Méthodologie publique

Réduction des fuites de SF6 lors de la fabrication d'équipements électriques

Sommaire

I. DETAIL DU PROCEDE 5

A. SF6 : UN GAZ A EFFET DE SERRE 5
B. EQUIPEMENTS ELECTRIQUES 5
C. CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET INVENTAIRE DES EMISSIONS DE SF6 6
D. PROCEDE DE FABRICATION DES DISJONCTEURS 7
1. Etape 1 : Assemblage disjoncteurs 9
2. Etape 2 : Réception / Convoyage du SF6 9
3. Etape 3 : Remplissage de SF6 / Bouchonnage 10
4. Etape 4 : Test d'étanchéité au SF6 11
5. Etape 5 : Test de fonctionnement électrique 11
6. Etape 6 : Atelier de réparation/destruction 11
7. Etape 6A : Processus de réparation 13
8. Etape 6B : Processus de destruction 13
E. POURQUOI ET OU SONT LES FUITES DE SF6 ? 14
F. SOLUTIONS PROPOSEES 15
1. Etape 1 : Assemblage disjoncteurs 16
2. Etape 2 : Remplissage à l'hélium 16
3. Etape 3 : Test d'étanchéité à l'hélium 16
4. Etape 4 : Vidange de l'hélium 17
5. Etape 5 : Réception / Convoyage du SF6 17
6. Etape 6 : Remplissage de SF6 / Bouchonnage 17
7. Etape 7 : Test de fonctionnalité au SF6 17
8. Etape 8 : Atelier de réparation/destruction 18
9. Etape 8A : Processus de réparation 18
10. Etape 8B : Processus de destruction 18

II. CALCUL DES EMISSIONS THEORIQUES DE SF6 19

A. CALCUL DES EMISSIONS DE SF6 AVANT LE PROJET 19
B. CALCUL DES EMISSIONS DE SF6 APRES LE PROJET 22
C. REDUCTION DES FUITES DE SF6 GRACE AU PROJET 22

III. APPLICABILITE 23

IV. PERIMETRE DU PROJET 23

V. SELECTION DU SCENARIO DE REFERENCE 25

VI. ADDITIONALITE 26

VII. REDUCTIONS D'EMISSIONS 28

A. SCENARIO DE REFERENCE 29
B. EMISSIONS DU PROJET 33
C. FUITES DU PROJET 36

VIII. DONNEES A UTILISER 37

IX. METHODE DE COMPTABILISATION ET DE SUIVI DES REDUCTIONS D'EMISSIONS 40

A. FOYER DE FUITES 1 : RESEAU 41
B. FOYER DE FUITES 2 : BOUCHONNAGE 43
C. FOYER DE FUITES 3 : ATELIER DE REPARATION/DESTRUCTION 45
D. FOYER DE FUITES 4 : 'MISE A L'AIR' 47

X. ANNEXE : CALCULS D'INCERTITUDES 49

A. CALCULS D'INCERTITUDES DES EMISSIONS DU SCENARIO DE REFERENCE 49
B. CALCULS D'INCERTITUDES DES EMISSIONS DU PROJET 50
C. CALCULS D'INCERTITUDES DES REDUCTIONS D'EMISSIONS 50

Table des photos

PHOTO 1 : DISJONCTEUR MOYENNE 6
PHOTO 2 : BOMBONNES DE SF6 A L'ENTREE 9
PHOTO 3 : ARMOIRE DE DETENTE 10

Table des schémas

SCHEMA 1 : PROCEDE DE FABRICATION DES DISJONCTEURS MOYENNE TENSION AVANT PROJET 8
SCHEMA 2 : ETAPE 2 DE RECUPERATION ET DE CONVOYAGE DU SF6 EN ENTREE 9
SCHEMA 3 : ETAPE 6, ATELIER DE REPARATION/DESTRUCTION 12
SCHEMA 4 : PROCEDE DE FABRICATION APRES PROJET 16
SCHEMA 5 : BILAN MASSIQUE EN SF6, DE L'ATELIER REPARATION/DESTRUCTION, AVANT PROJET 32
SCHEMA 6 : BILAN MASSIQUE EN SF6, DE L'ATELIER REPARATION/DESTRUCTION, APRES PROJET 35

Table des tableaux

TABLEAU 1 : QUANTITE DE SF6 EMISE LORS DES TESTS D'ETANCHEITE AU SF6 20
TABLEAU 2 : QUANTITE DE SF6 EMISE LORS DES TESTS DE FONCTIONNALITE ELECTRIQUE 21
TABLEAU 3 : EMISSIONS TOTALES DE SF6 SUR LE SITE DE PRODUCTION, AVANT PROJET 22
TABLEAU 4 : EMISSIONS TOTALES DE SF6 SUR LE SITE DE PRODUCTION, APRES PROJET 22
TABLEAU 5 : SOURCES D'EMISSIONS INCLUES ET EXCLUES DU PERIMETRE DU PROJET 24
TABLEAU 6 : PARAMETRES A DETERMINER. 39
TABLEAU 7 : PARAMETRES ET CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS DE MESURE POUR LE FOYER DE FUITES 1 : RESEAU 42
TABLEAU 8 : PARAMETRES ET CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS DE MESURE POUR LE FOYER DE FUITES 2 : BOUCHONNAGE 44
TABLEAU 9 : PARAMETRES ET CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS DE MESURE POUR LE FOYER DE FUITES 3 : REPARATION/DESTRUCTION 46
TABLEAU 10 : PARAMETRES ET CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS DE MESURE POUR LE FOYER DE FUITES 4 : 'MISE A L'AIR' 47

I. Détail du procédé

A. SF6 : un gaz à effet de serre

Le SF6 est un des gaz à effet de serre référencés comme les plus nocifs. Son Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) est de 23 900. C'est-à-dire qu'une tonne de SF6 rejetée est équivalent à environ 24 000 tonnes de CO2 rejetées.

En 2007, en France, les émissions de SF_6 s'élèvent en équivalent CO_2 à 1 064 kt CO_2.

Parmi les différents secteurs, seuls trois contribuent aux émissions de SF_6 qui sont par ordre d'importance en 2007 :

- l'industrie manufacturière avec 52% des émissions de la France métropolitaine
- la transformation d'énergie avec 47%
- le résidentiel/tertiaire avec 1%.

Ce gaz est un excellent isolant électrique. Sa rigidité diélectrique est 2,5 fois supérieure à celle de l'air. Cette bonne tenue électrique, alliée à sa très bonne stabilité lorsqu'il est traversé par un arc électrique (ionisation très faible), en fait un matériau de choix pour l'isolement des disjoncteurs.

B. Equipements électriques

De par ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau sous tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel soit endommagé par ce court-circuit. Il existe deux types de disjoncteurs utilisant du SF6 :

- Les disjoncteurs haute tension
- Les disjoncteurs moyenne tension

Tout autant les produits que les procédés de fabrication sont très différents en haute ou moyenne tension. Il n'est pas pertinent de faire des comparaisons entre les deux.

Les disjoncteurs haute tension :

Les disjoncteurs haute tension peuvent supporter une tension de 72.5 kV et plus. Selon la définition donnée par la Commission électrotechnique internationale, un disjoncteur haute tension est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée (la tension maximale du réseau électrique qu'il protège) à la fois :

- dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique
- dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit, ou les conséquences de la foudre

Bien souvent les disjoncteurs haute tension ne sont remplis de SF6 que chez les clients. D'autre part ils ne sont pas scellés pour pouvoir assurer des opérations de maintenance.

Lors de la maintenance des disjoncteurs haute tension, on constate des fuites considérables.

De même lors de son utilisation, les disjoncteurs perdent quelques pourcents de leur contenu chaque année.

Les quantités contenues dans un disjoncteur haute tension sont très différentes des quantités contenues dans les disjoncteurs moyenne tension et se chiffrent en dizaines, centaines de kg.

Les disjoncteurs moyenne tension :

Les disjoncteurs à moyenne tension sont compris entre 1 et 72kV. Ils peuvent être utilisés à l'extérieur, groupés dans une enveloppe métallique ou individuellement dans une sous-station.

Photo 1 : Disjoncteur moyenne tension

Les caractéristiques des disjoncteurs moyenne tension sont données par des normes internationales, telle que IEC 62271.

Lorsque la tension exercée sur le réseau dépasse 36 kV, le SF6 est obligatoire. En dessous de cette valeur, des produits très innovants - sans SF6 - sont en phase de commercialisation.

Généralement les disjoncteurs moyenne tension sont composés de cellules remplies de SF6 et étanches sur la durée de vie de l'appareil.

Pour contrôler cette étanchéité, les disjoncteurs peuvent être équipés d'un manomètre.

Les quantités contenues dans un disjoncteur moyenne tension se chiffrent en centaines de grammes.

Cette méthodologie s'intéresse au procédé de fabrication de disjoncteurs moyenne tension.

C. Contexte réglementaire et inventaire des émissions de SF6

A ce jour il n'existe pas de contrainte de réduction réglementaire concernant les émissions de SF6.

Néanmoins les entreprises rejetant du SF6 doivent communiquer leurs taux d'émissions auprès de la DRIRE (Directions Régionales de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement) afin qu'ensuite le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique) recense toutes les émissions de ce gaz à effet de serre afin d'établir un inventaire d'émission annuel.

A ce jour, le CITEPA regroupe 200 adhérents (industriels, fédérations et syndicats professionnels, producteurs d'énergie, constructeurs automobiles, éco-industries, bureaux d'études et laboratoires de mesures), constituant ainsi un véritable réseau interprofessionnel où circule une information pertinente et d'actualité sur les évolutions réglementaires et technologiques en matière de pollution atmosphérique.

Afin de garantir la transparence du suivi des émissions, **le site concerné s'engage à effectuer une déclaration annuelle (à partir de l'année de mise en service du projet) via GEREP de ses émissions de SF6 (mentionnées dans cette méthodologie) ainsi que sa consommation en SF6.**

D. Procédé de fabrication des disjoncteurs

Un site de fabrication de disjoncteurs moyenne tension, dans sa version test d'étanchéité au gaz SF6, est schématisé ci-après.

Ce site fabrique en moyenne N disjoncteurs moyenne tension par an. Il consomme en moyenne M_{conso} tonnes de SF6 par an, soit en moyenne M_i kg de SF6 par disjoncteurs.

Ces disjoncteurs sont divisés en quatre grandes familles produites chaque année. Ils se distinguent notamment par leur contenu massique en SF6. On note:

- Type 1, avec M1 kg de SF6
- Type 2, avec M2 kg de SF6
- Type 3, avec M3 kg de SF6
- Type 4, avec M4 kg de SF6

Les tests d'étanchéité font partie du procédé de fabrication des disjoncteurs pour garantir leur étanchéité. En raison des limites technologiques de certains procédés utilisés, notamment le procédé de soudure, on note un taux d'appareils non étanches, détecté lors des tests, assez élevé et d'une grande variabilité. Il en est de même lors des tests de fonctionnalité. La variabilité atteint un coefficient de 3 entre la valeur la plus faible et la valeur la plus élevée. Ce qui génère des émissions très instables qui ne peuvent être stabilisées sans changer de procédé.

Dès lors, nous le verrons dans la version projet – test à l'hélium – le fait de tester les produits à l'hélium, plutôt qu'au SF6, réduit bien sûr le taux d'émissions et permet également de s'affranchir d'un des paramètres générant leur variabilité.

Le gaz SF6 nécessaire à la production de disjoncteurs moyenne tension arrive dans des bombonnes, ce gaz est ensuite utilisé pour remplir les équipements comme schématisé ci-dessous :

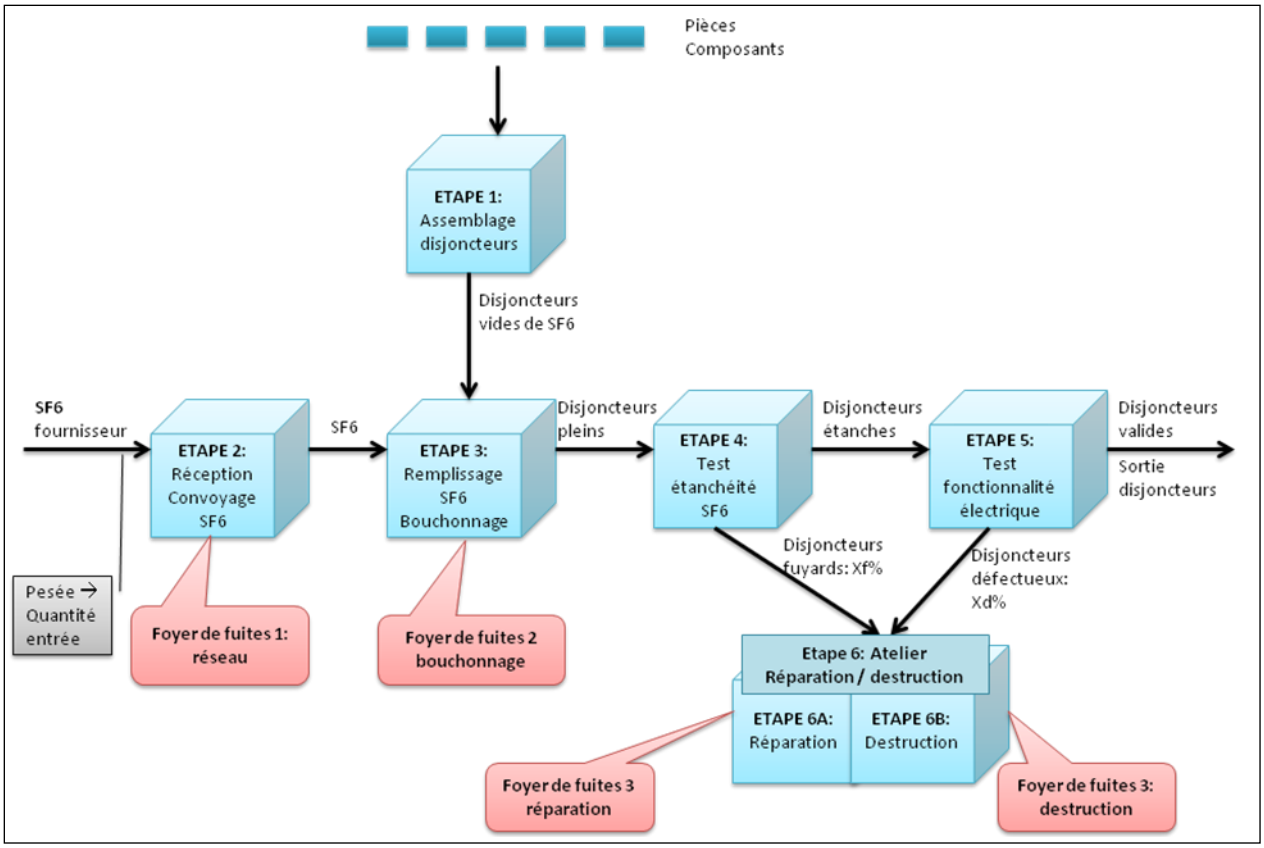

Schéma 1 : Procédé de fabrication des disjoncteurs moyenne tension avant projet

On recense quatre foyers de fuites de SF6 :

- **Foyer de fuites 1 : réseau** de conduits. Ils ne sont pas totalement étanches
  - Fuites théoriques estimées à $X_{réseau}$% de la consommation annuelle totale en SF6, soit, ici, $M_{réseau}$ kg de SF6 par an
- **Foyer de fuites 2 : bouchonnage** des disjoncteurs
  - Fuites théoriques estimées à Mb g de SF6 par équipement, soit $M_{bouchonnage}$ kg de SF6 par an. Ce qui représente ici $X_{bouchonnage}$% de la consommation annuelle totale en SF6
- **Foyer de fuites 3 :** l'atelier de **réparation/destruction** :
  - Lors de la réparation : On récupère (P1-Pr) bar, le reste est rejeté à l'atmosphère (fuites théoriques estimées à $M_{réparation}$ kg de SF6 par an)
  - Lors de la destruction : On récupère (P1-Pd) bar, le reste est rejeté à l'atmosphère (fuites théoriques estimées à $M_{destruction}$ kg de SF6 par an)
- **Foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'** de certains disjoncteurs défectueux électriquement, qui sont irrécupérables (en moyenne $X_{mise\ à\ l'air}$ % des équipements)
  - La totalité du SF6 contenu est perdu dans l'atmosphère (fuites théoriques estimées à $M_{mise\ à\ l'air}$ kg de SF6 par an)

Détail des différentes étapes :

1. Etape 1 : Assemblage disjoncteurs

Les différentes pièces et composants du disjoncteur sont assemblés et soudés lors de cette étape pour aboutir à un disjoncteur vide. Ceci ne génère pas de pollution liée au SF6 elle ne sera donc pas détaillée dans cette méthodologie.

On rappelle simplement qu'il y a des difficultés d'étanchéité.

2. Etape 2 : Réception / Convoyage du SF6

Ci-dessous un schéma de l'étape détaillée :

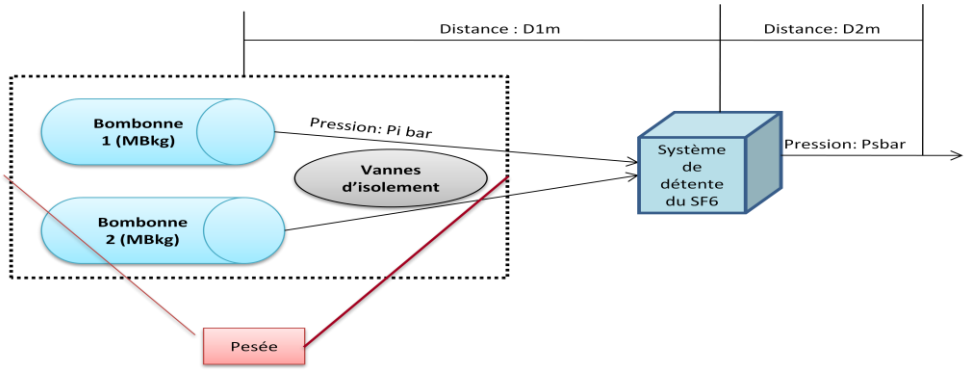

Schéma 2 : Etape 2 de récupération et de convoyage du SF6 en entrée

Les bombonnes sont représentées sur la photo ci-dessous :

Photo 2 : Bombonnes de SF6 à l'entrée

Des bombonnes contenant Mb kg de SF6 à une pression Pi sont livrées à l'usine. Elles sont pesées avec une balance de précision, sous une démarche d'assurance qualité. Cette pesée fait l'objet d'une procédure spécifique avec double mesure, vérification et mise en conformité de l'équipement de mesure.

La pesée d'usine est comparée avec le rapport du fournisseur et le certificat de conformité.

L'écart est ainsi mesuré et fait l'objet d'un rapport fournisseur. Ceci dit, la valeur retenue est celle mesurée sur le site.

La tare des bouteilles est consignée sur chacune des bouteilles par le constructeur.

Le système met en parallèle deux bombonnes, ainsi, lorsque l'une d'elles est vide, le système bascule sur la seconde automatiquement sans arrêt de la production.

Photo 3 : Armoire de détente

Le SF6 est évacué de la bombonne par un détendeur (système de différence de pression). Le gaz est détendu jusqu'à une pression Ps en moyenne.

Les bouteilles, une fois vidées, sont pesées de nouveau, toujours selon une procédure déterminée.
Dès lors par différence entre la valeur massique avant vidange et la valeur massique après vidange, la quantité rentrée sur le site est très clairement et simplement établie.
Le résidu (en moyenne $M_{résidu}$ de SF6 par bombonne) contenu dans les bombonnes est renvoyé au fournisseur.

Le SF6 est alors convoyé jusqu'à la prochaine étape, la longueur de tubes étant environ D2 m.

Le long de ces conduits, il y a des fuites (foyer de fuites 1 : réseau). Celles-ci sont estimées à $X_{réseau}$ % de la consommation annuelle totale en SF6. La mesure est effectuée en fermant le réseau en amont et en aval. Le réseau est alors sous pression, avec les données de température et de chute de pression on peut alors calculer la quantité de SF6 perdu sur un temps donné. Les fuites sont d'environ $M_{réseau}$ kg SF6/an pour une consommation de M_{conso} tonnes de SF6.

3. Etape 3 : Remplissage de SF6 / Bouchonnage

Cette station a pour fonction de remplir et fermer les disjoncteurs.
Les disjoncteurs sont vidés (à pression atmosphérique pour ne pas l'endommager) en amont du système de remplissage de SF6.

Les disjoncteurs sont ensuite remplis de SF6 (pression : P1, masse moyenne de SF6 : M_i en fonction du mix des disjoncteurs : type 1, 2, 3, 4). Puis ils sont fermés par un procédé de bouchonnage et testés.
Le temps écoulé entre la fin du remplissage des disjoncteurs et le bouchonnage génère des fuites moyennes de Mb g par équipement (foyer de fuites 2 : bouchonnage), soit pour une production de N disjoncteurs, la fuite est de $M_{bouchonnage}$ kg/an de SF6.

4. Etape 4 : Test d'étanchéité au SF6

Après avoir été remplis de SF6 et fermés hermétiquement, les disjoncteurs sont testés sur leur étanchéité. 100% des équipements sont testés dans une optique de totale qualité.

Le taux de fuite minimum détecté est TF1 atm.cm^3.s.
En moyenne Xf% des disjoncteurs sont déclarés fuyards (ce taux, comme expliqué précédemment, varie significativement selon des paramètres qui ne sont pas tous maitrisables). Ce qui provoque des émissions de SF6 variables.
Suivant le type de fuites (importance, situation…) les disjoncteurs sont envoyés en réparation (Etape 6A), en moyenne Xfr% d'entre eux, ou en destruction (Etape 6B), en moyenne Xfd% d'entre eux. Ces valeurs moyennes varient et sont données, à ce stade, à titre indicatif.

Les disjoncteurs étanches continuent leur progression en atteignant l'étape 5, test de fonctionnement électrique.

5. Etape 5 : Test de fonctionnement électrique

Ce test permet de détecter les anomalies électriques des équipements (amorçage, claquage, choc traversé, contact de terre décalé, corps étranger, manque de graisse...).

De même que pour les tests d'étanchéité, tous les disjoncteurs sont testés.
En moyenne, Xd% d'entre eux sont défectueux. Ceux-ci sont envoyés dans un autre processus (Etape 6), en fonction du type d'anomalie et de son importance. A l'inverse des tests d'étanchéité, un plus grand pourcentage de disjoncteurs est envoyé en destruction qu'en réparation. Xdr% des équipements défectueux sont envoyés en réparation (Etape 6A) et Xdd% en destruction (Etape 6B). Ces valeurs moyennes varient et sont données, à ce stade, à titre indicatif.

6. Etape 6 : Atelier de réparation/destruction

A l'entrée de l'atelier, les disjoncteurs défectueux (fuyards ou avec des problèmes de fonctionnement électrique) ont une masse moyenne M_i kg de SF6 (en fonction du mix des disjoncteurs : type 1, 2, 3, 4) et une pression de P1.

L'atelier est schématisé ci-dessous :

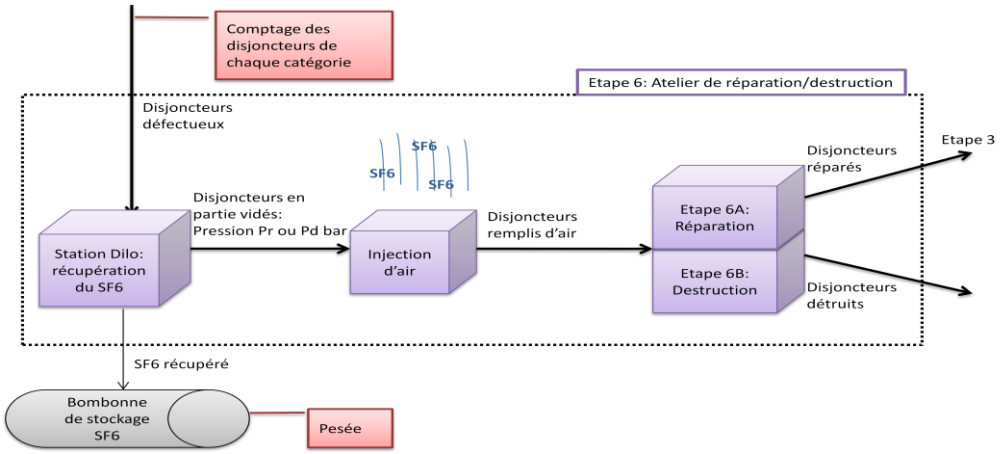

Schéma 3 : Etape 6, atelier de réparation/destruction

Dans une première étape, ils sont vidés à une certaine pression, selon s'ils vont subir une réparation (vidange à Pr) ou une destruction (vidange à Pd). Il est impossible de faire le vide des équipements sous peine de les endommager ou de les faire exploser.

Les disjoncteurs sont donc vidangés à Pr ou Pd et seule une partie de SF6 est récupérée, pompée par une station Dilo spécifiquement développée pour cet usage. Ce SF6 est stocké dans des bombonnes et pesé pour être retourné chez le fournisseur.

Ensuite de l'air va être injecté dans les disjoncteurs en partie vidés du SF6. Ainsi on fait sortir le SF6 sans faire le vide dans les disjoncteurs.

Ce reste de gaz est perdu et comptabilisé dans les émissions.

Pour une réparation (foyer de fuites 3), la vidange du disjoncteur se fait à Pr bar, les émissions sont en théorie de **$M_{réparation}$ kg de SF6 par an**, c'est-à-dire $X_{réparation}$ % de la consommation annuelle totale en SF6 (en fonction du mix des disjoncteurs).

Détail du calcul théorique:

- Production de N disjoncteurs, contenant en moyenne M_i kg de SF6 chacun, soit une consommation annuelle totale de M_{conso} tonnes de SF6
- Xf% des N disjoncteurs sont fuyards et Xfr% d'entre eux sont envoyés en réparation
- Xd% des N disjoncteurs sont défectueux électriquement et Xdr% d'entre eux sont envoyés en réparation

$$N \times \left(\frac{Pr}{P1} \times Mi\right) \times \left(\left(\frac{Xf}{100} \times \frac{Xfr}{100}\right) + \left(\frac{Xd}{100} \times \frac{Xdr}{100}\right)\right) = Mréparation$$

Pour une destruction (foyer de fuites 3), la vidange du disjoncteur se fait à Pd, soit en théorie **$M_{destruction}$ kg de SF6 émis par an**, c'est-à-dire $X_{destruction}$ % de la consommation annuelle totale en SF6 (en fonction du mix des disjoncteurs).

Détail du calcul théorique:

- Production de N disjoncteurs, contenant en moyenne M_i kg de SF6 chacun, soit une consommation annuelle totale de M_{conso} tonnes de SF6
- Xf% des N disjoncteurs sont fuyards et Xfd% d'entre eux sont envoyés en destruction
- Xd% des N disjoncteurs sont défectueux électriquement et Xdd% d'entre eux sont envoyés en destruction

$$\mathrm{N} \times \left(\frac{\mathrm{Pd}}{\mathrm{P1}} \times Mi\right) \times \left(\left(\frac{Xf}{100} \times \frac{Xfd}{100}\right) + \left(\frac{Xd}{100} \times \frac{Xdd}{100}\right)\right) = \mathrm{Mdestruction}$$

Le site industriel a déjà mis en place un processus poussé de traitement du SF6 en récupérant la plus grande quantité possible de SF6, sans faire exploser les équipements ni mettre en danger le personnel intervenant lors de la réparation.

Ensuite, les disjoncteurs remplis d'air sont, soit réparés, soit détruits selon le type de défaut.

7. Etape 6A : Processus de réparation

Ce processus permet de réparer certains disjoncteurs défectueux, fuyards ou électriquement. Le personnel intervient manuellement sur les équipements, qui sont ensuite réintroduits à l'étape 3 du procédé.

8. Etape 6B : Processus de destruction

Ce processus a pour fonction de détruire certains disjoncteurs défectueux, fuyards ou électriquement.

E. Pourquoi et où sont les fuites de SF6 ?

Des méthodes de calcul des émissions ont été mises en place pour déclarer les fuites chaque année, à la DRIRE.
Cette méthodologie se sert de ces résultats pour proposer un système efficace de diminution de fuites de SF6.
Les estimations ci-dessous sont calculées avec :

- Une production de N disjoncteurs par an
- Masse moyenne : M_i kg de SF6
- Pression initiale : P1 bar

On recense quatre foyers de fuites de SF6 :

- **Foyer de fuites 1 : réseau** de conduits. Ils ne sont pas totalement étanches
  - Fuites théoriques estimées à $X_{réseau}$% de la consommation annuelle totale en SF6, soit, ici, $M_{réseau}$ kg de SF6 par an
- **Foyer de fuites 2 : bouchonnage** des disjoncteurs
  - Fuites théoriques estimées à Mb g par équipement, soit $M_{Bouchonnage}$ kg de SF6 par an. Ce qui représente ici $X_{Bouchonnage}$ % de la consommation annuelle totale en SF6
- **Foyer de fuites 3 :** l'atelier de **réparation/destruction** :
  - Lors de la réparation : On récupère (P1-Pr) bar, le reste est rejeté à l'atmosphère (fuites théoriques estimées à $M_{réparation}$ kg de SF6 par an)
  - Lors de la destruction : On récupère (P1-Pd) bar, le reste est rejeté à l'atmosphère (fuites théoriques estimées à $M_{destruction}$ kg de SF6 par an)
- **Foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'** de certains disjoncteurs défectueux électriquement, qui sont irrécupérables (en moyenne $X_{mise\ à\ l'air}$% des équipements).
  - La totalité du SF6 contenu est perdu dans l'atmosphère (fuites théoriques estimées à $M_{mise\ à\ l'air}$ kg de SF6 par an)

F. Solutions proposées

Afin de limiter ces fuites, cette méthodologie propose d'agir sur les tests d'étanchéité (qui génèrent la plus grande quantité de SF6 rejetée). Ils sont actuellement réalisés avec du SF6, ce qui génère de la pollution lors de la réparation ou de la destruction. La méthodologie est basée sur un nouveau système de **test d'étanchéité à l'hélium**, qui n'est pas un gaz à effet de serre.

Pour le choix du gaz de substitution, plusieurs options étaient possibles, azote ou hélium. Le groupe industriel a notamment développé un test d'étanchéité à l'azote sur un autre de ses sites de production. Dans le cas de notre projet, pour des raisons de coût, c'est le test à l'hélium qui a été retenu. En effet, il permet de réutiliser certains systèmes de détection de fuites du procédé initial, et donc d'éviter certains frais d'investissement.

Il y a plusieurs avantages à cette solution de test à l'hélium:

- **Arrêt des émissions de SF6 lors de la réparation ou de la destruction** des équipements non étanches.
- **Augmenter la fiabilité du test**. L'hélium est une molécule plus petite, ce système permet donc de détecter des fuites plus petites, donc :
  - Une plus grande qualité des disjoncteurs en sortie
  - Une diminution des fuites chez le client

Ci-dessous le schéma récapitulatif du procédé de production :

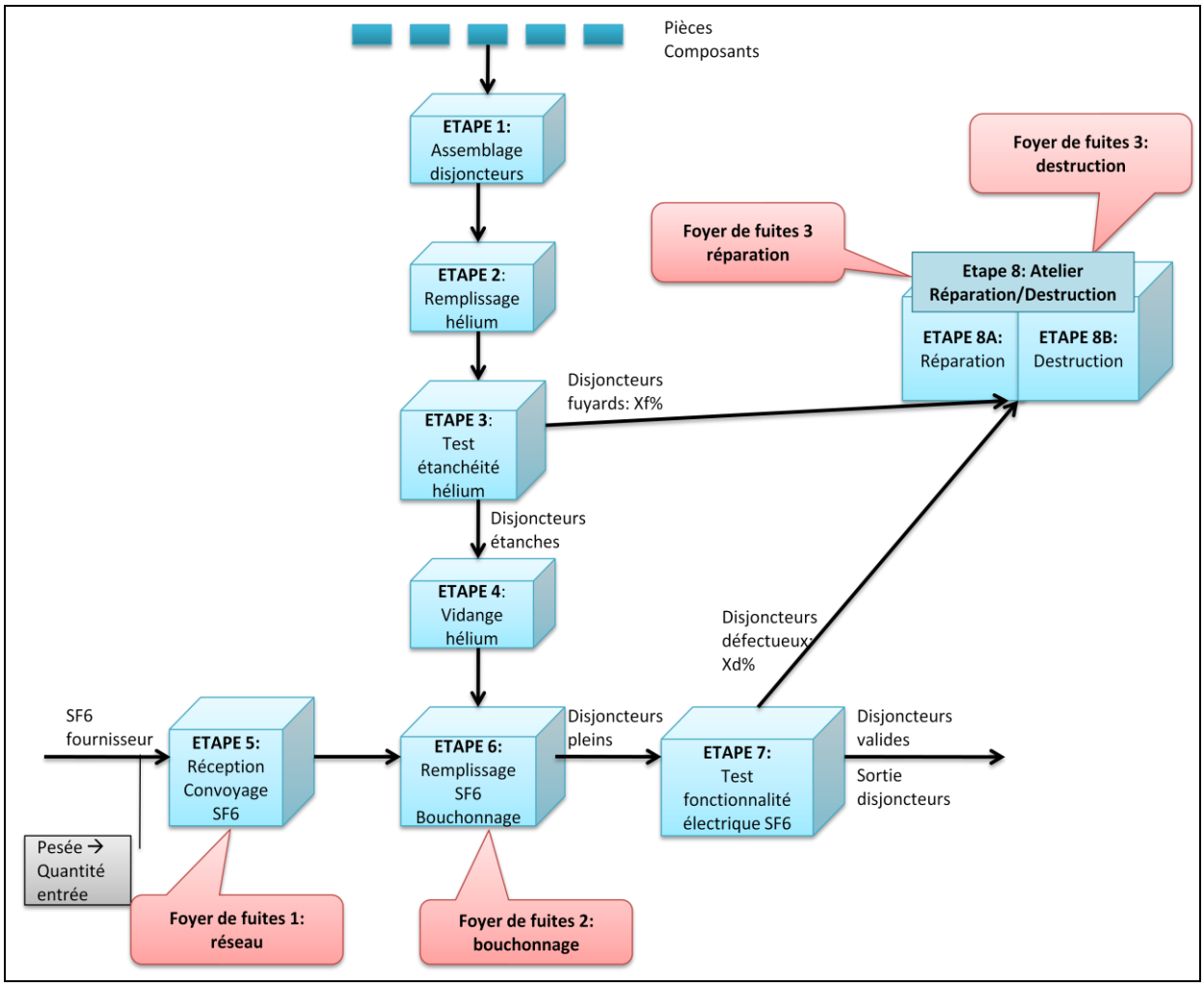

Schéma 4 : Procédé de fabrication après projet

1. Etape 1 : Assemblage disjoncteurs

Le système est identique au précédent.

2. Etape 2 : Remplissage à l'hélium

Les disjoncteurs sont remplis d'hélium à une pression d'environ P1.

L'hélium n'étant pas un gaz à effet de serre, les fuites ne sont pas comptabilisées comme des émissions polluantes.

3. Etape 3 : Test d'étanchéité à l'hélium

Rappel : En raison des limites technologiques du procédé de fabrication des disjoncteurs, notamment le procédé de soudure – on note un taux d'appareils non étanches, détecté lors des tests d'étanchéité et de fonctionnalité, assez élevé avec une grande variabilité. Cette variabilité n'a pu être enrayée malgré des efforts considérables menés par le site depuis près de 10 ans.

Ce qui justifie d'ailleurs la nécessité d'un contrôle à 100%, qui seul garantit l'étanchéité.
Dès lors, pour réduire les émissions et s'affranchir d'un des paramètres de variabilité du procédé de fabrication, le site a décidé d'opter pour une solution de tests sans SF6 – à l'hélium.

L'hélium n'étant pas un gaz à effet de serre, lors de fuites d'équipements, il n'y a pas de pollution atmosphérique.
Le taux de fuite détectable avec cette nouvelle technologie est de TF2 atm.cm^3.s. Ce renforcement de précision a deux conséquences:

- Immédiate. Diminuer le nombre d'équipements fuyards de façon importante, chez le client et donc la pollution et les renvois d'équipements défectueux.
- Sur le long terme. Les équipements fuyants très faiblement sont mieux détectés. Les conséquences de fuites majeures sont diminuées (pollution, équipements défectueux…). **Avec pour conséquence de réduire les fuites chez le client.**

Les disjoncteurs fuyards (valeur moyenne Xf%) sont envoyés dans un autre procédé, réparation (en moyenne Xfr% d'entre eux) ou destruction (en moyenne Xfd% d'entre eux).

Les équipements étanches poursuivent les étapes du procédé (Etape 4).

4. Etape 4 : Vidange de l'hélium

La vidange des équipements se fait à pression atmosphérique pour ne pas les endommager (comme décrit précédemment). Une partie de l'hélium est récupérée pour être réutilisée. Le reste est évacué par injection d'air sans que cela n'ait de conséquences polluantes.
Une fois les équipements testés étanches et vidés, ils peuvent être remplis de SF6 (Etape 6).

5. Etape 5 : Réception / Convoyage du SF6

Le système est identique au précédent.
En théorie, les fuites réseau (foyer de fuites 1) sont estimées à $M_{réseau}$ kg/an de SF6.

6. Etape 6 : Remplissage de SF6 / Bouchonnage

Le système est identique au précédent.
En théorie, les fuites au bouchonnage (foyer de fuites 2) sont estimées à $M_{bouchonnage}$ kg/an de SF6.

7. Etape 7 : Test de fonctionnalité au SF6

Ce test se déroule de la même façon que dans le procédé de production initial.
En moyenne, Xd% d'entre eux sont défectueux. Ceux-ci sont envoyés dans un autre processus (Etape 8), en fonction du type d'anomalie et de son importance. Xdr% des équipements défectueux sont envoyés en réparation (Etape 8A) et Xdd% en destruction (Etape 8B).
Ces valeurs moyennes varient et sont données, à ce stade, à titre indicatif.

8. Etape 8 : Atelier de réparation/destruction

Les disjoncteurs défectueux subissent le même traitement qu'avant le projet de test à l'hélium. Cependant, les disjoncteurs fuyards arrivent remplis d'hélium, donc leurs émissions ne sont pas polluantes.

La réparation des disjoncteurs génère un taux d'émissions théoriques de $X_{réparation}$% de la consommation annuelle totale (foyer de fuites 3), soit en moyenne $M_{réparation}$ kg de SF6 émis par an.

La destruction génère un taux d'émissions théoriques de $X_{destruction}$% de la consommation annuelle totale (foyer de fuites 3), soit $M_{destruction}$ kg de SF6 émis par an.

Ces émissions sont donc uniquement dues aux équipements défectueux électriquement.

Ensuite, les disjoncteurs, remplis d'air, fuyards et défectueux électriquement, sont, soit réparés, soit détruits selon le type de défaut.

9. Etape 8A : Processus de réparation

Ce processus permet de réparer certains disjoncteurs défectueux, fuyards ou électriquement. Le personnel intervient manuellement sur les équipements, qui sont ensuite réintroduits à l'étape 2 du procédé.

10. Etape 8B : Processus de destruction

Ce processus a pour fonction de détruire certains disjoncteurs défectueux, fuyards ou électriquement.

II. Calcul des émissions théoriques de SF6

Afin de contrôler les émissions de SF6, la méthodologie se base sur la somme de bilans massiques de SF6 réalisés sur chacun des foyers de fuites le long de procédé de fabrication.

Cette méthodologie est basée sur plusieurs méthodologies de projet de Mécanisme de Développement Propre (MDP) :

- AM0035: "SF6 Emission Reductions in Electrical Grids"
- AM0078 : "Point of use abatement device to reduce SF6 in LCD manufacturing operations"
- AM0079: "recovery of SF6 from Gas insulated electrical equipment in testing facilities": **diminution des émissions de SF6 dans un site de tests de disjoncteurs, validée le 25 Mars 2009**

A. Calcul des émissions de SF6 avant le projet

Les taux d'équipements fuyards, défectueux électriquement puis envoyés en réparation, destruction sont estimés en fonction des données récupérées par le site.

Foyer de fuites 1 : Réseau

Ces émissions sont estimées à $X_{réseau}$% de la consommation totale en SF6. Soit **$M_{réseau}$ kg de SF6** émis par an.

Foyer de fuites 2 : Bouchonnage

Elles correspondent aux fuites émises pendant le temps de bouchonnage, soit, en moyenne Mb kg de SF6 par disjoncteur, soit **$M_{bouchonnage}$ kg/an.**

Foyer de fuites 3 : Réparation/destruction

Disjoncteurs fuyards :

Hypothèses de calcul de l'exemple d'estimation d'émissions de disjoncteurs fuyards. Ces hypothèses ont été prises en accord avec les données venant de l'entreprise de fabrication:

- Nombre de disjoncteurs fabriqués : N
- Mix des disjoncteurs :
  - Type 1 : M1 kg SF6
  - Type 2 : M2 kg SF6
  - Type 3 : M3 kg SF6
  - Type 4 : M4 kg SF6
  - Masse moyenne du mix : M_i kg de SF6 par disjoncteur
- Taux de disjoncteurs fuyards : Xf%
- Taux de disjoncteurs fuyards en réparation : Xfr%
- Taux de disjoncteurs fuyards en destruction : Xfd%
- Pression initiale des disjoncteurs : P1 bar
- Pression de vidange des disjoncteurs en réparation : Pr bar
- Pression de vidange des disjoncteurs en destruction : Pd bar

Nombre de disjoncteurs fabriqués par an	Taux de disjoncteurs fuyards (%)	Quantité de disjoncteurs fuyards	Taux de disjoncteurs en réparation (%)	Quantité de disjoncteurs fuyards envoyés en réparation	Quantité de SF6 perdue en réparation, à cause des disjoncteurs fuyards (kg)	
N	Xf	Nf	Xfr	Nfr	Mfr	
			Taux de disjoncteurs en destruction (%)	**Quantité de disjoncteurs fuyards envoyés en destruction**	**Quantité de SF6 perdue en destruction, à cause des disjoncteurs fuyards (kg)**	**Quantité totale de SF6 perdue (kg)**
			Xfd	Nfd	Mfd	$\mathbf{M_{fuyard}}$

Tableau 1 : Quantité de SF6 émise lors des tests d'étanchéité au SF6

Xf% des disjoncteurs sont déclarés fuyards. Les fuites étant infiniment petites, elles provoquent des émissions de SF6 négligeables dans le laps de temps situé entre la détection et la vidange.

Xfr% des disjoncteurs fuyards sont envoyés en réparation, ou l'équivalent de Pr bar est perdu dans l'atmosphère, soit Mfr kg de SF6 par an.

Xfd% d'entre eux sont envoyés en destruction ou la vidange provoque la fuite de l'équivalent de Pd bar, soit Mfd kg de SF6 par an.

Le total des émissions dues **aux disjoncteurs fuyards est estimé à M_{fuyard} kg de SF6 par an**. Ce qui représente X_{fuyard} % de la consommation annuelle totale en SF6.

Disjoncteurs défectueux électriquement :

Hypothèses de calcul de l'exemple d'estimation d'émissions lors de disjoncteurs défectueux électriquement. Ces hypothèses ont été prises en accord avec les données venant de l'entreprise de fabrication:

- Nombre de disjoncteurs fabriqués : N
- Mix des disjoncteurs :
  - Type 1 : M1 kg SF6
  - Type 2 : M2 kg SF6
  - Type 3 : M3 kg SF6
  - Type 4 : M4 kg SF6
  - Masse moyenne du mix : M_i kg de SF6 par disjoncteur
- Taux de disjoncteurs défectueux électriquement: Xd%
- Taux de disjoncteurs défectueux électriquement en réparation : Xdr%
- Taux de disjoncteurs défectueux électriquement en destruction : Xdd%
- Pression initiale des disjoncteurs : P1 bar
- Pression de vidange des disjoncteurs en réparation : Pr bar
- Pression de vidange des disjoncteurs en destruction : Pd bar

Nombre de disjoncteurs fabriqués par an	Taux de disjoncteurs défectueux (%)	Quantité de disjoncteurs défectueux	Taux de disjoncteurs en réparation (%)	Quantité de disjoncteurs défectueux envoyés en réparation	Quantité de SF6 perdue en réparation, à cause des disjoncteurs défectueux (kg)	
N	Xd	Nd	Xdr	Ndr	Mdr	
			Taux de disjoncteurs en destruction (%)	Quantité de disjoncteurs défectueux envoyés en destruction	Quantité de SF6 perdue en destruction, à cause des disjoncteurs défectueux (kg)	Quantité totale de SF6 perdue (kg)
			Xdd	Ndd	Mdd	$\mathbf{M_{défectueux}}$

Tableau 2 : Quantité de SF6 émise lors des tests de fonctionnalité électrique

Xd% des disjoncteurs sont défectueux au niveau électrique.

Xdr% de ces disjoncteurs sont envoyés en réparation. Procédé qui génère Mdr kg de SF6 émis par an.

Xdd% des disjoncteurs défectueux électriquement sont envoyés en destruction, ce qui a pour conséquence d'émettre Mdd kg de SF6 par an.

Au total, la quantité de SF6 perdue est estimée à $\mathbf{M_{défectueux}}$ **kg par an.** Ce qui représente $X_{défectueux}$ % de la consommation annuelle totale du site en SF6.

Foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'

En moyenne, $X_{miseàl'air}$ % des disjoncteurs sont défectueux et irrécupérables. Il ne s'agit pas de disjoncteurs fuyards. Dans leur cas, la totalité du SF6 qu'ils contiennent est émise dans l'atmosphère. Soit, $M_{miseàl'air}$ kg de SF6 émis annuellement.

Récapitulatif des émissions de SF6

Foyer de fuites		Taux d'émissions (kg/an)
1 : Réseau		$M_{réseau}$
2 : Bouchonnage		$M_{Bouchonnage}$
3 : Fuyards	Réparation	Mfr
	Destruction	Mfd
3 : Défectueux électriquement	Réparation	Mdr
	Destruction	Mdd
4 : 'mise à l'air'		$M_{miseàl'air}$
Total		$M_{avtprojet}$

Tableau 3 : Emissions totales de SF6 sur le site de production, avant projet

Le rejet total de SF6, avant projet, est estimé à $M_{avtprojet}$ kg par an. Soit $X_{avtprojet}$ % de la consommation annuelle totale en SF6.

B. Calcul des émissions de SF6 après le projet

Le projet est d'installer un système de test d'étanchéité à l'hélium. Les fuites dues aux disjoncteurs fuyards ne seront alors plus polluantes.
Ce projet n'a aucun impact sur les autres émissions.

Foyer de fuites		Taux d'émissions (kg/an)
1 : Réseau		$M_{réseau}$
2 : Bouchonnage		$M_{Bouchonnage}$
3 : Fuyards	Réparation	0
	Destruction	0
3 : Défectueux électriquement	Réparation	Mdr
	Destruction	Mdd
4 : 'mise à l'air'		$M_{miseàl'air}$
Total		$M_{apresprojet}$

Tableau 4 : Emissions totales de SF6 sur le site de production, après projet

Le total des émissions, suivant les mêmes estimations que précédemment, est **de $M_{apresprojet}$ kg de SF6 par an.** Ce qui représente **$X_{apresprojet}$ %** de la consommation annuelle totale de SF6.

C. Réduction des fuites de SF6 grâce au projet

Ce projet de test d'étanchéité à l'hélium permet de **réduire les émissions de SF6 de $M_{réduction}$ kg,** soit de $X_{réduction}$ % de la consommation annuelle totale de SF6.

III. Applicabilité

Cette méthodologie est applicable aux industries de production de disjoncteurs moyenne tension, utilisant du SF6, en France et qui veulent réduire leurs fuites.
Elle peut être appliquée dans les conditions suivantes :

- Entreprise de production de disjoncteurs moyenne tension contenant du SF6.
- L'entreprise fait des tests d'étanchéité avec du SF6.
- Le SF6 provenant des fuites d'installations est rejeté sans traitement dans l'atmosphère.
- Le site est une usine existante, dont le procédé comprend les équipements décrits ci-dessus et n'est pas réglementé au niveau des rejets de SF6.
- Le site s'engage à effectuer une déclaration annuelle (à partir de l'année de mise en service du projet) via GEREP de ses émissions de SF6 (mentionnées dans cette méthodologie) ainsi que sa consommation en SF6.

IV. Périmètre du projet

Sur ce site de fabrication de disjoncteurs moyenne tension, le procédé est complet. Le produit fini est directement utilisable par le client final, le produit étant opérationnel, rempli de SF6 et testé tout autant fonctionnellement qu'en étanchéité.

Un site de fabrication de disjoncteurs est un site où se combine :

- Un procédé d'assemblage qui concerne l'assemblage de l'équipement châssis, tôlerie, fonctions électroniques avec notamment des procédés de soudure très pointus
- Un procédé de réception / vidange / convoyage du SF6 destiné à être injecté dans les cellules étanches des disjoncteurs
- Un procédé de remplissage du SF6 dans les cellules
- Un procédé de contrôle/test de l'étanchéité
- Un procédé de contrôle/test de la fonctionnalité électrique
- Un atelier de réparation/destruction
  - Un procédé de réparation des équipements défectueux, soit en étanchéité, soit en fonctionnalité électrique
  - Un procédé de destruction des équipements défectueux, soit en étanchéité, soit en fonctionnalité électrique

Les équipements de contrôles/tests d'étanchéité sont des équipements spécifiques aux types de disjoncteurs produits sur le site.

Ils sont de très haut niveau technologique avec une extrême précision de remplissage ou de vidange (à une certaine pression pour ne pas endommager les disjoncteurs ou blesser le personnel).

Le périmètre du projet comprend le procédé de test d'étanchéité, initialement réalisé avec du SF6 puis, avec le projet, réalisé avec de l'hélium.
Le seul gaz à effet de serre pris en considération est le SF6 qui est généralement utilisé comme un isolant dans la transmission électrique et des réseaux de distribution.

	Source	Gaz	Inclu / Exclu	Explication
Cas de référence	Emissions de SF6 à chaque foyer de fuites du procédé de fabrication	SF6	Oui	Fuites de SF6 dans l'atmosphère pendant le procédé de fabrication
		CO2	Non	
		CH4	Non	
Activité de projet	Emissions de SF6 à chaque foyer de fuites du procédé de fabrication	SF6	Oui	Fuites de SF6 dans l'atmosphère pendant le procédé de fabrication
		CO2	Non	
		CH4	Non	

Tableau 5 : Sources d'émissions inclues et exclues du périmètre du projet

V. Sélection du scénario de référence

La méthodologie a pour but de changer le type de test d'étanchéité effectué. C'est-à-dire le remplacement du test au SF6 par un test à l'hélium.

La sélection du scénario de référence implique l'identification préalable des différents scénarii de référence possibles pour le projet et l'élimination de ceux qui ne sont pas viables.

Cette analyse est effectuée en trois étapes :

- **Étape 1. Identifier les scénarios de référence techniquement réalisables dans le cadre de l'activité du projet :**

Alternatives proposées :

1. Continuer l'activité sans effectuer de changement
2. Monter le projet sans faire de projet domestique / JI

- **Etape 2. Éliminer les alternatives de scénarios de référence qui ne répondraient pas aux réglementations nationales et locales :**

Le SF6 n'est soumis à aucune réglementation de rejet en France, dans le domaine de la fabrication de disjoncteurs moyenne tension.
Aucune des alternatives ne peuvent être écartées des propositions à l'issue de cette étape.

- **Etape 3. Eliminer les alternatives de scenarios de référence qui feraient face à des barrières prohibitives (analyse des barrières) :**

Les barrières identifiées sont :

i) Les barrières à l'investissement
ii) Les barrières technologiques, entre autres :
    1. Les risques techniques et opérationnels des alternatives
    2. L'efficacité technique des alternatives
    3. Le manque de main d'œuvre qualifiée
    4. Le manque d'infrastructures pour mettre en œuvre la technologie
iii) Les barrières liées aux pratiques dominantes, entre autres :
    1. Technologie avec laquelle les développeurs de projet ne sont pas familiers
    2. Il n'existe aucun projet similaire opérationnel dans la zone géographique considérée

Alternative 1 :

L'alternative 1, de continuer l'activité comme la situation actuelle, ne fait face à aucune barrière prohibitive car il n'y a aucune réglementation à ce jour en vigueur concernant la réduction des émissions de SF6 dans le domaine de la fabrication de disjoncteurs moyenne tension.

Alternative 2 :

La mise en place du système de test à l'hélium nécessite un investissement important, tant au niveau de l'équipement qu'au niveau des perturbations liées à l'installation et la mise au point de l'équipement.

L'analyse financière de ce projet montre que **le retour sur investissement est supérieur à A ans. Or le PDD ne pourra être validé avant mi-2010. Soit une période de créditing de 2.5 ans (de mi-2010 à fin 2012). Le gain net total, sur la période de 2.5 ans, couvre une faible part du coût d'investissement total.**

L'alternative 1 de continuité de la situation actuelle est donc retenue comme scénario de référence du projet.

VI. Additionalité

Pour démontrer concrètement que le projet est additionnel, c'est-à-dire que les résultats du projet en termes d'émissions de SF6 sont différents du scénario de référence, le porteur du projet devra adopter un raisonnement par étapes, conformément à l'Annexe 3 de l'Arrêté du 2 Mars 2007.

Dans le cas de la limitation de fuites de SF6, les alternatives possibles qui devront être analysées sont :

1. La possibilité d'optimiser le procédé de vidange lors des réparations et destructions.
2. Technologies de réparation et de destruction des équipements défectueux 'sous vide'.
3. La mise en place de test d'étanchéité à l'hélium
4. La mise en place de test d'étanchéité à l'azote
5. Le maintien du scénario de référence.

Alternative 1 :

L'entreprise a montré son application à réduire les fuites de SF6, notamment au niveau de l'optimisation des fuites lors des tests d'étanchéité. La performance atteinte par ce site industriel est déjà de très haut niveau.

- Pour rappel, l'objectif Gimélec d'émissions de SF6 est de 2.5% de la consommation annuelle.
- Pour information, ce site est l'un des plus performants au monde de ce groupe industriel, qui compte plus de 10 sites comparables.
- Pour comparaison, **un projet CDM est actuellement en phase de validation avec un niveau de référence d'émission à 10% et un niveau après projet à 3%.**

L'ensemble du procédé et des paramètres du procédé sont réglés pour réduire au maximum les fuites.
Celles-ci ne peuvent être réduites en continuant selon le procédé actuel.
En effet, les technologies utilisées pour maintenir l'étanchéité, telle que la soudure, sont à leur limite. Ce qui génère une grande variabilité de l'étanchéité des équipements bien qu'elle est aussi dut à des limites de fonctionnalité. Taux qui ne peut être amélioré malgré tous les efforts du site.

Dès lors, aucune amélioration du procédé de production ne peut garantir la baisse durable des rebuts lors des tests d'étanchéité.

L'atelier de réparation/destruction, où sont envoyés ces disjoncteurs fuyards, ne peut lui non plus faire l'objet d'amélioration significative qui réduirait le taux d'émissions.

En effet comme indiqué précédemment, il n'est pas matériellement possible de récupérer l'ensemble du gaz SF6 sous peine de détériorer les disjoncteurs, voire de créer des situations dangereuses pour le personnel qui intervient manuellement dans cet atelier.

Alternative 2 :

L'alternative 2 nécessite l'installation d'une enceinte sous vide, dans laquelle rentrent les équipements défectueux pour être vidés. Ensuite, pour effectuer les réparations, soit le personnel doit travailler 'sous vide', soit un procédé de bras téléguidé est mis en place.

Ce type d'installation fait face à une barrière technologique prohibitive. En effet, ce type de technologie est très difficilement envisageable.

Alternative 3 :

L'alternative 3 qui représente la mise en œuvre de l'activité de projet nécessite un investissement important. De plus, comme il est démontré ci-dessus (V. sélection du scénario de référence), les URE constituent la seule recette attendue.

Ceci démontrant l'intérêt du financement carbone pour investir dans ce type de projet et donc le dépassement de la barrière à l'investissement par le biais du projet domestique.
Ceci même si le retour sur investissement avec les URE reste très long, supérieur à A ans.

Alternative 4 :

Au vue des installations de détection déjà présentes sur ce site, le test à l'hélium est plus intéressant financièrement. En effet, une partie des installations initiales peuvent être utilisées pour la détection des molécules d'hélium et non pour celles d'azote.
Il faudrait investir, en plus des équipements de test, dans un autre système de détection, pour pouvoir utiliser de l'azote lors des tests d'étanchéité.
D'autre part, de point de vue de l'effet de serre, l'utilisation de l'azote en lieu et place de l'hélium ne présente aucun avantage.

Alternative 5 :

La poursuite de la situation pré existante, définie comme scénario de référence, alternative 1, (V. sélection du scénario de référence), n'a aucun impact sur les émissions de SF6.

De toute évidence, tester les disjoncteurs avec un gaz neutre, l'hélium, apparait comme la meilleure solution.

VII. Réductions d'émissions

La méthodologie de calcul présentée ci-dessous est celle utilisée pour reporter les fuites à la DRIRE.
La méthodologie est basée sur l'addition des fuites référencées tout au long du procédé de fabrication. A savoir :

- **Foyer de fuites 1 : Réseau** (Etape 2): Le réseau de conduits n'est pas totalement étanche
- **Foyer de fuites 2 : Bouchonnage** (Etape 3) : Lors du bouchonnage des disjoncteurs afin de les rendre hermétiques
- **Foyer de fuites 3 : Réparation/destruction** (Etape 6) :
  - Sur les disjoncteurs envoyés en réparation, on récupère (P1-Pr) bar, le reste est rejeté à l'atmosphère
  - Sur les disjoncteurs envoyés en destruction, on récupère (P1-Pd) bar, le reste est rejeté à l'atmosphère
- **Foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'** :
  - Lors de la 'mise à l'air', la totalité du SF6 contenue dans les disjoncteurs est perdue dans l'atmosphère.

Cette somme d'émissions est mesurée pour le scénario de référence, avec le système de test d'étanchéité au SF6. Puis ces mêmes mesures sont effectuées pour connaître les émissions du projet, avec le système de test à l'hélium. La méthodologie permet de mesurer les réductions d'émissions en faisant la différence entre ces émissions sans le système de test à l'hélium et avec ce système.

Les réductions d'émissions sont calculées suivant cette équation :

$$\mathbf{Re_{y,x} = ESR_x - EP_y}$$

Rey,x = Réductions d'émission pendant l'année y par rapport à l'année de référence x (tCO2/an)
ESRx = Emissions du scenario de référence x (tCO2/an)
EPy = Emissions du projet pendant l'année y (tCO2 /an)

A. Scénario de référence

Attention : il serait inapproprié de se référer à une valeur benchmark. Chaque site et procédé de fabrication est différent car chaque produit fini est différent. On ne peut en aucun cas comparer des disjoncteurs haute tension avec des disjoncteurs moyenne tension.

Nous proposons alors de prendre comme référence la valeur minimale des 6 années précédant la mise en place du système de test à l'hélium. Ces données ont été déclarées à la DRIRE, elles sont donc officielles.

Eu égard à la grande variabilité des disjoncteurs détectés fuyards ou défectueux électriquement lors des tests, donc à la grande variabilité des émissions, il est nécessaire de prendre en considération ces valeurs d'émissions des 6 dernières années de fabrication dans la limite des 2,5 % de la consommation annuelle de SF6, conformément aux objectifs du Gimélec.

Emissions du scenario de référence

$$ESR_X = X_{ESR,X} \times M_{conso,x} \times PRG_{SF6}$$

ESR_x: Emissions du scenario de référence de l'année x (tCO2/an)
$X_{ESR,X}$: Taux d'émissions des fuites de l'année x (%)
PRG_{SF6} : Pouvoir de réchauffement global du SF6 (23.9 tCO2/kgSF6)
$M_{conso,\ x}$ = Masse réelle de SF6 injectée dans le réseau, sur l'année x (kg SF6)

$$M_{conso,x} = \sum_{k=1}^{m_x} (M_{bombonne\ avant\ k,x} - M_{bombonne\ après\ k,x})$$

$M_{\ bombonne\ avant\ k,\ x}$= Masse de la bombonne k, à l'arrivée sur le site, sur l'année x (kg)

$M_{\ bombonne\ après,\ k,\ x}$= Masse de la bombonne k, après leur vidange dans le réseau, sur l'année x (kg)

m_x : Nombre total de bombonnes livrées sur le site et vidées dans le réseau de production sur l'année x

Détermination du taux d'émissions des fuites

Le taux d'émissions des fuites du scénario de référence correspond au taux d'émission le plus bas constaté au cours des 6 dernières années précédant celle de la mise en œuvre du projet, **dans la limite des 2,5%** (valeur conforme aux objectifs du Gimélec).

Cas 1 : Si Xesr,x < 2,5%

$$X_{ESR,X} = ((M_{Réseau,\ x} + M_{Bouchonnage,\ x} + M_{Réparation/destruction,x} + M_{mise\ à\ l'air,x}) / M_{conso,x}) \times 100$$

$X_{ESR,X}$: Taux d'émissions des fuites de l'année x (%)
$M_{Réseau,\ x}$: Fuites du réseau sur l'année x (kg SF6)
$M_{Bouchonnage,\ x}$: Fuites lors du bouchonnage, sur l'année x (kg SF6)
$M_{Réparation/destruction,\ x}$: Fuites générées dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année x (kg SF6)

$M_{Mise\ à\ l'air,\ x}$: Fuites de 'mise à l'air' des disjoncteurs de l'année x (kg SF6)
$M_{conso,x}$: Masse réelle de SF6 injectée dans le réseau, sur l'année x (kg SF6)

Foyer de fuites 1 : Réseau

$$M_{réseau,x} = K_{réseau,x} \times M_{conso,x}$$

$M_{Réseau,\ x}$: Fuites sur le réseau (conduits) de l'année x (kg SF6)

$M_{conso,x}$: Masse réelle de SF6 injectée dans le réseau, sur l'année x (kg SF6)

$K_{réseau\ x}$: Constante de chute de pression mesurée sur le réseau, sur l'année x (%)

$$K_{réseau,x} = \frac{(PR1x - PR2x)}{PR1x} \times 100$$

PR1x : Pression du réseau à t1, sur l'année x (Bar)

PR2x : Pression du réseau à t2, sur l'année x (Bar)

Foyer de fuites 2 : Bouchonnage

$$M_{Bouchonnage,x} = K_{bouchonnage} \times ND_x$$

$M_{Bouchonnage,\ x}$: Fuites lors du bouchonnage sur l'année x (kg SF6)

$K_{bouchonnage}$: Constante de fuite au bouchonnage, mesurée sur le réseau (kg SF6)

ND_x : Nombre de disjoncteurs bouchonnés, sur l'année x

Après avoir été remplis de SF6, les équipements sont conduits au procédé de bouchonnage afin d'être fermés hermétiquement. Le temps de bouchonnage génère des fuites de SF6.

Une courbe de référence, quantité de SF6 échappée de l'équipement en fonction du temps de bouchonnage, est réalisée :

- Étape 1 : Retrait du bouchon (obus toujours en place) et mise en place du raccord Staubli.

- Étape 2 : Branchement du débitmètre massique - Arrêt toutes les t_{FM} minutes, pour comptabiliser les fuites. Attente jusqu'à stabilisation du débitmètre (c'est-à-dire jusqu'à la pression d'environ 1bar)

Cette courbe de référence permet de trouver la quantité de SF6 perdue par minute nécessaire au calcul. Cette valeur est constante, nommée $K_{bouchonnage}$.

$K_{bouchonnage}$: Constante de fuite au bouchonnage, mesurée sur le réseau (kg SF6)

$$K_{bouchonnage} = TB \times FM$$

> TB : Temps d'un opérateur pour bouchonner (minute)
>
> FM : Fuites de SF6 / minute (kg SF6/min)

Foyer de fuites 3 : Réparation/destruction

$$M_{réparation/destruction,x} = \sum_{i=1}^{n} \left(M_{i,x} \times \left(QRDF_{i,x} + QRDE_{i,x} \right) \right) - MD_x$$

$M_{Réparation/destruction,\ x}$: Fuites générées dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année x (kg SF6)

$M_{i,\ x}$: Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i (kg SF6)

$QRDF_{i,x}$: Quantité de disjoncteurs fuyards, de la catégorie i, envoyés dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année x

$QRDE_{i,x}$: Quantité de disjoncteurs défectueux électriquement, de la catégorie i, envoyés dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année x

MD_x : Masse de SF6 récupérée par la station Dilo (station de pompage du SF6) de (kg SF6)

n : nombre de type de disjoncteurs fabriqués

Dans l'atelier réparation/destruction, on retrouve les équipements fuyards et défectueux électriquement.

Des relevés sont réalisés afin de connaître le nombre de disjoncteurs, de chaque catégorie, envoyés dans cet atelier (type 1, 2, 3 et 4).

A l'entrée, les disjoncteurs défectueux (fuyards ou avec des problèmes de fonctionnement électrique) ont une masse variable selon leur catégorie (Type 1 : M1 kg SF6 – Type 2 : M2 kg SF6 – Type 3 : M3 kg SF6 – Type 4 : M4 kg SF6).

La vidange est effectuée par une station Dilo qui récupère une partie du SF6 contenu dans les disjoncteurs, ce SF6 est ensuite stocké dans des bombonnes et pesé, pour en connaitre la quantité récupéré, puis renvoyé au fournisseur.

Pour calculer les émissions dans cet atelier, on réalise le bilan massique de l'atelier, en SF6 :

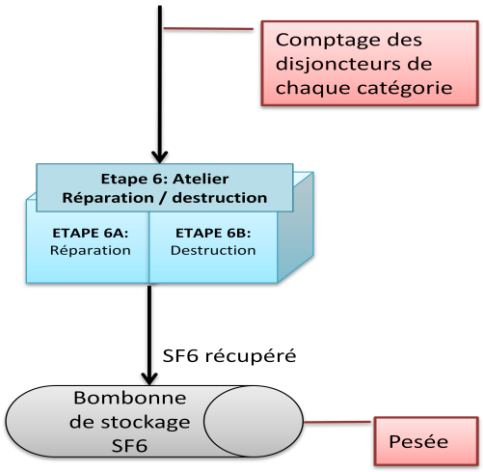

Schéma 5 : Bilan massique en SF6, de l'atelier réparation/destruction, avant projet

Foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'

Certains disjoncteurs subissent des dommages irréparables qui génèrent la perte de la totalité du SF6 contenu.

$$M_{\text{mise à air,x}} = \sum_{i=1}^{n} \left(M_{\text{i,x}} \times N_{\text{dis,x}} \right)$$

$M_{\text{mise à l'air, x}}$: Fuites de 'mise à l'air' des disjoncteurs de l'année x (kg SF6)

$M_{i,\ x}$: Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i (kg SF6) (quatre catégories (Type 1, 2, 3, 4))

$N_{\text{dis, x}}$: Quantité de disjoncteurs de la catégorie i, 'mis à l'air', sur l'année x

n : nombre de type de disjoncteurs fabriqués (4 catégories)

Les calculs d'incertitudes des mesures prises pour connaître les émissions du scénario de référence sont en annexe.

Cas 2 : Si Xesr,x > 2,5%

Dans le cas où le taux d'émissions des fuites est supérieur ou égal à 2,5%, la valeur conforme aux objectifs du Gimélec est choisie comme référence :

$$X_{\text{ESR,x}} = 2{,}5\%$$

$X_{\text{ESR,X}}$: Taux d'émissions des fuites de l'année x (%)

B. Emissions du projet

Les relevés réalisés après l'installation du projet sont pris de façon identique. Le changement majeur, comme expliqué précédemment, se fait dans l'atelier de réparation/destruction. En effet, le projet prévoit de remplacer les tests au SF6 par de l'hélium. Les équipements fuyards qui sont dirigés vers l'atelier de réparation/destruction ne sont plus polluants, d'où la diminution des fuites.

La méthode de calcul des émissions du projet est décrite ci-dessous :

Emissions du projet

$$EPy = (M_{Réseau,\ y} + M_{Bouchonnage,\ y} + M_{Réparation/destruction,\ y} + M_{mise\ à\ l'air,\ y}) \times PRG_{SF6}$$

EPy: Emissions du projet de l'année y (tCO2/an)

PRG_{SF6} = Pouvoir de réchauffement global du SF6 (23.9 tCO2/kgSF6)

$M_{Réseau,\ y}$: Fuites du réseau sur l'année y (kg SF6)

$M_{Bouchonnage,\ y}$: Fuites lors du bouchonnage, sur l'année y (kg SF6)

$M_{Réparation/destruction,\ y}$: Fuites générées dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année y (kg SF6)

$M_{Mise\ à\ l'air,\ y}$: Fuites de 'mise à l'air' des disjoncteurs de l'année y (kg SF6)

Foyer de fuites 1 : Réseau

$$M_{réseau,y} = K_{réseau,y} \times M_{conso,y}$$

$M_{Réseau,\ y}$: Fuites sur le réseau (conduits) de l'année y (kg SF6)

$M_{conso,\ y}$ = Masse réelle de SF6 injectée dans le réseau, sur l'année y (kg SF6)

$$M_{conso,y} = \sum_{k=1}^{m_y} (M_{bombonne\ avant\ k,y} - M_{bombonne\ après\ k,y})$$

$M_{\ bombonne\ avant\ k,\ y}$= Masse de la bombonne k, à l'arrivée sur le site, sur l'année y (kg)

$M_{\ bombonne\ après,\ k,\ y}$= Masse de la bombonne k, après leur vidange dans le réseau, sur l'année y (kg)

m_y : Nombre total de bombonnes livrées sur le site et vidées dans le réseau de production sur l'année y

$K_{réseau,\ y}$: Constante de chute de pression mesurée sur le réseau, sur l'année y (%)

$$K_{réseau,y} = \frac{(PR1y - PR2y)}{PR1y} \times 100$$

> PR1y : Pression du réseau à t1, sur l'année y (Bar)
>
> PR2y : Pression du réseau à t2, sur l'année y (Bar)

Foyer de fuites 2 : Bouchonnage

$$M_{Bouchonnage,y} = K_{bouchonnage} \times ND_y$$

$M_{Bouchonnage,\ x}$: Fuites lors du bouchonnage sur l'année y (kg SF6)

$K_{bouchonnage}$: Constante de fuite au bouchonnage, mesurée sur le réseau (kg SF6)

ND_y : Nombre de disjoncteurs bouchonnés, sur l'année y

Après avoir été remplis de SF6, les équipements sont conduits au procédé de bouchonnage afin d'être fermés hermétiquement. Le temps de bouchonnage génère des fuites de SF6.

Une courbe de référence, quantité de SF6 échappée de l'équipement en fonction du temps de bouchonnage, est réalisée :

- Étape 1 : Retrait du bouchon (obus toujours en place) et mise en place du raccord Staubli.
- Étape 2 : Branchement du débitmètre massique - Arrêt toutes les t_{FM} minutes, pour comptabiliser les fuites. Attente jusqu'à stabilisation du débitmètre (c'est-à-dire jusqu'à la pression d'environ 1bar)

Cette courbe de référence permet de trouver la quantité de SF6 perdue par minute nécessaire au calcul. Cette valeur est constante, nommée $K_{bouchonnage}$.

$K_{bouchonnage}$: Constante de fuite au bouchonnage, mesurée sur le réseau (kg SF6)

$$K_{bouchonnage} = TB \times FM$$

> TB : Temps d'un opérateur pour bouchonner (minute)
>
> FM : Fuites de SF6 / minute (kg SF6/min)

Foyer de fuites 3 : Réparation/destruction

$$M_{réparation/destruction,y} = \sum_{i=1}^{n} (M_{i,y} \times QRDE_{i,y}) - MD_y$$

$M_{Réparation/destruction,\ x}$: Fuites générées dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année x (kg SF6)

$M_{i,\ y}$: Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i (kg SF6)

$QRDE_{i,y}$: Quantité de disjoncteurs défectueux électriquement, de la catégorie i, envoyés dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année y

MD_y : Masse de SF6 récupérée par la station Dilo (station de pompage du SF6) de (kg SF6)

n : nombre de type de disjoncteurs fabriqués

Dans l'atelier réparation/destruction, on retrouve les équipements fuyards et défectueux électriquement. Dans le cadre du projet, seuls les disjoncteurs défectueux électriquement contiennent du SF6, se sont donc les seuls à émettre du SF6.

Des relevés sont réalisés afin de connaitre le nombre de disjoncteurs défectueux électriquement, de chaque catégorie, envoyé dans cet atelier (type 1, 2, 3 et 4).

A l'entrée, les disjoncteurs défectueux électriquement ont une masse variable selon leur catégorie (Type 1 : M1 kg SF6 – Type 2 : M2 kg SF6 – Type 3 : M3 kg SF6 – Type 4 : M4 kg SF6).

La vidange est effectuée par une station Dilo qui récupère une partie du SF6 contenu dans les disjoncteurs, ce SF6 est ensuite stocké dans des bombonnes et pesé, pour en connaitre la quantité récupérée, puis renvoyée au fournisseur.

Pour calculer les émissions dans cet atelier, on réalise le bilan massique de l'atelier, en SF6 :

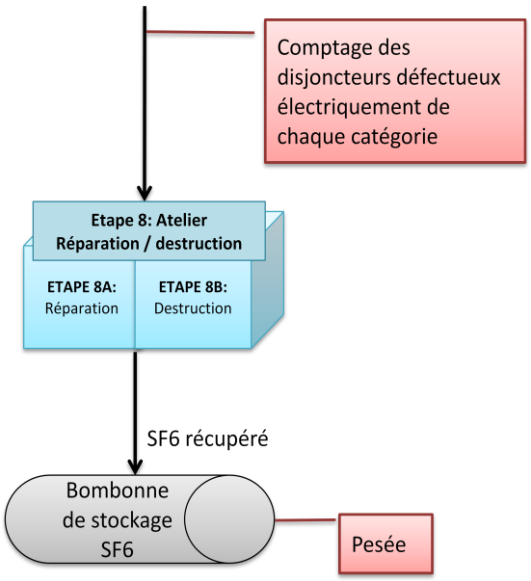

Schéma 6 : Bilan massique en SF6, de l'atelier réparation/destruction, après projet

Foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'

Certains disjoncteurs subissent des dommages irréparables qui génèrent la perte de la totalité du SF6 contenu.

$$M_{\text{mise à air,y}} = \sum_{i=1}^{n} \left(M_{\text{i,y}} \times N_{\text{dis,y}} \right)$$

$M_{\text{mise à l'air, y}}$: Fuites de 'mise à l'air' des disjoncteurs de l'année y (kg SF6)

$M_{\text{i, y}}$: Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i (kg SF6) (quatre catégories (Type 1, 2, 3, 4))

$N_{\text{dis, y}}$: Quantité de disjoncteurs de la catégorie i, 'mis à l'air', sur l'année y

n : nombre de type de disjoncteurs fabriqués

Les calculs d'incertitudes des mesures prises pour connaître les émissions du projet sont en annexe.

C. Fuites du projet

Il n'y a pas de fuite à considérer.

VIII. Données à utiliser

Les données utilisées dans le calcul de réduction d'émissions sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Symbole	Donnée	Unité	Source de la donnée	Description des méthodes et procédures de mesure qui seront appliquées	Fréquence de relevé	Incertitude
$M_{bombonne\ avant,\ k,\ x}$; $M_{bombonne\ avant,\ k,\ y}$	Masse de la bombonne k à son arrivée sur le site, environ MB kg	Kg	Balance	Pesée de la bombonne à son arrivée sur le site	Pesée de chaque bombonne	+/- Xb g par bombonne
$M_{bombonne\ après,\ x}$; $M_{bombonne\ après,\ y}$	Masse de la bombonne k après sa vidange dans le réseau, environ $M_{résidu}$ kg	Kg	Balance	Pesée de la bombonne après que le SF6 soit écoulé dans le réseau	Pesée de chaque bombonne	+/- Xb g par bombonne
m_x ; m_y	Nombre de bombonnes	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de bombonnes livrées et vidées sur le site de production de disjoncteurs	Annuel	Valeur exacte
$PR1_x$; $PR1_y$	Pression du réseau à t1, environ $X_{réseau}$% de fuite annuelle	Bar	Manomètre	Le réseau est fermé, en amont et en aval, pendant un temps donné. La pression est prise par un manomètre juste après la fermeture du réseau	Annuel	X_{PR1}%
$PR2_x$; $PR2_y$	Pression du réseau à t2, environ $X_{réseau}$ % de fuite annuelle	Bar	Manomètre	Lorsque le réseau est fermé, la pression est prise avec un manomètre à un temps t2, avant réouverture du réseau	Annuel	X_{PR2}%
TB	Temps d'un opérateur pour bouchonner, environ t secondes = t' minute	Minute	Chronomètre	Test sur échantillonnage	Annuel	+/- X_{tps} seconde

Symbole	Donnée	Unité	Source de la donnée	Description des méthodes et procédures de mesure qui seront appliquées	Fréquence de relevé	Incertitude
FM	Fuites de SF6 / minute, environ FM g/min	Kg SF6/ minute	Courbe de référence	1. Retrait du bouchon (obus toujours en place) et mise en place du raccord staubli. 2. Branchement du débitmètre massique - Arrêt toutes les t_{FM} mn, pour comptabiliser les fuites - Attente jusqu'à stabilisation du débitmètre (environ 1bar) 3. Etablir la courbe de référence et en déduire la moyenne de fuites par minute	Annuel	+/-X_{FM} g/min
ND_x ; ND_y	Nombre de disjoncteurs bouchonnés	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de disjoncteurs passant par l'étape de bouchonnage	Annuel	Valeur exacte
$M_{i,x}$; $M_{i,y}$	Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i	Kg SF6	Valeurs constantes : Type 1 : M1 kg Type 2 : M2 kg Type 3 : M3 kg Type 4 : M4 kg	A l'aide du débitmètre, on récupère la quantité de SF6 introduit dans les 4 catégories de disjoncteurs	A chaque disjoncteur	X_M% Type 1 : +/- X_{M1} kg Type 2 : +/- X_{M2} kg Type 3 : +/- X_{M3}kg Type 4 : +/- X_{M4}kg
$QRDF_{i,x}$	Quantité de disjoncteurs fuyards, de la catégorie i, envoyés dans l'atelier de réparation/destruction	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de disjoncteurs fuyards envoyés dans l'atelier réparation/destruction	Annuel	Valeur exacte

Symbole	Donnée	Unité	Source de la donnée	Description des méthodes et procédures de mesure qui seront appliquées	Fréquence de relevé	Incertitude
$QRDE_{i,x}$ $QRDE_{i,y}$	Quantité de disjoncteurs défectueux électriquement, de la catégorie i, envoyés dans l'atelier de réparation/destruction	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de disjoncteurs défectueux électriquement envoyés dans l'atelier réparation/destruction	Annuel	Valeur exacte
MD_x ; MD_y	Masse de SF6 récupérée par la station Dilo	Kg SF6	Balance	Pesée des bombonnes de Mb' kg	A chaque bombonne envoyée au fournisseur	+/-Xb g
$N_{dis,x}$; $N_{dis,y}$	Quantité de disjoncteurs de la catégorie i, 'mis à l'air'	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de disjoncteurs 'mis à l'air'	Annuel	Valeur exacte
PRG_{SF6}	Pouvoir de réchauffement global du SF6	tCO2/tSF6	IPCC : 23 900 tCO2/tSF6	x	x	Valeur exacte

Tableau 6 : Paramètres à déterminer.

IX. Méthode de comptabilisation et de suivi des réductions d'émissions

En préambule, il faut préciser que chaque disjoncteur est identifié par une référence spécifique qui le suit de sa naissance jusqu' à la fin de vie. Ainsi, il y a une traçabilité totale pour chaque élément qui permet de suivre son parcours au sein du site industriel via un état de suivi ou 'historique'. D'autre part selon le type de disjoncteur (la référence) le contenu de SF6 est connu par construction selon les spécificités techniques de chaque type de disjoncteurs.

La méthodologie de comptabilisation et suivi des réductions d'émission retenue pour notre projet est celle qui est utilisée depuis de nombreuses années sur le site et qui fait l'objet de la déclaration officielle annuelle auprès de la DRIRE.

Afin de garantir la transparence du suivi des émissions, **le site concerné s'engage à effectuer une déclaration annuelle (à partir de l'année de mise en service du projet) via GEREP de ses émissions de SF6 (mentionnées dans cette méthodologie) ainsi que sa consommation en SF6.**

Cette méthodologie couvre les 4 foyers de fuite identifiés :

- Foyer de fuites 1 : réseau
- Foyer de fuites 2 : bouchonnage
- Foyer de fuites 3 : atelier de réparation/destruction
- Foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'

Elle fait l'objet de mesures régulières, chaque année, selon des fréquences et procédures techniques déterminées. Pression, différence de pression, masse et différence de masse sont mesurées et calculées pour chacun des foyers de fuites.

La méthodologie de mesure est définie comme décrit dans la partie VII.B. et ne changera pas au cours du projet.

A. Foyer de fuites 1 : réseau

Pour comptabiliser les émissions du réseau, chaque année, selon un protocole sous assurance qualité, à une fréquence annuelle, le service qualité mesure la différence de pression du gaz SF6 dans le réseau de conduits, entre :

- Le manomètre en entrée (lors de la vidange des bombonnes, après détente du gaz - Etape 2)
- Le manomètre en sortie (à l'entrée de la station de remplissage des disjoncteurs – Etape 3)

Ces manomètres indiquent une pression PR1 et PR2. La chute de pression, différence entre PR1 et PR2, est engendrée par la perte de SF6 dans les conduits.

Avec ces données et les équations suivantes, on peut calculer les émissions du foyer de pertes 1 : réseau.

$$M_{réseau,y} = K_{réseau,y} \times M_{conso,y}$$

$M_{Réseau,\ y}$: Fuites sur le réseau (conduits) de l'année y (kg SF6)

$M_{conso,\ y}$: Masse réelle de SF6 injectée dans le réseau, sur l'année y (kg SF6)

$K_{\ réseau,\ y}$: Constante de chute de pression mesurée sur le réseau, sur l'année y (%)

$$M_{conso,y} = \sum_{k=1}^{m_y} (M_{bombonne\ avant\ k,y} - M_{bombonne\ après\ k,y})$$

$M_{conso,\ y}$ = Masse réelle de SF6 injectée dans le réseau, sur l'année y (kg SF6)

$M_{\ bombonne\ avant\ k,\ y}$= Masse de la bombonne k, à l'arrivée sur le site, sur l'année y (kg)

$M_{\ bombonne\ après,\ k,\ y}$= Masse de la bombonne k, après leur vidange dans le réseau, sur l'année y (kg)

m_y : Nombre total de bombonnes livrées sur le site et vidées dans le réseau de production sur l'année y

$$K_{réseau,y} = \frac{(PR1y - PR2y)}{PR1y} \times 100$$

$K_{\ réseau,\ y}$: Constante de chute de pression mesurée sur le réseau, sur l'année y (%)

PR1y : Pression du réseau à t1, sur l'année y (Bar)

PR2y : Pression du réseau à t2, sur l'année y (Bar)

Les caractéristiques de chaque paramètre et équipement de mesure sont définies dans le tableau ci-dessous :

Symbole	Donnée	Unité	Source de la donnée	Description des méthodes et procédures de mesure qui seront appliquées	Fréquence de relevé	Incertitude
$M_{bombonne\ avant,\ k,\ y}$	Masse de la bombonne k à son arrivée sur le site, environ MB kg	Kg	Balance	Pesée de la bombonne à son arrivée sur le site	Pesée de chaque bombonne	+/- Xb g par bombonne
$M_{bombonne\ après,\ k,\ y}$	Masse de la bombonne k après sa vidange dans le réseau, environ $M_{résidu}$ kg	Kg	Balance	Pesée de la bombonne après que le SF6 soit écoulé dans le réseau	Pesée de chaque bombonne	+/- Xb g par bombonne
m_y	Nombre de bombonnes	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de bombonnes livrées et vidées sur le site de production de disjoncteurs	Annuel	Valeur exacte
PR1y	Pression du réseau à t1, environ $X_{réseau}$% de fuite annuelle	Bar	Manomètre	Le réseau est fermé, en amont et en aval, pendant un temps donné. La pression est prise par un manomètre juste après la fermeture du réseau	Annuel	X_{PR1}%
PR2y	Pression du réseau à t2, environ $X_{réseau}$ % de fuite annuelle	Bar	Manomètre	Lorsque le réseau est fermé, la pression est prise avec un manomètre à un temps t2, avant réouverture du réseau	Annuel	X_{PR2}%
$M_{i,\ y}$	Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i	Kg SF6	Valeurs constantes : Type 1 : M1 kg Type 2 : M2 kg Type 3 : M3 kg Type 4 : M4 kg	A l'aide du débitmètre, on récupère la quantité de SF6 introduit dans les 4 catégories de disjoncteurs	A chaque disjoncteur	X_M% Type 1 : +/- X_{M1} kg Type 2 : +/- X_{M2} kg Type 3 : +/- X_{M3}kg Type 4 : +/- X_{M4}kg

Tableau 7 : Paramètres et caractéristiques des équipements de mesure pour le foyer de fuites 1 : réseau

B. Foyer de fuites 2 : bouchonnage

Les émissions, lors du bouchonnage, sont comptabilisées annuellement par la mesure du temps que prend la manipulation (bouchonnage), le débit du gaz et le nombre de disjoncteurs bouchonnés. Le nombre de disjoncteurs est comptabilisé par un compteur, situé dans la station de remplissage, tout au long de l'année.

Les émissions du foyer de fuites 2 sont déterminées par les équations suivantes.

$$M_{Bouchonnage,y} = K_{bouchonnage} \times ND_y$$

$M_{Bouchonnage,\ x}$: Fuites lors du bouchonnage sur l'année y (kg SF6)

$K_{\ bouchonnage}$: Constante de fuite au bouchonnage, mesurée sur le réseau (kg SF6)

ND_y : Nombre de disjoncteurs bouchonnés, sur l'année y

$K_{\ bouchonnage}$: Constante de fuite au bouchonnage, mesurée sur le réseau (kg SF6)

$$K_{bouchonnage} = TB \times FM$$

TB : Temps d'un opérateur pour bouchonner (minute)

FM : Fuites de SF6 / minute (kg SF6/min)

Les caractéristiques de chaque paramètre et équipement de mesure sont définies dans le tableau ci-dessous :

Symbole	Donnée	Unité	Source de la donnée	Description des méthodes et procédures de mesure qui seront appliquées	Fréquence de relevé	Incertitude
TB	Temps d'un opérateur pour bouchonner, environ t secondes = t' minute	Minute	Chronomètre	Test sur échantillonnage	Annuel	+/- X_{tps} seconde
FM	Fuites de SF6 / minute, environ FM g/min	Kg SF6/ minute	Courbe de référence	1. Retrait du bouchon (obus toujours en place) et mise en place du raccord staubli. 2. Branchement du débitmètre massique - Arrêt toutes les t_{FM} mn, pour comptabiliser les fuites - Attente jusqu'à stabilisation du débitmètre (environ 1bar) 3. Etablir la courbe de référence et en déduire la moyenne de fuites par minute	Annuel	+/-X_{FM} g/min
ND_y	Nombre de disjoncteurs bouchonnés	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de disjoncteurs passant par l'étape de bouchonnage	Annuel	Valeur exacte
$M_{i,y}$	Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i	Kg SF6	Valeurs constantes : Type 1 : M1 kg Type 2 : M2 kg Type 3 : M3 kg Type 4 : M4 kg	A l'aide du débitmètre, on récupère la quantité de SF6 introduit dans les 4 catégories de disjoncteurs	A chaque disjoncteur	X_M% Type 1 : +/- X_{M1} kg Type 2 : +/- X_{M2} kg Type 3 : +/- X_{M3}kg Type 4 : +/- X_{M4}kg

Tableau 8 : Paramètres et caractéristiques des équipements de mesure pour le foyer de fuites 2 : bouchonnage

C. Foyer de fuites 3 : atelier de réparation/destruction

Pour connaitre les émissions du foyer de fuites 3, il faut tout d'abord comptabiliser le nombre de disjoncteurs défectueux (électriquement et fuyards). Chaque disjoncteur défectueux est répertorié par son 'historique' dès lors qu'il est envoyé à l'atelier de réparation/ destruction. Chaque disjoncteur est ensuite pesé à l'aide d'une balance de précision dont les caractéristiques sont données page 39.

Comme il est décrit précédemment, une partie du SF6 est récupérée dans des bombonnes pour être renvoyée au fournisseur. Ces bombonnes sont répertoriées avec exactitude. Une balance de précision permet de connaitre le poids de chacune d'elles.

De la différence entre ces valeurs, résulte la quantité massique de SF6 émit dans l'atmosphère par ce foyer de fuites, suivant l'équation suivante.

$$M_{\text{réparation/destruction,y}} = \sum_{i=1}^{n} \left(M_{i,y} \times QRDE_{i,y} \right) - MD_y$$

$M_{Réparation/destruction,\ x}$: Fuites générées dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année x (kg SF6)

$M_{i,\ y}$: Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i (kg SF6)

$QRDE_{i,y}$: Quantité de disjoncteurs défectueux électriquement, de la catégorie i, envoyés dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année y

MD_y : Masse de SF6 récupérée par la station Dilo (station de pompage du SF6) de (kg SF6)

n : nombre de type de disjoncteurs fabriqués

Les caractéristiques de chaque paramètre et équipement de mesure sont définies dans le tableau ci-dessous :

Symbole	Donnée	Unité	Source de la donnée	Description des méthodes et procédures de mesure qui seront appliquées	Fréquence de relevé	Incertitude
$M_{i, y}$	Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i	Kg SF6	Valeurs constantes : Type 1 : M1 kg Type 2 : M2 kg Type 3 : M3 kg Type 4 : M4 kg	A l'aide du débitmètre, on récupère la quantité de SF6 introduit dans les 4 catégories de disjoncteurs	A chaque disjoncteur	X_M% Type 1 : +/- X_{M1} kg Type 2 : +/- X_{M2} kg Type 3 : +/- X_{M3}kg Type 4 : +/- X_{M4}kg
$QRDE_{i, y}$	Quantité de disjoncteurs défectueux électriquement, de la catégorie i, envoyés dans l'atelier de réparation/destruction	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de disjoncteurs défectueux électriquement envoyés dans l'atelier réparation/destruction	Annuel	Valeur exacte
MD_y	Masse de SF6 récupérée par la station Dilo	Kg SF6	Balance	Pesée des bombonnes de Mb' kg	A chaque bombonne envoyée au fournisseur	+/-Xb g

Tableau 9 : Paramètres et caractéristiques des équipements de mesure pour le foyer de fuites 3 : réparation/destruction

D. Foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'

L'historique de chaque disjoncteur et le comptage associé permet de déterminer le nombre et le type de disjoncteurs 'mis à l'air'. Dès lors la quantité de SF6 mise à l'air est définie selon la référence de disjoncteur concernée. Ce qui nous donne la quantité massique de SF6 émit pour le foyer de fuite 4, suivant l'équation suivante.

$$M_{\text{mise à air,y}} = \sum_{i=1}^{n} \left(M_{i,y} \times N_{dis,y} \right)$$

$M_{mise\ à\ l'air,\ y}$: Fuites de 'mise à l'air' des disjoncteurs de l'année y (kg SF6)

$M_{i,\ y}$: Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i (kg SF6) (quatre catégories (Type 1, 2, 3, 4))

$N_{dis,\ y}$: Quantité de disjoncteurs de la catégorie i, 'mis à l'air', sur l'année y

n : nombre de type de disjoncteurs fabriqués

Les caractéristiques de chaque paramètre et équipement de mesure sont définies dans le tableau ci-dessous :

Symbole	Donnée	Unité	Source de la donnée	Description des méthodes et procédures de mesure qui seront appliquées	Fréquence de relevé	Incertitude
$M_{i,\ y}$	Masse de SF6 contenu dans le disjoncteur de catégorie i	Kg SF6	Valeurs constantes : Type 1 : M1 kg Type 2 : M2 kg Type 3 : M3 kg Type 4 : M4 kg	A l'aide du débitmètre, on récupère la quantité de SF6 introduit dans les 4 catégories de disjoncteurs	A chaque disjoncteur	X_M% Type 1 : +/- X_{M1} kg Type 2 : +/- X_{M2} kg Type 3 : +/- X_{M3}kg Type 4 : +/- X_{M4}kg
$N_{dis,\ y}$	Quantité de disjoncteurs de la catégorie i, 'mis à l'air'	Unité	Inventaire annuel	Comptage du nombre de disjoncteurs 'mis à l'air'	Annuel	Valeur exacte

Tableau 10 : Paramètres et caractéristiques des équipements de mesure pour le foyer de fuites 4 : 'mise à l'air'

Le bilan des émissions est effectué chaque année. Ainsi, par addition de toutes les émissions mesurées comme il est décrit précédemment, nous obtenons la quantité de SF6 totale émise dans l'atmosphère. Les émissions du projet sont calculées selon l'équation suivante.

$$\mathbf{EPy = (M_{Réseau,\,y} + M_{Bouchonnage,\,y} + M_{Réparation/destruction,\,y} + M_{mise\ à\ l'air,\,y}) \times PRG_{SF6}}$$

EPy: Emissions du projet de l'année y (tCO2/an)

PRG_{SF6} = Pouvoir de réchauffement global du SF6 (23.9 tCO2/kgSF6)

$M_{Réseau,\,y}$: Fuites du réseau sur l'année y (kg SF6)

$M_{Bouchonnage,\,y}$: Fuites lors du bouchonnage, sur l'année y (kg SF6)

$M_{Réparation/destruction,\,y}$: Fuites générées dans l'atelier de réparation/destruction, de l'année y (kg SF6)

$M_{Mise\ à\ l'air,\,y}$: Fuites de 'mise à l'air' des disjoncteurs de l'année y (kg SF6)

Les calculs d'incertitudes des mesures prises pour connaître les émissions du projet sont en annexe.

Chaque année, les émissions sont ensuite déclarées à la DRIRE qui publie un rapport officiel des émissions de toutes les entreprises de fabrication de disjoncteurs.

Les réductions d'émissions sont obtenues par différence entre les émissions du scénario de référence et celles du projet, selon l'équation suivante.

$$\mathbf{Rey,x = ESRx - EPy}$$

Rey,x = Réductions d'émission pendant l'année y par rapport à l'année de référence x (tCO2/an)
ESRx = Emissions du scenario de référence x (tCO2/an)
EPy = Emissions du projet pendant l'année y (tCO2 /an)

Sachant que nous prenons comme taux d'émissions du scénario de référence : $X_{ESR,x}$**% de la consommation annuelle totale en SF6 du site.**

X. Annexe : Calculs d'incertitudes

A. Calculs d'incertitudes des émissions du scénario de référence

Foyer de fuites 1 : Réseau :

$$\Delta Mconso, x = (\Delta M \text{ bombonne avant } x + \Delta M \text{ bombonne après } x) \times m$$

$$\Delta Mréseau, x = (Mconso, x + \Delta Mconso, x) \times Kréseau, x \times \Delta PRx$$

Foyer de fuites 2 : Bouchonnage :

$$\Delta Mbouchonnage, x = [(TB + \Delta TB) \times (FM + \Delta FM) - (TB \times FM)] \times NDx$$

Foyer de fuites 3 : Réparation/destruction :

$$\Delta MRéparation/destruction, x = \sum_{i=1}^{4} QRDF\ i, x \times \Delta Mi, x + \sum_{i=1}^{4} QRDE\ i, x \times \Delta Mi, x + \Delta MDx \times Nbombonnes, x$$

Foyer de fuites 4 : Mise à l'air :

$$\Delta Mmise\ à\ l'air, x = \sum_{i=1}^{4} Ndis, x \times \Delta M\ i, x$$

Emissions du scénario de référence :

$$\Delta ESRx = \Delta M_{Réseau,\ x} + \Delta M_{Bouchonnage,x} + \Delta M_{Réparation/destruction,\ x} + \Delta M_{mise\ à\ l'air,\ x}$$

B. Calculs d'incertitudes des émissions du projet

Foyer de fuites 1 : Réseau :

Identique au calcul du scénario de référence

Foyer de fuites 2 : Bouchonnage :

Identique au calcul du scénario de référence

Foyer de fuites 3 : Réparation/destruction :

$$\Delta MRéparation/destruction, y = \sum_{i=1}^{4} QRDE\ i, y \times \Delta Mi, y + \Delta MDy \times Nbombonnes, y$$

Foyer de fuites 4 : Mise à l'air :

Identique au calcul du scénario de référence

Emissions du projet :

$\Delta EPy = \Delta M_{Réseau, y} + \Delta M_{Bouchonnage, y} + \Delta M_{Réparation/destruction, y} + \Delta M_{mise\ à\ l'air, y}$

C. Calculs d'incertitudes des réductions d'émissions

$\Delta REy,x = \Delta ESRx + \Delta EPy$