



Rapport de stage

NINA PERRET – EI 24

Stage d'analyse du milieu industriel

06/01/2025 – 31/01/2025

Stage de réalisation : Alimentation et Structuration d'un code Python - Etude des tassements
d'ouvrages nucléaires

Tuteur de stage : BAPTISTE PELLETIER, ingénieur géotechnicien

Responsables académiques : THIBAUT METAILLER, JEAN-PHILIPPE TOPPIA

Remerciements

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à M. Baptiste Pelletier, ingénieur géotechnicien chez EDF, pour son accompagnement tout au long de mon stage. Baptiste Pelletier a fait preuve d'une grande pédagogie. Il a pris le temps de m'expliquer les concepts fondamentaux propres à la géotechnique avec bienveillance et clarté. Sa disponibilité et son écoute m'ont permis de m'approprier ces notions et de mener à bien la mission qui m'avait été confiée.

Mes remerciements vont également à Mme Nanthilde Reviron, ingénieure géotechnicienne et docteure en génie civil, pour la pertinence de ses conseils.

Je tiens également à exprimer ma gratitude la plus sincère à M. Simon Depinois, qui m'a offert la possibilité de réaliser mon stage au sein de l'équipe Géotechnique¹ dont il est le manager.

De surcroît, je remercie l'ensemble de l'équipe Géotechnique pour leur accueil irréprochable et leur volonté de partager leur expertise. L'ensemble des membres de l'équipe ont contribué à faire de ce stage une expérience enrichissante, d'un point de vue technique comme humain.

Enfin, j'adresse mes remerciements à l'intégralité des collaborateurs EDF du site d'Aix-en-Provence (le département TEGG) pour leur bienveillance et leur accueil.

¹ Chez EDF, TEGG désigne le département Techniques de réalisation et Essais de Génie civil et Géosciences. Il est composé de 7 équipes techniques : géologie, géotechnique, hydrogéologie, aléa sismique, matériaux organiques, cimentaires, métalliques.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Remerciements | 2 |
| Introduction | 5 |
| I. Présentation d'EDF et de son environnement | 6 |
| I.1. Historique | 6 |
| I.2. EDF aujourd'hui | 7 |
| I.2.1. Organisation | 7 |
| I.2.2. Chiffres clés | 10 |
| I.3. Marché et stratégies..... | 11 |
| I.3.1. Objectifs | 11 |
| I.3.2. Valeurs | 11 |
| I.3.3. Matrice SWOT | 12 |
| I.3.4. Organisation managériale au sein de l'équipe TEGG | 13 |
| II. Déroulement et accomplissement de la mission | 13 |
| II.1. Enjeux | 13 |
| II.1.1. Enjeux généraux | 13 |
| II.1.2. Etude de trois paramètres | 14 |
| II.1.3. Automatiser le traitement des données : un objectif crucial de la mission | 14 |
| II.2. Organisation générale du code | 15 |
| II.3. Post-traitement | 18 |
| II.4. Prétraitement | 19 |
| II.4.1. Données brutes..... | 19 |
| II.4.2. Données factuelles et coefficients..... | 21 |
| II.5. Retour d'expérience | 22 |
| II.5.1. Difficultés rencontrées | 22 |
| II.5.2. Solutions apportées et apprentissages | 23 |

| | |
|--|-----------|
| III. Comment l'humain peut-il agir dans un environnement où l'erreur n'a pas sa place ? | 25 |
| III.1. Contextualisation | 25 |
| III.2. Vers risque zéro | 26 |
| III.2.1. Protocoles et procédures pour cadrer l'action humaine | 26 |
| III.2.2. Automatisation et contrôle : déléguer aux machines | 27 |
| III.2.3. Ancrer la rigueur sur le long terme | 28 |
| III.3. Existence perpétuelle de l'erreur | 29 |
| III.3.1. L'erreur humaine, une variable inévitable | 29 |
| III.3.2. Failles persistantes malgré des systèmes réputés infallibles | 30 |
| III.3.3. Apprendre de l'échec : vers une résilience active | 30 |
| III.4. Le rôle de l'ingénieur | 32 |
| III.4.1. Anticiper, modéliser, sécuriser | 32 |
| III.4.2. L'éthique de l'ingénieur face à l'incertitude | 32 |
| Conclusion | 35 |
| Annexes | 36 |
| Glossaire | 44 |
| Bibliographie | 46 |

Introduction

Dans le cadre de mes études d'ingénieur au sein de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, j'ai été amenée à effectuer un stage d'un mois en janvier 2025. L'objectif principal de ce stage était d'être immergée dans le monde professionnel.

Je recherchais un stage de réalisation d'un projet concret, d'une durée d'un mois. En cohérence avec mes ambitions professionnelles et mes compétences, je cherchais un stage axé sur de la programmation en langage Python². J'ai participé à des forums entreprises, postulé à différentes annonces en ligne et effectué plusieurs entretiens téléphoniques. Cependant, c'est le stage proposé par M. Baptiste Pelletier, ingénieur géotechnicien chez EDF, qui a retenu mon attention. En effet, il s'agissait d'une mission captivante et réalisable en un mois. De nombreuses entreprises proposent des missions sur plusieurs mois, ce qui n'était pas compatible avec ce stage de première année. Le projet consistait à alimenter et à structurer un code Python visant à étudier le tassement des sols sous plusieurs centrales nucléaires françaises.

L'entreprise EDF³ détient et exploite l'intégralité des infrastructures nucléaires françaises. EDF gère l'un des plus vastes parcs nucléaires au monde. L'entreprise pilote la conception et la construction des installations nucléaires. Elle assure également leur exploitation et leur maintenance, dans le respect des exigences de sûreté.

Ce rapport a pour but de retranscrire une analyse de mon expérience en tant que stagiaire chez EDF. Dans un premier temps, je présenterai l'entreprise. Je retracerai d'abord son évolution historique. Puis je détaillerai son fonctionnement actuel, tant sous un angle factuel que sur le plan stratégique. Dans un second temps, je rendrai compte du travail que j'ai effectué. J'explicitai le déroulement des différentes tâches composant la mission qui m'a été confiée. J'apporterai continuellement un regard réflexif sur mon expérience, en prenant du recul sur cette dernière. Enfin, j'aborderai un enjeu essentiel dans un domaine tel que celui du nucléaire, en m'interrogeant sur la question suivante : Comment l'humain peut-il agir dans un environnement où l'erreur n'a pas sa place ?

² Python : langage de programmation polyvalent, largement utilisé en data science, web et automatisation.

³ L'acronyme EDF signifie « Electricité de France ».

I. Présentation d'EDF et de son environnement

I.1. Historique

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, la création d'un service public unique pour prendre en charge la production, le transport et la distribution d'électricité en France devient une nécessité. EDF est créée en 1946, par décision gouvernementale à l'initiative de Marcel Paul. À sa création, EDF est un établissement public industriel et commercial (EPIC).

Dans les années 1950, soutenue financièrement par le Plan Marshall, EDF engage d'importants efforts de reconstruction et de construction d'infrastructures de production et de transport d'électricité. La production repose alors principalement sur des centrales thermiques, tandis que les premiers grands barrages hydroélectriques sont inaugurés, notamment :

- Barrage de Tignes (Savoie) en 1953
- Barrage de Serre-Ponçon (Hautes-Alpes) en 1959
- Barrage de Roselend (Savoie) en 1960

Durant les années 1960, la forte croissance économique s'accompagne d'une augmentation de la consommation d'électricité, en raison de l'équipement massif des foyers en appareils électroménagers. C'est dans ce contexte qu'EDF commence à développer le nucléaire. En 1962, son premier réacteur nucléaire, EDF1, surnommé « La Boule », diverge⁴ à Chinon (Indre-et-Loire). Il s'agit d'un réacteur uranium naturel graphite gaz (UNGG), une technologie rapidement abandonnée en France au profit d'un autre modèle acheté aux États-Unis.

Le choc pétrolier de 1973 marque un tournant stratégique : pour assurer son indépendance énergétique, la France décide de miser sur le nucléaire. Cette même année, le Premier ministre Pierre Messmer annonce la construction de 13 centrales nucléaires fonctionnant à l'uranium enrichi. La première d'entre elles, Fessenheim (Alsace), est mise en service en 1977 et produira de l'électricité jusqu'en 2020.

En parallèle de ce programme nucléaire ambitieux, EDF poursuit la modernisation du réseau électrique pour répondre aux nouveaux besoins. L'entreprise diversifie aussi ses sources de production d'électricité avec :

⁴ Diverger : moment où un réacteur est mis en service pour la première fois.

- La première centrale solaire française, inaugurée en 1983 à Thémis (Pyrénées-Orientales)
- Le développement international, avec la construction en 1984 d'une centrale nucléaire à Daya Bay (Chine)

Les années 1990 et 2000 marquent l'ouverture du marché de l'énergie et le début d'une expansion mondiale d'EDF. En 2005, l'entreprise devient une société anonyme (SA) et ouvre son capital en bourse, bien que l'État français reste l'actionnaire majoritaire. EDF renforce alors sa présence sur les marchés internationaux en participant à divers projets énergétiques d'envergure :

- Projets EPR⁵ en France (Flamanville) et au Royaume-Uni (Hinkley Point, Sizewell)
- Centrale hydroélectrique Nam Theun 2 (Laos)
- Nouveau nucléaire en France, programme EPR2 (Gravelines, Penly, Bugey)

En 2023, EDF est renationalisée à 100 % par l'État français, réaffirmant son rôle central dans la stratégie énergétique nationale et la transition vers les énergies décarbonées.

En 2024, le réacteur EPR Flamanville 3 (Normandie) a été mis en service. Il s'agit du réacteur le plus récemment couplé au réseau électrique national français. Avec une puissance de 1650 MW, il permet de subvenir aux besoins d'environ 3 millions de foyers tout en s'inscrivant dans le cadre de la production d'énergie bas-carbone.

Aujourd'hui, on dénombre 56 réacteurs nucléaires en France, faisant d'EDF le premier exploitant nucléaire mondial. L'entreprise est fortement présente à l'international, à travers divers projets nucléaires à l'échelle mondiale [1].

I.2. EDF aujourd'hui

I.2.1. Organisation

EDF est dirigée par Luc Rémont, nommé Président-Directeur Général en 2022 (en cours de remplacement mi-2025 par Bernard Fontana). L'entreprise est organisée autour de plusieurs pôles stratégiques. Ces derniers couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur de l'électricité.

- Production d'électricité : nucléaire, hydraulique, énergies renouvelables

⁵ EPR : L'acronyme signifie "European Pressurized Reactor". Il s'agit d'un réacteur nucléaire de troisième génération, conçu pour améliorer la sûreté, les performances et la durée de vie des centrales.

- Transport et distribution : Après sa production, l'énergie électrique est d'abord acheminée sur de grandes distances à haute tension, afin de limiter les pertes dans les câbles. Il s'agit de la phase de transport. En France, le transport est effectué par la filiale RTE⁶. Ensuite, l'acheminement aux clients s'effectue à basse tension. Il s'agit des 230 V qu'on retrouve sur les prises électriques dans la vie quotidienne. C'est ce qu'on appelle la distribution. Elle est assurée par la filiale Enedis.
- Fourniture d'énergie : commercialisation d'énergie électrique auprès des particuliers, entreprises et collectivités.
- Services énergétiques : développement de solutions pour optimiser l'efficacité énergétique, dans le cadre de la transition écologique. Par exemple, la filiale Dalkia est spécialisée dans l'optimisation énergétique des bâtiments industriels et tertiaires.

⁶ RTE : Réseau de Transport d'Electricité.



Figure 1 : Organisation du Groupe EDF au 01/04/2024 et place de l'équipe dans laquelle j'ai réalisé mon stage dans l'organigramme

J'ai effectué mon stage au sein de l'équipe Géotechnique⁷, sur le site d'Aix-en-Provence (département TEGG). Le département TEGG appartient à la direction technique d'EDF. TEGG conduit des essais en laboratoire en géologie, en géotechnique et sur les matériaux de génie civil. De plus, le service TEGG participe à des études visant à assurer la maintenance et la sûreté des installations, en particulier sur les sites nucléaires. Il collabore avec d'autres entités d'EDF comme la DTG⁸ et la DIPDE⁹. Le département prend part aux projets d'EDF en France comme à l'international. Son principal secteur d'intervention est le nucléaire, bien que d'autres secteurs tels que l'hydraulique fassent également partie de son domaine d'expertise.

I.2.2. Chiffres clés

Données économiques [2] :

- Chiffre d'affaires : 140 milliards d'euros en 2023
- Effectif : EDF SA compte environ 180 000 employés dans le monde
- Nombre de clients : plus de 40,9 millions dans le monde
- Capacité installée : 117,3 GW
- Production d'électricité : 467,6 TWh
- Budget R&D : 706 millions d'euros
- Résultat net¹⁰ : 10 milliards d'euros en 2023, -18 milliards d'euros en 2022 → Ce redressement remarquable est dû à un contexte économique global plus favorable, contrastant avec les crises techniques et financières ayant impacté l'année 2022.

Données environnementales [2] :

- Production sans CO₂ : 434 TWh en 2023. Correspond à 93% de la production électrique totale française.
- Intensité carbone moyenne : 37g CO₂/kWh → Diminution de 26% par rapport à 2022. Il s'agit de l'une des plus faibles à l'échelle mondiale.
- Installation de pompes à chaleur : en hausse de 30%

⁷ TEGG : Techniques de réalisation et Essais de Génie civil et Géosciences.

⁸ DTG : Direction Technique Générale d'EDF. Voir glossaire pour les détails.

⁹ DIPDE : Direction Ingénierie du Parc et De l'Environnement d'EDF. Voir glossaire pour les détails.

¹⁰ Résultat net = produits – charges. Voir glossaire pour les détails.

- Installation de panneaux photovoltaïques : en hausse de 60%
- Production éolienne : en 2023 → 50,8 TWh : record historique
- Production solaire : en 2023 → 21,6 TWh : record historique

Données sociales [3, 4] :

- Part de femmes dans les effectifs : 29,9% → Objectif de 40% d'ici 2030
- Part de femmes parmi les cadres : 30,9%
- Nombre de salariés en situation de handicap : environ 6000 en France
- Index de l'égalité professionnelle : 95/100 en 2024 → Reflet de l'engagement du groupe EDF en faveur de l'égalité entre les genres

I.3. Marché et stratégies

I.3.1. Objectifs

Les objectifs d'EDF sont axés sur une production d'énergie électrique alliant performance et durabilité.

- Réduction de l'impact environnemental dans le cadre de la transition énergétique : production d'énergie bas-carbone. Quantitativement, le groupe EDF vise à diminuer ses émissions de gaz à effet de serre de 50% d'ici 2030. Cette démarche contribue à l'objectif de neutralité carbone fixé pour 2050.
- Projets nucléaires, en France et à l'international, contribuant à la production d'une énergie décarbonée.
- Diversifier la production énergétique. L'accent est mis sur les énergies renouvelables, comme les panneaux photovoltaïques et l'hydrogène bas-carbone.

I.3.2. Valeurs

Depuis 2013, la *Charte éthique Groupe* [5] d'EDF se décline autour de trois valeurs : respect, solidarité et responsabilité.

- Respect :

D'une part, cette valeur se traduit par une volonté de minimiser l'impact environnemental, en respectant les principes du développement durable. D'autre part, EDF s'engage activement à garantir les droits des salariés et à prévenir toute forme de discrimination ou de harcèlement.

- Solidarité :

Le groupe EDF s'implique en faveur du collectif, en favorisant la cohésion sociale et la transmission intergénérationnelle des savoirs.

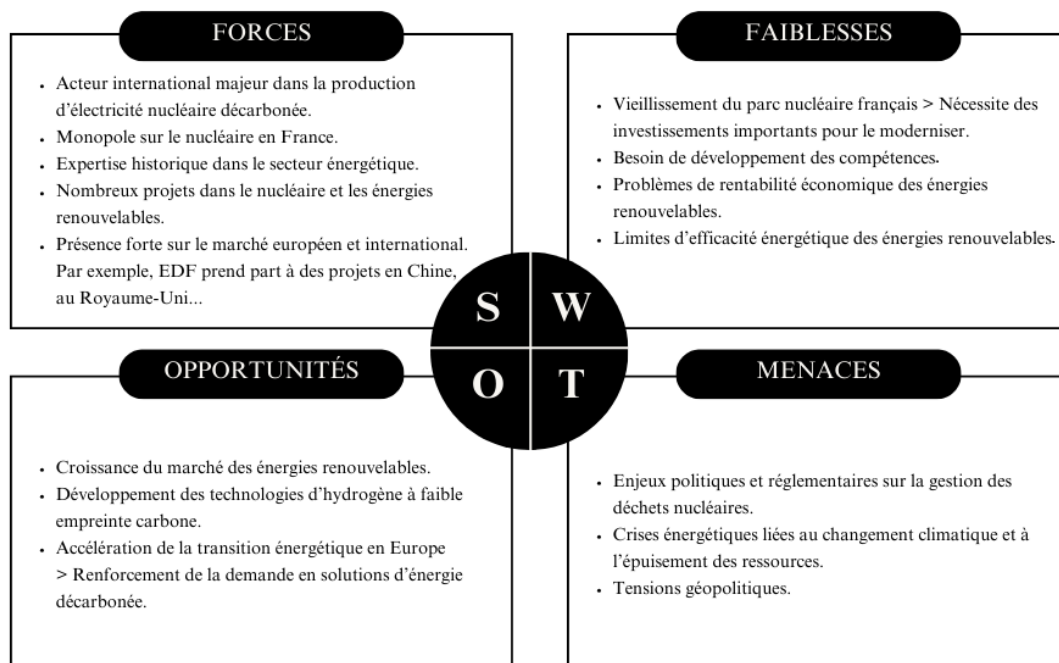
- Responsabilité :

EDF s'engage à exercer ses activités éthiquement, en assurant la sûreté nucléaire pour les employés comme pour les citoyens. L'entreprise prône la transparence et affirme sa volonté de lutter contre la corruption. Elle veille à protéger son patrimoine et à traiter de manière responsable les informations sensibles.

Depuis 2001, EDF adhère au pacte mondial des Nations Unies [6]. L'entreprise « s'est engagée à respecter dix principes portant sur les droits de l'homme, le travail et l'environnement et, depuis 2004, la lutte contre la corruption [5] ».

Le groupe porte 16 engagements RSE¹¹ organisés autour de la neutralité carbone, de la préservation des ressources de la planète, de la solidarité et du développement responsable.

I.3.3. Matrice SWOT



¹¹ RSE : L'acronyme signifie « Responsabilité Sociétale des Entreprises ». Voir glossaire pour les détails.

I.3.4. Organisation managériale au sein de l'équipe Géotechnique

Le mode managérial au sein de l'équipe est principalement orienté sur les objectifs. Autrement dit, l'autonomie des collaborateurs est encouragée du moment que les résultats attendus sont atteints. Ce fonctionnement conduit à un style managérial majoritairement déléгатif [7]. Ainsi, le manager cadre les finalités, mais laisse aux collaborateurs la liberté quant aux moyens à déployer pour y parvenir.

Toutefois, les normes internes et les exigences de sûreté imposent parfois un cadre plus rigide. Dans ce cas, le mode managérial adopté est davantage centré sur les processus que sur les objectifs. Il en résulte un style managérial plus directif [7] où le respect des procédures prime sur l'autonomie individuelle. En effet, dans le domaine du nucléaire, cette rigueur est indispensable. Sans ces règles strictes, la sécurité des collaborateurs comme des citoyens pourrait être mise en danger.

Cette première partie a permis d'établir de dresser un état des lieux du fonctionnement, de l'organisation et des stratégies d'EDF. La seconde partie détaillera la mission qui m'a été confiée. J'en présenterai le déroulement et j'adopterai un point de vue réflexif sur mon expérience de stage chez EDF.

II. Déroulement et accomplissement de la mission

II.1.Enjeux

II.1.1. Enjeux généraux

Ma mission portait sur l'étude du tassement des sols par les centrales nucléaires en France. Il s'agit d'un enjeu crucial pour la sécurité nucléaire. En effet, une centrale nucléaire est construite sur plusieurs bâtiments¹² reliés entre eux. Tout particulièrement, les bâtiments combustible (BK) et réacteur (BR) sont connectés par des tuyaux. Or, s'ils tassent à des rythmes drastiquement différents, ce tuyau pourrait être endommagé, voire rompu. Ces différences de vitesses de tassement sont loin d'être négligeables au vu des écarts relatifs de masse entre les bâtiments et de l'hétérogénéité des terrains de fondation.

¹² Voir l'annexe 1 détaillant l'architecture d'une centrale nucléaire.

II.1.2. Etude de trois paramètres

Le tassement¹³ est le paramètre le plus trivial. Il caractérise l'enfoncement vertical du bâtiment dans le sol. Il est exprimé en *mm*. Il est préférable de raisonner avec la notion de tassement relatif, c'est-à-dire la mesure du tassement du sol par rapport à son niveau initial – i.e. avant la construction de la centrale. Les mires permettent notamment de mesurer la côte *z* moyenne d'un bâtiment par rapport à cette origine. Le tassement moyen du sol au niveau du bâtiment en est ainsi déduit.

Le basculement¹⁴ est une grandeur en *mm/m*. Il correspond à l'inclinaison de ce qu'on appelle le « plan de basculement » du bâtiment – i.e. le plan confondu avec le plancher du bâtiment. Les mires sont disposées à différents endroits au sein du bâtiment. Chacune possède trois coordonnées *x*, *y*, *z*. Il est ainsi possible de déterminer l'équation de ce plan, puis par conséquent d'évaluer cette inclinaison.

Enfin, le gisement¹⁵ est fondamentalement un angle, exprimé en *grades*. Tout comme le degré, le grade est une unité d'angle. 400 grades équivalent à 360°. Il s'agit de l'unité officielle de la topographie en France. Le gisement quantifie la rotation du bâtiment sur lui-même.

II.1.3. Automatiser le traitement des données : un objectif crucial de la mission

Ces paramètres varient surtout lors de la construction de la centrale nucléaire. Effectivement, le sol se compacte sous l'effet de la masse des bâtiments et tasse donc moins vite par la suite. Toutefois, les bâtiments sont extrêmement lourds. Leur masse peut atteindre jusqu'à 40 000 tonnes. Par conséquent, le tassement tridimensionnel des sols continue d'évoluer lors de l'exploitation du site nucléaire. D'où la nécessité d'effectuer des extrapolations sur toute la durée de vie de l'édifice. Dans certains cas, les ouvrages continuent de tasser tout au long de leur vie (phénomène de fluage des sols).

La majorité du parc nucléaire français a été construite aux alentours des années 1980. Ainsi, EDF possède déjà un grand nombre de données. Pour davantage de lisibilité, il est commun de réaliser des graphiques, en interpolant les valeurs pour un même ouvrage à une date de mesure donnée par un plan aux moindres carrés. C'est à partir de ces interpolations que sont effectuées les extrapolations temporelles. L'ensemble permet d'analyser l'évolution du tassement

¹³ Une vision schématique est proposée en annexe 10.

¹⁴ Une vision schématique est proposée en annexe 10.

¹⁵ Une vision schématique est proposée en annexe 10.

tridimensionnel de chaque bâtiment de la centrale nucléaire, individuellement tout comme relativement aux autres bâtiments.

Jusqu'alors, le tracé de tels graphiques était réalisé manuellement sur Excel. Il s'agissait d'une tâche laborieuse et longue à réaliser.

Le langage de programmation Python permet d'automatiser de nombreux processus. Par exemple, on peut utiliser Python pour renommer automatiquement tous les fichiers d'un dossier sur un ordinateur. Cela évite de le faire manuellement et offre un gain de temps considérable, surtout s'il s'agit de renommer un grand nombre de fichiers.

De même, Python peut être utilisé pour automatiser le traitement des données relatives à l'étude du tassement d'ouvrages nucléaires.

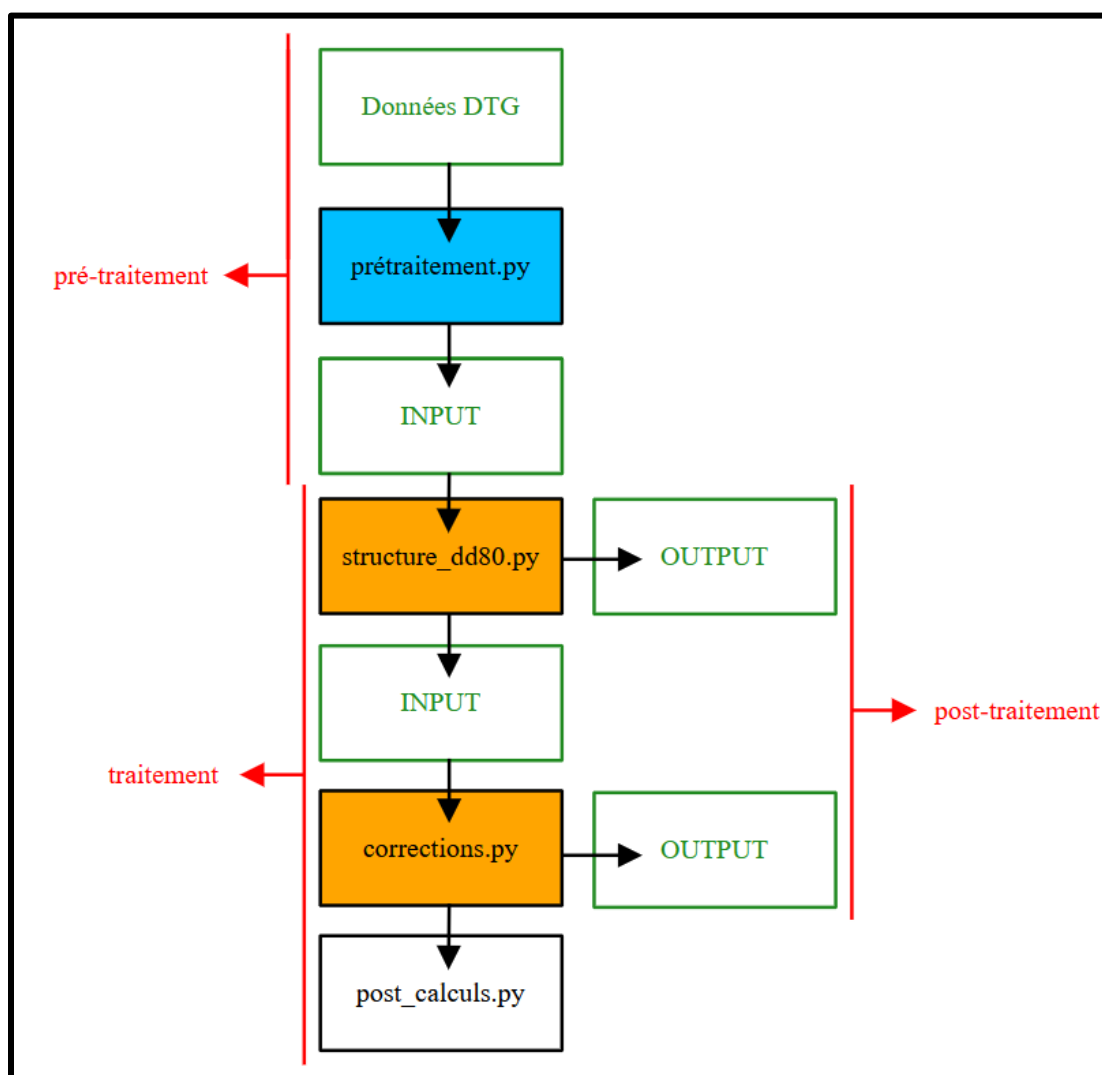
Ma mission était d'alimenter un code Python développé par mon tuteur de stage. Elle s'est organisée en deux parties. D'une part, j'ai effectué le post-traitement des données. Cette partie consistait à générer des graphes et des tableaux analysables. D'autre part, j'ai travaillé sur l'automatisation du prétraitement des données brutes. Cette seconde partie visait à uniformiser et à organiser automatiquement les données brutes. L'objectif était de les rendre directement exploitables par le code de traitement développé par mon tuteur de stage, sans nécessiter de prétraitement manuel en amont.

II.2.Organisation générale du code

Le programme Python total était divisé en trois parties :

- Prétraitement des données brutes.
- Traitement : Il s'agit du cœur du code. Cette partie définit toutes les structures nécessaires, puis utilise les fichiers de données brutes pour exploiter ces dernières.
- Post-traitement : tracé de graphes et génération de tableaux interprétables, à partir des données traitées par le code de traitement.

Le fonctionnement général du code est détaillé dans l'organigramme ci-dessous.



Légende de la figure 2 :



Figure 2 : organigramme détaillant l'organisation du code Python.

Ainsi, le programme comprend au total 4 codes (prétraitement.py, structure_dd80.py, corrections.py, post_calculs.py) et fait intervenir 3 dossiers de fichiers (Données DTG¹⁶ – 2024, INPUT, OUTPUT).

¹⁶ DTG : Direction Technique Générale d'EDF. Voir glossaire (1^{er} définition) pour les détails.

| | | |
|--------------------|------------------|---------------------|
| Données DTG - 2024 | 30/01/2025 22:10 | Dossier de fichiers |
| INPUT | 30/01/2025 22:10 | Dossier de fichiers |
| OUTPUT | 30/01/2025 22:09 | Dossier de fichiers |

Figure 3 : Dossiers de fichiers intervenant dans le programme Python.

| Dossier | Fichiers |
|--------------------|---|
| Données DTG - 2024 | Données brutes (mesures de la DTG) : Plan de basculement.csv |
| INPUT | Données prétraitées : coordonnes_auto_{nom du site nucléaire}.csv ¹⁷ + Données factuelles (dates, coefficients) : cnpe_dd80.xlsx ¹⁸ |
| OUTPUT | Graphes et tableaux |

La première phase de ce stage a été consacrée à la prise en main des scripts Python élaborés par mon tuteur de stage. Cette étape a été la plus complexe à appréhender. En effet, j’ai dû m’approprier des notions techniques, non seulement en programmation, mais surtout en géotechnique – un domaine qui m’était jusqu’alors inconnu.

Les fichiers .csv contenant les mesures brutes fournies par la DTG avaient été prétraités manuellement. Plusieurs opérations de prétraitement avaient été effectuées, telles que la concaténation des fichiers et l’uniformisation des libellés. Cinq sites nucléaires sur les dix-huit à analyser avaient été prétraités ainsi. Une première partie du code de traitement était dédiée à l’extraction d’un grand nombre de données, à partir de ces fichiers prétraités. Une autre permettait d’ajuster les données traitées. Cette seconde partie visait à préparer le post-traitement, notamment en vue de la génération des graphes. Par exemple, elle supprimait les données aberrantes.

La dernière fonction principale de ces programmes était de tracer des graphiques. D’une part les données corrigées étaient interpolées¹⁹ entre la date d’origine et la date de mesure la

¹⁷ .csv : extension de fichier (comme .pdf, .docx... etc.). Voir glossaire pour les détails.

¹⁸ .xlsx : extension de fichier. Désigne un fichier Excel.

¹⁹ Glossaire.

plus récente. D'autre part, des extrapolations²⁰ logarithmiques à 80 ans après la date d'origine avaient été effectuées afin de prévoir le comportement futur des infrastructures.

II.3. Post-traitement

Cependant, il était nécessaire de tracer des graphes supplémentaires pour s'adapter aux demandes de la DIPDE²¹. En effet, les graphiques générés jusqu'à présent étaient organisés bâtiment par bâtiment²². Ils regroupaient toutes les données relatives au bâtiment étudié sur la même page, avec un système d'axes secondaires²³. La DIPDE souhaitait organiser les graphiques différemment pour davantage de lisibilité. La première partie de ma mission consistait à répondre à cette requête en traçant des graphes non pas bâtiment par bâtiment, mais catégorie par catégorie²⁴. C'est-à-dire que pour chaque centrale nucléaire, j'ai tracé les trois graphiques suivants : évolution temporelle du tassement relatif moyen, du basculement et du gisement. Pour chacun de ces trois graphes, les courbes représentatives de l'évolution du paramètre de tous les bâtiments de la tranche apparaissent. D'une part, les valeurs numériques ont le même ordre de grandeur pour tous les bâtiments de la tranche, ce qui conduit à un graphique lisible. D'autre part, une telle organisation permet de comparer l'évolution de chaque paramètre entre les différents bâtiments.

Des tableaux étaient également attendus. J'ai commencé par générer des tableaux comparatifs²⁵. Ce premier type de tableaux affichait des valeurs de tassements, de basculements et de gisements pour tous les bâtiments de la centrale. D'une part les valeurs mesurées à la date d'origine, et d'autre part des valeurs extrapolées à 80 ans après cette date d'origine. L'objectif est ici de d'évaluer l'évolution des paramètres clés et de comparer les valeurs numériques extrapolées avec celles d'origine. Dans un deuxième temps, j'ai généré des tableaux des valeurs interpolées pour le tracé des graphes précédents²⁶. Le but de ces derniers est d'avoir accès aux valeurs utilisées pour tracer les graphes. Ces tableaux n'ont pas vocation à être interprétés directement, mais plutôt à servir d'annexes. Ils peuvent être utiles si on recherche une valeur à une date précise par exemple.

II.4. Prétraitement

²⁰ Glossaire.

²¹ DIPDE : Direction Ingénierie du Parc et De l'Environnement d'EDF. Voir glossaire (2^e définition) pour les détails.

²² Voir l'annexe 1 détaillant l'architecture d'une centrale nucléaire.

²³ Voir annexe 2.

²⁴ « Catégorie » sous-entend distinguer les trois paramètres : tassement, basculement et gisement. Voir annexe 3.

²⁵ Voir annexe 4.

²⁶ Voir annexe 5.

II.4.1. Données brutes

La deuxième partie de ma mission portait sur l'automatisation du prétraitement des données brutes. En effet, cette étape de prétraitement avait été jusqu'alors effectuée manuellement. Or, prétraiter manuellement n'est pas optimal. C'est une source potentielle d'erreurs et d'oublis, en plus d'être particulièrement chronophage. De plus, si un nouveau fichier est renvoyé, il faut tout recommencer. Cela peut notamment se produire lorsque des données sont corrigées ou ajoutées. Ainsi, l'utilisation de Python pour automatiser le prétraitement de ces fichiers avait pour but d'optimiser à la fois temps et efficacité.

J'ai réalisé le code de prétraitement dans un script indépendant. Ce dernier lit les fichiers de données brutes envoyés par la DTG dans le dossier intitulé « Données DTG-2024 ». Il génère des fichiers de données prétraités dans le dossier INPUT. Ces fichiers prétraités sont ensuite lus par les codes de traitement.

En premier lieu, le code lit les fichiers de données brutes de la DTG. On compte deux types de fichiers bruts pour chaque centrale nucléaire. D'une part, les fichiers de mesures des tassements (côte z)²⁷. D'autre part, les fichiers dénommés « plans de basculement²⁸ ». Il s'agit de fichiers de coordonnées. En effet, ils contiennent les coordonnées x et y des mires²⁹. C'est avec ces données en deux dimensions, on peut calculer les deux autres paramètres : le basculement et le gisement. Toutefois, il existe plusieurs fichiers de ce second type. En effet, il y a deux fichiers de données brutes par tranche. Le premier fichier est relatif à la majorité des bâtiments tandis que le deuxième isole le bâtiment principal : le bâtiment réacteur (BR). Sachant que dans une centrale, il y a en général entre 2 et 6 tranches, cela conduit à un certain nombre de fichiers.

La première étape de mon code de prétraitement a été de concaténer les fichiers de coordonnées en un seul et même fichier. Ainsi, les nombreux fichiers bruts du dossier Données DTG-2024 deviennent deux fichiers de données prétraitées stockés dans le dossier INPUT³⁰. Le premier fichier recense les mesures brutes de tassements relatifs et le deuxième les coordonnées des mires. L'ensemble permet d'identifier les positions de toutes les mires dans un repère tridimensionnel.

²⁷ Voir annexe 6.

²⁸ Voir annexe 7.

²⁹ Capteurs.

³⁰ Se référer à la partie II.2 pour visualiser d'où proviennent et où sont stockés les différents fichiers.






| | | | |
|--|------------------|-----------------------|--------|
|  PY1-2.csv | 27/01/2025 16:26 | Fichier CSV Micros... | 778 Ko |
|  PY1A-plan de basculement.csv | 27/01/2025 16:26 | Fichier CSV Micros... | 19 Ko |
|  PY1E-plan de basculement.csv | 27/01/2025 16:26 | Fichier CSV Micros... | 3 Ko |
|  PY2A-plan de basculement.csv | 27/01/2025 16:26 | Fichier CSV Micros... | 17 Ko |
|  PY2E-plan de basculement.csv | 27/01/2025 16:26 | Fichier CSV Micros... | 3 Ko |

Figure 4 : aperçu du contenu du dossier Données DTG-2024, pour le site de [Supprimé pour des raisons de confidentialité]³¹.

| | | | |
|--|------------------|-----------------------|--------|
|  coordonnees_auto_Penly_1-2.csv | 28/01/2025 15:42 | Fichier CSV Micros... | 39 Ko |
|  PY1-2.csv | 28/01/2025 15:42 | Fichier CSV Micros... | 357 Ko |

Figure 5 : aperçu du contenu du dossier INPUT, pour le site de [Supprimé pour des raisons de confidentialité]³².

Dans ces deux fichiers, chaque mire (de chaque bâtiment et de chaque tranche) est dénommée par un libellé. Il est fréquent qu'ils ne soient pas au bon format. L'étape suivante de mon code de prétraitement consistait donc à uniformiser les libellés au format suivant.

| | | | | | | |
|-----------|------------|------------------|-------|------|-----------------|---------------|
| Format : | {BIGRAMME} | {numéro_tranche} | {A/E} | Plan | {code_bâtiment} | {numéro mire} |
| Exemple : | SL | 1A | | Plan | BK | 001 |

Figure 6 : format normalisé des libellés.

Cette étape a été essentielle. En effet, le code de traitement n'est pas fonctionnel sans ce type de libellés formatés. Cette étape a été fastidieuse car il a fallu identifier tous les libellés non conformes, pour les deux fichiers prétraités. Par exemple, j'ai rectifié des libellés affectés à la mauvaise tranche, des noms de bâtiments en minuscules au lieu d'être en majuscules, ou encore des libellés du type SL1E Plan BR Repère 01 au lieu de SL1E Plan BR 001.

³¹ Carte des centrales nucléaires françaises : voir annexe 8.

³² Carte des centrales nucléaires françaises : voir annexe 8.

³³ Bigramme : chaque site nucléaire est identifié par deux lettres (bigramme).

II.4.2. Données factuelles et coefficients

L'objectif phare de cette partie du code de prétraitement est de compléter le tableur Excel `cnpe_dd80.xlsx`. Ce tableur est également lu par les programmes de traitement, mais ce n'est pas un fichier de mesures. Il s'agit d'un fichier qui recense une variété de données factuelles relatives à chaque site, telles que des dates ou l'inventaire des bâtiments. Il contient également des données calculées telles que des coefficients d'équations. L'ensemble de ces données est nécessaire au fonctionnement du code de traitement. Ainsi, il faut compléter ce tableur lorsqu'on traite un nouveau site.

Les premières colonnes de ce tableur sont des colonnes d'identification. Elles contiennent des informations telles que le nom du site nucléaire étudié, le nom du bâtiment considéré ou encore sa tranche associée. Ces colonnes peuvent être complétées automatiquement à partir des fichiers de coordonnées prétraités. Pour rappel, ces fichiers ont été générés avec les deux premières parties du programme de prétraitement. Ils sont stockés dans le dossier INPUT. Pour accéder à la liste des bâtiments et à leurs tranches associées, on parcourt les libellés de ces fichiers prétraités. Grâce à l'uniformisation des libellés effectuée précédemment, il est aisé d'extraire ces informations. On les écrit ensuite dans le tableur afin de compléter les colonnes d'identification.

Les autres colonnes regroupent des dates et des coefficients nécessaires au tracé des courbes d'interpolation et d'extrapolation lors de l'étape de post-traitement.

La date de demi-chargement d'un ouvrage est définie comme le moment auquel la moitié de sa charge a été appliquée. Le tracé des courbes débute à partir de cette dernière. Il s'agit du moment où les mires³⁴ sont mises en service. Un des rôles du script « `corrections.py` » est de corriger les mesures en ajoutant un terme correspondant au tassement estimé à la date de demi-charge. Cette correction permet de compenser la charge déjà appliquée avant le début des enregistrements³⁵.

Par ailleurs, les dates de calage mécaniques correspondent à la référence utilisée pour le calcul du déplacement différentiel³⁶.

³⁴ Capteurs.

³⁵ Quelques précisions à propos des mesures antérieures à la date de demi-chargement dans le glossaire.

³⁶ Différence de déplacement entre deux ouvrages adjacents. Il est calculé à une date donnée, relativement à une date de référence : la date de calage mécanique. Voir glossaire pour les détails.

Les coefficients sont ceux des équations logarithmiques d'extrapolation³⁷. Ces équations sont de la forme : $y = a \cdot \ln(x - t) + b$. Le tableur recense les coefficients a , b et t pour la liste de bâtiments établie précédemment.

L'ensemble de ces dates et coefficients est recensé dans la base de données d'EDF. Ces données ont été relevées il y a plusieurs dizaines d'années, pendant et à l'issue de la construction de chaque centrale nucléaire. Cependant, j'ai été surprise par le manque de rigueur quant à leur sauvegarde. En effet, de nombreuses valeurs sont introuvables. Cela pourrait s'expliquer par un défaut d'archivage. Il est également possible que ces valeurs n'aient jamais été relevées. De ce fait, elles doivent souvent être approximées.

La procédure est de commencer à chercher les valeurs dans les rapports archivés. Cette tâche est chronophage. De plus, il est fréquent de ne pas trouver la donnée recherchée. Dans ce cas, il est nécessaire d'effectuer une approximation, ce qui est source d'erreurs et d'inexactitudes.

Une fois le tableur Excel `cnpe_dd80.xlsx` complété, le programme Python complet est fonctionnel. J'ai traité dix sites nucléaires de cette manière : [Supprimé pour des raisons de confidentialité]³⁸.

II.5.Retour d'expérience

II.5.1. Difficultés rencontrées

J'ai principalement rencontré des difficultés d'ordre technique. Dès le premier jour, j'ai été confrontée à un vocabulaire géotechnique spécialisé. D'une part, j'ai dû m'approprier le champ lexical lié à l'architecture des centrales nucléaires³⁹. Cela inclut les notions de site, de tranche, de bâtiment, de mire... ainsi que les acronymes désignant les bâtiments. D'autre part, j'ai dû assimiler le vocabulaire relatif aux grandeurs manipulées : tassement moyen relatif, basculement, gisement, date de calage mécanique, date de demi-charge...

Un second enjeu a été de m'approprier les codes de traitement écrits par mon tuteur de stage. Bien que ces codes soient commentés, il est difficile de comprendre un programme écrit par quelqu'un d'autre que soi-même⁴⁰. Il faut comprendre à quoi correspondent les notations utilisées pour les noms de variables et pour les noms de fonctions. De plus, il a fallu repérer

³⁷ Equations logarithmiques d'extrapolation : Il s'agit du modèle mathématique utilisé.

³⁸ Carte des centrales nucléaires françaises : voir annexe 8.

³⁹ Voir annexe 1.

⁴⁰ Remarque : Il est même souvent difficile de comprendre un code que l'on a soi-même écrit, surtout s'il n'est pas commenté.

d'où chaque série de données provenait afin de pouvoir les utiliser à bon escient. C'était loin d'être une tâche aisée, surtout compte tenu de mon manque de maîtrise du vocabulaire.

II.5.2. Solutions apportées et apprentissages

J'ai utilisé une grande variété de libraires Python, comme par exemple Matplotlib⁴¹, Pandas⁴² et Openpyxl⁴³. J'ai manipulé des tableaux de données sous différentes formes : tableaux de données brutes, tableurs de données traitées, DataFrames⁴⁴ Python, dictionnaires⁴⁵ Python... J'ai également appris à utiliser les classes⁴⁶. Ce concept me servira dans la suite de mon parcours, notamment dans le cadre de mon projet professionnel. En effet, je souhaiterais m'orienter vers le domaine de l'intelligence artificielle. Ce domaine mobilise fortement les classes, en particulier par l'intermédiaire de librairies telles que PyTorch⁴⁷.

Parmi les cours enseignés à l'Ecole au travers du cursus ISMIN⁴⁸, c'est le cours d'Outils de l'Informatique dont j'ai tiré le plus grand profit au cours de mon stage chez EDF. Ce cours est une initiation à l'utilisation à l'environnement Linux. On y apprend notamment à naviguer dans le terminal. Je n'ai pas utilisé Linux pendant mon stage. Cependant, j'ai constaté que les commandes et la navigation sont similaires à celles de l'invite de commandes Windows. L'entreprise m'a fourni un PC pour toute la durée de mon stage. Le premier jour, j'ai dû installer Python sur ce dernier. Pour des raisons de compatibilité entre les différents scripts Python, j'ai dû utiliser l'invite de commandes Windows. Savoir y naviguer m'a grandement aidé à installer le logiciel efficacement.

Ainsi, au cours de mon stage, j'ai acquis des compétences techniques. J'ai également développé des compétences transversales (*soft skills*).

Tout au long du stage, mon tuteur de stage m'a laissé beaucoup d'autonomie pour réaliser la mission qui m'était confiée. Cela m'a incité à travailler sur mes capacités

⁴¹ Matplotlib : librairie Python permettant de tracer des graphes.

⁴² Pandas : librairie Python permettant de manipuler des données.

⁴³ Openpyxl : librairie Python permettant de lire, modifier et écrire des fichiers Excel.

⁴⁴ DataFrame : Il s'agit d'une structure de données Python, appartenant à la librairie Pandas. Elle permet de manipuler des tableaux de données. Les DataFrames sont équipés de fonctionnalités similaires à celles d'un tableur ou d'une base de données.

⁴⁵ Dictionnaire : structure de données Python. A la différence d'un tableau (recensement de données de manière ordonnée), le dictionnaire permet de stocker des données sous forme de paires clé/valeur, ce qui en fait une structure plus complète.

⁴⁶ Classe : concept de programmation orientée objet en Python. Une classe définit un modèle pour créer des objets contenant à la fois des données (nommées attributs) et des fonctions (nommées méthodes).

⁴⁷ PyTorch : librairie Python open-source développée par Meta. Elle est utilisée pour le *deep learning* (domaine de l'intelligence artificielle). PyTorch utilise une structure orientée objet.

⁴⁸ ISMIN : Ingénieur Système Microélectronique et Informatique.

organisationnelles. En particulier lors de la phase de prétraitement, j'ai divisé la mission globale en plusieurs tâches à effectuer. J'ai été amenée à prendre des initiatives et à faire preuve de proactivité, notamment en posant mes questions afin de ne pas rester bloquée. J'ai ainsi avancé de manière efficace.

J'ai constaté que la communication est un pilier du bon déroulement de tout projet. Des réunions régulières avec mon tuteur de stage ont permis de suivre de l'avancement de la mission et d'échanger sur les problèmes identifiés afin de trouver des solutions. C'était également l'occasion de demander l'accès à des ressources complémentaires (fichiers, données...) et d'aborder des notions nécessitant des explications plus approfondies.

Un exemple concret de problème auquel j'ai fait face est la réimplantation des mires de plusieurs bâtiments d'un site nucléaire, à des emplacements différents de ceux d'origine. Cela causait une discontinuité dans les mesures. Tout d'abord, j'ai cherché à évaluer si la distance entre les anciennes et les nouvelles mires était négligeable, en créant un petit code Python à cet effet. C'était le cas pour la plupart des bâtiments. Dans ce cas, le problème était résolu. En revanche, pour deux bâtiments, les mires avaient été replacées à des endroits différents. Après avoir échangé avec mon tuteur de stage, une solution a été identifiée. Cette dernière n'a pas encore été implémentée. Elle consistera à effectuer des calculs supplémentaires, uniquement sur ces deux bâtiments, afin d'obtenir des graphes satisfaisants. Cette phase d'identification du problème a permis de gagner du temps par la suite. En effet, seuls deux bâtiments du site nucléaire seront à traiter à part.

Lors de mes précédents stages, j'avais été immergée dans une PME⁴⁹ (Krampouz) et une ETI⁵⁰ (Armor Lux). Dans ces deux entreprises, j'avais constaté une importante synergie entre les différents départements. Plus la structure est petite, plus cette synergie est transversale, c'est-à-dire que tous les services collaborent étroitement. J'ai retrouvé ce fonctionnement synergique chez EDF, mais dans un cadre plus hiérarchisé. En effet, la synergie entre les différentes entités est davantage compartimentée dans les grandes entreprises. Autrement dit, de nombreux services ne sont pas en interaction directe. Les échanges transitent par différents niveaux hiérarchiques et sectoriels. Cette organisation est indispensable, non seulement pour coordonner des effectifs importants, mais aussi en raison de la dispersion géographique des sites à l'échelle

⁴⁹ PME : Petite ou Moyenne Entreprise. Se référer à l'annexe 9, extrait de *L'essentiel du management*, page 30 [7].

⁵⁰ ETI : Entreprise de taille intermédiaire. Se référer à l'annexe 9, extrait de *L'essentiel du management*, page 30 [7].

nationale, voire internationale. Ainsi, dans les grandes entreprises, une synergie globale est essentielle, mais elle s'exerce de manière plus hiérarchisée que dans les structures plus petites.

Pour finir, je tiens à aborder un point précis : l'arrivée dans une entreprise. Je retiens de ce stage qu'il est primordial de se présenter, et pas uniquement le premier jour. En effet, de nombreux collaborateurs étaient en congés ou en télétravail le jour de mon arrivée. EDF est une grande entreprise, il m'était donc difficile de me souvenir avec certitude des collaborateurs que j'avais déjà rencontrés. De plus, il est délicat de choisir le moment adéquat pour se présenter afin d'éviter d'interrompre quelqu'un dans son travail. Cependant, si c'était à refaire, je préférerais me présenter deux fois à la même personne ou l'interrompre brièvement plutôt que de rester une inconnue pour certains collègues.

Cette seconde partie a retracé le déroulement de la mission que j'ai menée à bien. Elle s'est organisée en deux temps : une phase de post-traitement, puis une phase de prétraitement. J'ai également adopté un regard réflexif sur mon expérience. J'ai évoqué les difficultés que j'ai rencontrées, les solutions que j'ai apportées, et les apprentissages que j'ai tirés de ce stage.

III. Comment l'humain peut-il agir dans un environnement où l'erreur n'a pas sa place ?

III.1. Contextualisation

L'erreur peut être tolérée, voire encouragée dans certains secteurs d'activité. Par exemple, dans le développement de jeux vidéo, l'erreur peut mener à des opportunités créatives. Les voitures volantes du jeu vidéo *Rocket League* sont le fruit d'une erreur de calcul. Pourtant, les développeurs ont fait le choix de ne pas corriger cette erreur. Ils ont trouvé le résultat stimulant et ont exploité cette erreur, qui est devenue une fonctionnalité emblématique du jeu. De même, en recherche fondamentale, les erreurs ont fréquemment conduit à des découvertes scientifiques majeures. Par exemple, la découverte de la pénicilline⁵¹ résulte d'une erreur de manipulation. Le scientifique Alexander Fleming avait oublié de fermer une boîte de Petri contenant une culture de bactéries avant de partir en congés. Cet oubli a conduit à une découverte révolutionnaire dans le domaine de la médecine. L'antibiotique est encore largement utilisé de nos jours.

⁵¹ Pénicilline : antibiotique permettant notamment de traiter les angines bactériennes.

Cependant, dans d'autres secteurs, l'erreur est à proscrire car elle peut compromettre la sécurité. C'est notamment le cas du domaine du nucléaire. Les conséquences d'une erreur peuvent être dramatiques, comme en témoignent les catastrophes de Tchernobyl (1986) et de Fukushima (2011). L'incident de Tchernobyl est le résultat d'une défaillance de conception d'un réacteur. Cette défaillance a entraîné une explosion radioactive. Les conséquences humaines et environnementales furent tragiques : nombreuses morts directes, milliers de cancers, contamination environnementale à long terme... Quant au drame de Fukushima, il résulte d'une sous-estimation du risque. Un tsunami dévastateur, plus haut que ce qui était pris en compte dans le dimensionnement de la digue à la mer, a conduit à l'inondation de la centrale nucléaire, ce qui a empêché de refroidir les réacteurs car les moteurs diésels de secours sensés alimenter la centrale notamment en cas d'accident étaient noyés. La fusion partielle des cœurs⁵² a provoqué une pollution radioactive alarmante aux alentours du site nucléaire.

D'autres secteurs, tels que l'aviation ou la cybersécurité, exigent également une rigueur irréprochable. La question suivante émerge : comment l'humain peut-il agir dans un environnement où l'erreur n'a pas sa place ? Nous évoquerons la quête du risque zéro, malgré laquelle l'erreur persiste perpétuellement. Enfin, nous nous interrogerons sur le rôle de l'ingénieur dans les environnements où les erreurs ne sont pas tolérables.

III.2. Vers le risque zéro

III.2.1. Protocoles et procédures pour cadrer l'action humaine

Dans un environnement où l'erreur n'a pas sa place, des protocoles sont mis en place dans le but d'encadrer l'action humaine. On retrouve de nombreux exemples de tels protocoles dans le domaine médical.

L'OMS⁵³ a mis en place une check-list universelle à appliquer avant toute intervention chirurgicale [8, 9]. Les premiers essais ont été effectués en 2007 et la check-list a été implémentée officiellement en 2009.

Elle vise à éviter les erreurs critiques comme l'opération du mauvais patient ou de la mauvaise partie du corps. L'objectif est de lutter contre les défauts de vérification.

⁵² Fusion partielle des cœurs des réacteurs : fonte des barres de combustible nucléaire en raison d'un défaut de refroidissement. Le processus libère des radiations radioactives dans le réacteur. Si le confinement est endommagé, les radiations se propagent en dehors du réacteur. C'est ce qui s'est passé dans le cas de l'incident de Fukushima, où les inondations avaient altéré les zones de confinement.

⁵³ OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

La check-list se divise en trois phases : avant l'anesthésie, avant l'incision et après l'intervention. Par exemple, avant l'anesthésie, l'équipe médicale doit confirmer l'identité du patient. Elle doit également vérifier les éléments relatifs à la procédure chirurgicale, tels que les dosages des produits utilisés. Enfin, les éventuelles contre-indications présentées par le patient (allergies...) doivent être prises en compte.

Selon une étude publiée dans *The New England Journal of Medicine* [10], la mise en place de cette check-list a conduit à une diminution de 36% des complications post-opératoires majeures. En effet, leur taux est passé de 11% à 7%. De plus, la mortalité chirurgicale a diminué de 47%, passant de 1,5% à 0,8%. L'étude a été menée dans huit hôpitaux situés dans différents pays, allant du Canada à la Tanzanie. Cette diversité géographique confère une portée universelle à ces résultats.

Cet exemple démontre que des protocoles rigoureux permettent de cadrer l'action humaine et ainsi de réduire le risque d'erreur.

III.2.2. Automatisation et contrôle : déléguer aux machines

Outre les protocoles, un autre moyen de réduire l'erreur d'origine humaine est d'automatiser les processus à risque. Déléguer certaines tâches aux machines permet de garantir davantage de précision, de s'affranchir de l'impact de la fatigue et des émotions humaines. L'automatisation des tâches concerne des domaines divers et variés.

Dans le domaine chirurgical, le robot Da Vinci permet de mener à bien des opérations chirurgicales avec une stabilité et une précision bien supérieure à celle de la main humaine. Ainsi, il permet de remédier aux tremblements de main. Ces derniers sont inévitables, même chez les chirurgiens les plus expérimentés. Ils sont accentués en cas de stress. Contrairement à l'humain, le robot ne ressent pas de stress, ce qui assure une précision inégalable.

Dans le domaine de l'aviation, l'implémentation de systèmes de pilotage automatique a permis de réduire drastiquement les erreurs liées à la fatigue des pilotes, en particulier sur les longs vols. De tels systèmes permettent de maintenir automatiquement l'altitude, le cap et la vitesse de l'avion. Par ailleurs, des dispositifs tels que le TCAS⁵⁴ détectent automatiquement les risques de collision, en une durée bien inférieure au temps de réaction humain. Lors d'un vol en avion, la sécurité de dizaines voire de centaines de personnes est en jeu. L'automatisation

⁵⁴ TCAS : Traffic Collision Avoidance System.

maximise la sécurité, en s'affranchissant de facteurs tels que la fatigue ou le temps de réaction humain.

Dans des secteurs tels que la chirurgie ou l'aviation, la moindre erreur met des vies en jeu. Déléguer certaines tâches aux machines permet de réduire les erreurs liées aux limites du corps humain.

III.2.3. Ancrer la rigueur sur le long terme

Ni les protocoles, ni l'automatisation ne suffisent à eux seuls à garantir le risque zéro. La rigueur doit effectivement être maintenue sur le long terme.

Le secteur du nucléaire est un exemple pertinent illustrant le maintien d'une rigueur sans faille sur la durée. Des contrôles périodiques de maintenance sont instaurés. Par exemple, lors de la visite décennale d'une centrale nucléaire, tous les réacteurs sont arrêtés et scrupuleusement inspectés. Certains composants sont remplacés, à la fois pour prolonger la durée de vie de la centrale mais aussi (et surtout) pour maintenir la sûreté des installations. Lors de la quatrième visite décennale du site nucléaire de Gravelines⁵⁵ [11, 12], plusieurs dizaines de milliers d'actions de contrôle et de mise à niveau ont été effectuées par EDF : environ 18 500 sur le BR4⁵⁶ et 50 000 sur le BR3⁵⁷. Par exemple, pour le BR4, les pompes du système d'aspiration de l'enceinte⁵⁸ ont été révisées afin de répondre aux exigences de sécurité.

L'erreur dans le domaine du nucléaire ne se limite pas seulement à la catastrophe à grande échelle. En effet, les personnes travaillant sur le site nucléaire sont exposées à des risques accrus, ce qui implique des précautions supplémentaires quant à la radioprotection⁵⁹. Des écrans de protection en plomb ou béton sont installés dans la centrale afin de protéger les travailleurs des rayonnements ionisants⁶⁰. De surcroît, il est obligatoire de porter de équipements de protection adaptés : blouses plombées, gants et lunettes. Enfin, l'exposition

⁵⁵ Voir annexe 8.

⁵⁶ BR4 : Bâtiment réacteur n°4.

⁵⁷ BR3 : Bâtiment réacteur n°3.

⁵⁸ Système d'aspiration de l'enceinte : en cas d'accident, le système d'aspiration de l'enceinte pulvérise de l'eau dans l'enceinte de confinement la refroidir et en réduire la pression interne.

⁵⁹ Radioprotection : ensemble des mesures visant à protéger les personnes et l'environnement des effets des rayonnements ionisants. Ces rayonnements ionisants peuvent endommager les cellules vivantes. Il est nécessaire de s'en protéger.

⁶⁰ Rayonnements ionisants : Les rayonnements radioactifs un type de rayonnements ionisants. Ils endommagent les cellules vivantes, d'où la nécessité de s'en protéger.

radioactive des travailleurs est attentivement suivie avec des dosimètres⁶¹. Cela permet de s'assurer que le seuil limite de danger pour la santé n'est pas dépassé.

Cette vigilance accrue est quotidienne. Elle s'inscrit dans la démarche d'ancrage de la rigueur sur le long terme. Elle contribue à tendre vers le risque zéro en évitant les accidents de travail.

Ancrer la rigueur sur le long terme est nécessaire pour réduire le risque d'erreurs et d'accidents. Cela passe par un suivi régulier des installations et un suivi quotidien de la sécurité des travailleurs.

De nombreuses entreprises issues de secteurs d'activité variés partagent un objectif commun : la quête du risque zéro, sur le long terme. Toutefois, malgré l'implémentation de procédures rigoureuses et l'automatisation des processus à risque, l'erreur persiste.

III.3. Existence perpétuelle de l'erreur

III.3.1. L'erreur humaine, une variable inévitable

Les erreurs d'origine humaine subsistent malgré les nombreuses procédures mises en œuvre afin de les éviter. En effet, ces procédures, aussi rigoureuses soient-elles, ne permettront jamais d'effacer la fatigue, le stress, la surcharge cognitive et la distraction.

Dans le milieu hospitalier, la pression exercée sur les infirmiers est à l'origine d'une proportion considérable d'erreurs. Par exemple, en 2017, une infirmière a administré à tort un puissant paralysant à un patient [12]. Pourtant, elle suivait un protocole sur un logiciel informatisé. Ce dernier a justement pour objectif de réduire ce type d'erreurs de prescription. Il contient plusieurs étapes de vérification et de confirmation.

L'erreur n'est pas liée à un dysfonctionnement du logiciel. Dans un moment de pression, l'infirmière a sélectionné le mauvais médicament. Les avertissements fournis par le logiciel procédural n'ont pas suffi à lui faire remettre en question le choix du médicament. Elle a

⁶¹ Dosimètre : capteur individuel attaché à l'équipement de travail de chaque travailleur exposé aux rayonnements ionisants. Ce capteur permet de mesurer l'exposition aux rayonnements ionisants.

sélectionné du vécuronium⁶² au lieu du Versed⁶³. Cette erreur a conduit au décès du patient. Paralysé et sans assistance respiratoire, il s'est retrouvé incapable de respirer.

L'erreur d'origine humaine s'impose donc comme un facteur inévitable, malgré l'application de procédures rigoureuses.

III.3.2. Faillies persistantes malgré des systèmes réputés infaillibles

Toutefois, la persistance de l'erreur n'est pas seulement due à l'humain. Bien que réputés infaillibles, les systèmes automatisés et informatisés présentent des vulnérabilités. On relève parmi elles les défaillances de capteurs, les pannes de machines et les cyberattaques ciblant les logiciels.

Par exemple, en 2021, l'entreprise Colonial Pipeline a été la cible d'une cyberattaque. Malgré des logiciels hautement sécurisés, les cybercriminels ont réussi à s'y infiltrer. L'entreprise a été contrainte de suspendre temporairement ses activités le temps de résoudre le problème.

Un cas encore plus flagrant est celui des systèmes conçus pour limiter les erreurs d'origine humaine. Paradoxalement, ces derniers comportent eux-mêmes des failles. Par exemple, le crash du vol Air France 447 en 2009 résulte d'un arrêt imprévu du pilotage automatique. Cet arrêt a été causé par une défaillance des capteurs de vitesse. Les pilotes pris au dépourvu n'ont pas eu la capacité d'éviter le crash.

Ainsi, aucun système, aussi performant soit-il, n'est épargné par le risque d'une défaillance. Même dans le cas d'un système spécifiquement conçu pour réduire les erreurs, ce risque persiste.

III.3.3. Apprendre de l'échec : vers une résilience active

On constate qu'il est impossible de supprimer l'erreur. Elle persiste, en dépit de procédures rigoureuses et de l'automatisation des processus. Systèmes comme humains sont soumis à des limites impossibles à surmonter. Ainsi, plutôt que de chercher à s'affranchir de l'erreur, il semble plus pertinent d'adopter une stratégie de résilience.

⁶² Vécuronium : puissant paralysant.

⁶³ Versed : sédatif léger, utilisé pour soulager l'anxiété.

Cette stratégie de résilience repose sur deux piliers : le back-up, les retours d'expérience. Ces derniers s'inscrivent dans le cadre d'une culture d'entreprise⁶⁴ valorisant l'apprentissage.

Plutôt que de chercher à supprimer l'erreur, il s'agit de concevoir des systèmes capables de s'adapter et de résister à la défaillance. C'est le principe du back-up. Cette approche consiste à prévoir des solutions de secours pour assurer le bon fonctionnement d'un système en cas de défaillance. Par exemple, dans une centrale nucléaire, les bâtiments dits « diesel » assurent ce rôle. Une centrale nucléaire est ordinairement alimentée en électricité par le réseau national. Suite à un phénomène naturel tel qu'une tempête, une inondation ou encore un séisme, cette alimentation externe peut être interrompue. Dans ces situations d'urgence, ces bâtiments diesel permettent de fournir l'électricité nécessaire au maintien des fonctions de sûreté, telles que le refroidissement du réacteur.

Les retours d'expérience permettent de tirer le maximum d'une situation, qu'elle aboutisse à un succès ou un échec. Dans le cas d'un échec, voire d'un incident, il est important d'analyser les erreurs commises afin d'éviter de les reproduire à l'avenir. Les retours d'expérience s'inscrivent dans le cadre d'une culture d'entreprise valorisant l'apprentissage. L'erreur n'est pas sanctionnée, mais analysée, afin de faire preuve de résilience activement et sur le long terme. Il s'agit de ne pas voir l'échec comme une impasse, mais comme une opportunité d'apprentissage.

Plutôt que de nier l'erreur, il faut adopter une posture de résilience active. Cette stratégie repose sur deux piliers. En premier lieu, il est nécessaire d'intégrer l'erreur dans la conception de tout système. Cela passe par la mise en place de dispositifs de back-up, afin de résister aux défaillances. En second lieu, il est essentiel d'apprendre des échecs passés, afin d'éviter de reproduire les mêmes erreurs à l'avenir.

Le risque zéro est un objectif idéaliste. Les erreurs d'origine humaines et les défaillances techniques persistent, malgré l'implémentation durable de procédures rigoureuses et l'automatisation de nombreux processus. Ainsi, chercher à supprimer l'erreur n'est pas envisageable. Il convient plutôt d'adopter une stratégie de résilience à cette dernière.

⁶⁴ Culture d'entreprise : « ensemble de valeurs, de mythes, de rites, de tabous et de signes partagés par la majorité des membres d'une organisation », d'après *L'essentiel du management* [7].

III.4. Le rôle de l'ingénieur

III.4.1. Anticiper, modéliser, sécuriser

Dans un environnement où l'erreur n'a pas sa place, le rôle de l'ingénieur ne se limite pas à concevoir des systèmes fonctionnels. L'ingénieur doit anticiper les défaillances afin de créer un ensemble résistant, sécurisé et durable dans le temps.

C'est pourquoi il est pertinent d'effectuer des simulations numériques s'appuyant sur des modèles mathématiques. Dans le cadre de la conception, de telles simulations visent à étudier le comportement d'un système dans des conditions extrêmes. Elles permettent ainsi d'envisager des solutions adaptées.

Mais l'anticipation ne relève pas uniquement de la phase de conception. Au contraire, elle se poursuit et s'actualise pendant toute la durée de vie du système. Par exemple, le programme Python sur lequel j'ai travaillé pendant mon stage chez EDF vise à être alimenté dans les années à venir. De nouvelles mesures seront effectuées afin de suivre l'évolution du tassement des sols sous les centrales nucléaires étudiées. Ainsi, les courbes d'extrapolation seront actualisées. Elles tiendront compte des nouvelles séries de mesures disponibles.

En somme, les simulations numériques ne se limitent pas à la phase de conception. Au contraire, elles s'appliquent également à la phase de suivi, en faveur d'une sécurité sur le long terme.

De nombreux ingénieurs dédient leur carrière à la sécurité, dans des secteurs d'activité variés tel que le nucléaire, l'aéronautique, la santé ou encore la construction. Ils analysent les risques, imaginent des solutions pour y faire face et prévoient des marges de sécurité. A travers ces démarches, ils adoptent la posture de résilience active évoquée plus tôt.

III.4.2. L'éthique de l'ingénieur face à l'incertitude

Lorsqu'il conçoit un système, l'ingénieur engage la sécurité, la santé et parfois même la vie des utilisateurs. Dans le cadre de certains domaines d'activité tels que le nucléaire, il est même question de sécurité nationale. Cette responsabilité confère au rôle de l'ingénieur une dimension éthique.

Le contexte actuel est marqué par une course à l'innovation et à la performance technique. Par exemple, ces dernières années, le domaine de l'intelligence artificielle est en

pleine expansion. De ce fait, de nombreuses entreprises ont intégré l'intelligence artificielle à leur interface logicielle. Cependant, chacune ajoute sa touche personnelle. Le but est de se distinguer en proposant *l'option révolutionnaire*. Tous les domaines d'activité sont concernés par cette compétitivité. Pourtant, malgré cette dynamique, la sécurité doit primer sur la rentabilité.

L'ingénieur a pour responsabilité d'alerter sur les risques encourus. Il doit émettre des réserves face aux décisions qu'il considère comme dangereuses. Même si aucun risque n'est détecté à court terme, l'ingénieur doit mener des études afin de s'assurer qu'aucun risque évitable ne se présentera dans le futur. Le coût et le temps requis pour conduire ces études ne doivent pas être un frein, même si la concurrence est forte. Certes, certaines erreurs ne sont pas prévisibles. En revanche, il est possible d'éviter de nombreuses défaillances grâce à de telles études.

Les études ne sont pas le seul aspect éthique auquel un ingénieur doit être vigilant. Par exemple, dans le domaine de la construction, il est impératif de privilégier la qualité à la rapidité.

En 1940, le pont de Tacoma Narrows s'est effondré lors d'une tempête, quatre mois après la fin de sa construction [13]. Des compromis avaient été faits lors de la construction, notamment sur les délais de construction. Des signes de déformation – oscillations et vibrations – avaient été observés par temps venteux. Pourtant, aucune décision immédiate n'a été prise pour y remédier. Des rénovations étaient prévues pour améliorer la stabilité du pont, mais il a quand même été ouvert à la circulation. La rentabilité a primé sur la sécurité, et les conséquences auraient pu être désastreuses – les dégâts furent heureusement uniquement matériels.

Certaines erreurs sont évitables. Il appartient à l'ingénieur d'avertir sur les risques encourus et de mettre en œuvre les moyens pour les éviter, même au détriment de la rentabilité.

En conclusion, comment l'humain peut-il agir dans un environnement où l'erreur n'a pas sa place ? Des entreprises issues de secteurs d'activité variés partagent un objectif commun : la quête du risque zéro. Pourtant, l'erreur persiste, malgré l'implémentation de procédures durables et rigoureuses. Au même titre que ces procédures, la mise en place de systèmes automatisés et informatisés a permis de réduire un certain nombre d'erreurs.

Cependant, ces derniers ne sont pas infaillibles : les défaillances demeurent. C'est pourquoi il est nécessaire d'adopter une posture de résilience active face à l'erreur. Plutôt que de chercher à la supprimer, il faut développer des solutions afin d'y résister. Le rôle de l'ingénieur s'inscrit dans cette démarche. Il doit anticiper les vulnérabilités des innovations. Cette attitude ne s'arrête pas à la conception. En effet, il doit également assurer une phase de suivi et des maintenances. Pour finir, malgré la pression liée à la course à la performance, l'ingénieur doit rester éthique, en faisant passer la sécurité avant la rentabilité.

Conclusion

Durant ce stage au sein de l'équipe Géotechnique du département TEGG d'EDF, j'ai eu l'opportunité de mener à bien une mission concrète. J'ai contribué au développement d'un programme Python visant à étudier l'évolution du tassement des sols sous les centrales nucléaires françaises. Ma mission s'est divisée en deux parties : une phase de post-traitement, puis une phase de prétraitement de données.

J'ai eu l'occasion de traiter de véritables données brutes, ce qui fut particulièrement formateur. Contrairement à un exercice scolaire, ces données ne sont pas construites avec une visée pédagogique. Elles reflètent la complexité du réel, c'est-à-dire qu'elles ne sont ni simplifiées ni structurées au préalable. Leur densité et leur hétérogénéité mènent à divers défis à résoudre. J'ai ainsi développé ma capacité à résoudre des problèmes.

J'ai travaillé des compétences à la fois techniques et humaines.

Les compétences que j'ai acquises en Python et en traitement de données contribueront à mon projet professionnel. En effet, je souhaite poursuivre dans l'intelligence artificielle. Ce langage de programmation est largement utilisé dans ce domaine. Avoir participé à un projet concret utilisant Python sera un réel atout dans la suite de mon parcours. J'ai notamment appris à maîtriser les classes⁶⁵, ce qui facilitera mon apprentissage de l'utilisation de bibliothèques Python telles que PyTorch⁶⁶.

J'ai également consolidé des compétences transversales (*soft skills*). Le haut degré d'autonomie qui m'a été accordé m'a incitée à prendre des initiatives et à faire preuve de proactivité. Le climat bienveillant au sein de l'équipe m'a encouragée à poser toutes mes questions, même celles dont la réponse pouvait sembler évidente.

L'immersion au cœur du département TEGG d'EDF m'a offert une vision concrète des diverses dimensions du métier d'ingénieur, techniques comme managériales. Au sein d'une équipe pourtant spécialisée, il n'y a pas deux métiers identiques. J'ai constaté que chaque collaborateur apporte sa touche personnelle à sa profession. L'opportunité d'échanger avec des

⁶⁵ Classe : concept de programmation orientée objet en Python. Une classe définit un modèle pour créer des objets contenant à la fois des données (nommées attributs) et des fonctions (nommées méthodes).

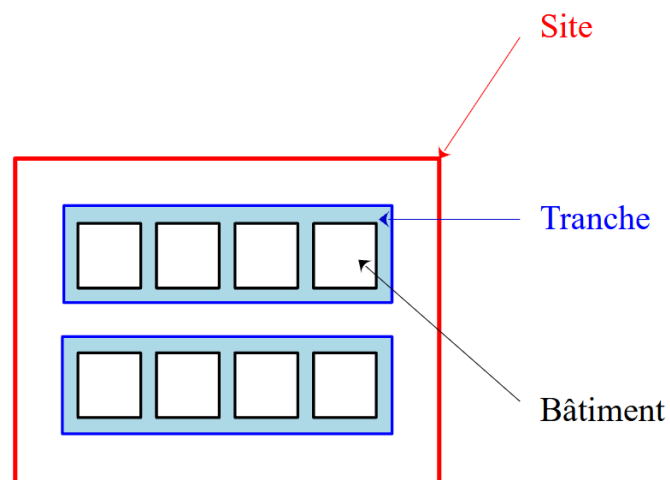
⁶⁶ PyTorch : librairie Python open-source développée par Meta. Elle est utilisée pour le *deep learning* (domaine de l'intelligence artificielle). PyTorch utilise une structure orientée objet.

professionnels aux parcours divers et variés était très enrichissante. C'est une belle illustration des perspectives d'évolutions qu'offre le métier d'ingénieur.

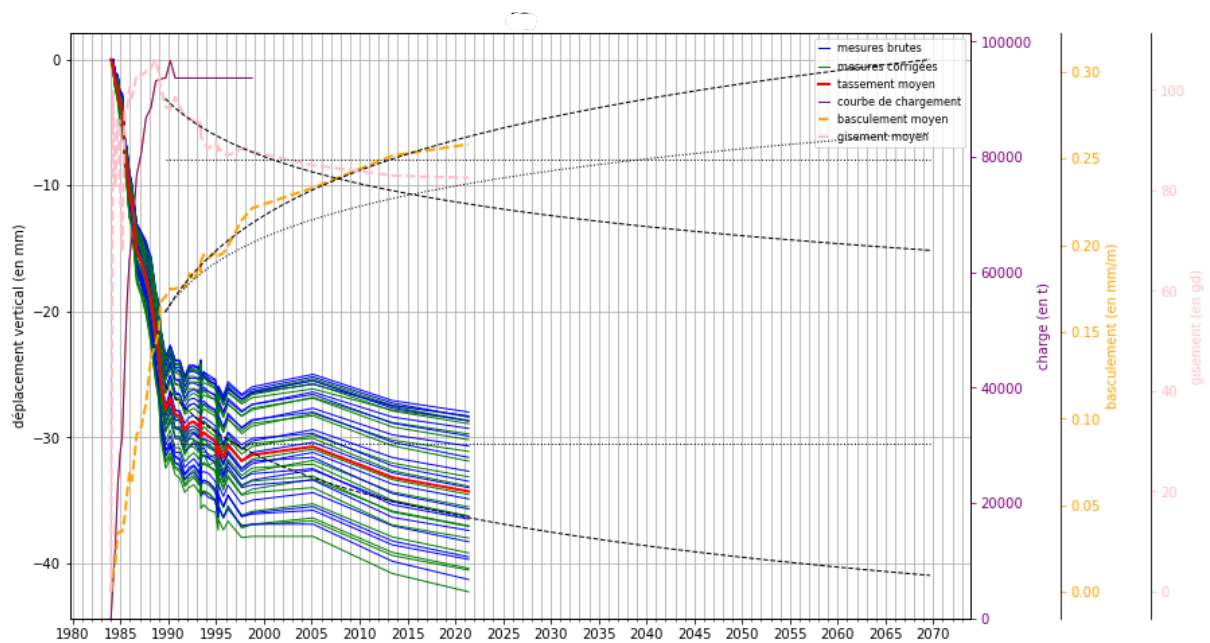
Pour conclure, cette expérience a été idéale pour travailler sur un projet concret et être immergée dans le monde professionnel. Au-delà des compétences acquises, ce stage a confirmé mon envie de prendre part à des projets ambitieux.

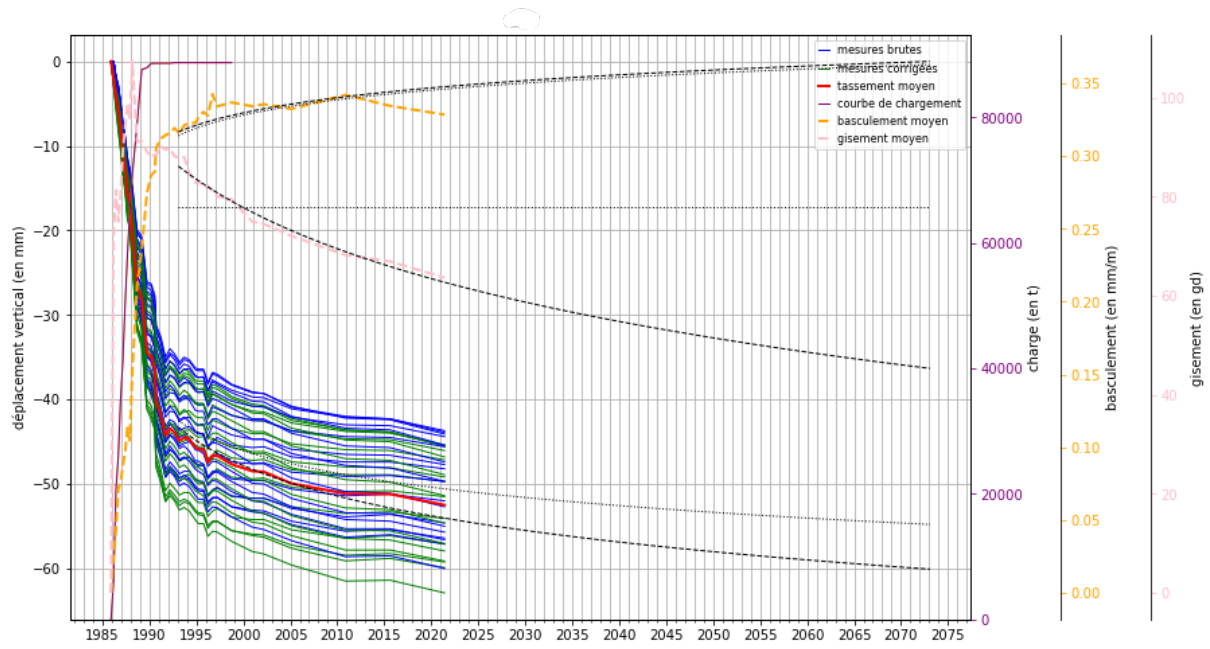
Annexes

Annexe 1 : architecture d'une centrale nucléaire.



Annexe 2 : graphes bâtiment par bâtiment, pour le site [Supprimé pour raisons de confidentialité]





Des graphes similaires pour les autres bâtiments composant ce site nucléaire.

Annexe 3 : graphes catégorie par catégorie, pour le site [Supprimé pour raisons de confidentialité].

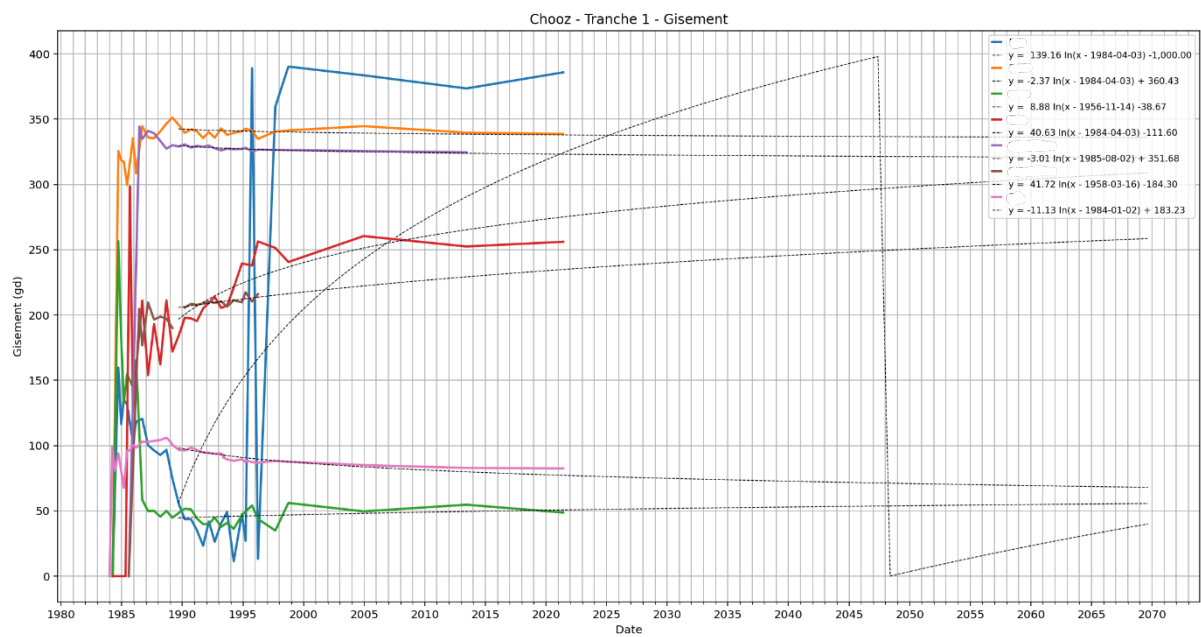
- Tassement moyen :



- Basculement :



- Gisement :



[Supprimé pour raisons de confidentialité]

Annexe 4 : comparaison des valeurs initiales et des projections à 80 ans.

| Tranche | Bâtiment | Origine | | |
|---------|----------|----------------------|--------------------|---------------|
| | | Tassement moyen (mm) | Basculement (mm/m) | Gisement (gd) |
| | | -16.37 | 0.04 | 56.91 |
| | | -12.12 | 0.10 | 346.04 |
| | | -8.30 | 0.06 | 48.18 |
| | | -6.31 | 0.05 | 183.46 |
| | | -11.04 | 0.81 | 329.14 |
| | | -9.06 | 0.16 | 197.44 |
| | | -27.56 | 0.17 | 97.02 |
| | | -29.91 | 0.50 | 398.21 |
| | | -23.64 | 0.08 | 339.33 |
| | | -12.48 | 0.08 | 395.51 |
| | | -25.24 | 0.44 | 211.87 |
| | | -41.88 | 1.52 | 369.26 |
| | | -20.24 | 0.60 | 111.25 |
| | | -44.68 | 0.32 | 87.98 |

| Tranche | Bâtiment | Après 80 ans | | |
|---------|----------|----------------------|--------------------|---------------|
| | | Tassement moyen (mm) | Basculement (mm/m) | Gisement (gd) |
| | | -25.86 | 0.06 | 39.99 |
| | | -16.84 | 0.24 | 335.93 |
| | | -11.50 | 0.18 | 55.67 |
| | | -6.81 | 0.20 | 308.89 |
| | | -21.23 | 1.66 | 320.54 |
| | | -16.16 | 0.10 | 258.52 |
| | | -40.97 | 0.31 | 68.03 |
| | | -40.41 | 0.68 | 378.12 |
| | | -34.89 | 0.16 | 363.04 |
| | | -16.05 | 0.14 | 364.85 |
| | | -32.72 | 0.63 | 234.06 |
| | | -53.66 | 0.87 | 369.22 |
| | | -29.80 | 1.11 | 111.97 |
| | | -60.08 | 0.37 | 45.34 |

Annexe 5 : extrait d'un tableau de valeurs interpolées. Site : [Supprimé pour raisons de confidentialité]. Tranche 2. Paramètre mesuré : basculement.

| Date | Batiment | Basculement (mm/m) |
|---------------------|----------|--------------------|
| 1973-03-01 00:00:00 | | 0.00 |
| 1978-10-25 08:00:00 | | 0.01 |
| 1979-06-19 09:00:00 | | 0.01 |
| 1987-10-09 08:00:00 | | 0.02 |
| 1993-11-10 08:00:00 | | 0.04 |
| 1998-12-15 08:00:00 | | 0.05 |
| 2000-12-01 08:00:00 | | 0.05 |
| 2001-01-10 08:00:00 | | 0.05 |
| 2001-12-18 08:00:00 | | 0.06 |
| 2009-11-30 08:00:00 | | 0.07 |
| 2017-10-17 09:00:00 | | 0.05 |
| 1973-01-03 08:00:00 | | 0.00 |
| 1973-05-10 08:00:00 | | 0.00 |
| 1973-09-05 08:00:00 | | 0.18 |
| 1973-10-16 08:00:00 | | 0.20 |
| 1974-02-19 08:00:00 | | 0.16 |
| 1974-05-07 08:00:00 | | 0.12 |
| 1974-09-18 08:00:00 | | 0.16 |
| 1974-11-06 08:00:00 | | 0.16 |
| 1975-04-15 08:00:00 | | 0.18 |
| 1975-09-08 08:00:00 | | 0.25 |
| 1976-02-23 08:00:00 | | 0.27 |
| 1976-06-29 09:00:00 | | 0.27 |
| 1976-10-18 08:00:00 | | 0.27 |
| 1977-01-17 08:00:00 | | 0.27 |
| 1977-05-12 09:00:00 | | 0.26 |
| 1978-10-25 08:00:00 | | 0.25 |
| 1979-06-28 09:00:00 | | 0.25 |
| 1981-01-08 08:00:00 | | 0.24 |
| 1983-01-11 08:00:00 | | 0.24 |
| 1987-10-07 10:00:00 | | 0.45 |

Annexe 6 : extrait d'un fichier de données brutes, tassements relatifs (z).

| Export requête | Séries chronologiques | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|------------------------------|--------------|-----------------|----------|---------|--------------|-------------|---------------|-----------------|--------------|
| ***** | Filtres | | | | | | | | | | |
| Code site | | | | | | | | | | | |
| Libellé site | | | | | | | | | | | |
| Codes ouvrage | | PE2E | PE1E | | | | | | | | |
| Types de phén | Basculement | Déplacements verticaux en mm | Coordonnée Z | Ecart type (dis | Gisement | | | | | | |
| Codes phénor 5403 | 5401 | | 5405 | 5409 | 5403 | 5407 | 5411 | G101 | G102 | G103 | G104 |
| Code ouvrage | Code phénom | Libellé phénomène | Type phénom | Unité | Date | DB | Marquages DE | Etat mesure | Etat comporte | Etat de validat | Etat de cohé |
| | 5101 | 001 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 25.5167 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5102 | 002 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 21.4333 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5103 | 003 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 20.2500 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5104 | 004 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 17.9667 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5105 | 005 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 24.0833 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5106 | 006 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 21.4000 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5107 | 007 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 26.8167 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5108 | 008 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | | -PS- | Non fait | Non fait | validée | Cohérent |
| | 5110 | 010 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 33.1333 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5111 | 011 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 31.8500 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5112 | 012 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 23.1667 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5113 | 013 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 19.4833 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5201 | 001 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 13.5947 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5202 | 002 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 22.6895 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5203 | 003 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 13.3842 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5204 | 004 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 27.4789 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5205 | 005 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 18.3737 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5206 | 006 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 18.5684 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5207 | 007 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 17.6632 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5208 | 008 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 25.4579 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5209 | 009 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 21.4526 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |
| | 5210 | 010 [DZ] | Déplacement: | mm | ##### | 31.5474 | -PS- | Normal | Normal | validée | Cohérent |

Annexe 7 : extrait d'un fichier de données brutes, coordonnées des mires (x, y).

| Export requête | Dispositif | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------------------|-----------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------------------|--|--|
| ***** | Filtres | | | | | | | | | | |
| Code ouvrage | | | | | | | | | | | |
| Libellé ouvrage | Annexe | | | | | | | | | | |
| ***** | Section plans de basculement | | | | | | | | | | |
| Code ouvrage | Nom de la fon | Période de val | Code phénom | Libellé phénomène | Coordonnées | Coordonnées | Libellé de sort | Code phénom | Libellé phénomène de sortie | | |
| | | 01/01/1981 08 - | | Coord centre | 501.0 | 59.0 | Y1 : tassemen | 5401 | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5101 | 001 [DZ] | 488.5 | 70.3 | Y2 : gisement | 5402 | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5102 | 002 [DZ] | 499.9 | 71.3 | Y3 : pente du p | 5403 | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5103 | 003 [DZ] | 503.5 | 71.3 | Y4 : écart-type | 5404 | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5104 | 004 [DZ] | 513.2 | 70.3 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5105 | 005 [DZ] | 502.5 | 58.5 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5106 | 006 [DZ] | 513.2 | 58.5 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5107 | 007 [DZ] | 498.88 | 56.8 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5108 | 008 [DZ] | 492.9 | 51.2 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5110 | 010 [DZ] | 498.7 | 47.2 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5111 | 011 [DZ] | 512.2 | 45.0 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5112 | 012 [DZ] | 494.13 | 74.05 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5113 | 013 [DZ] | 506.53 | 74.21 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 - | | Coord centre | 541.7 | 96.9 | Y1 : tassemen | 5405 | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5201 | 001 [DZ] | 527.9 | 110.0 | Y2 : gisement | 5406 | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5202 | 002 [DZ] | 557.6 | 110.0 | Y3 : pente du p | 5407 | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5203 | 003 [DZ] | 542.05 | 97.8 | Y4 : écart-type | 5408 | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5204 | 004 [DZ] | 558.6 | 84.3 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5205 | 005 [DZ] | 526.7 | 84.3 | | | | | |
| | | 01/01/1981 08 | 5206 | 006 [DZ] | 522.2 | 84.3 | | | | | |

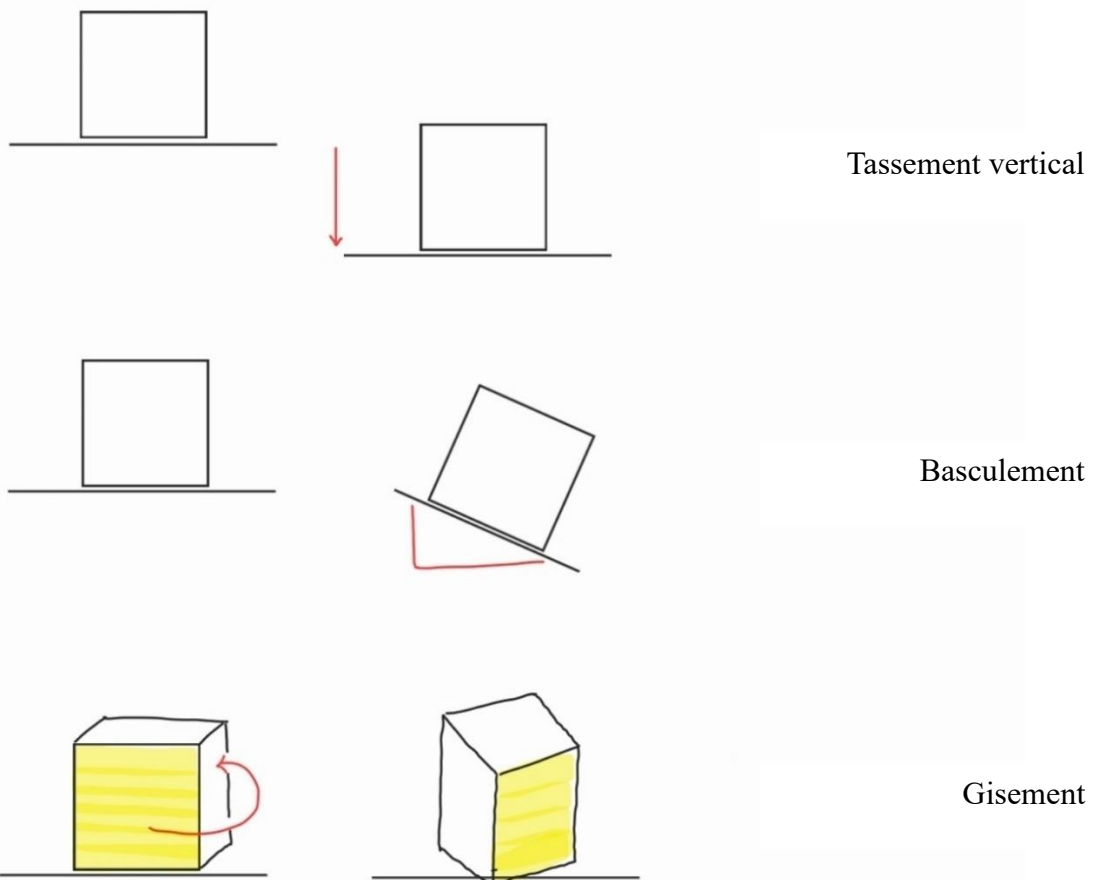
Annexe 8 : carte des centrales nucléaires françaises.

Annexe 9 : extrait du cours de management → tableau récapitulatif de la classification des entreprises, d'après *L'essentiel du management*, page 30 [7].

| Chiffre d'affaires | Total de bilan | Effectif | | | |
|---|--|------------------------|--|---|--------------------------|
| | | Moins de 10 salariés | De 10 à 249 salariés | De 250 à 4 999 salariés | 5 000 salariés ou plus |
| 2 millions d'euros au plus | 2 millions d'euros au plus | Microentreprises (MIC) | Petites et moyennes entreprises hors microentreprises (PME hors MIC) | Entreprises de taille intermédiaire (ETI) | Grandes entreprises (GE) |
| Plus de 2 millions d'euros à 50 millions d'euros inclus | Plus de 2 millions d'euros | | | | |
| Plus de 50 millions d'euros à 1,5 milliard d'euros inclus | 2 millions d'euros au plus | MIC | PME (hors MIC) | ETI | GE |
| | Plus de 2 millions d'euros à 43 millions d'euros inclus | | | | |
| Plus de 1,5 milliard d'euros | Plus de 43 millions d'euros | | PME (hors MIC) | ETI | GE |
| | 2 millions d'euros au plus | MIC | | | |
| | Plus de 2 millions d'euros à 43 millions d'euros inclus | | | | |
| | Plus de 43 millions d'euros à 2 milliards d'euros inclus | | | | |
| | Plus de 2 milliards d'euros | | | | |

Note : le cumul des zones prunes et oranges correspond à la catégorie PME au sens de la loi de modernisation de l'économie (LME).

Annexe 10 : les trois paramètres étudiés.



Glossaire

DTG : entité d'EDF. L'acronyme signifie « Direction Technique Générale ». La DTG effectue notamment les mesures géotechniques brutes sur le terrain. Ces mesures sont ensuite transmises au département TEGG, qui en assure le traitement et l'exploitation. Le but est de garantir la surveillance, la maintenance et la sûreté des ouvrages nucléaires.

DIPDE : entité d'EDF. L'acronyme signifie « Direction Ingénierie du Parc et De l'Environnement ». La DIPDE travaille conjointement avec la DTG et le département TEGG pour mener des études techniques afin de suivre le vieillissement des ouvrages nucléaires. Elle commande ces travaux et analyse les livrables produits par le département TEGG.

Résultat net = produits – charges. S'il est positif, il s'agit d'un bénéfice. En revanche, s'il est négatif, il s'agit d'une perte. Dans le cas d'EDF, le résultat est positif. L'entreprise a effectué un bénéfice.

RSE : La RSE désigne l'engagement volontaire des entreprises à conjuguer performance économique, préoccupations sociales, respect de l'environnement et principes éthiques dans leurs activités.

.csv : Cette extension désigne un fichier au format texte contenant des données présentées sous forme de tableau. Les valeurs sont séparées par des délimiteurs tels que des virgules ou des points-virgules. Ce type de fichiers est couramment ouvert avec Excel.

Interpoler : estimer une valeur inconnue située entre deux valeurs connues en s'appuyant sur une méthode mathématique. C'est ce qui est effectué lors du tracé d'une courbe à partir d'un nuage de points.

Extrapoler : estimer une valeur située au-delà des données connues en s'appuyant sur un modèle mathématique (ici logarithmique). C'est ce qui est effectué lorsqu'on prolonge une courbe au-delà du dernier point mesuré.

Déplacement différentiel :

On ne s'intéresse pas au tassement absolu des édifices, mais à leur tassement relatif, c'est-à-dire les uns par rapport aux autres. Afin de pouvoir comparer tous les déplacements, toutes les coordonnées x, y, z sont ramenées dans un même repère, dont l'origine le centre du BR⁶⁷. Ce changement de repère est effectué à partir de formules de conversion. L'étape suivante consiste à évaluer le déplacement à l'interface entre deux ouvrages, à la date de calage mécanique. Cette différence servira de **référence**. Ensuite, on évalue ce même déplacement à une **date quelconque t** .

⁶⁷ L'acronyme « BR » signifie « bâtiment réacteur ».

Enfin, le déplacement différentiel résulte de la soustraction de ces deux différences, selon chacune des coordonnées. D'où :

$$\begin{cases} \delta x(t) = [dx_B(t) - dx_A(t)] - [dx_B(t_{cm}) - dx_A(t_{cm})] \\ \delta y(t) = [dy_B(t) - dy_A(t)] - [dy_B(t_{cm}) - dy_A(t_{cm})] \\ \delta z(t) = [dz_B(t) - dz_A(t)] - [dz_B(t_{cm}) - dz_A(t_{cm})] \end{cases}$$

Puis la formule suivante permet d'obtenir le déplacement différentiel total :

$$\delta u = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2 + \delta z^2}.$$

Remarque : Dans le cadre de l'étude, la date de calage mécanique est confondue avec celle de mise en service de la centrale nucléaire.

Précisions à propos des mesures antérieures à la date de demi-chargement :

Il n'est pas représentatif de considérer les mesures antérieures à la date de demi-chargement. Ces mesures reflètent un tassement considérable, dû à l'application d'une contrainte brutale sur le sol lors de l'initialisation de la phase de chargement. Or, cette phase n'est qu'un épisode transitoire au regard de la durée de vie d'une centrale nucléaire. Elle n'est pas représentative sur le long terme. Certes, il est essentiel d'être vigilant au tassement tridimensionnel lors de la construction. Toutefois, le programme Python sur lequel j'ai travaillé vise à étudier des centrales déjà construites depuis plusieurs décennies. Ainsi, l'objectif est d'analyser le comportement des ouvrages sur le long terme.

Bibliographie

I. Présentation d'EDF et de son environnement

I.1. Historique

[1] Historique d'EDF : <https://www.edf.fr/groupe-edf/edf-en-bref/histoire>, consulté le 06/03/2025

I.2. EDF aujourd'hui

[2] Données économiques et environnementales : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/journalistes/tous-les-communiques-de-presse/resultats-annuels-2023-production-nucleaire-en-france-en-forte-progression-bonne-performance-operationnelle-densemble-nouvelle-politique-commerciale-reduction-de-la-dette-financiere>, consulté le 06/03/2025

Données sociales :

- [3] https://www.edf.fr/sites/groupe/files/2022-10/edfgroup_rse_transition-juste-et-inclusive_principes_2022_vf.pdf
- [4] <https://www.edf.fr/edf-recrute/pourquoi-choisir-edf/un-employeur-responsable/handicap>, consulté le 06/03/2025

[5] *Charte éthique Groupe* : <https://www.edf.fr/groupe-edf/agir-en-entreprise-responsable/programme-ethique-et-conformite/le-respect-des-valeurs-du-groupe>, consulté le 06/03/2025

[6] Pacte mondial des Nations Unies : <https://pactemondial.org/>, consulté le 30/03/2025

I.3. Marchés et stratégies

I.3.4. Organisation managériale de l'équipe TEGG

[7] *L'essentiel du management*, Thierry Ricordeau et François Jaujard – Edition 2024-2025

II. Déroulement et accomplissement de la mission

II.5. Retour d'expérience

II.5.2. Solutions et apprentissages

[7] *L'essentiel du management*, Thierry Ricordeau et François Jaujard – Edition 2024-2025

III. Comment l'humain peut-il agir dans un environnement où l'erreur n'a pas sa place ?

III.2. Vers le risque zéro

III.2.1. Protocoles et procédures pour cadrer l'action humaine

[8] *Liste de contrôle de la sécurité chirurgicale*, Organisation Mondiale de la Santé, 2009

https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44232/9789242598599_fre_checklist.pdf

[9] *Manuel d'application de la liste de contrôle de la sécurité chirurgicale*, Organisation Mondiale de la Santé, 2009

[10] "A Surgical Safety Checklist to Reduce Morbidity and Mortality in a Global Population", *The New England Journal of Medicine*, Haynes A. B., Weiser T. G., Berry W. R., Lipsitz S. R., Breizat A.-H. S., Dellinger E. P., Herbosa T., Joseph S., Kibatala P. L., Lapitan M. C., Merry A. F., Moorthy K., Reznick R. K., Taylor B., Gawande A. A., 2009, <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMsa0810119>

III.2.3. Ancrer la rigueur sur le long terme

[11] Maintenance du site nucléaire de Gravelines :

- <https://www.edf.fr/centrale-nucleaire-gravelines>, consulté le 11/04/25
- https://www.edf.fr/sites/groupe/files/2024-04/Centrale%20Gravelines%20-%20Plaque%202024%201x21%20v1g%20Digitale_compressed.pdf

III.3. Existence perpétuelle de l'erreur

III.3.1. L'erreur humaine, une variable inévitable

[12] Article sur les erreurs médicamenteuses :

« Les erreurs médicamenteuses liées aux médicaments d'apparence et de dénomination semblables—Quelle est l'ampleur du problème et quels sont les progrès accomplis ? », Anesthesia Patient Safety Foundation (APSF), Juin 2023.

<https://www.apsf.org/fr/article/les-erreurs-medicamenteuses-liees-aux-medicaments-dapparence-et-de-denomination-semblables-quelle-est-lampleur-du-probleme-et-quels-sont-les-progres-accomplis>

III.4. Le rôle de l'ingénieur

III.4.2. L'éthique de l'ingénieur face à l'incertitude

[13] Vidéo d'effondrement du pont Tacoma Narrows :

<https://www.youtube.com/watch?v=XggxeuFDaDU>