynamiques en fonction du temps, pour tenter d'identifier les quatre chocs caractéristiques de l'ouverture (Figure 7).

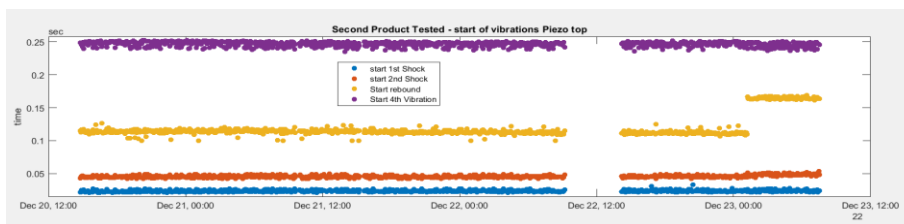


Figure 7 : Evolution du temps  $t_0$  des 4 chocs définis par rapport au temps

Dans la figure ci-dessus, on remarque bien le moment où la casse du ressort de rappel de pôles survient, avec un décalage bien marqué, ce qui valide les observations de la partie précédente.

Cependant, on se rend compte en testant cet algorithme de découpage, que ce rebond n'est pas présent à chaque ouverture.

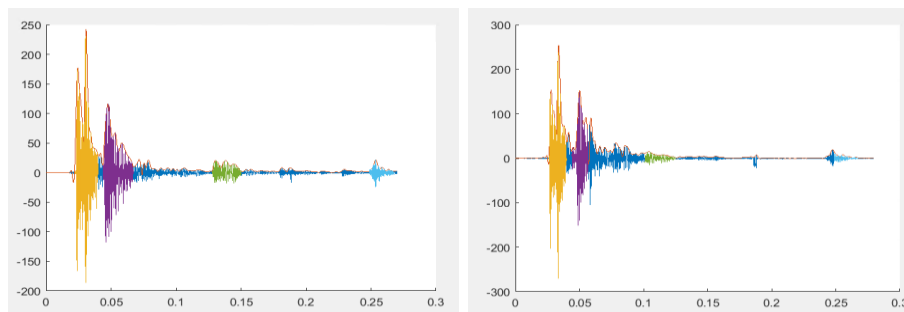


Figure 8 : Signal vibratoire d'ouverture avec et sans rebond

Après consultation des experts, on apprend que cela est dû à un mécanisme d'anti-rebond, conçu pour éviter que les contacts ne se rapprochent à nouveau après l'ouverture (notamment en cas de court-circuit. Théoriquement, ce mécanisme ne devrait pas s'activer lors d'une ouverture manuelle (comme dans les essais d'endurance), mais les signaux bruts montrent qu'il peut néanmoins se déclencher, annulant parfois totalement le rebond.

On remarque alors que l'algorithme de découpage est mis en difficulté car il est censé reconnaître 4 chocs, mais ce n'est pas toujours le cas. Cela remet en question la fiabilité de cet indicateur pour une analyse systématique, et confirme la difficulté de créer un algorithme capable de

détecter les chocs malgré une certaine variabilité dans les signaux bruts. Malgré ça, cette piste reste intéressante : elle montre que certaines signatures vibratoires, bien interprétées mécaniquement, peuvent révéler un défaut du produit.

#### 4.1.3 Analyse de l'amplitude des chocs par RMS

Savoir délimiter les chocs permet également de connaître leur amplitude. Pour ça, on calcule la RMS de chaque signal. Cela permettrait, comme pour le travail effectué par Cheikh en 2020, d'étudier la dégradation de l'amplitude des signaux vibratoires, mais avec une précision plus importante car on la calcule selon le choc et non selon le signal en entier.

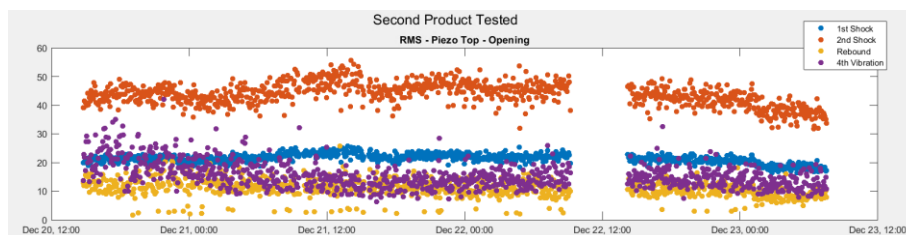


Figure 9 : RMS de chacun des 4 chocs par rapport au temps, avant la casse

Ici, on représente les observations avant la casse du produit pour essayer d'identifier une dégradation. On voit une légère diminution de la RMS vers la fin du test, ce qui pourrait traduire une perte d'énergie mécanique. Cependant, cette évolution n'est pas linéaire ni régulière, et la casse du ressort n'a pas l'air détectable à l'avance. Ce résultat corrobore les conclusions de Cheikh : la dégradation mécanique est difficile à détecter de manière claire et précoce en se basant uniquement sur l'amplitude des vibrations.

Il est très important de noter que cette analyse est réalisée dans un contexte où le produit présente un défaut et non une usure normale, ce qui complique l'interprétation des variations observées. On ne peut pas distinguer clairement si la diminution de la RMS reflète une usure progressive normale du mécanisme ou simplement un symptôme du défaut du produit qui conduit à la casse du ressort de rappel de pôle.

#### 4.1.4 Analyse des signaux de l'essai sous contrainte thermique (SOHO) et influence de la température

En s'appuyant sur les résultats de l'essai Supofo, Marta a analysé les données issues des tests SOHO, réalisés sous contrainte thermique. Ces signaux proviennent de capteurs CB110 qui enregistrent à la fois les vibrations et la température.



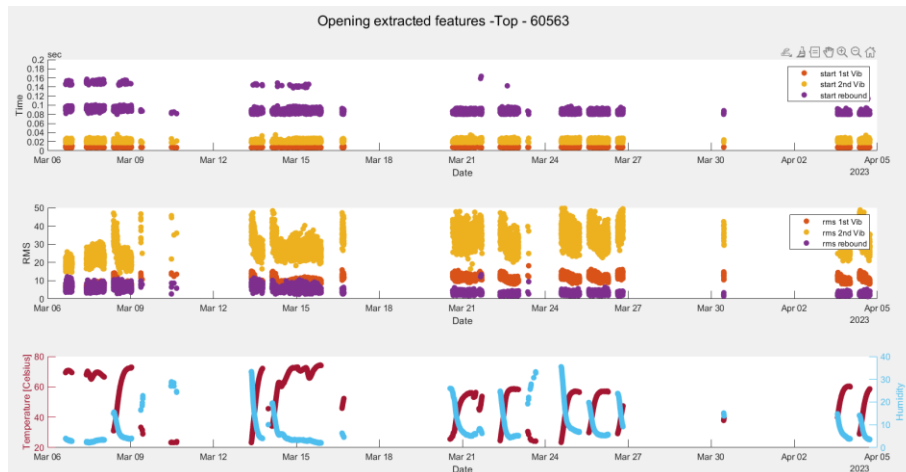


Figure 10 : Caractéristiques extraites des signaux bruts de SOHO issus d'un capteur CB110

Plusieurs observations ressortent de cette analyse :

Premièrement, la présence de trous de données importants, parfois sur plusieurs jours, affectant la continuité des séries temporelles (jusqu'à plusieurs milliers de cycles manquants).

Deuxièmement, en superposant la température enregistrée et la RMS calculée, on voit un impact marqué de la température sur l'amplitude des vibrations (RMS) : on constate que lorsque la température augmente, la RMS diminue. Ce phénomène s'explique par la dilatation thermique des matériaux, modifiant le comportement dynamique de la mécanique, et n'a donc rien à voir avec la dégradation.

Cette influence thermique, bien que non liée à la dégradation, est cruciale à considérer. En effet, si l'amplitude des vibrations est une des caractéristiques utilisées comme indicateur de la dégradation, il faut impérativement prendre en compte la température pour éviter des interprétations erronées. A l'instar du test Supofo, on se concentre sur l'amplitude du choc du rebond de l'arbre de pôle :

Commenté [RP4]: Plus clair

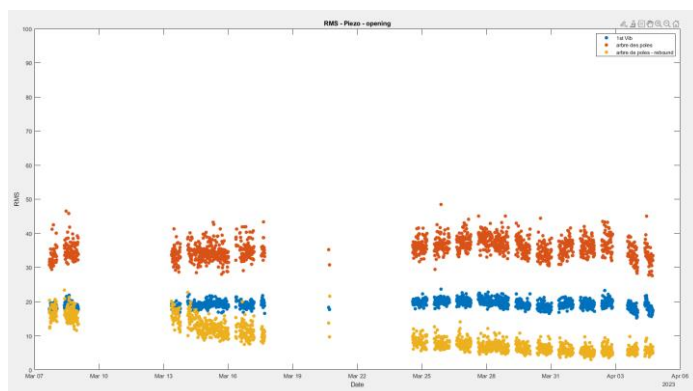


Figure 11 : RMS des différents chocs à l'ouverture en fonction du temps – Données SOHO

On observe une légère tendance à la dégradation, similaire aux données de l'essai Supofo, mais en l'absence de casse ou de fermeture incomplète constatée sur les produits SOHO, il est difficile d'en tirer des conclusions robustes.

#### 4.1.5 Conclusion

La première analyse des signaux vibratoires d'ouverture met en évidence un changement net dans le comportement mécanique du disjoncteur après la casse du ressort de rappel de pôle, notamment à travers le décalage temporel du rebond de l'arbre de pôle. Ce phénomène est mécaniquement cohérent et l'explication a été exposée.

Cependant, ce marqueur ne constitue pas un véritable indicateur de dégradation progressive, car la casse du ressort est un défaut clair et observable directement sur le produit.

D'autres indices de dégradation ont été explorés, notamment la diminution de l'amplitude des chocs à l'ouverture. Il y a deux hypothèses probables :

Hypothèse 1 : La diminution de l'amplitude du choc de l'arbre de pôle n'est pas liée à une usure normale, mais à un défaut de fabrication du produit. On sait que dans les essais Supofo, les produits ont tous présenté une casse du ressort de rappel de pôle. Pour les essais SOHO, nous n'avons pas été jusqu'à la fin de vie du produit, on doit donc conserver l'hypothèse que ces produits étaient aussi défectueux dès le départ. Dans ce scénario, la baisse d'amplitude ne traduit pas une dégradation normale mais plutôt la dégradation d'un mécanisme déjà altéré. De plus, après consultation des experts produits, il a été confirmé que ce défaut de ressort cassé était un défaut bien connu, survenu dans un certain nombre de lots à l'époque, incluant ceux testés ici. Ce défaut ne concernerait en fait qu'une part extrêmement faible des produits fabriqués, et a été rapidement corrigé dans les lots suivants. Par conséquent, l'utilité de prédire ce défaut, qui n'est plus d'actualité, peut être remise en question.

Hypothèse 2 : La diminution de l'amplitude des chocs reflète une usure normale du mécanisme, liée à l'apparition progressive de frottements internes, et ce peu importe le produit, qu'il soit défectueux ou non. Ces frottements réduiraient la puissance des impacts, entraînant une perte d'énergie mécanique visible à la fois lors de l'ouverture et potentiellement lors de la fermeture. Dans cette hypothèse, on pourrait relier cette dégradation à la perte progressive de l'énergie excédentaire du produit, qui diminue à cause des frottements mécaniques liées à l'usure.

Il est important de se rappeler que la perte d'énergie excédentaire du produit peut avoir deux causes. La première est la perte d'énergie de la grenade, qui est en théorie, uniquement visible lors de la fermeture (la grenade n'agit pas lors de l'ouverture). La deuxième est l'ajout de forces de frottement qui augmentent la force nécessaire pour pouvoir fermer correctement le produit. Dans ce cas, on pourrait voir des changements dans les signaux vibratoires à la fermeture et à l'ouverture.

Ce travail préliminaire réalisé par Marta constitue le point d'entrée essentiel pour mon exploration des données. Après avoir étudié ses résultats et pris connaissance des signaux et des problématiques identifiées, la première étape a naturellement été de traiter les données brutes. L'objectif était d'obtenir des données propres et de qualité, afin de garantir la pertinence et la robustesse des analyses qui allaient suivre.

## 4.2 Prétraitement des données

Tout d'abord, l'élimination des valeurs aberrantes (ou outliers) constitue une étape clé du prétraitement, car ces valeurs peuvent fausser les analyses et la détection d'événements significatifs dans les signaux vibratoires.

**Commenté [RP5]:** Est-ce qu'on sait d'où viennent les valeurs aberrantes ?

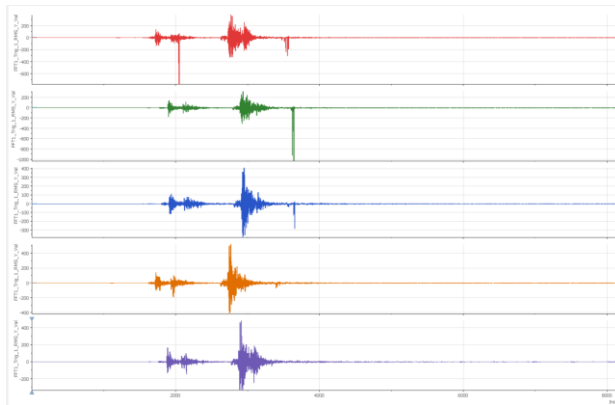


Figure 12 : Exemples de valeurs aberrantes dans des signaux bruts - Données piézoélectriques

La figure ci-dessus illustre des exemples typiques de valeurs aberrantes détectées dans les signaux bruts piézoélectriques. On voit qu'il est impossible d'appliquer un seuil global fixe pour détecter ces outliers, car une valeur aberrante à la fin d'un signal (où il n'y a pas de choc) peut être numériquement inférieure à une valeur « normale » correspondant à un choc important en amplitude. Ainsi, la détection doit être relative, c'est-à-dire dépendante du contexte local des chocs.

Après avoir exploré plusieurs approches, la solution que j'ai développée consiste en un algorithme simple qui calcule des bornes minimales et maximales sur de petits intervalles temporels, en comparant chaque valeur à celle de son « opposée » (symétrique dans l'intervalle). Si une valeur est nettement plus élevée ou plus basse que son opposée, elle est considérée comme aberrante et supprimée, cette méthode montre une très bonne efficacité pour nettoyer les données tout en conservant les caractéristiques du signal.

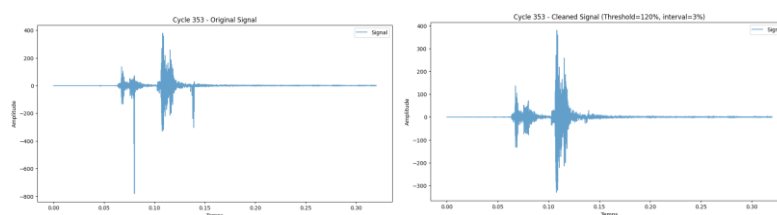


Figure 13 : Signal d'une opération présentant des valeurs aberrantes, avant et après traitement

Ensuite, l'idée était de s'inspirer du travail de Marta pour explorer différentes stratégies de découpage et de délimitation des chocs, afin d'évaluer leur efficacité et de déterminer si certaines pouvaient fournir un découpage fiable, reproductible et adapté à la variabilité des signaux.

**Commenté [RP6]:** Garder cette partie même si on garde pas l'idée ?

Resynchronisation : Pour les Piezos, ils sont censés démarrer l'enregistrement sur un signal bobine, en réalité, ça dépend de l'état du sinusoïde au moment du signal donc ça déphase un peu)

- ⇒ Solution possible : recalculer à partir de l'état de la bobine le déphasage pour chaque cycle
- ⇒ Option 2 : Supprimer carrément le début :
  - On perd l'info du t0 MAIS
    - On l'a pas de base sur les CB110 (activation sur front montant seuil)
    - On a vu aucun signe de dégradation au moment du premier choc (logique, aucun mécanisme n'est encore mis en jeu, simplement le clic bobine, donc aucun indice de dégradation)

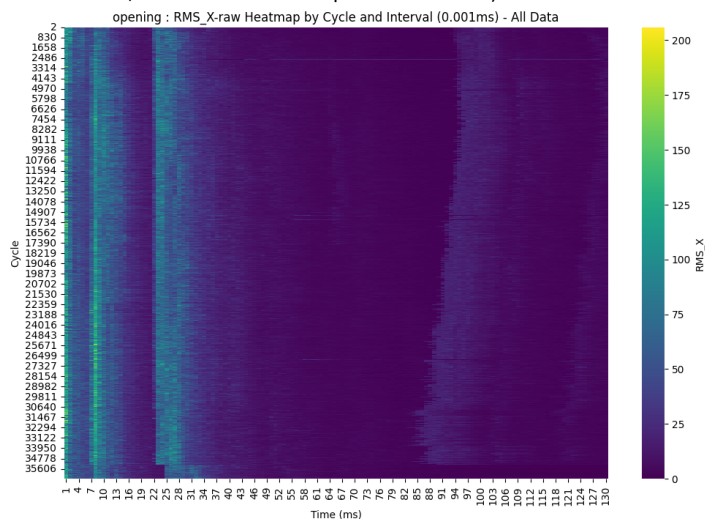
**Commenté [RP7]:** Pareil

### 4.3 Nouvelle technique

Grâce aux premières analyses, on sait que les indices de dégradation observés se manifestent à la fois dans l'amplitude des chocs et dans leur position temporelle au sein des signaux. Cela soulève une difficulté importante : la nécessité d'avoir une représentation qui permette de suivre simultanément ces deux aspects – amplitude et temporalité – sur l'ensemble des cycles, sans recourir à des techniques de découpage trop complexes ou sensibles aux paramètres.

Pour répondre à ce besoin, une nouvelle méthode a été imaginée. Elle consiste à appliquer un calcul de la RMS sur des fenêtres glissantes courtes, typiquement de 1 milliseconde, sur tous les signaux d'un même essai. Le choix de la fenêtre a été choisi empiriquement après plusieurs essais, 1 ms offrant un bon compromis entre résolution temporelle et stabilité de l'amplitude mesurée.

Cette approche permet de générer une heatmap (carte de chaleur en français) avec, en abscisse, le temps du signal vibratoire, en ordonnée le numéro de l'opération successifs (on sépare les ouvertures et les fermetures, donc on affiche une opération sur deux).



Chaque petite ligne horizontale correspond donc à une opération, et chaque rectangle coloré représente la valeur RMS calculée entre  $t$  et  $t+1$  ms. Par exemple, si l'on regarde la troisième colonne de la ligne correspondant à l'opération 2, on lit la RMS entre 3 et 4 ms de cette deuxième opération, extraite directement des données vibratoires brutes.

Cette représentation permet d'avoir une vision globale des évolutions du signal au fil des cycles sur plusieurs aspects à la fois : amplitude, moment d'apparition des chocs, durée, ou encore perturbations soudaines. Il évite notamment les imprécisions liées à la détection automatisée des chocs, qui on l'a vu, est fragile lorsque les formes de signal changent au cours de la dégradation.

Dans l'exemple présenté, on reconnaît par exemple très nettement la casse du ressort de rappel de pôle, identifiable par une coupure franche, avec le décalage du rebond dans le temps.

En étudiant la deuxième partie du choc, au moment du rebond, on constate une modification à la fois du temps de survenue du choc et une légère baisse d'amplitude, ce qui confirme les observations faites précédemment, mais avec plus de précision.

Cette méthode apporte donc une nouvelle manière, à la fois robuste et visuelle, de suivre la dégradation des produits. Elle peut être appliquée facilement à d'autres capteurs, signaux ou produits, sans nécessiter d'ajustement complexe des paramètres, ce qui en fait un outil prometteur pour l'analyse vibratoire à grande échelle.

⇒ Annexe avec toutes les images

⇒ Est-ce que je parle du test de régression ?

#### 4.4 Conclusion de l'exploration et limites de l'approche initiale

L'exploration des données issues des premières campagnes d'endurance a permis de dégager plusieurs constats utiles, mais également de mettre en lumière les limites de l'approche envisagée initialement.

Récapitulons les observations faites jusqu'à maintenant.

Premièrement, concernant les signaux d'ouverture, certaines tendances de dégradation ont pu être observées, mais elles restent difficiles à interpréter. Les cas de figure sont trop rares et trop différents les uns des autres pour établir un schéma clair, d'autant plus que l'origine de certains comportements reste incertaine.

En revanche, un cas de défaut a été identifié de manière certaine : la casse d'un ressort de rappel de pôle. Ce type de défaut n'est pas pertinent en soi à détecter avec les vibrations, car il est directement visible sur le produit et facilement identifiable lors d'une inspection visuelle. Toutefois, il est intéressant de noter qu'il a laissé une signature identifiable dans les données vibratoires. Cela confirme que les vibrations peuvent contenir des informations exploitables pour détecter certains défauts.

L'indicateur le plus fiable pour suivre l'état de santé reste l'énergie excédentaire, qui reflète la capacité du mécanisme à assurer une fermeture complète. Mais cet indicateur n'est pas mesuré systématiquement : il est parfois présent dans les tests Supofo, mais absent dans Soho, et il est surtout impossible à automatiser à chaque cycle. Ce manque de mesure systématique est d'autant plus problématique dans une optique de modélisation : en data science, un modèle de régression nécessite un label fiable pour l'apprentissage. Sans données suffisantes et continues sur l'énergie

excédentaire, il est impossible d'entraîner un modèle pertinent. Cela renforce l'idée qu'une approche prédictive continue n'est pas adaptée dans un contexte réel.

Les capteurs CB110 se sont révélés cohérents avec les capteurs piézoélectriques sur les mesures vibratoires, mais présentent deux limites importantes pour les tests d'endurance mécanique : une sensibilité aux pertes de données dues à la transmission sans fil, et un risque de déplacement au fil des cycles pendant les essais à cause de leur fixation magnétique.

Au vu de ces limites, la stratégie initialement prévue, qui reposait sur le suivi progressif de la dégradation via de nouvelles campagnes d'endurance, s'avère difficile à mettre en œuvre dans la pratique. Elle demanderait de récupérer un très grand volume de données de bonnes qualités, ce qui demanderait beaucoup trop de temps et de moyens (capteurs, produits, budget). En d'autres termes, chercher à modéliser de manière continue l'évolution de l'état de santé du disjoncteur est trop complexe et pas vraiment pertinent.

Ces constats ont finalement motivé un changement de stratégie, présenté dans le chapitre suivant, avec une approche plus adaptée aux contraintes terrain tout en conservant l'objectif de diagnostic prédictif.

## 5 Changement de stratégie

### 5.1 Justification

A l'origine, il était prévu de séparer le projet en deux axes : le suivi de la dégradation du mécanisme au fil du temps, et la classification de défauts. La roadmap initiale prévoyait de nouvelles campagnes d'endurance pour modéliser la dégradation en continu. Mais les conclusions tirées de l'analyse des premières données (chapitre 4) ont montré que cette approche est trop complexe, peu fiable, et difficile à mettre en œuvre en pratique.

En revenant à l'essence du projet, l'objectif principal est d'étudier la faisabilité de la maintenance prédictive à partir de mesures vibratoires. De plus, au niveau de l'application client, il n'est pas nécessaire de suivre l'évolution de l'état du disjoncteur avec une précision extrême (par exemple, estimer le niveau d'énergie excédentaire exact). Ce niveau de précision n'est ni réaliste avec les données disponibles, ni utile pour les utilisateurs finaux.

Ce que recherchent les équipes de maintenance, c'est un outil simple capable de détecter un défaut et donner un diagnostic global de l'état de santé (bon, moyen, mauvais), sans nécessiter l'intervention de techniciens. Afin d'éviter les maintenances inutiles et prévenir lors d'une défaillance.

C'est pourquoi la stratégie a été recentrée sur une approche plus simple et plus utile : classer l'état global du produit et détecter des défauts. La clé de la nouvelle stratégie est de repenser la manière dont on veut modéliser l'état de dégradation du produit. L'objectif n'est plus d'estimer précisément l'énergie excédentaire, mais d'indiquer si le produit fonctionne normalement, s'il commence à montrer des signes d'usure, ou s'il est proche de la défaillance.

Avec l'avis des experts et des ingénieurs d'essai, nous avons validé qu'il est possible de simuler différents états du disjoncteur pour tester cette nouvelle approche. Elle est plus ciblée, plus adaptée aux contraintes du projet, et mieux alignée avec les besoins réels du terrain. La mise en œuvre de cette stratégie est détaillée dans le chapitre suivant.

Commenté [RP8]: Mieux expliquer

C'est dans ce cadre que s'inscrit la nouvelle stratégie d'essais, plus ciblée, plus simple, et mieux adaptée aux contraintes du projet. Elle est détaillée dans le chapitre suivant.

## 5.2 Procédure des tests

On va « simuler » ou « reproduire » différents états d'un produit à partir d'un produit en bon état (par ex, changer la grenade pour simuler une détente=> Perte d'énergie, ou rajouter un câble d'interverrouillage

**Commenté [RP9]:** Expliquer vite fait à quoi ça sert

### 1. Compromis entre budget/temps/efficacité

Tests du produit à différents niveaux d'énergie excédentaire :

11,5J (Bon état)

6J (Moyen)

<3J (Inférieur car on peut pas mesurer moins mais on garantit que c'est <, mauvais)

0J (Fermeture incomplète) => Les contacts ferment, mais le mécanisme reste en suspens, la grenade n'atteint pas sa butée et des qu'on recharge le méca (par moteur ou manuellement), sa se réouvre. Situation dangereuse psq le produit n'est pas fermé correctement.

+ une liste de défauts qu'on a défini avec les experts produits :

CO (Closing opening)

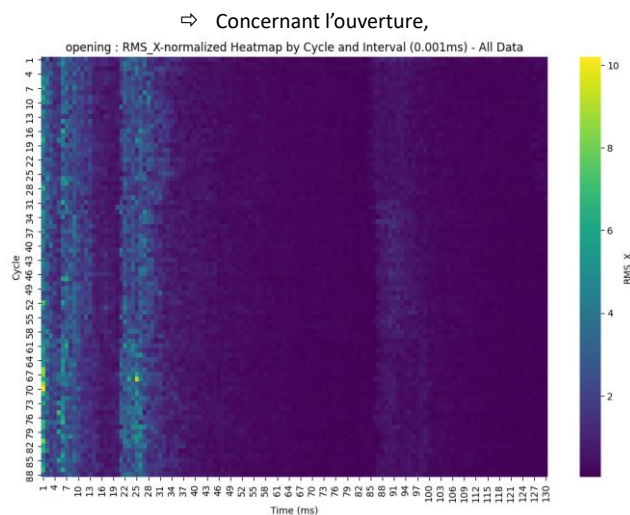
Décharge à vide (décrochage du mécanisme donc pas entraîné, la grenade décharge toute son énergie sur la butée

Pour chaque « état » on fait entre 30 et 100 cycles. Ça nous permet de mieux labelliser les données et d'en faire un classifieur qui va déterminer les états et les défauts

Donc plus facile de superviser, on va pouvoir regarder concrètement si on voit les différences dans les signaux des différents niveaux d'EEX, on va pouvoir regarder si on retrouve ce même indice de dégradation dans l'ouverture et confirmer ou non notre hypothèse.

## 5.3 Résultats et réserves

### 5.3.1 Les données brutes



- ⇒ on ne voit pas de dégradation quand on change la grenade ou qu'on rajoute du frottement. Il y a donc 2 hypothèses :
- ⇒ 1. Comme on s'en doutait, c'est plutôt un symptôme du produit défectueux plutôt que la perte d'énergie du mécanisme
- ⇒ 2. C'est un autre symptôme de vieillissement du produit qui n'est pas lié à la perte d'énergie excédentaire, car ne concerne pas la fermeture

### 5.3.2 Le modèle de classification

- ⇒ Test d'un random forest classifier avec les données labellisées, et préprocessées comme expliqué précédemment (avec la technique des intervalles)
- ⇒ Très bons résultats (presque 100% de précision sur chaque classe)
  - Expliquer pourquoi (classes assez différenciables visuellement donc avec les bonnes features c'est facile)

### 5.3.3 Réserves

- ⇒ Réserves : Ce n'est qu'une reproduction, pour gagner en temps et pas se perdre dans la complexité, mais dans un cas réel, les différences entre les classes ne sont évidemment pas évidentes (on passe de manière progressive entre good, mid et low)
- ⇒ On a reproduit 2 phénomènes de dégradation (dégradation du ressort « grenade » et ajout de frottements), on l'a fait séparément et ça se voit, dans la vraie vie les deux phénomènes interviennent en parallèle et plus progressivement



## 6 Conclusion et suite

### 6.1 Attendus

Les attendus et le potentiel du projet ont pu dériver pendant l'exploration, on a pu éclaircir les objectifs grâce à la consultation des experts. Le but principal du projet était de démontrer si oui ou non, on pouvait établir un lien entre signature vibratoire du produit, et son état de santé. La réponse est oui, donc une sorte de POC réussi. Maintenant que nous en avons la preuve, cela ouvre plein de possibilités de projets à plus grande ampleur pour mettre à l'échelle cette solution inédite.

### 6.2 Possibilités pour la suite

Possibilités pour la suite

Applicable à l'étude du mécanisme, mais dans la vraie vie on fait pas 10k cycles par jour avec ce genre de disjoncteurs, en pratique les produits peuvent durer des dizaines d'années sans atteindre les 10k cycles et que le mécanisme ne pose problème.

On peut tester plusieurs produits dans d'autres conditions pour élargir les capacités du modèle, et élargir le champ de vue. (par ex : Le prod existe en version fixe et modulable, donc ça peut impacter les vibrations, son emplacement peut aussi impacter les vibrations)

Par ex : On peut différencier les défauts qu'on a entraîné, on pourrait aussi utiliser les données pour créer un modèle de détection de défaut, basé sur une divergence avec les données « normales », pour pouvoir alerter en cas de vibration suspectes.

Ce POC peut aussi permettre de débloquer du budget pour faire tous ces tests à plus grande échelle, et on a aussi montré l'efficacité des CB110 (car ça marche dans les deux cas)

## 7 Impact environnemental et sociétal du projet

## 8 Bilan personnel

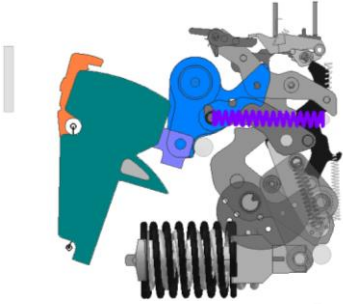
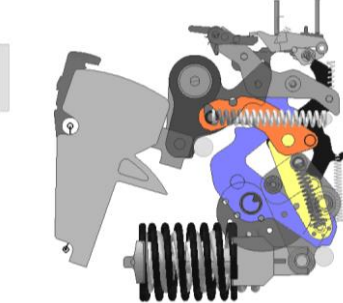
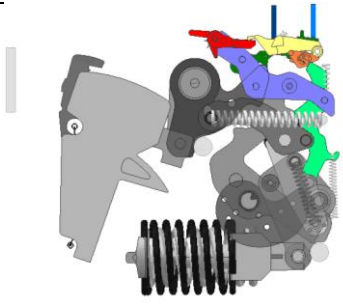
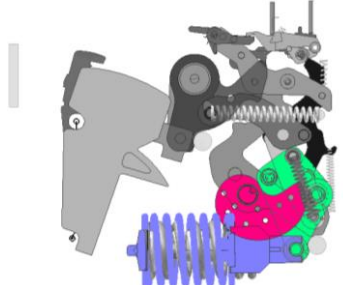
Planning effectif et comparaison avec la roadmap du début

Conclusion sur les apports du projet, professionnel technique et personnel

Annexes

Annexe 1 : Composants principaux du MasterPacT MTZ

Cette annexe liste et illustre les composants du disjoncteur MasterPacT MTZ. Elle sert de référence pour faciliter la compréhension des termes techniques employés dans le reste du document. Les composants essentiels à retenir et récurrents dans le rapport sont indiqués en gras.

	<ul style="list-style-type: none"><li><b>Contact Mobile</b></li><li>Cage de Pôle</li><li><b>Arbre de Pôle</b></li><li><b>Ressorts de Rappel Pôle (un de chaque côté de l'arbre)</b></li><li>Bielle de Pôle</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>Crochet</li><li>Bielle Supérieure</li><li>Bielle Inférieur</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>Demi-Lune d'Ouverture</li><li>Cliquet d'Ouverture</li><li>Demi-Lune de Fermeture</li><li>Cliquet de Fermeture</li><li>Levier Auxiliaire</li><li><b>Bobine auxiliaire MX (Ouverture)</b></li><li><b>Bobine auxiliaire XF (Fermeture)</b></li><li>Verrou</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>Entraîneur (et son Galet d'Armement)</li><li>Came d'Armement</li><li>Grenade (Guide, Chappe et Ressort Moteur)</li></ul>

## Annexe 2 : Principe général du mécanisme du MasterPacT MTZ

### Le mécanisme OCO

Le disjoncteur MasterPacT MTZ est conçu pour les applications de haute intensité, où la continuité de service est critique. Il intègre un mécanisme spécifique appelé OCO (*Opening – Closing – Opening*), qui permet une fermeture rapide et une remise en service immédiate après une ouverture, sans intervention manuelle.

L'objectif de ce mécanisme est double :

- Après un défaut sur le réseau électrique, le MasterPacT peut tenter de se refermer automatiquement. Ainsi, si le défaut est passager, la coupure est très courte et le temps d'arrêt est réduit au maximum.
- Il permet de commander la fermeture du disjoncteur rapidement et à distance, pour des raisons de sécurité et de fiabilité du réseau.

### Les ressorts antagonistes et leur rôle

Le mécanisme de fermeture et d'ouverture repose sur deux ensembles de ressorts aux fonctions opposées :

- Les ressorts de rappel de pôle : Leur rôle est, lors d'un ordre d'ouverture, de ramener rapidement le contact mobile pour ouvrir le circuit en les « tirant ».
- La grenade : Son rôle est, lors d'un ordre de fermeture de libérer l'énergie suffisante pour « pousser » le contact mobile contre le contact fixe. Elle doit donc dépasser la tension exercée par les ressorts de rappel de pôle qui retiennent le pôle mobile ouvert.

### Chargement et verrouillage de la grenade

Comme expliqué juste avant, la fermeture du disjoncteur demande une force mécanique importante pour déplacer le contact mobile et rétablir le courant. Cette force est fournie par la grenade, un ressort de puissance qui stocke l'énergie nécessaire à l'avance, pour la libérer lors d'un ordre de fermeture.

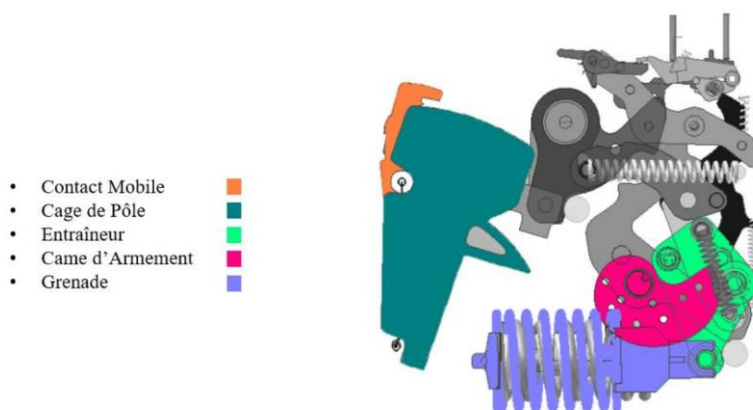


Figure 14 : Mécanisme interne du MasterPacT MTZ (ouvert, non chargé)

Dans la figure ci-dessus, le MTZ est en position ouverte, mais la grenade n'est pas armée (ou chargée). Donc, en cas d'ordre de fermeture, le disjoncteur n'est pas capable de fermer.

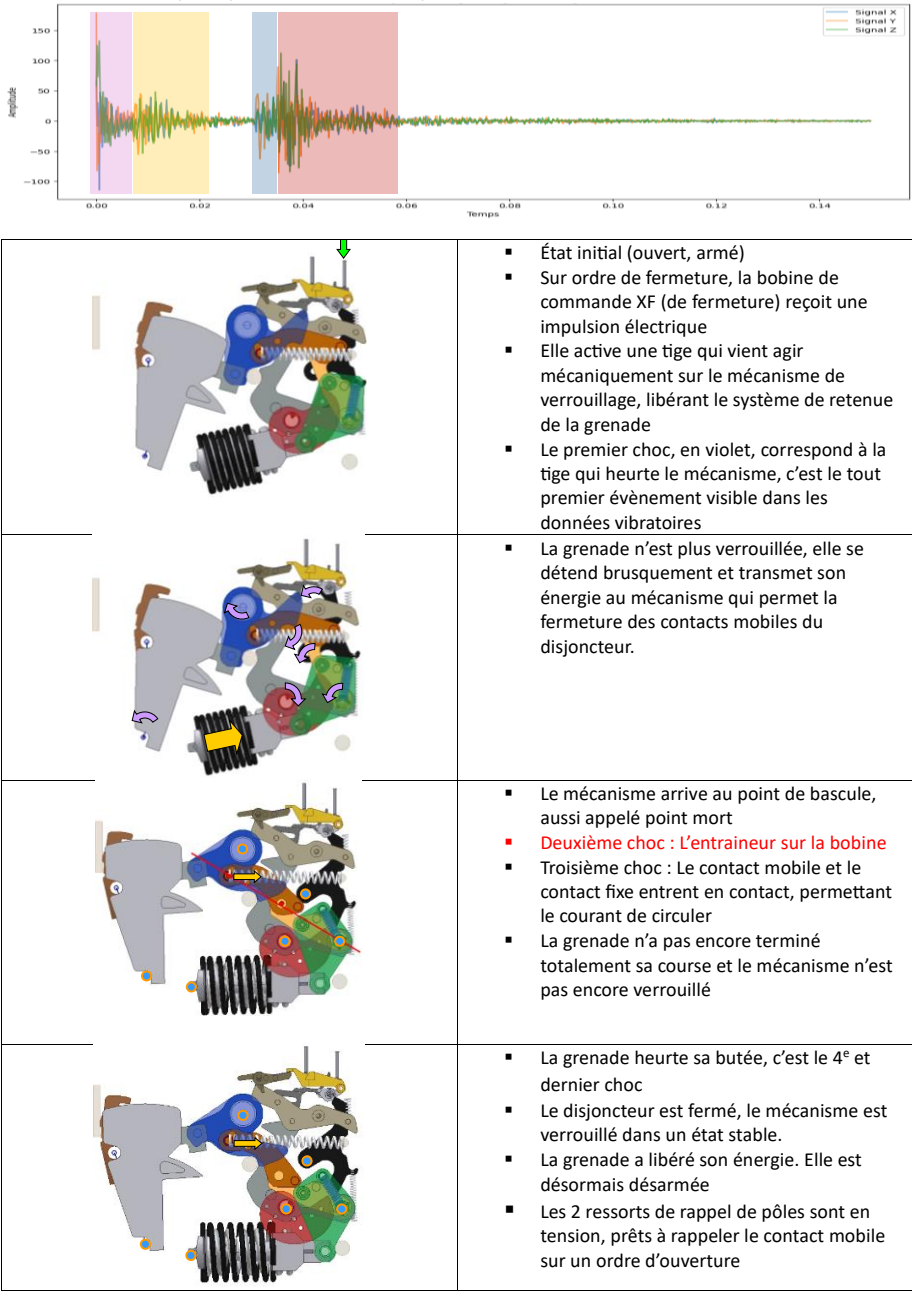
En effet, cette grenade doit être préalablement armée pour pouvoir fonctionner correctement. Cela peut se faire de deux manières : manuellement, grâce à un mécanisme d'armement (un levier), ou automatiquement, à l'aide d'un moteur intégré (MCH).

État initial (déchargé)		État final (chargé)
La came est actionnée (par le moteur ou manuellement) pour comprimer la grenade	Le mécanisme d'armement franchit un point de bascule (point mort)	Après avoir franchi le point mort, la grenade est verrouillée dans cette position, prête à libérer son énergie sur commande

Figure 15 : Chargement de la grenade

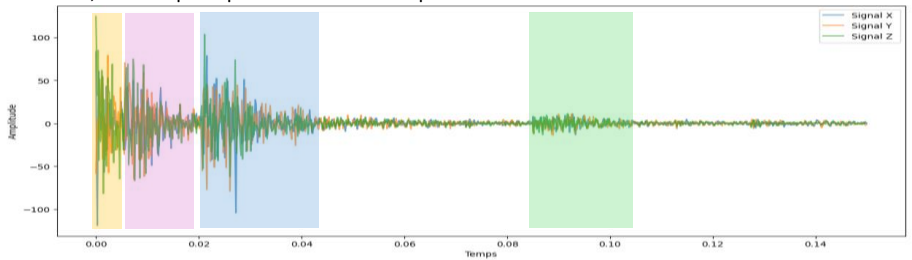
Annexe 3 : Fermeture - Mécanisme et signal vibratoire

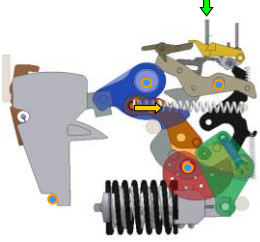

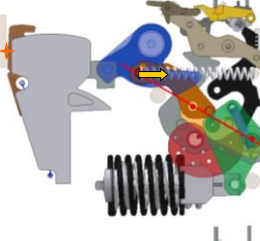
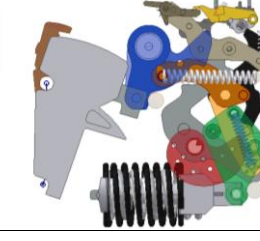
La figure ci-dessous représente les données brutes vibratoires obtenues typiquement lors d’une fermeture, avec les principaux chocs identifiés par des couleurs.



Annexe 4 : Ouverture – Mécanisme et signature vibratoire

La figure ci-dessous représente les données brutes vibratoires obtenues typiquement lors d’une ouverture, avec les principaux chocs identifiés par des couleurs.



	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ État initial (fermé, déchargé)</li><li>▪ Sur ordre d'ouverture, la bobine de commande MX (d'ouverture) reçoit une impulsion électrique</li><li>▪ Elle active une tige qui vient agir mécaniquement sur le mécanisme de verrouillage, libérant le système qui retient le disjoncteur fermé</li><li>▪ Comme pour la fermeture, le premier choc, en jaune, correspond à la tige qui heurte le mécanisme</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Le mécanisme se met en route, la position fermée est déverrouillée et les ressorts de rappel de pôles qui sont sous tension vont ramener le pôle mobile rapidement</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Le mécanisme arrive au « point mort », le point de bascule</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ État final (ouvert, déchargé)</li><li>▪ Troisième choc, l'arbre de Pôle heurte la butée</li><li>▪ Quatrième choc : l'arbre de pôle rebondit légèrement contre la butée : avec un choc secondaire de plus faible intensité</li></ul>



## Annexe 5 : L'énergie excédentaire

### Définition et origine

Comme expliqué dans l'annexe 2, le bon fonctionnement du disjoncteur MasterPacT MTZ repose sur une fermeture rapide et efficace, assurée par un ressort puissant appelé grenade. Ce ressort est préalablement chargé (armé) pour libérer une énergie mécanique suffisante au moment de la fermeture.

Pour qu'une fermeture soit correcte, il faut :

- Que la grenade surpasse la force exercée par les ressorts de rappel de pôle, qui s'opposent à la fermeture
- Et qu'elle compense les frottements mécaniques du système (axes, leviers, cames...).

On appelle énergie excédentaire, l'énergie qui reste après avoir franchi ce point de fermeture, après que la grenade atteint sa butée :

**Énergie excédentaire = Énergie libérée par la grenade – Énergie minimale nécessaire à une fermeture complète**

Elle représente une marge de sécurité qui garantit que la fermeture a bien eu lieu et que le contact mobile est solidement plaqué contre le contact fixe.

Au fil du temps et des cycles, deux phénomènes peuvent altérer la capacité de fermeture du disjoncteur, et conduire à une baisse de l'énergie excédentaire :

- La détente de la grenade, qui réduit progressivement l'énergie stockée, donc libérée
- L'accumulation de frottements dans les pièces mécaniques, qui augmente l'effort nécessaire à la fermeture

D'après la documentation technique du fabricant, cette énergie excédentaire doit être maintenue dans une plage optimale, comprise entre 6 joules et 12 joules.

Même si, en théorie, une très faible énergie excédentaire suffit à garantir la fermeture, cela ne laisse aucune marge de sécurité face aux éventuels aléas mécaniques. C'est pourquoi une énergie excédentaire inférieure à 6 J est considérée comme un risque, et justifie des actions de maintenance ou de remplacement du disjoncteur.

### Risques liés à une énergie excédentaire insuffisante

Lorsque l'énergie excédentaire devient insuffisante, le mécanisme de fermeture du disjoncteur peut ne pas parvenir à dépasser le point de bascule. Dans ce cas, le système s'arrête au niveau du point mort, mais la grenade n'atteint pas sa butée. Le contact mobile vient toucher le contact fixe, ce qui permet au courant de circuler, mais la position n'est pas verrouillée mécaniquement : le contact n'est pas fermement maintenu contre le contact fixe.

Cette situation est particulièrement dangereuse. En apparence, le disjoncteur semble fermé, mais en réalité le contact reste partiellement engagé. Cela peut générer des arcs électriques ou une surchauffe.

Un autre effet secondaire survient car la grenade n'atteint pas sa butée finale. Elle reste alors dans un état instable. Lors du réarmement, on observe systématiquement une ouverture involontaire du disjoncteur. En pratique sur le terrain, la grenade est réarmée automatiquement à l'aide d'un moteur, directement après une fermeture. Ce qui permet comme expliqué dans *l'intérêt du mécanisme OCO*, de pouvoir se refermer directement après une ouverture. Ce défaut provoque alors une ouverture involontaire directement après la fermeture, autrement dit, le disjoncteur devient inutilisable.

On comprend donc que l'énergie excédentaire est un indicateur référence de l'état de dégradation du mécanisme, car sa disparition marque la fin de vie du produit.

### Mesure de l'énergie excédentaire

Actuellement, la mesure de l'énergie excédentaire n'est possible que via un procédé invasif. Elle repose sur l'utilisation d'un appareil spécifique, qui simule une résistance contrôlée à la fermeture du disjoncteur. Le principe est le suivant :

1. On règle la résistance à une valeur arbitraire
2. On déclenche une fermeture
  - a. Si elle réussit, cela signifie que l'énergie excédentaire est supérieure à cette valeur
  - b. Si elle échoue, alors elle est inférieure
3. On répète l'opération avec différentes valeurs pour déterminer l'intervalle dans lequel se situe l'énergie excédentaire

Par exemple :

- On règle une résistance de 5 joules, la fermeture est réussie
- On essaye avec 8 joules, la fermeture échoue, on sait donc que l'énergie excédentaire se situe entre 5 et 8J
- Si l'on veut une estimation plus précise, on répète l'opération avec des valeurs différentes jusqu'à obtenir l'intervalle souhaité.

La mesure est donc extrêmement contraignante, car elle nécessite un démontage partiel du disjoncteur, et l'intervention d'un expert qualifié. De plus, il faut recommencer la manœuvre à chaque cycle dont on veut connaître l'énergie excédentaire, ce qui nécessite l'interruption temporaire de son fonctionnement.

Questions :

Pb de la fin dans la heatmap et les données brutes en général, est ce que j'explique ce que c'est et pourquoi on l'enlève ou j'en parle tt simplement pas comme si ça n'existait pas ?