

Étude de câblage Suisse

Date 3 février 2025
Rédigé par Swissgrid, Business Unit Market

Contenu

1	WP 1 – Compensation de la puissance réactive	3
1.1	Champ d'application et objectifs	3
1.2	Puissance active et réactive	4
1.3	Compensation de puissance réactive dans les projets de câblage	9
1.4	Éléments de compensation nécessaires dans les trois scénarios	10
1.4.1	Scénario 1	10
1.4.2	Scénario 2	13
1.4.3	Scénario 3	18
1.4.4	Résumé des besoins de compensation de réactive	23
1.5	Estimation de l'espace nécessaire pour les selfs du scénario 3	24
1.6	Calcul de coûts des éléments de compensation des trois scénarios	28
2	WP 2 – Études EMT au niveau des systèmes et des équipements	29
2.1	Résumé exécutif	29
2.1.1	Études de balayage des fréquences	29
2.1.2	Études d'amplification des harmoniques	30
2.1.3	Études temporelles (mise sous tension de grands transformateurs)	31
2.1.4	Variations de tension dues à la connexion des câbles et ou à la perte d'un dispositif de compensation	32
2.2	Études de balayage de fréquences	33
2.2.1	Méthodologie	34
2.2.2	Résultats et discussions	36
2.2.3	Conclusion	57
2.3	Études d'amplification des harmoniques	58
2.3.1	Méthodologie	60
2.3.2	Résultats et discussions	62
2.3.3	Conclusions	81
2.4	Études temporelles	83

2.4.1	Contexte théorique	84
2.4.2	Méthodologie	86
2.4.3	Résultats et discussions	88
2.4.4	Conclusion	109
2.5	Variations de tension dues à la connexion ou déconnexion des câbles et des dispositifs de compensation	111
2.5.1	Variations de tension causées par la connexion/déconnexion d'un câble	111
2.5.2	Variations de tension causées par la déconnexion d'un élément de compensation	114
3	WP 3 – Reconstruction du réseau après black-out	115
3.1	Introduction	115
3.2	Reconstruction du réseau avec câbles	116
3.3	Cellule de reconstruction sud (OFIMA-OFIBLE)	117
3.4	Cellule de reconstruction centrale (KWO)	118
3.5	Conclusions	123
4	Références et annexes	124
4.1	Références WP 1	124
4.2	Références WP 2	124
4.3	Références WP 3	125
4.4	Annexes WP 2	126
4.4.1	Scénarios étudiés	126
4.4.2	Modélisation du réseau dans EMTP	130
4.4.3	Balayage de fréquences pour le scénario 3	151
4.4.4	Facteurs d'amplification pour les 3 scénarios et les différents points d'injection d'harmoniques	177

Tous droits réservés, notamment le droit de reproduction et d'autres droits de propriété.

Toute reproduction ou communication à des tiers du présent document, en tout ou en partie, est interdite sans l'autorisation écrite expresse de Swissgrid SA.

Swissgrid SA exclut toute responsabilité quant aux éventuelles erreurs contenues dans ce document.

1 WP 1 – Compensation de la puissance réactive

1.1 Champ d'application et objectifs

Le nombre de projets de liaisons câblées dans le réseau de transport suisse a énormément augmenté ces dernières années. Les câbles dont il est question dans cette étude sont des câbles XLPE souterrains. Dorénavant, pour faciliter la lecture, seul le mot « câble » sera écrit.

Jusqu'à présent, chaque nouveau projet et son impact sur le réseau ont été analysés individuellement. Les études réalisées pour des projets de câblage comme celui du Gothard ont montré que les câbles ont un effet considérable sur le fonctionnement du réseau.

Les effets les plus importants sont les suivants :

- Augmentation des niveaux de tension en raison de la production de puissance réactive par les câbles.
- Observation de phénomènes de résonance dus à la diminution des fréquences de résonance en raison de l'augmentation de la proportion de câbles.
- Augmentation du contenu harmonique dans le réseau car les câbles agissent comme un amplificateur.
- Comme ces effets sont déjà observés avec les câbles actuellement prévus, on peut s'attendre à ce que l'effet de ces phénomènes soit encore plus prononcé au fur et à mesure que la longueur de câble installée augmentera. Dans cette situation, il est prudent de s'avancer et de recueillir davantage d'informations sur l'impact d'une augmentation significative du nombre de projets de câbles. En effet, il est alors possible d'anticiper les défis et de planifier les projets de manière durable.

Pour ce faire, il a été décidé de réaliser une étude comparative avec trois scénarios à différents horizons temporels :

1. Le premier scénario comprend les câbles actuellement existants.
2. Le deuxième scénario contient les câbles du scénario 1 plus les câbles déjà planifiés ou en cours de construction. L'horizon temporel n'est pas fixé car il est encore incertain, mais à titre indicatif, nous pouvons considérer l'année 2040.
3. Le troisième scénario est un scénario hypothétique avec un grand nombre de câbles. Il s'agit d'un scénario clé dans l'analyse comparative car il permettra de voir l'impact sur le réseau et de le comparer aux deux scénarios précédents. Le positionnement des nouveaux câbles a été choisi en tenant compte des lignes qui entreront dans le plan sectoriel dans les années à venir. Les câbles du deuxième scénario sont également inclus. Comme il s'agit d'un scénario totalement hypothétique, aucun horizon temporel n'est indiqué.

Bien que les horizons temporels des scénarios soient différents, la même topologie de réseau correspondant au réseau de départ du dernier réseau stratégique SN2040 a été utilisée pour les trois scénarios. La raison en est que pour pouvoir analyser l'impact des câbles, tous les autres paramètres doivent rester constants. Sinon, il serait difficile d'identifier si les changements sont dus à une augmentation du nombre de câbles ou à une modification de la topologie du réseau. La topologie de réseau considérée est montrée dans la figure ci-dessous.

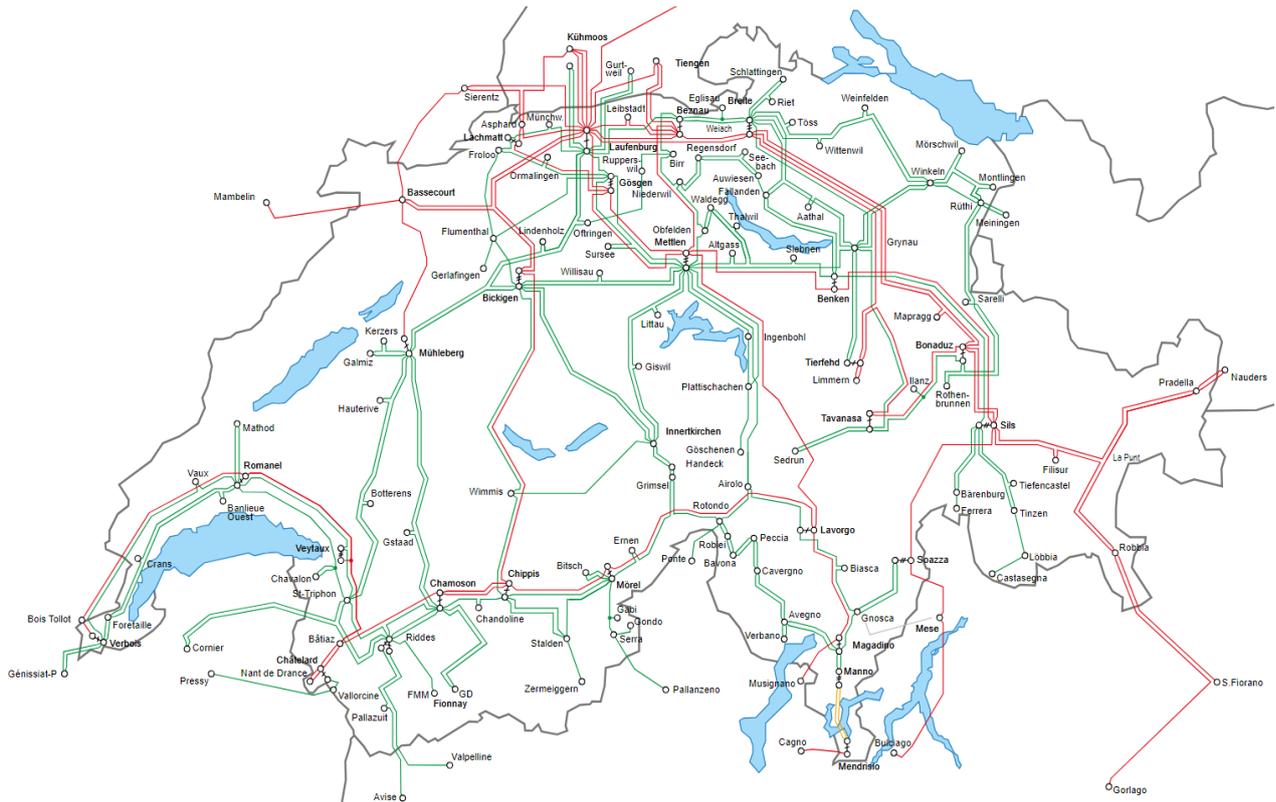


Figure 1-1 : Réseau de départ réseau stratégique SN2040

Les trois effets négatifs mentionnés ci-dessus ont été analysés pour les trois scénarios. Les résultats ont ensuite été comparés pour tirer des conclusions sur l'impact des câbles sur le réseau.

Les analyses présentées dans ce work package visent à quantifier les besoins de compensation de la puissance réactive dans les trois scénarios. L'impact sur la fréquence de résonance et le contenu harmonique sera analysé dans des work packages dédiés.

1.2 Puissance active et réactive

L'énergie réactive est un phénomène électrique qui, bien qu'il n'effectue pas de travail utile comme l'énergie active, joue un rôle fondamental dans le fonctionnement de nombreux systèmes électriques. Contrairement à l'énergie active, qui se transforme en lumière, en chaleur ou en mouvement, l'énergie réactive est liée à la création et au maintien des champs magnétiques nécessaires au fonctionnement des équipements dotés de bobines ou de moteurs, tels que les transformateurs, les ascenseurs ou les appareils ménagers comme les machines à laver ou les réfrigérateurs. Bien qu'elle ne soit pas consommée au sens traditionnel du terme, elle est indispensable au démarrage et au bon fonctionnement de ces appareils.

La tension qui arrive dans nos maisons est une tension alternative, ce qui signifie qu'elle oscille très rapidement dans le temps entre deux valeurs, comme on peut le voir sur l'image.

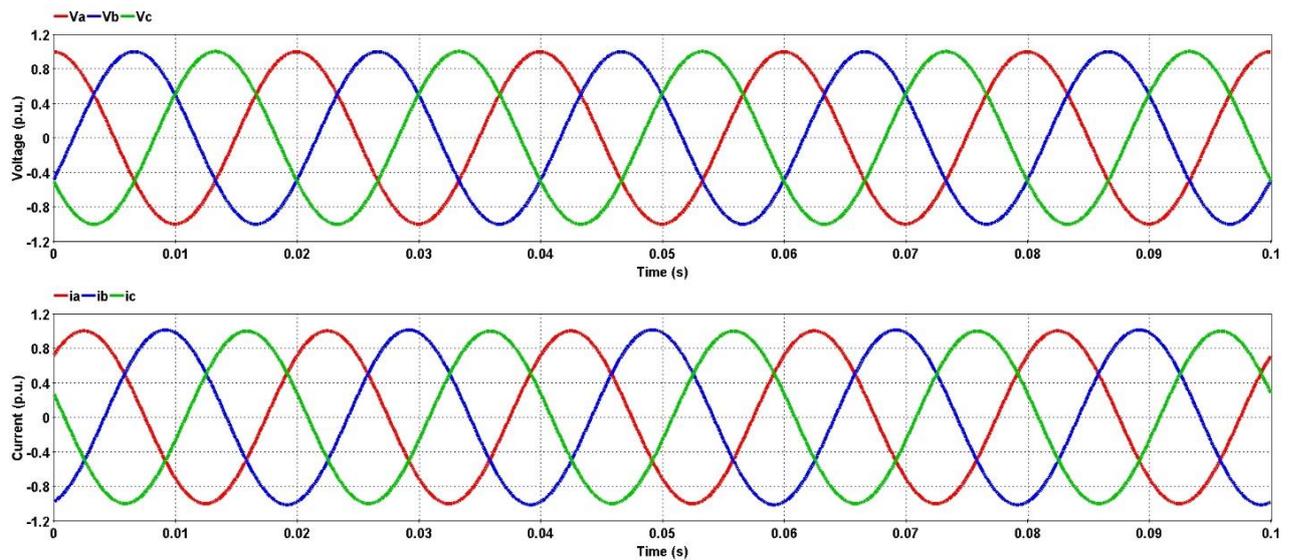


Figure 1-2 : Tension et courant

Par conséquent, le courant sera également alternatif, mais en fonction de la charge connectée, il sera plus ou moins déphasé par rapport à la tension.

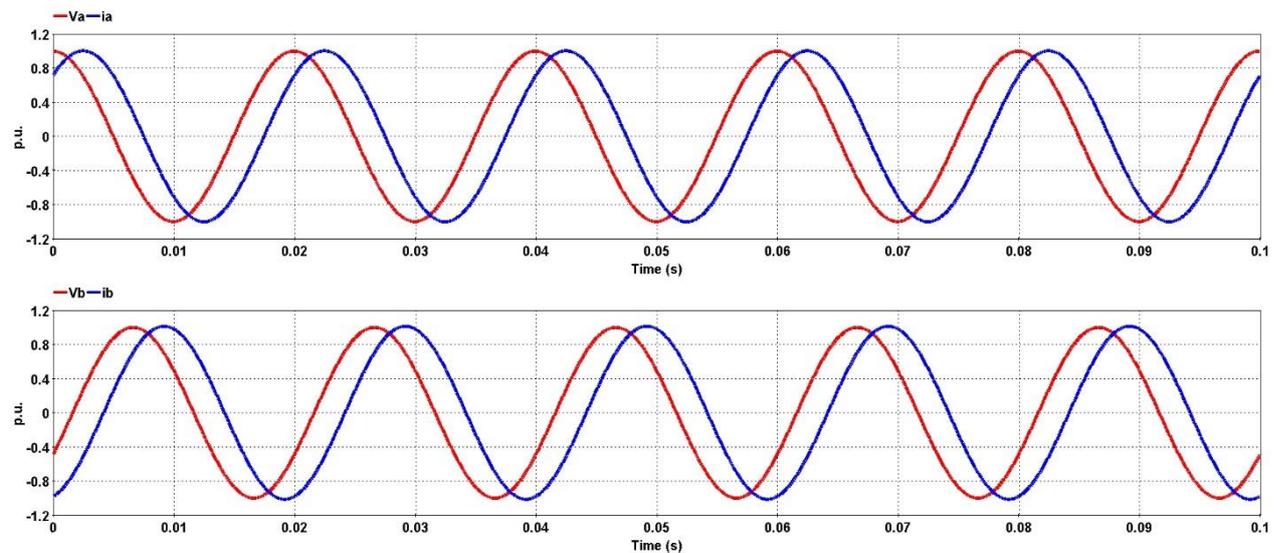


Figure 1-3 : Décalage entre tension et courant pour une charge inductive

Les charges purement résistives ne consomment que de l'énergie active, auquel cas les pics de tension et de courant coïncident dans le temps.

Cependant, la plupart des charges ont une composante inductive ou capacitive, qui est à l'origine de l'énergie réactive. En présence d'énergie réactive, le courant et la tension sont déphasés et les pics ne coïncident pas dans le temps. Par conséquent, en présence d'énergie réactive, la puissance totale circulant dans la ligne est plus élevée. C'est pourquoi on dit qu'un excès d'énergie réactive surcharge les lignes.

Un autre effet indésirable de l'excès de puissance réactive quand elle est capacitive est l'augmentation des tensions. Le réseau dispose d'une plage de tensions dans laquelle il peut fonctionner sans problème. Lorsque les tensions dépassent les valeurs maximales, les composants du réseau risquent d'être endommagés.

Il existe plusieurs méthodes pour abaisser les tensions, dont les plus importantes sont les suivantes :

- Déconnecter les lignes et/ou les câbles qui transportent peu de courant sur le moment, car les lignes peu chargées produisent plus de puissance réactive. Cette méthode est cependant dangereuse car elle diminue la redondance, le maillage et la sécurité du réseau.
- Diminuer les valeurs de tension de consigne des générateurs. Les générateurs absorbent alors de la puissance réactive et la retirent du réseau. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle a une limite très basse. Les générateurs ne peuvent absorber qu'une quantité très limitée de puissance réactive. Au-delà d'un certain niveau d'absorption, les modifications de la tension de consigne n'auront aucun effet car le générateur aura atteint ses limites.
- Les transformateurs munis de réglage longitudinal permettent aussi de baisser la tension d'un niveau de tension donné (avec un effet inverse sur l'autre niveau de tension). Ils n'ont cependant pratiquement pas d'effet sur la quantité de puissance réactive produite ou absorbée par le réseau.
- Installer des éléments capables d'absorber la puissance réactive. Il existe différents types de compensation de la puissance réactive sur le marché, tels que les selfs de compensation, les SVC et les STAT-COM. Les selfs sont le plus simple des trois et il s'agit d'une inductance qui compense le comportement capacitif du réseau.

Les figures suivantes montrent des images des deux principaux types de bobines de compensation, isolées à l'huile et isolées à l'air.



Figure 1-4 : Self triphasée 420 kV, 50-250 Mvar (longueur 18,7 m, largeur de la cuve 4 m, largeur 7,6 m, hauteur de la cuve 4,5 m, hauteur 11,1 m, poids de transport 219 000 kg, poids en service 361 000 kg). Source [1.1]

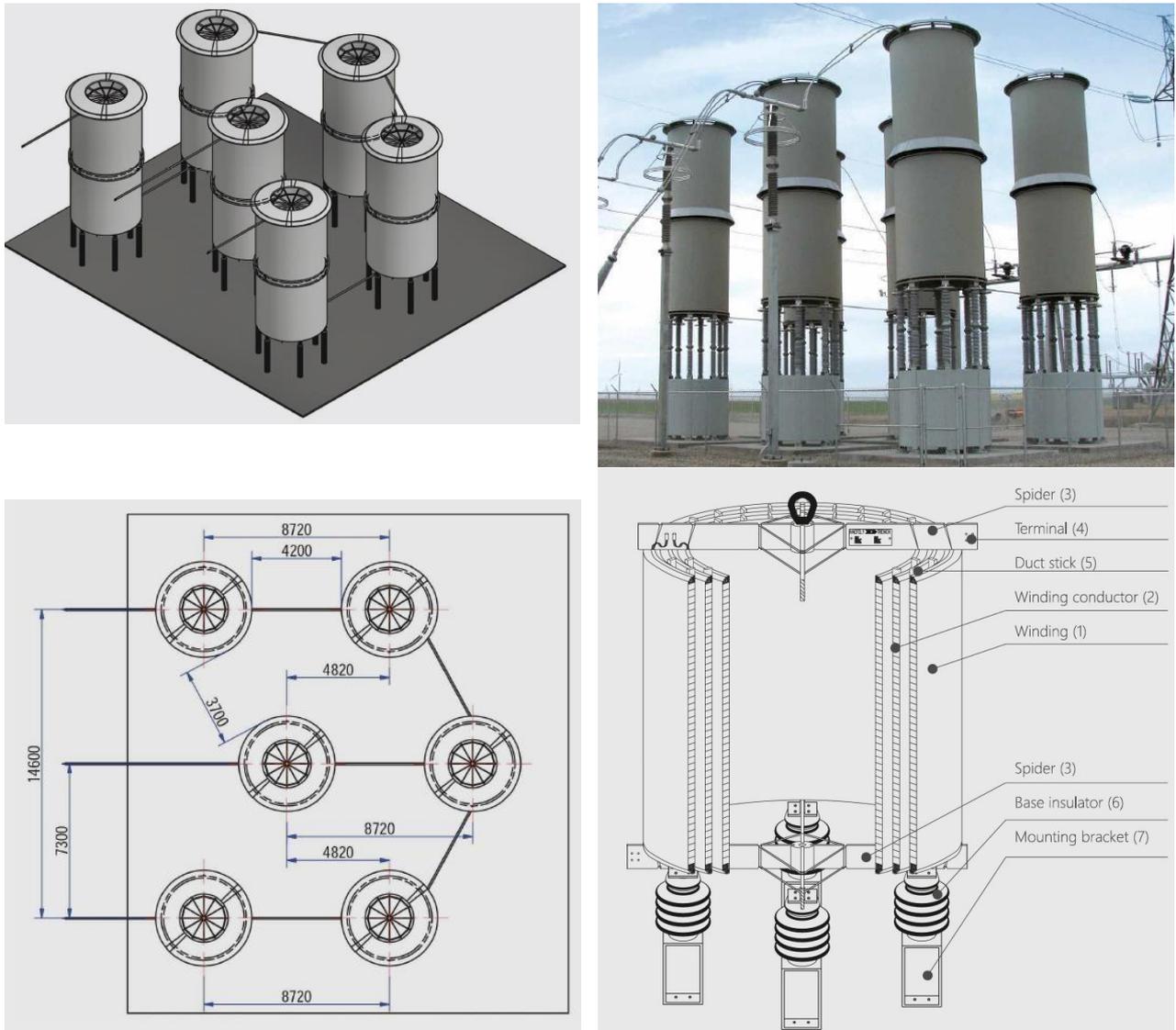


Figure 1-5 : Disposition d'une self isolée à l'air triphasée. En haut/en bas à gauche : Disposition pour une bobine de réactance de 420 kV, 120 Mvar (env. 400 m²). En haut à droite : 345 kV, self de 20 Mvar. En bas à droite : Structure d'une self isolée à l'air (partielle). Source [1.1]

Les tensions trop basses créent également des problèmes que nous n'aborderons pas ici. En effet, les réseaux à forte teneur en câbles sont capacitifs, ce qui provoque des tensions élevées et non des tensions faibles.

La situation actuelle en Suisse avec le contenu du câble du scénario 1 est déjà critique en ce qui concerne les tensions. Les opérateurs se retrouvent souvent sans moyens pour faire baisser les tensions. Parfois, même si toutes les centrales électriques absorbent de la puissance réactive à leur capacité maximale, les tensions dépassent les limites. Sans éléments de compensation réactive, il n'y a pas d'autre choix que d'attendre que les tensions baissent d'elles-mêmes.

C'est pourquoi, avec l'augmentation du nombre de câbles, il n'y a pas d'autre choix que de compenser 100 % de leur production de puissance réactive.

1.3 Compensation de puissance réactive dans les projets de câblage

Il est bien connu que les caractéristiques électriques des câbles en courant alternatif présentent des différences considérables par rapport à celles des lignes aériennes. L'une des principales différences électriques est le courant de charge capacitif, qui est beaucoup plus élevé dans un câble que dans une ligne aérienne de même longueur et de même puissance de transmission. Un câble conserve toujours le comportement d'un condensateur, alors qu'une ligne aérienne passe d'une propriété capacitive moins prononcée à un comportement inductif en passant par un point neutre en réactif (on parle alors de puissance naturelle de la ligne) lorsque la charge augmente.

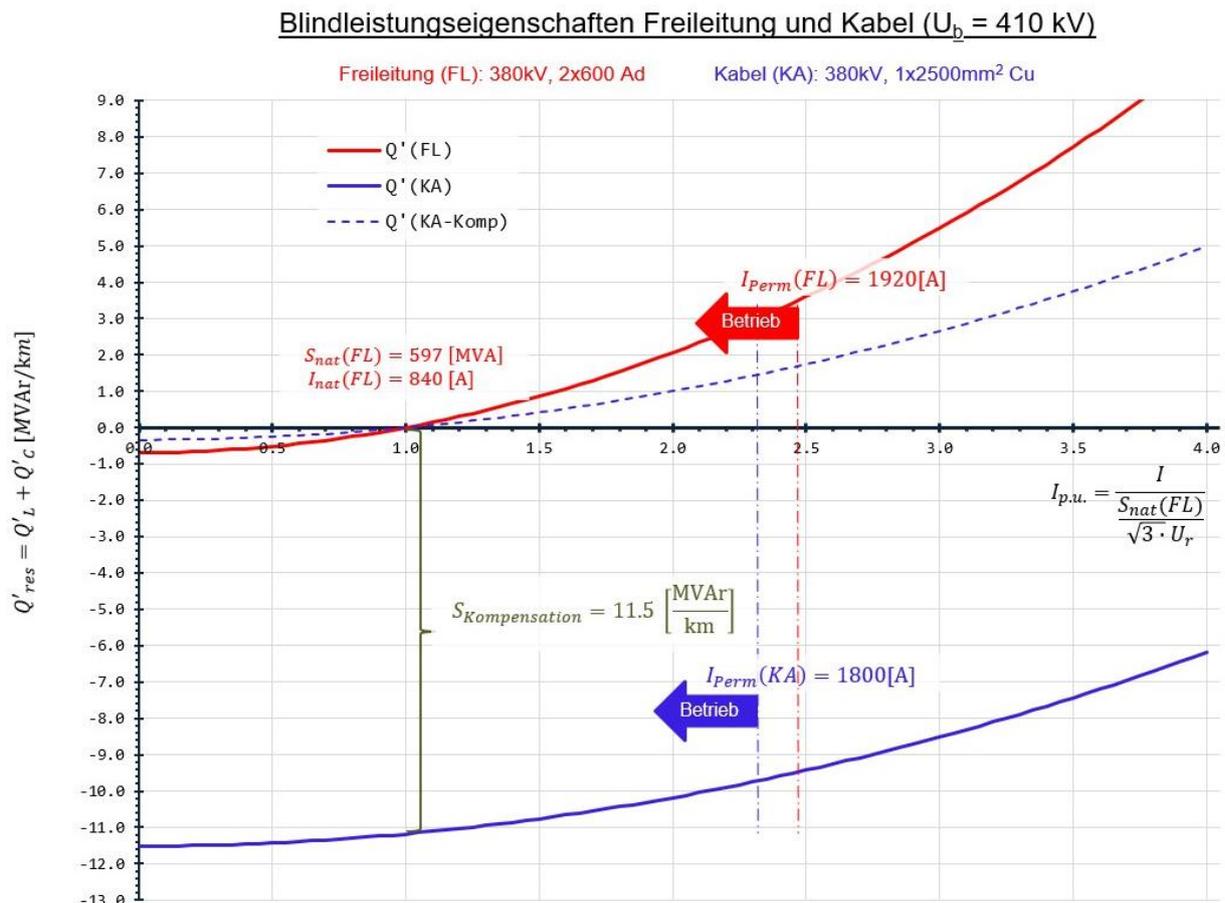


Figure 1-6 : Comportement de la puissance réactive d'une ligne aérienne (rouge) et d'un câble de 380 kV (bleu) Source [1.1]

La puissance réactive générée par les câbles provoque une augmentation de la tension dans le réseau et une charge supplémentaire sur les conducteurs. C'est pourquoi la puissance réactive doit être compensée par le raccordement des selfs aux extrémités des câbles. Ces éléments pèsent lourd dans le bilan des pertes : à 220 kV, environ 10 kW par km de câble, à 380 kV, le triple de cette valeur parce que la puissance réactive augmente avec le carré de la tension. Les dimensions des sous stations ou des passages câble-ligne doivent être significativement augmentées vu que l'installation d'une self de compensation présente des dimensions similaires à un terrain de football.

La quantité totale de Mvar à compenser est proportionnelle à la longueur de câble installée. Il convient de noter que lorsqu'il y a deux systèmes en parallèle ou deux câbles par phase, la production de puissance réactive double. Dans certains cas, il est nécessaire de compenser aux deux extrémités des câbles, soit parce que la longueur de la liaison câblée est proche de 20 km, soit parce que la taille de la compensation requise

est trop importante. Lorsque le câble comporte deux systèmes et que nous devons compenser à une extrémité où il n'y a pas de sous-station, une self doit être installée dans chaque système. Les câbles de moins de 3 km ne sont pas nécessairement compensés à côté du câble, mais leur production de puissance réactive est prise en compte pour augmenter la taille des compensations voisines. Ces considérations et d'autres similaires font que le nombre total de Mvar compensés ne correspond pas exactement au nombre total de kilomètres de câbles.

Différentes solutions de compensation peuvent convenir à un même projet. L'optimisation de ces solutions dépend en grande partie d'une bonne planification et de la connaissance des projets de câbles prévus. Seulement ainsi il est possible de planifier les besoins de compensation de façon durable. Par exemple, il serait dommage de planifier une petite compensation au niveau d'une sous-station pour découvrir peu de temps après la planification d'autres projets de câbles dans les environs. C'est pourquoi il n'est pas conseillé de planifier les compensations par projet, mais plutôt par groupe de projets.

Une solution de compensation a été calculée pour chacun des trois scénarios étudiés. L'objectif de cette analyse est de comparer le nombre d'éléments de compensation nécessaires, leur coût et l'espace requis. Les conclusions sont détaillées dans la section suivante.

1.4 Éléments de compensation nécessaires dans les trois scénarios

Les besoins de compensation ont été couverts par des selfs de quatre tailles différentes, 50, 100, 120 et 150 Mvar. En effet, il est courant que les opérateurs définissent des tailles standard de selfs pour faciliter les processus. Dans les cas où la compensation requise se situait entre deux valeurs, la valeur la plus élevée a normalement été choisie. D'autre part, dans certains cas où la compensation est effectuée directement sur le câble, il a été nécessaire de réduire la valeur de compensation pour éviter les problèmes de délai de passage par zéro. Ce problème se produit dans les câbles compensés à plus de 50% lorsque la compensation est connectée en même temps que le câble. Pour les compensations connectées à la sous-station, ce problème n'existe pas vu qu'une connexion séquentielle est possible.

1.4.1 Scénario 1

Actuellement, tous les câbles installés ont une longueur inférieure à 7 km. Entre eux se trouvent les câbles de 380 kV reliant les centrales électriques de Linth-Limmern et de Nant de Drance, qui mesurent respectivement 4,54 km et 5,96 km. Dans le 220 kV la liaison câblée Bavona – Peccia avec 6,1 km et le câble de 2,5 km entre Grimsel et Gerstenegg. Dans la région de Zurich il y a les câbles de Riniken et Spreitenbach de 1,47 et 2,33 km respectivement.

Jusqu'à présent, la production de puissance réactive des câbles existants n'a pas été compensée. La production de puissance réactive d'environ 100 Mvar des câbles Linth-Limmern et d'environ 130 Mvar des câbles Nant de Drance est absorbée par ces centrales et les centrales voisines.

Dans le réseau de transport suisse, il n'y a qu'une seule self de compensation d'une puissance de 60 Mvar connectée en 16 kV au tertiaire du transformateur 380/220 kV de Breite.

Avec l'augmentation du nombre de projets de câbles et de leur longueur, il devient nécessaire d'installer des selfs de compensation pour maintenir les tensions dans des limites acceptables.

L'objectif de cette analyse théorique étant de comparer le montant de la compensation nécessaire, les mêmes critères ont été utilisés pour les trois scénarios. C'est pourquoi les compensations Linth-Limmern et Nant de Drance sont incluses dans ce premier scénario, même si elles ne sont pas installées actuellement.

Pour les calculs, la puissance réactive de chaque câble a été arrondie à la dizaine la plus proche. Par la suite, une self de taille standard a été choisie pour couvrir entièrement les besoins en puissance réactive.

Les câbles considérés dans ce premier scénario ainsi que leur production de puissance réactive sont listés dans le tableau ci-dessous. Les câbles de moins de 1 km sont inclus dans le modèle, mais leur production de puissance réactive n'est pas prise en compte dans la comparaison et n'apparaît pas dans les tableaux.

Projet	Tension d'exploitation (kV)	Section câble (mm ²)	Langueur câble (km)	Systèmes en parallèle	Câbles par phase	Q _{câble} (Mvar)	Sous-station
220 kV Niederwil – Re-gensdorf (Spreitenbach)	235	1200	2,33	1	2	17,79	
220 kV Beznau – Birr (Riniken – Gäbihübel)	235	2500	1,47	1	2	15,66	
380 kV Beznau – Mettlen (Riniken – Gäbihübel)	410	2500	1,47	1	2	37,26	
380 kV Châtelard – Nant de Drance	410	1600	5,96	1	2	125,90	380 kV Châtelard
380 kV Bâtiaz – Le Verney	410	1000	1,23	1	2	23,29	
380 kV Limmern – Tierfehd	410	1600	4,54	1	2	95,90	380 kV Tierfehd
150 kV Manno – Mendrisio (Brusino – Morcote)	150	800	2,85	2	1	8,90	
150 kV Manno – Pian Scairolo	150	800	5,59	2	1	17,46	
Total						342,17	

Tableau 1-1 : Solution de compensation pour le scénario 1

Pour éviter des compensations trop petites et pas réalistes seuls les câbles les plus longs, c'est-à-dire ceux de Nant de Drance et de Limmern, ont été compensés. Les besoins de compensation des autres câbles seront pris en compte dans le scénario 2. La compensation totale dans ce scénario est de 230 Mvar. De façon à compenser 100% de cette puissance réactive tout en respectant les tailles proposées ci-dessus, une compensation de 100 Mvar et une autre de 150 Mvar sont choisies respectivement pour Châtelard et Tierfehd, totalisant 250 Mvar de compensation.

Les câbles et les selfs du scénario 1 sont représentés sur la figure ci-dessous.

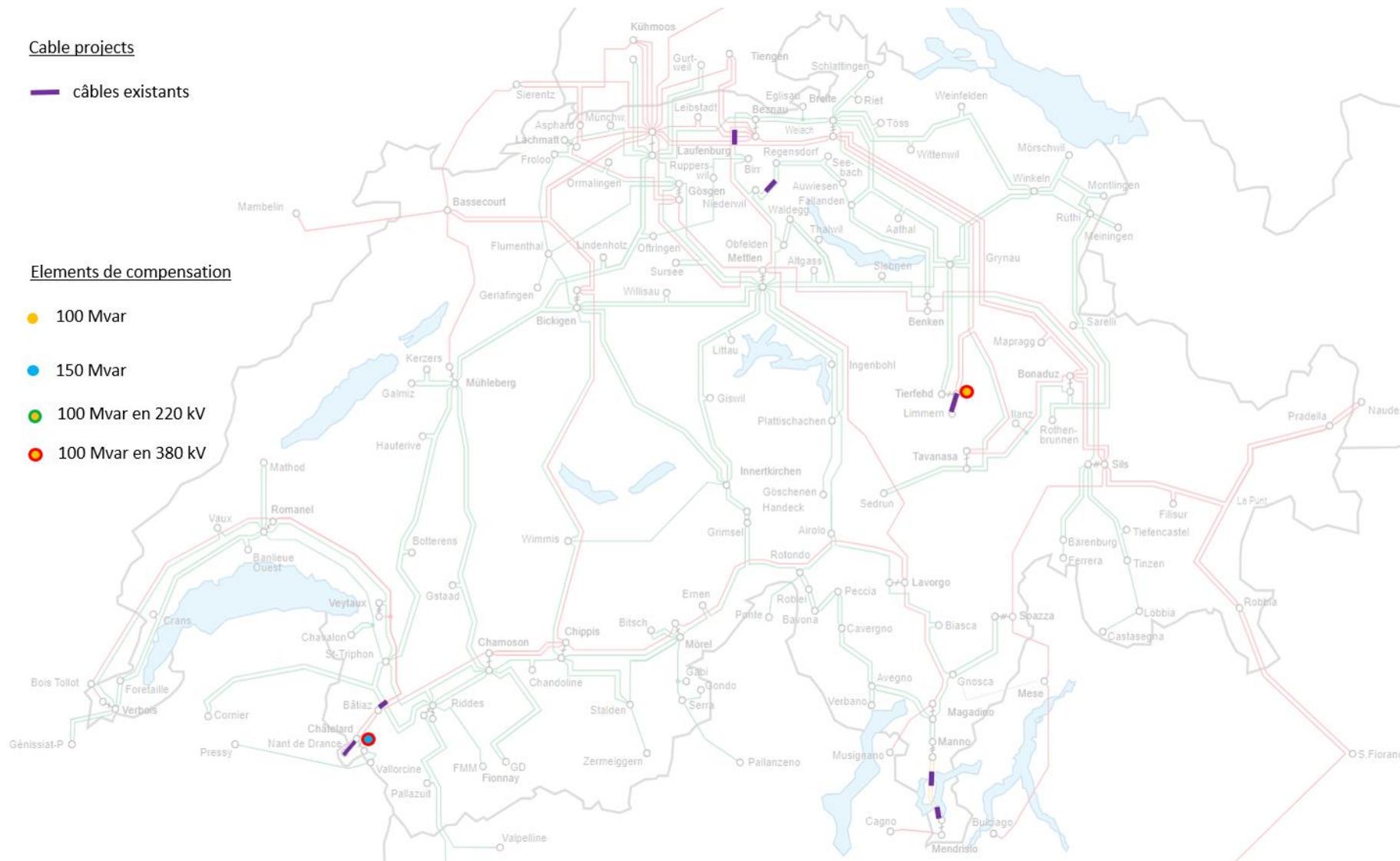


Figure 1-7 : Solution de compensation pour le scénario 1

1.4.2 Scénario 2

Dans le scénario 2, les câbles du scénario 1 sont maintenus et plusieurs nouveaux projets déjà planifiés sont ajoutés, par exemple Gothard, Innertkirchen – Ulrichen, Glaubenberg, Valle Maggia et plusieurs projets dans la région de Zurich.

Contrairement au scénario précédent, il existe déjà des câbles assez longs, d'environ 20 km. De ce fait, les besoins de compensation de la puissance réactive augmentent et plusieurs selfs sont nécessaires pour le même projet.

Dans ce scénario, la production de puissance réactive, faible mais non négligeable, des câbles de Spreitenbach et de Riniken du scénario 1 a été prise en compte et 40 Mvar ont été ajoutés à la compensation à 220 kV Niederwil.

La solution de compensation proposée pour les câbles Innertkirchen – Ulrichen est plus élevée que sa production de réactive. La cause étant le besoin d'inclure deux compensations par sous-station à Innertkirchen et Seehalten, afin de permettre un fonctionnement à deux nœuds. En fait, dans la réalité, les projets de câbles longs comme celui-ci doivent être calculés en tenant compte d'une certaine marge de redondance en cas d'indisponibilité d'une self de compensation. Les exigences en matière de redondance n'ont pas été prises en compte dans cette analyse afin de permettre une comparaison plus linéaire basée sur les kilomètres de câbles installés.

La position de la compensation est spécifiée dans chaque cas. Lorsque la mention « câble » figure sur l'emplacement, cela signifie qu'une compensation doit être installée sur le trajet du câble. Ce tableau ne répertorie que les nouveaux câbles, c'est-à-dire les câbles à ajouter au scénario 1 pour obtenir le scénario 2.

Projet	Tension d'exploitation (kV)	Section câble (mm ²)	Langueur câble (km)	Systèmes en pa-rallèle	Câbles par phase	Q _{câble} (Mvar)	Sous-station
220 kV Airolo – Mettlen (Gothard)	235	2500	18,00	1	1	95,87	220 kV Airolo, câble
220 kV Innertkirchen – Handeck	235	2500	12,00	2	1	127,83	220 kV Innertkirchen, 220 kV Seehalten
220 kV Handeck – Grimsel	235	2500	6,50	2	1	69,24	220 kV Innertkirchen, 220 kV Seehalten
220 kV Grimsel – Seehalten	235	2500	5,30	2	1	56,46	220 kV Innertkirchen, 220 kV Seehalten
220 kV Innertkirchen – Mettlen (et Innertkirchen – Giswil)	235	2500	5,00	2	1	53,26	220 kV Innertkirchen
220 kV Innertkirchen – Wimmis	235	2500	5,00	1	1	26,63	220 kV Innertkirchen
220 kV Bickigen – Innertkirchen	235	2500	5,00	2	1	53,26	220 kV Innertkirchen
220 kV Innertkirchen – Mettlen (et Giswil-Littau)	235	2500	9,50	2	1	101,20	Câble
220 kV Bavona – Peccia	235	1400	6,70	1	2	51,15	220 kV Peccia
220 kV Caverigno – Peccia	235	1400	7,40	1	2	56,49	220 kV Peccia
220 kV Avegno – Caverigno	235	1400	15,00	1	2	114,51	220 kV Avegno
220 kV Avegno – Magadino	235	1400	3,30	1	2	25,19	220 kV Avegno
220 kV Foretaille – Verbois	235	2500	4,80	1	2	51,13	220 kV Verbois
220 kV Niederwil – Obfelden	235	2500	4,50	1	1	23,97	220 kV Niederwil

380 kV Beznau – Mettlen (parallèle à Niederwil – Obfelden)	410	2500	4,50	1	1	57,03	380 kV Mettlen
220 kV Obfelden – Waldegg	235	2500	2,00	1	2	21,31	220 kV Waldegg
220 kV Thalwil – Waldegg	235	2500	10,00	2	1	106,53	220 kV Waldegg
Total						1091,06	

Tableau 1-2: Solution de compensation pour le scénario 2

Selon les informations contenues dans le tableau précédent, les câbles prévus impliquent la nécessité d'une compensation de 1091 Mvar. Après avoir choisi les selfs standard requises et ajouté la compensation pour le scénario 1, un total de 1670 Mvar de compensation est nécessaire pour le scénario 2.

La solution de compensation proposée pour le scénario 2 est présentée dans la figure ci-dessous.

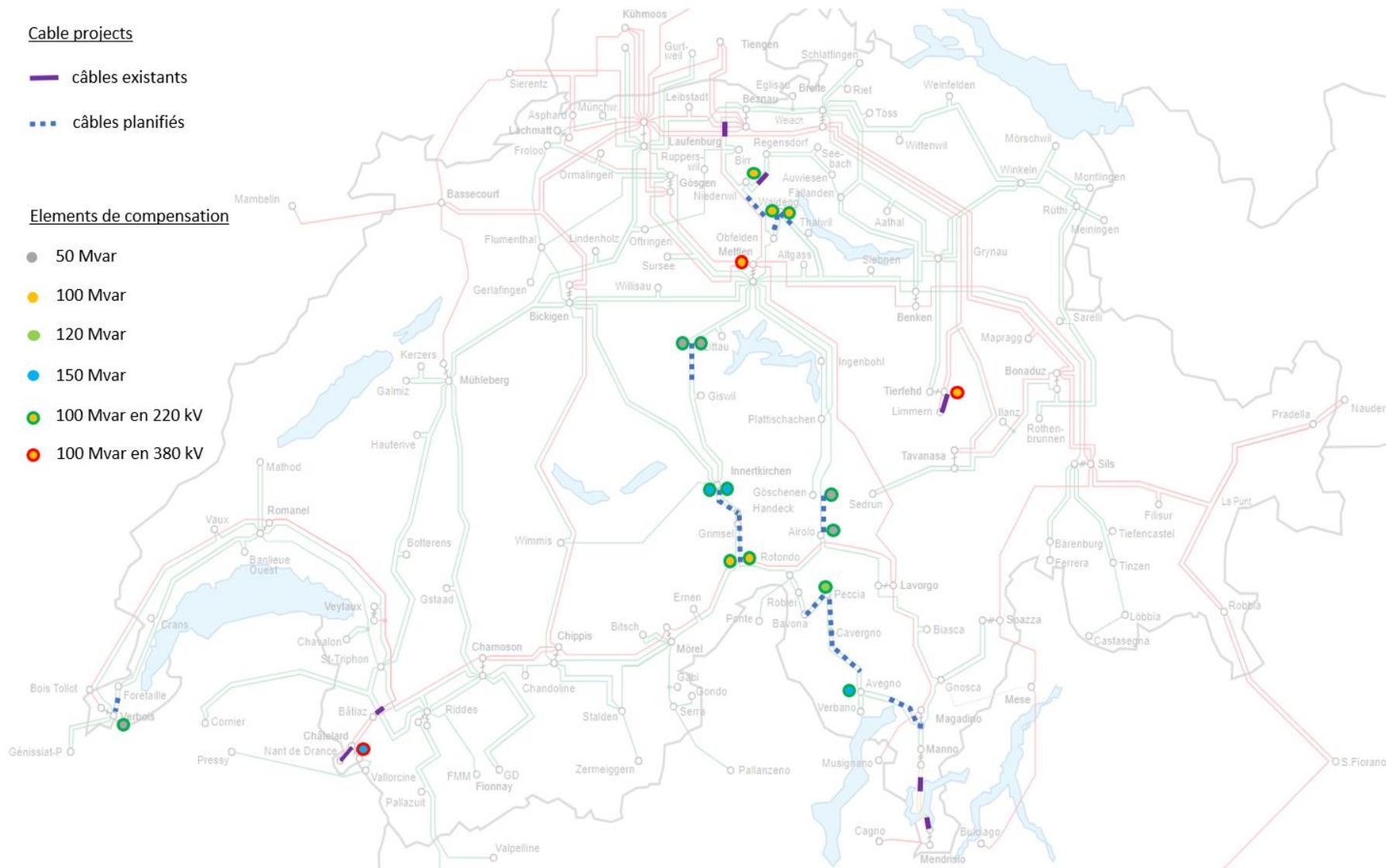


Figure 1-8: Solution de compensation pour le scénario 2

La solution de compensation proposée pour le scénario 2 comprend un total de 17 selfs dont 5 de 50 Mvar, 7 de 100 Mvar, 1 de 120 Mvar et 4 de 150 Mvar. La puissance maximale serait de 1670 Mvar.

1.4.3 Scénario 3

Dans le scénario 3, les câbles du scénario 2 sont maintenus et une multitude de nouveaux projets sont ajoutés. Le positionnement des nouveaux tronçons câblés est basé sur les lignes qui seront renouvelées dans les années à venir. Pour l'étude, on suppose que dans les projets de renouvellement, des parties de ligne ou des lignes complètes seront converties en câbles. Le choix des sections de câble à réaliser a été basé sur des hypothèses. En aucun cas, ces câbles ne doivent être considérés comme des projets futurs. La création de ce scénario est uniquement destinée à une analyse comparative.

Il convient de noter que les longueurs de câbles proposées sont approximatives et basées sur les longueurs des lignes actuelles. Aucune étude sur le tracé des nouveaux câbles n'a été réalisée.

Dans le tableau suivant, la position de la compensation est spécifiée dans chaque cas. Lorsque la mention «câble» figure sur l'emplacement, cela signifie qu'une compensation doit être installée sur le trajet du câble. Ce tableau ne répertorie que les nouveaux câbles, c'est-à-dire les câbles à ajouter au scénario 2 pour obtenir le scénario 3.

Projet	Tension d'exploitation (kV)	Section câble (mm ²)	Longueur câble (km)	Systèmes en parallèle	Câbles par phase	Q _{câble} (Mvar)	Sous-station
380 kV Benken – Mettlen (entre Mettlen et Samstageren)	410	2500	20,0	1	1	253,49	380 kV Mettlen, câble
220 kV Altgass – Mettlen (entre Mettlen et Samstageren)	235	2500	17,1	1	1	91,13	220 kV Altgass
220 kV Altgass – Samstageren (entre Mettlen et Samstageren)	235	2500	14,6	1	1	77,55	220 kV Altgass
220 kV Grynau – Mettlen (entre Mettlen et Samstageren)	235	2000	20,0	1	1	97,16	220 kV Mettlen, câble
380 kV Beznau – Breite	410	1600	17,0	2	2	718,22	380 kV Breite, câble
220 kV Auwiesen – Regensdorf	235	2000	12,1	2	1	117,56	220 kV Auwiesen
220 kV Auwiesen – Fällanden	235	2000	6,0	1	1	29,15	220 kV Auwiesen
220 kV Breite – Fällanden et Fällanden – Grynau (Breite – Y/Fehraltorf)	235	2500	9,0	2	1	95,87	220 kV Fällanden
220 kV Benken – Fällanden	235	2500	37,0	2	1	394,14	220 kV Benken, 220 Fällanden, câble
220 kV Aathal – Breite et Fällanden – Grynau (Aathal – Y/Fehraltorf)	235	2500	8,0	2	1	85,22	220 kV Aathal
220 kV Aathal – Grynau	235	2500	22,0	2	1	234,36	220 kV Aathal, 220 kV Grynau

220 kV Grynau – Samstagern	235	2000	7,0	1	1	34,00	220 kV Grynau
220 kV Grynau – Winkeln	235	1600	9,0	2	2	156,15	220 kV Grynau, câble
220 kV Mörschwil – Winkeln (via Y 235 – St.Gallen)		2500	17,0	2	1	181,09	220 kV Mörschwil, 220 kV Winkeln
220 kV Rüthi – Winkeln	235	1600	12,0	1	2	104,10	220 kV Winkeln
220 kV Bonaduz – Rüthi	235	1600	15,0	2	2	260,24	220 kV Rüthi, câble
380 kV Bonaduz – Sils	410	1600	14,0	2	2	591,47	380 kV Bonaduz, 380 kV Sils
220 kV Bonaduz – Rüthi	235	1600	5,0	2	2	86,75	220 kV Rüthi
380 kV Benken – Sils (West)	410	2500	13,0	1	1	164,77	380 kV Sils
220 kV Benken – Sils (Ost)	235	2500	13,0	1	1	69,24	220 kV Sils
380 kV Lavorgo – Mettlen	410	1600	14,0	1	2	295,74	380 kV Lavorgo, câble
380 kV Sils – Soazza	410	1600	12,0	1	2	253,49	380 kV Soazza, câble
220 kV Löbbia – Tinzen	235	800	8,0	1	1	27,76	220 kV Tinzen
380 kV Lavorgo – Musignano	410	2000	13,0	1	2	302,07	380 kV Magadino, câble
Total						10 590,48	

Tableau 1-3: Solution de compensation pour le scénario 3

Le besoin de compensation de la puissance réactive augmente énormément dans ce scénario. Un total de 10,59 Gvar sont nécessaires pour compenser la puissance réactive produite par les nouveaux câbles du scénario 3. Après avoir choisi les selfs standard requises et ajouté la compensation pour le scénario 2, un total de 13,11 Gvar de compensation est nécessaire pour le scénario 3. La distribution de cette compensation en selfs standard se traduit par 15 selfs de 50 Mvar, 33 selfs de 100 Mvar, 33 selfs de 120 Mvar et 34 selfs de 150 Mvar.

La solution de compensation proposée pour le scénario 3 est présentée dans la figure ci-dessous.

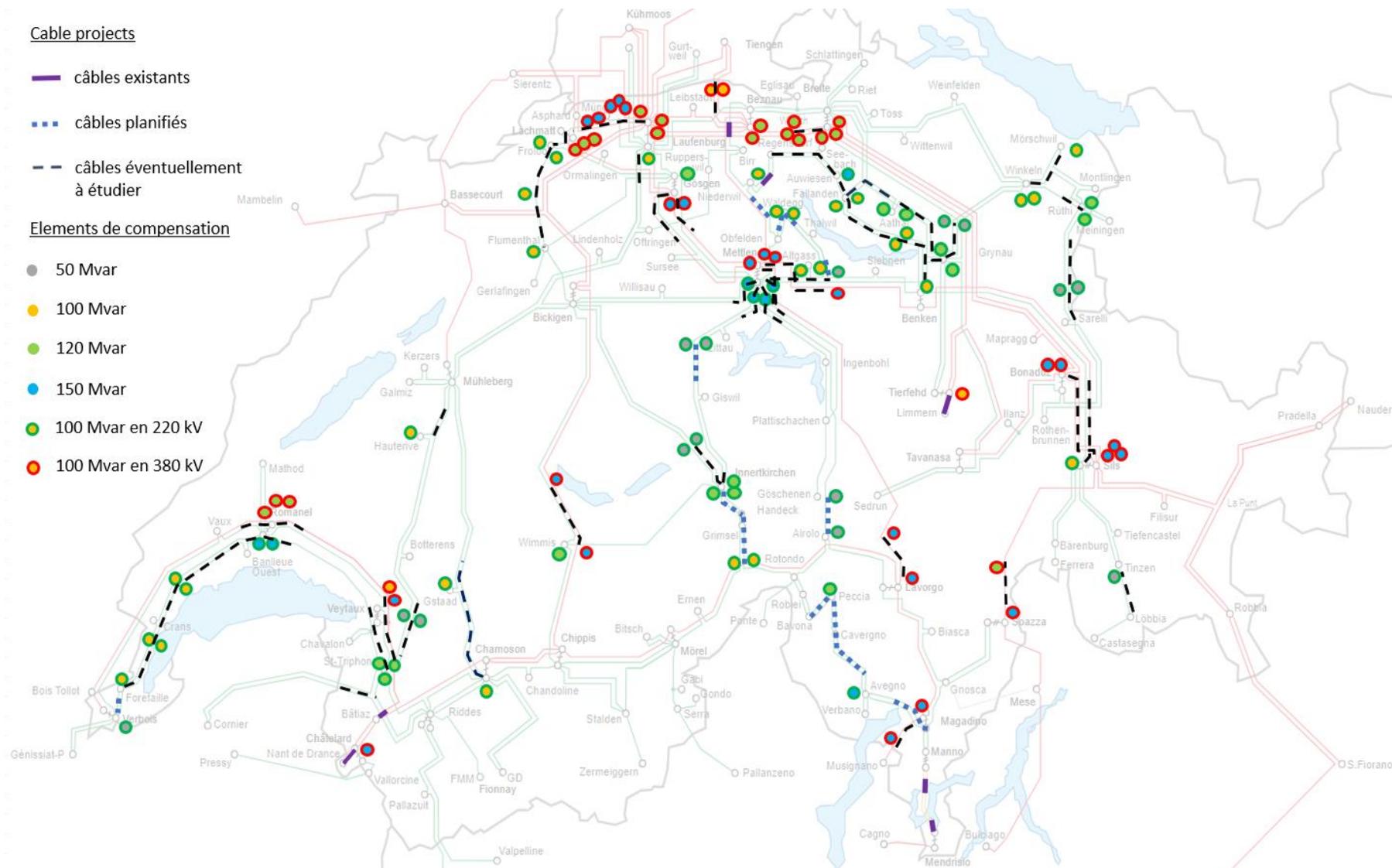


Figure 1-9: Solution de compensation pour le scénario 3

En raison du grand nombre de selfs dans certaines zones, la taille de certaines sous-stations devrait être considérablement augmentée. Pour citer un exemple, jusqu'à 7 selfs sont nécessaires dans une sous-station (Mettlen) et aussi jusqu'à 11 selfs réparties le long d'un câble (380 kV Lachmatt – Laufenburg). Cela nécessiterait la création de nouvelles sous-stations le long de l'itinéraire du câble pour connecter les éléments de compensation. Les sous-stations intermédiaires auraient un aspect similaire à celui de la figure suivante.

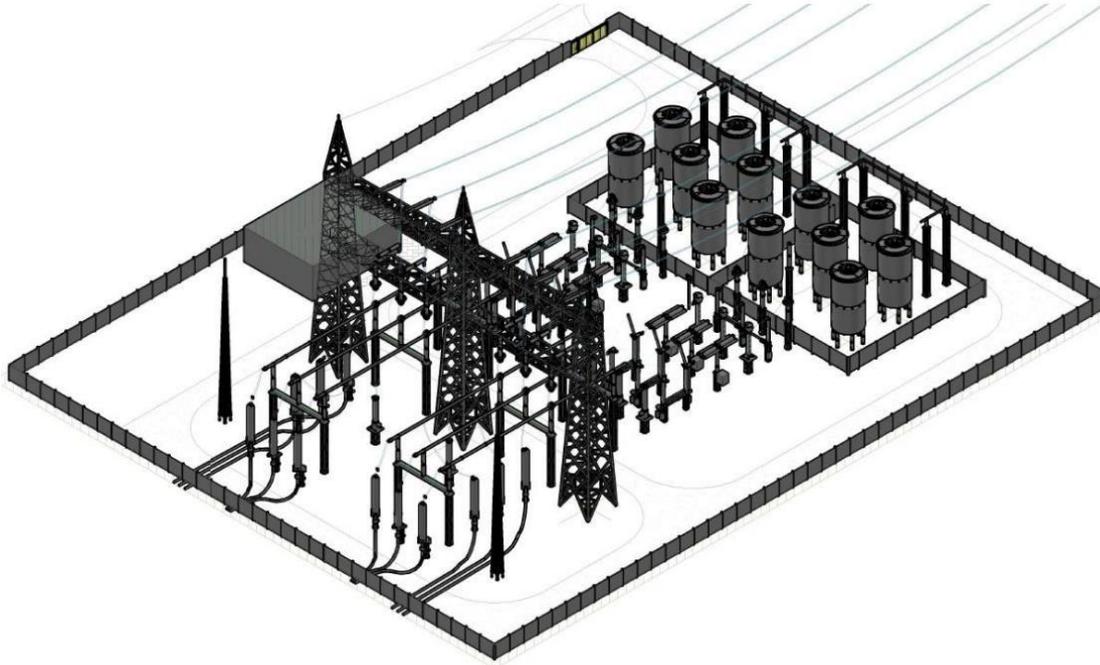


Figure 1-10: Sous-station de transition entre ligne aérienne 420 kV et câble avec installation de compensation avec bobines de réactance à air sans fer (env. 100 m x 70 m). Source [1.1]

La centrale nucléaire de Leibstadt peut être prise comme référence pour les ordres de grandeur. Avec une puissance de 1220 MW, la centrale peut absorber jusqu'à 513 Mvar de puissance réactive. Sans installer de selfs pour compenser les câbles, il faudrait 25 centrales comme celle de Leibstadt pour pouvoir absorber toute la puissance réactive produite dans le scénario 3. Il ne s'agit là que d'une comparaison pour donner une idée des ordres de grandeur. Une telle solution ne serait ni techniquement réalisable ni durable.

Une particularité de l'énergie réactive est qu'elle doit être compensée là où elle est produite. Sinon, elle devrait être transportée par des lignes et des câbles jusqu'au point d'absorption. Cela surchargerait le réseau et obligerait à surdimensionner les lignes et les câbles. Pour cette raison, l'espace à réserver pour l'installation des selfs doit se trouver à côté des câbles. Cela signifie que l'impact visuel d'une ligne aérienne ne serait pas éliminé mais remplacé par des selfs.

1.4.4 Résumé des besoins de compensation de réactive

Afin de faciliter la comparaison entre les trois scénarios, le tableau suivant résume les éléments de compensation requis ainsi que les longueurs de câble considérées. Le type de bobine est indiqué entre parenthèses. Le premier chiffre indique le nombre de bobines isolées à l'air et le second le nombre de bobines isolées à l'huile. La longueur de câble est calculée en tenant compte du nombre de systèmes et du nombre de câbles par phase. Un câble avec 2 systèmes et 2 câbles par phase est compté en longueur multipliée par 4.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Q produite par les câbles (Mvar)	342	1433	12365
Q compensation (Mvar)	250	1670	12960
Nombre de selfs de 50 Mvar	0	5 (3/2)	15 (12/3)
Nombre de selfs de 100 Mvar	1 (0/1)	7 (0/7)	33 (9/24)
Nombre de selfs de 120 Mvar	0	1 (0/1)	33 (0/33)
Nombre de selfs de 150 Mvar	1 (0/1)	4 (0/4)	33 (0/33)
Nombre total de selfs	2	17	114
Longueur de câble (km)	51	268	1132

Tableau 1-44: Nombre de selfs par type et scénario

1.5 Estimation de l'espace nécessaire pour les selfs du scénario 3

La taille d'un self de compensation, compte tenu de l'espace nécessaire à l'isolation et au raccordement au réseau, équivaut à environ 3000 m². Il s'agit d'une valeur moyenne pour des selfs entre 50 et 150 Mvar qui peuvent nécessiter entre 2000 et 5000 m² selon leur taille et niveau de tension. Cette valeur tient compte de la surface nécessaire pour la connexion du self au réseau et de l'espace d'isolement. Cependant les accès ne sont pas considérés.

Dans la solution de compensation proposée pour le scénario 3, 114 selfs sont nécessaires, ce qui signifie qu'au minimum l'espace de 342 000,00 m² devrait être occupé par des selfs. En prenant comme valeur de référence connue l'espace nécessaire pour un terrain de football (environ 7200 m²), 48 terrains de football seraient nécessaires à proximité immédiate des nouveaux câbles pour installer la compensation de réactive nécessaire.

Dans certaines sous-stations, il est déjà difficile de trouver de l'espace pour installer de nouveaux éléments. Si un projet de câble devait être réalisé à proximité de ces sous-stations disposant de peu d'espace, il serait nécessaire de modifier la structure du réseau de manière significative. De nouvelles sous-stations devraient être construites ailleurs pour permettre la connexion des selfs aux extrémités des câbles. Il serait également nécessaire de construire des sous-stations pour installer des compensations le long de certains tracés de câbles. Cela nécessiterait des modifications substantielles des tracés actuels de certaines lignes. Il faudrait également entamer de nombreuses procédures d'autorisation de construction, ce qui allongerait le temps total nécessaire à la réalisation des projets.

Dans le scénario 3, un exemple possible de ce problème serait le cas de la sous-station de Lachmatt. L'espace disponible est déjà limité et l'installation d'un nouveau transformateur 380/220 kV ainsi que d'une entrée/sortie de la ligne 380 kV Asphard – Gösgen est prévue. L'installation d'un câble de 380 kV Lachmatt – Laufenburg de 32 km nécessiterait une compensation à 380 kV Laufenburg, plusieurs selfs tout le long du câble et également à 380 kV Lachmatt. En particulier, 3 selfs de 120 Mvar seraient nécessaires à 380 kV Lachmatt. Dans une sous-station qui manque déjà d'espace, 9000 m² supplémentaires seraient nécessaires pour la compensation de la puissance réactive.

La figure suivante montre l'agencement de la sous-station de Lachmatt en tenant compte du projet en cours d'installation du GIS 380 kV, du nouveau transformateur 380/220 kV et de l'entrée/sortie de la ligne 380 kV Asphard – Gösigen. La surface nécessaire pour ces nouveaux éléments est estimée à 7850 m² (en couleur bleu).

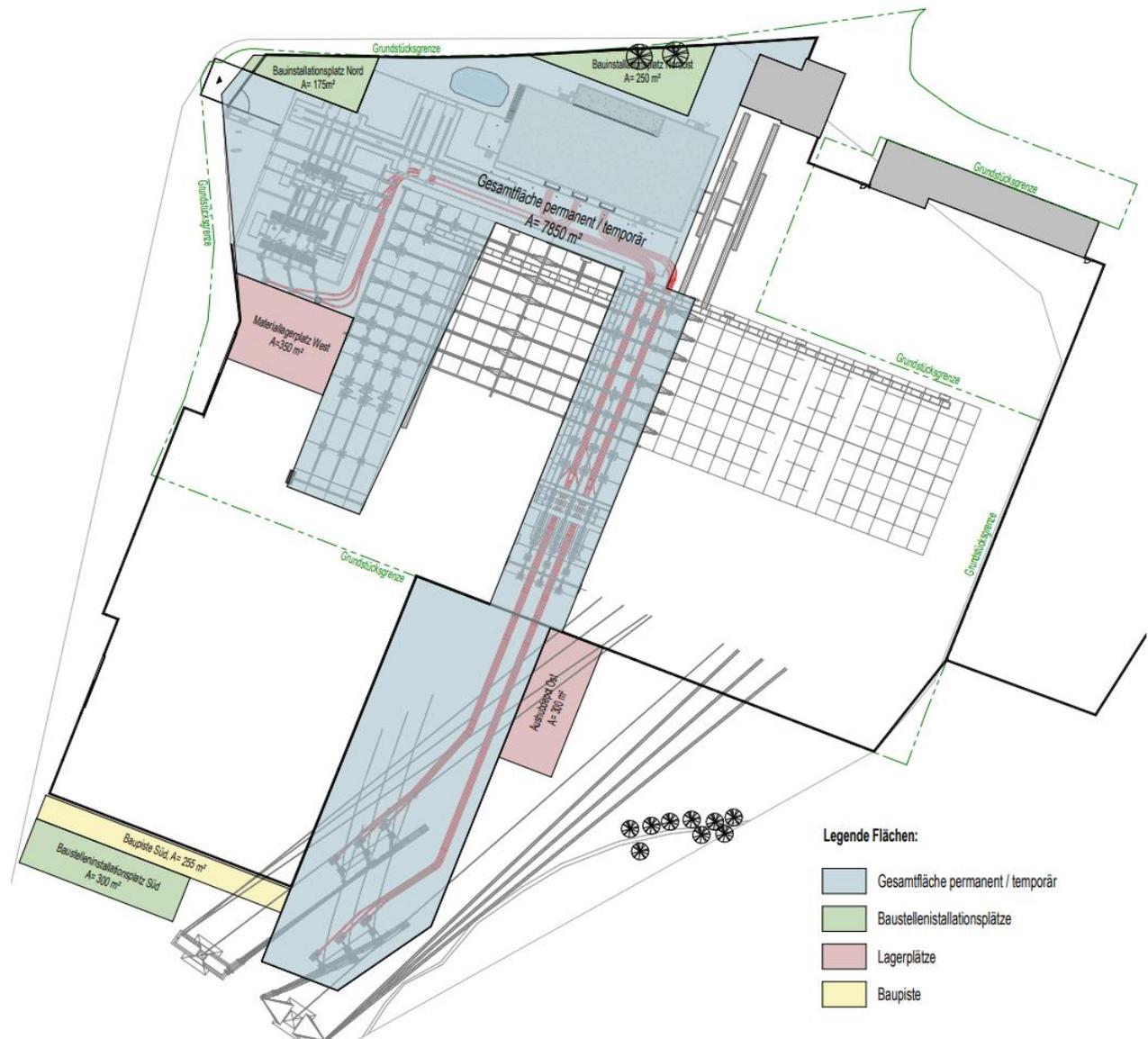


Figure 1-11: Sous-station de Lachmatt

Si un tel projet d'installation d'un câble de 380 kV entre Lachmatt et Laufenburg devait être réalisé, 3 bobines de 120 Mvar seraient nécessaires à 380 kV Lachmatt. La surface occupée par ces trois bobines (environ 9000 m²) serait plus grande que la surface nécessaire pour l'ensemble du projet de modernisation de la sous-station avec un nouveau GIS, un transformateur et une entrée-sortie de ligne.

Comme le montre la figure suivante, il n'est pas possible d'étendre la sous-station de Lachmatt pour positionner les bobines.

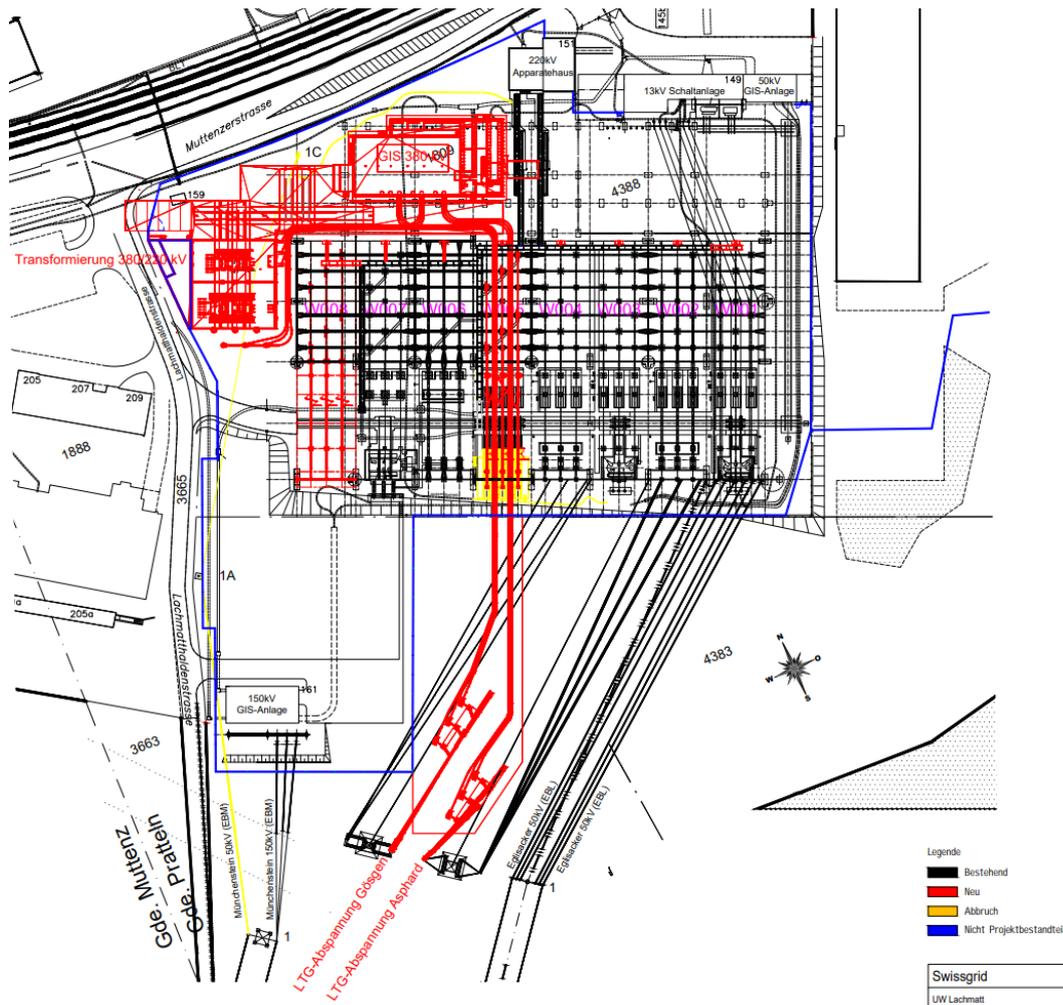


Figure 1_121-1312: Sous-station de Lachmatt

La solution consisterait à trouver un autre espace pour les selfs à proximité immédiate de la sous-station et à les relier par un câble. Ou bien construire une nouvelle sous-station plus grande ailleurs à Lachmatt.

Un zoom de la Figure 1-9 est présenté ci-dessous pour montrer le nombre de selfs nécessaires pour le projet de câble 380 kV Lachmatt – Laufenburg.

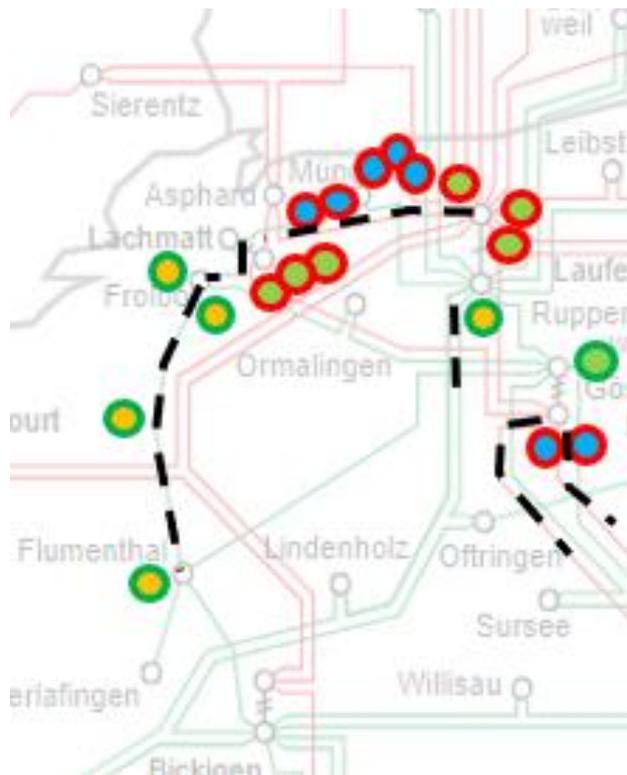


Figure 1-13: Selfs de compensation dans le scénario 3 autour de Lachmatt

En plus de la compensation à Lachmatt, il serait également nécessaire de raccorder 5 selfs de 150 Mvar à une ou plusieurs sous-stations intermédiaires le long de l'itinéraire du câble. Cela nécessiterait la construction de sous-stations intermédiaires telles que celle de la Figure 1-11 entre Lachmatt et Laufenburg.

Pour compléter cet exemple, 3 selfs de 120 Mvar à 380 kV Laufenburg seraient également nécessaires. Au total 11 selfs qui occuperaient au minimum 33 000 m² pour absorber les 1470 Mvar produites par un seul projet de câblage.

En suivant le même raisonnement pour d'autres points du réseau, on arrive rapidement à la conclusion que les sous-stations entourées de nombreux câbles deviendraient vite trop petites pour intégrer les nouvelles compensations nécessaires. La morphologie de notre réseau pourrait être considérablement affectée par les contraintes imposées par les projets de câblage.

La taille des sous-stations existantes dans le réseau Swissgrid varie de 743 m² à Robbiei à 137 924 m² à Laufenburg, avec une moyenne de 19,527 m² et une surface totale de 2 460 435 m². Les 114 bobines du scénario 3 nécessiteraient 342 000 m², ce qui représente 14% de la surface actuellement occupée par la totalité des sous-stations de Swissgrid. La surface requise pour une seule self de compensation (3000 m²) est plus de trois fois supérieure à la taille de la plus petite sous-station existante. Une seule self représente un 15% de la taille d'une sous-station moyenne. Comme le montre la Figure 1-13, de nombreuses sous-stations auraient besoin d'une compensation dans le cadre du scénario 3. Plusieurs sous-stations auraient besoin de deux, voire trois selfs. L'installation d'un nombre de câbles similaire à celui du scénario 3 augmenterait la surface consacrée aux sous-stations d'environ 14%. Il s'agit d'un chiffre optimiste, qui suppose que toutes les sous-stations nécessaires pourraient être agrandies, ce qui, comme nous l'avons vu, est loin d'être le cas.

1.6 Calcul de coûts des éléments de compensation des trois scénarios

Un calcul des coûts de la compensation de chaque scénario étudié a été réalisé. Les prix unitaires considérés, selon la taille, le niveau de tension et le type d'isolement, sont présentés dans le tableau suivant. Ils comprennent la self, une fondation, un champ AIS DSS, la technique de contrôle du champ, la technique de contrôle de la station, la communication, la planification, les prestations propres et les pertes (capitalisées au moment de l'investissement) [1.2]. Cependant, les coûts ne tiennent pas compte des paramètres tels que le manque d'espace et le besoin de construire de nouvelles sous-stations. Les câbles ne sont pas compris dans le calcul non plus. Le tableau présente les coûts par scénario, qui s'élèvent à 29,9, 182,2 et 1365,9 Mio. de CHF respectivement pour les scénarios 1, 2 et 3.

	Prix unitaire [Mio, de CHF]	Nombre de selfs			Coûts des selfs [Mio, de CHF]		
		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
50 Mvar isolée à l'air 220 kV	4	0	3	12	0	12	48
50 Mvar isolée à l'huile 220 kV	8	0	2	3	0	16	24
100 Mvar isolée à l'air 220 kV	5	0	0	7	0	0	35
100 Mvar isolée à l'huile 220 kV	11,3	0	5	22	0	56,5	248,6
120 Mvar isolée à l'huile 220 kV	12,4	0	1	15	0	12,4	186
150 Mvar isolée à l'huile 220 kV	14	0	3	8	0	42	112
50 Mvar isolée à l'air 380 kV	5	0	0	0	0	0	0
50 Mvar isolée à l'huile 380 kV	9,7	0	0	0	0	0	0
100 Mvar isolée à l'air 380 kV	6	0	0	2	0	0	12
100 Mvar isolée à l'huile 380 kV	13,4	1	2	2	13,4	26,8	26,8
120 Mvar isolée à l'huile 380 kV	14,5	0	0	18	0	0	261
150 Mvar isolée à l'huile 380 kV	16,5	1	1	25	16,5	16,5	412,5
Total		2	17	114	29,9	182,2	1365,9

Tableau 1-5: Coûts des selfs de compensation par type et scénario

2 WP 2 – Études EMT au niveau des systèmes et des équipements

2.1 Résumé exécutif

Les analyses présentées dans ce rapport représentent le work package 2 de l'étude de câblage Suisse et sont dédiées aux simulations EMT pour les trois scénarios objet d'étude représentés dans l'annexe [4.4].

Les câbles dont il est question dans cette étude sont des câbles XLPE souterrains. Dorénavant, pour faciliter la lecture, seul le mot « câble » sera écrit.

Des études EMT approfondies au niveau des systèmes et des équipements ont été réalisées dans le cadre de cet ensemble de travaux afin d'évaluer l'impact des systèmes de câbles proposés dans les trois scénarios sur le comportement et les performances du réseau existant dans les domaines fréquentiel et temporel.

En mettant l'accent sur les résonances et les harmoniques du réseau, les études dans le domaine fréquentiel ont été réalisées en deux étapes : le balayage des fréquences et l'amplification des harmoniques. Les études de balayage des fréquences visent à déterminer les endroits du réseau qui sont sensibles aux résonances dues à l'intégration des câbles, ainsi que leurs fréquences de résonance respectives. Elles sont cruciales pour identifier les risques potentiels des TOV (surtension temporaire, anglais : temporary overvoltage) qui peuvent être rencontrés pendant les transitoires du réseau tels que les événements de mise sous tension. Les études d'amplification des harmoniques, d'autre part, ont pour objectif de prédire à quel point les harmoniques de bas ordre peuvent être amplifiées dans des zones densément câblées, causant des problèmes de qualité de l'énergie, stressant et même endommageant différents types d'équipements de réseau.

Les études du domaine temporel pour un réseau AC (courant alternatif, anglais : alternating current) couvrent généralement une grande variété d'événements transitoires, y compris la mise sous tension de transformateurs, réactances, condensateurs, lignes aériennes, câbles, les court-circuits et leur élimination, etc. Compte tenu des spécificités de ce projet, nous nous concentrons principalement sur les études de mise sous tension des grands transformateurs aux endroits sensibles du réseau identifiés dans les études de balayage de fréquences afin d'évaluer les risques de TOV à prévoir avec les projets de câbles proposés dans les différents scénarios.

En outre, une analyse présente la relation entre la connexion d'un câble et l'augmentation de tension en régime permanent provoquée par l'apport de puissance réactive du câble à son point de connexion. Cette relation permet de déterminer d'une part la longueur totale maximale de câble admissible sur un seul nœud en fonction de sa puissance de court-circuit, et d'autre part la taille maximale des équipements de compensation pour éviter une augmentation de tension excessive sur un nœud lorsqu'un élément de compensation est perdu.

Les principales conclusions tirées des études réalisées sont présentées ci-dessous :

2.1.1 Études de balayage des fréquences

- Plusieurs cas critiques de résonance parallèle ont été identifiés dans le scénario 3.

Alors que la réponse en fréquence à divers endroits du réseau sous différentes conditions d'exploitation reste plutôt non critique pour les scénarios 1 et 2, plusieurs cas extrêmement critiques de résonances parallèles ont été identifiés dans le scénario 3. Avec de graves risques de résonance parallèle aux harmoniques 2 et 3 (c.-à-d. 100 Hz et 150 Hz), ces cas provoqueraient des TOV très déformés et mal amortis pendant les transitoires sur site, ce qui entraînerait des contraintes thermiques et diélectriques considérables sur l'équipement du réseau, voire une défaillance de l'équipement. Ces cas se retrouvent principalement à 380 kV Romanel et à 380 kV Magadino.

En outre, des risques potentiels de résonance parallèle sur l'harmonique 3 pourraient apparaître à d'autres endroits, tels que 220 kV Wimmis et 380 kV Lavorgo, si ces zones deviennent encore plus densément câblées qu'elles ne le sont dans le scénario 3.

- La réponse en fréquence du réseau peut encore se détériorer dans le scénario 4 avec un nombre de projets de câbles encore plus élevé que dans le scénario 3.

Dans un scénario supplémentaire 4 où le nombre de projets de câbles est plus élevé que dans le scénario 3, la détérioration de la réponse en fréquence du réseau peut être confirmée dans des zones du réseau où la réponse en fréquence n'était pas critique dans les scénarios 1, 2 et 3. À 380 kV Nant de Drance, 380 kV Mörel, 380 kV Lavorgo, 380 kV Tierfehd, 380 kV Filisur et 380 kV Soazza, des résonances parallèles auparavant non critiques deviennent critiques avec des fréquences encore plus basses et une amplitude d'impédance plus élevée, tandis que dans d'autres, de nouveaux pics de résonances parallèles apparaissent à des harmoniques d'ordre inférieur, ce qui pose des risques de TOV critiques pendant les événements transitoires du réseau.

- L'augmentation du nombre de projets de câbles dans le réseau (du scénario 1 au scénario 3) déplace les fréquences de résonances parallèles du système vers des harmoniques plus basses, ce qui augmente les risques de TOV.

La comparaison de la réponse en fréquence à divers endroits du réseau entre les scénarios 1, 2 et 3 montre un déplacement notable de la résonance parallèle vers les harmoniques de rang inférieur. En particulier, les fréquences de résonance parallèle pour le scénario 3 à plusieurs endroits du réseau se déplacent sous l'harmonique 4 (c.-à-d. 200 Hz), ce qui exposerait le réseau à des risques considérables de TOV en raison de l'excitation de la résonance parallèle harmonique d'ordre inférieur pendant les transitoires, en particulier sous des conditions d'exploitation défavorables telles qu'une faible puissance de court-circuit et des contingences.

- L'intégration des câbles a un impact plus important sur le réseau 380 kV que sur le réseau 220 kV en raison de l'amortissement plus faible du système dans le premier cas.

Par rapport au réseau 220 kV, le réseau 380 kV est nettement moins maillé, avec moins de groupes de production et de charges connectées, ce qui fait que l'amortissement sur le réseau 380 kV est généralement plus faible que sur le réseau 220 kV. Comme résultat, l'impédance est plus élevée lors des résonances dans le réseau 380 kV. L'intégration des câbles sur le réseau 380 kV aurait donc un impact plus important sur les performances globales du réseau et la sécurité des équipements que sur le réseau 220 kV. En d'autres termes, il serait plus « sûr » d'envisager la mise en œuvre de projets de câblage sur le réseau 220 kV que sur le réseau 380 kV.

2.1.2 Études d'amplification des harmoniques

- L'amplification des harmoniques de bas ordre s'aggrave lorsque le nombre de projets de câbles augmente dans le réseau.

Aucun risque d'amplification des harmoniques n'est à craindre dans un réseau composé uniquement de lignes aériennes. L'intégration de projets de câbles dans un réseau introduit des éléments capacitifs, ce qui augmente considérablement les risques d'amplification de certaines harmoniques de rang inférieur. En général, plus le nombre de projets de câbles augmente, plus l'amplification des harmoniques de rang inférieur est importante. C'est le cas pour l'amplification du 7^e harmonique aux sous-stations 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel, et 220 kV Vaux où l'amplification devient critique dans le scénario 3 alors qu'elle est négligeable dans les scénarios 1 et 2. Dans les alentours de Nant de Drance, l'amplification de l'harmonique 7 existe déjà dans l'actualité, mais augmente notablement dans le scénario 3.

Il existe toutefois des exceptions à cette règle, comme démontré dans la section 2.3.2.1.3 avec l'exemple de la diminution de l'amplification de l'harmonique 5 à Airolo dans le scénario 3. C'est la raison pour laquelle des études détaillées sur l'amplification des harmoniques doivent être réalisées pour tout nouveau projet de câble afin de prévoir tout problème éventuel de résonance harmonique au stade de la planification.

- Une puissance de court-circuit élevée peut atténuer les problèmes d'amplification des harmoniques.

Des comparaisons de l'amplification des harmoniques de bas ordre à plusieurs endroits du réseau sous diverses conditions de puissance de court-circuit ont été effectuées. En général, l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau peut atténuer les problèmes liés à l'amplification des harmoniques de rang inférieur en déplaçant la fréquence de résonance harmonique vers des fréquences plus élevées et en amortissant la résonance harmonique sur les différents trajets harmoniques. C'est le cas pour l'amplification des harmoniques 5 et 7 à Airolo dans le scénario 2, où l'amplification pourrait atteindre jusqu'à 11 fois dans la condition de puissance de court-circuit faible. Toutefois, des exceptions à cette règle sont à nouveau découvertes. Dans les alentours de Nant de Drance, des amplifications plus élevées sont observées avec puissance de court-circuit basse pour le scénario 2. Cependant, dans le scénario 3, les amplifications des harmoniques sont plus élevées avec la puissance de court-circuit élevée. Ce cas est expliqué en détail dans les sections 2.3.2.2.2 et 2.3.2.2.3.

- Un seul projet de câblage dans un réseau densément câblé peut avoir un impact important sur l'amplification des harmoniques dans les zones éloignées.

Les questions d'amplification des harmoniques deviennent de plus en plus complexes à mesure que de plus en plus de câbles sont intégrés dans le réseau. Dans un réseau densément câblé, la mise en câble d'un certain segment de réseau, soit avec des lignes aériennes, soit avec des câbles, n'aurait pas seulement un impact sur l'amplification des harmoniques dans la zone locale, mais il pourrait aussi avoir un impact important sur l'amplification des harmoniques de bas ordre dans une zone éloignée. Par exemple, la section 220 kV Altgass – Samstagern aurait un impact sur les facteurs d'amplification observés au Tessin.

Globalement, l'amplification des harmoniques de bas ordre pendant l'intégration des câbles (en particulier l'intégration intensive des câbles) peut être une question délicate, qui nécessiterait absolument des études détaillées sur l'amplification des harmoniques afin d'identifier les risques, de définir certains principes d'exploitation et de prendre des décisions sur la conception et l'installation des filtres.

2.1.3 Études temporelles (mise sous tension de grands transformateurs)

- Des TOV critiques sont à prévoir pendant la mise sous tension des transformateurs aux endroits sensibles aux résonances parallèles dans le scénario 3 (par exemple, 380 kV Romanel et 380 kV Magadino).

Dans le scénario 3, des TOV sévères et mal amortis peuvent être observés lors de la mise sous tension des grands transformateurs à 380 kV Romanel et 380 kV Magadino sous certaines topologies et configurations de réseau. Avec une amplitude de TOV supérieure à 1,5 pu dans certains cas, ces TOV peuvent entraîner des contraintes diélectriques et thermiques considérables sur les équipements du réseau situés à proximité, provoquant un vieillissement prématuré des équipements, voire leur défaillance.

Néanmoins, il est également observé que pour le scénario 2 avec beaucoup moins de projets de câbles, les mêmes topologies et configurations de réseau se traduiraient par des TOV très atténués, de sorte qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter de la stabilité et de la sécurité de l'exploitation du réseau.

Dans l'ensemble, on peut affirmer que l'intégration intensive des câbles, comme dans le scénario 3, augmenterait considérablement les risques de TOV critiques à plusieurs endroits du réseau lors d'événements transitoires sur le site.

- La puissance de court-circuit d'un endroit de réseau joue un rôle important dans l'impact de l'intégration des câbles dans le voisinage. Des études complémentaires ont été réalisées pour démontrer cette thèse.

L'impact de l'intégration des câbles varie d'un nœud à l'autre, en fonction de la puissance de court-circuit du nœud. Pour démontrer cela, des simulations supplémentaires partant du scénario 3 avec une augmentation remarquable des km de câble à 380 kV Romanel et à 380 kV Laufenburg ont été réalisées.

Pour un nœud faible tel que 380 kV Romanel, l'augmentation de la longueur de câblage proposée dans le scénario 3 de 40 km à 117,4 km autour de 380 kV Romanel déplace davantage la résonance parallèle de l'harmonique 3 vers l'harmonique 2, conduisant à des TOV beaucoup plus aggravés (de 1,32 pu à plus de 1,5 pu) lors de la mise sous tension des transformateurs à Romanel.

D'autre part, pour un nœud fort tel que le 380 kV Laufenburg, presque tripler la longueur de câblage de 64,8 km à 171,74 km ne déplacerait que légèrement la fréquence de résonance parallèle de moins de 10 Hz dans une contingence N-1 testée. En outre, l'amortissement élevé du système dû à la puissance de court-circuit élevée fait que l'impédance harmonique du réseau à 380 kV Laufenburg pour les harmoniques d'ordre inférieur (c.-à-d. 2, 3 et 4) est suffisamment faible pour éviter l'excitation de toute résonance parallèle d'ordre inférieur. Sans surprise, aucun TOV ne peut être observé pendant la mise sous tension du transformateur à Laufenburg pour les deux cas testés, même avec un câblage intensif à proximité de 380 kV Laufenburg.

En résumé, il serait plutôt sûr d'intégrer des projets de câbles à proximité d'un nœud fort, car on peut s'attendre à un impact minimal sur le réseau existant. Toutefois, il convient d'être attentif lors de l'intégration de projets de câbles à proximité d'un nœud faible, car des enquêtes ou des études plus détaillées pourraient s'avérer nécessaires.

2.1.4 Variations de tension dues à la connexion des câbles et ou à la perte d'un dispositif de compensation

L'apport de puissance réactive engendré par la mise sous tension d'un câble provoque une augmentation de la tension en régime permanent du nœud auquel le câble est connecté. Cette augmentation de tension est directement proportionnelle à la quantité de puissance réactive générée par le câble et inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit du nœud. Sachant que l'apport de puissance réactive d'un câble est directement lié à sa longueur, on peut conclure qu'un nœud fort (puissance de court-circuit élevée) peut mieux supporter la connexion d'une grande quantité de câbles sans subir une grande influence sur sa tension en régime permanent.

Par définition, la variation de tension maximale admissible est de 2% [2.29]. En connaissant cette limite, il est possible d'estimer la longueur totale maximale de câbles connectés à un nœud en fonction de la puissance de court-circuit pour une tension d'exploitation donnée.

De façon analogue, lorsqu'un câble est en fonctionnement et que son élément de compensation est perdu (par exemple en raison d'une défaillance ou par une fausse manœuvre), la tension du nœud correspondant aura tendance à augmenter. Il convient donc de limiter la puissance des bobines de compensation de sorte que la perte d'un de ces éléments ne provoque pas une augmentation de tension en régime permanent au-delà de la limite de 2%.

En résumé, les analyses montrent qu'il convient d'utiliser des éléments de compensation d'une puissance inférieure à 200 Mvar pour des nœuds dont la puissance de court-circuit minimale est inférieure à 10 GVA. Dans tous les cas, il serait judicieux de prendre ces résultats avec modération et comme une première approximation, tout en sachant que des études plus approfondies peuvent être nécessaires, plus particulièrement dans le cas d'un nœud faible.

2.2 Études de balayage de fréquences

Un réseau électrique est composé de divers équipements et composants électriques de nature résistive, inductive ou capacitive. Certaines de ces réactances inductives et capacitives peuvent devenir égales entre elles à certaines fréquences, entraînant des résonances en série ou en parallèle. Le nombre et la fréquence de ces points de résonance dépendent de multiples facteurs, tels que la complexité du réseau et la nature de ses composants, les paramètres de leurs caractéristiques électriques, leurs emplacements les uns par rapport aux autres et le point d'intérêt. D'autre part, les composants de nature non linéaire (par exemple, le noyau de fer d'un transformateur) et certaines opérations de commutation (par exemple, les événements de mise sous tension, les dispositifs électroniques de puissance en fonctionnement normal, l'élimination des défauts à la terre, l'îlotage du système, etc.) pourraient générer des formes d'ondes de tension et de courant avec des composantes sur un large spectre de fréquences. Ces composantes de tension et de courant riches en harmoniques, lorsque certaines conditions sont réunies, provoqueraient des oscillations mal amorties aux fréquences de résonance du système, entraînant une distorsion harmonique excessive et des surtensions. Ceci peut être illustré par un exemple où une inductance non linéaire est commutée sur un réseau RLC simple, comme le montre la Figure 2-1.

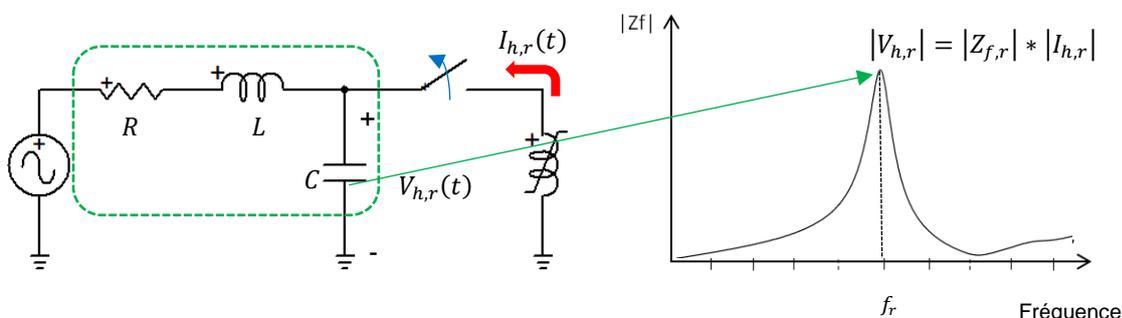


Figure 2-1: Illustration de la connexion d'une inductance non linéaire à un réseau RLC

Comme le montre la Figure 2-1, le réseau RLC a une fréquence de résonance parallèle à f_r avec une impédance relativement élevée. Cette résonance est définie par les composants LC du réseau :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

L'inductance non linéaire, telle qu'un transformateur ou une réactance shunt, injecte des courants contenant un large spectre de composantes de fréquence lorsqu'elle est activée. Par conséquent, la composante de courant à f_r , $I_{h,r}$, sera amplifiée par la grande impédance du réseau à la résonance $Z_{f,r}$, ce qui entraîne une composante de tension relativement élevée à f_r observée au nœud, représentée par $V_{h,r}$. Cette composante de tension, superposée à la composante de tension de fréquence fondamentale $V_{50\text{ Hz}}$, donnerait lieu à des tensions plus élevées que la normale (surtensions). Ces surtensions provoqueraient un vieillissement prématuré de l'isolement et de l'équipement, une détérioration ou même une défaillance due à une contrainte diélectrique excessive et/ou à un échauffement.

Il est donc essentiel de réaliser des études sur les harmoniques et les résonances afin d'évaluer les points sensibles du réseau qui sont sujets à des problèmes de résonance et de stabilité avant d'introduire de nouveaux composants et équipements électriques.

En outre, les câbles souterrains sont beaucoup plus capacitifs que les lignes aériennes, ce qui peut conduire les fréquences de résonance du réseau vers des harmoniques de rang inférieur, d'où l'importance

particulière des études sur les harmoniques et les résonances dans un réseau de transport d'électricité dense en câbles.

Les études sur les harmoniques et les résonances du réseau sont généralement réalisées en deux étapes : la première, à savoir le balayage de fréquences, consiste à déterminer les points du réseau sensibles aux résonances (en parallèle ou en série) ainsi que leurs fréquences de résonance respectives ; la seconde, à savoir l'amplification des harmoniques, vise à évaluer la réponse du système à certaines fréquences harmoniques en termes d'amplification.

Les résultats des études de balayage de fréquences sont présentés dans cette section, tandis que ceux de l'amplification harmonique sont présentés dans la section 2.3.

2.2.1 Méthodologie

Dans EMTP, le balayage de fréquences pour l'impédance harmonique à un certain endroit du réseau peut être effectué en injectant un courant de 1 A d'une fréquence spécifique dans une gamme de fréquences prédéfinie au point d'intérêt et en mesurant la réponse de la tension à ce point. La tension mesurée dans le spectre de fréquences prédéfini correspond à l'impédance harmonique observée au point de commande.

En général, les balayages de fréquences sont effectués jusqu'à 2500 Hz (c.-à-d. la fréquence de l'harmonique 50). Compte tenu des spécificités du réseau de transport d'électricité suisse et des TOV provoquées par certains événements transitoires, nous nous intéressons à toute résonance parallèle jusqu'à la fréquence harmonique 7 (c.-à-d. 350 Hz). Par conséquent, il est jugé suffisant d'effectuer un filtrage des fréquences jusqu'à 500 Hz dans le cadre de ce travail. Il convient de noter que parmi toutes les fréquences de résonance parallèles possibles inférieures à l'harmonique 7, l'attention doit se porter sur les fréquences de résonance situées au niveau ou à proximité des fréquences harmoniques entières d'ordre inférieur (c.-à-d. 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, etc.).

La puissance de court-circuit du réseau joue un rôle important dans la résonance. D'une manière générale, un niveau de court-circuit (SCL) élevé tend à déplacer la résonance parallèle vers des fréquences plus élevées, réduisant ainsi les risques de TOV excités par toute résonance. Au contraire, un niveau de court-circuit faible pousse davantage la résonance du réseau vers des fréquences plus basses, augmentant ainsi les risques de TOV excités par la résonance pendant les événements transitoires. La puissance de court-circuit à un certain nœud du réseau dépend de multiples facteurs, tels que le niveau de production, les imprévus planifiés, les pannes d'équipement (par exemple, transformateurs, lignes/câbles, réacteurs/condensateurs shunt, SVC, filtres, etc.).

Le modèle EMT du réseau permet de basculer entre deux niveaux de production - optimal et faible. Le niveau de production optimal (SCL optimal ci-après) permet d'évaluer la réponse du réseau sous des conditions d'exploitation optimales en termes de production. Il est calculé à chaque nœud sur la base d'études internes de court-circuit. La condition SCL bas, en revanche, est une condition d'exploitation fictive, dont l'objectif est d'étudier la réponse du système dans des conditions d'exploitation non optimales lorsque les groupes de production locaux sont à 50 % de leur capacité respective. Dans les études de balayage de fréquences, on a pris en compte un faible SCL, ainsi que diverses contingences de ligne/câble N-1 (et N-2 dans certains cas), afin d'évaluer la réponse en fréquence du réseau avec les projets de câbles prévus dans des conditions de réseau « défavorables » pour parvenir à une évaluation globale prudente. Les contingences N-1 (et N-2) sont soigneusement définies pour obtenir les conditions de réseau les plus « défavorables » (par exemple, résonances d'ordre inférieur, SCL inférieur, etc.).

Outre les fréquences de résonance, l'amplitude de l'impédance harmonique à la résonance, qui est liée à l'amortissement du réseau, est également un facteur déterminant de la gravité des TOV qui peuvent être déclenchés par certains événements transitoires. En l'absence de normes internationales pertinentes, les GRT

européens utilisent généralement leurs propres valeurs de seuils critiques pour l'amplitude de l'impédance harmonique à la résonance. Quelques exemples sont donnés dans le Tableau 2-1 [2.1].

TSO	Valeurs de seuils critiques
Svenska Kraftnät	100 Hz \pm 10 Hz: 400 Ohm
	150 Hz \pm 10 Hz: 800 Ohm
Eirgrid	<150 Hz: 1000 Ohm
Energinet	100 Hz \pm 10 Hz: 400 Ohm
	150 Hz \pm 10 Hz: 600 Ohm
	200 Hz \pm 10 Hz: 2400 Ohm
RTE	Différentes valeurs pour les harmoniques entre 2 et 10

Tableau 2-1: Valeurs de seuils critiques de l'amplitude de l'impédance harmonique employées par les GRT européens

Il convient de noter qu'une marge de ± 10 Hz a été adoptée par la plupart des GRT lorsqu'il s'agit d'analyses de balayage de fréquences pour tenir compte des écarts possibles entre les résultats de la simulation et le réseau réel en raison d'imprécisions dans les approches de modélisation, d'hypothèses, de conditions de réseau imprévisibles, etc. Selon le Tableau 2-1 et dans une perspective conservatrice, nous nous concentrons sur les résonances parallèles à ou près des fréquences harmoniques jusqu'à 200 Hz avec une marge de ± 10 Hz et les valeurs de seuils critiques indiquées dans le Tableau 2-2..

Fréquences de résonance	Valeurs de seuils critiques
100 Hz \pm 10 Hz	400 Ohm
150 Hz \pm 10 Hz	600 Ohm
200 Hz \pm 10 Hz	2400 Ohm

Tableau 2-2: Valeurs du seuil d'impédance critique pour les harmoniques jusqu'à 4th dans cette étude

Les balayages de fréquences ont été réalisés sur un total de 28 endroits du réseau, à deux niveaux de tension, comme le montre le tableau ci-dessous. Ces endroits ont été choisis en fonction de la présence de grands transformateurs 220/380 kV de Swissgrid et/ou de leur proximité avec les projets de câbles prévus.

220 kV Altgass	220 kV Auwiesen	220 kV Benken	220 kV Bickigen
380 kV Bickigen	220 kV Chamoson	380 kV Châtelard	220 kV Fällanden
220 kV Froloo	220 kV Flumenthal	220 kV Gösgen	380 kV Gösgen
220 kV Lachmatt	380 kV Lachmatt	220 kV Laufenburg	380 kV Laufenburg
380 kV Lavorgo	220 kV Magadino	220 kV Mettlen	380 kV Mettlen
220 kV Mühleberg	220 kV Romanel	380 kV Romanel	220 kV Sarelli
380 kV Sils	380 kV Soazza	220 kV Wimmis	220 kV Winkeln

2.2.2 Résultats et discussions

Les conclusions suivantes peuvent être tirées des études réalisées :

- Plusieurs cas critiques de résonance parallèle en termes de fréquences de résonance et d'amplitude d'impédance harmonique (selon le Tableau 2 2) ont été trouvés dans le scénario 3 à 380 kV Romanel et à 380 kV Magadino dans certaines conditions de réseau (voir section 2.2.2.1).
- Avec un contenu de câble encore plus élevé que dans le scénario 3, une détérioration de la réponse en fréquence du réseau, par rapport au scénario 3, a été observée et confirmée dans le scénario 4. Dans le scénario 4, des résonances harmoniques critiques d'ordre inférieur ont été observées à plusieurs endroits du réseau, alors qu'elles n'avaient pas été observées dans les scénarios 1, 2 et 3 précédents. Dans certains cas, des résonances parallèles auparavant non critiques deviennent critiques après s'être déplacées vers des harmoniques d'ordre inférieur en raison des projets de câbles supplémentaires, tandis que dans d'autres cas, de nouveaux pics de résonances parallèles apparaissent à des fréquences harmoniques d'ordre inférieur, avec une amplitude d'impédance significative qui conduirait à un TOV critique pendant les transitoires du réseau (voir section 2.2.2.2).
- L'augmentation du nombre de projets de câbles déplace les fréquences de résonance du système vers des harmoniques plus basses à différents endroits du réseau, ce qui, à son tour, augmente les risques de TOV et de résonances aux harmoniques de bas ordre pendant les transitoires du réseau (voir section 2.2.2.3).
- Comparé au réseau 380 kV, le réseau 220 kV plus maillé offre généralement un amortissement du système plus élevé à différents endroits du réseau, ce qui diminue les risques potentiels de TOV et de résonances provoquées par l'intégration de projets de câbles. Cela signifie qu'il est relativement plus « sûr » de mettre en œuvre des projets de câbles sur le réseau 220 kV que sur le réseau 380 kV (voir section 2.2.2.4).

Les quatre principales conclusions ci-dessus sont développées dans les sections respectives. Les études de balayage des fréquences sont faites pour commencer avec le scénario 3, les cas présentant des risques de résonances harmoniques d'ordre inférieur sont dans la section 2.2.2.1 et les autres dans l'annexe 4.4.3 pour la commodité de lecture.

En outre, il convient de mentionner que, bien qu'ils n'aient pas été identifiés comme des endroits présentant des risques critiques de résonance parallèle, 220 kV Wimmis et 380 kV Lavorgo méritent l'attention des lecteurs car des risques potentiels de résonance parallèle peuvent survenir si des projets de câbles supplémentaires, autres que ceux du scénario 3, sont proposés dans les zones du réseau local (voir l'annexe 4.4.3).

2.2.2.1 Cas critiques de résonances parallèles

Plusieurs cas critiques de résonance parallèle en termes de fréquences de résonance et d'amplitude d'impédance harmonique (selon le Tableau 2-2) ont été trouvés dans le scénario 3 à 380 kV Romanel et à 380 kV Magadino dans certaines conditions de réseau.

2.2.2.1.1 380 kV Romanel

Plusieurs projets de câbles sont proposés dans le scénario 3 à proximité de 380 kV Romanel :

- 8 km, de 380 kV Romanel vers 380 kV Bois Tollot
- 8 km, de 380 kV Romanel vers 380 kV La Bâtiaz
- 12 km autour de 380 kV Veytaux, ~36 km de 380 kV Romanel

On peut s'attendre à des résonances parallèles pour les harmoniques de rang inférieur à 380 kV Romanel.

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études de balayage de fréquences pour 380 kV Romanel :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Romanel – Bois Tollot
3	N-1 sur 380 kV Romanel – La Bâtiaz
4	N-1 sur 380 kV Châtelard – La Bâtiaz
5	N-1 sur 380 kV Chamoson – La Bâtiaz
6	N-2 sur 380 kV Romanel – Bois Tollot et Chamoson – La Bâtiaz

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Romanel pour les 6 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 2-2..

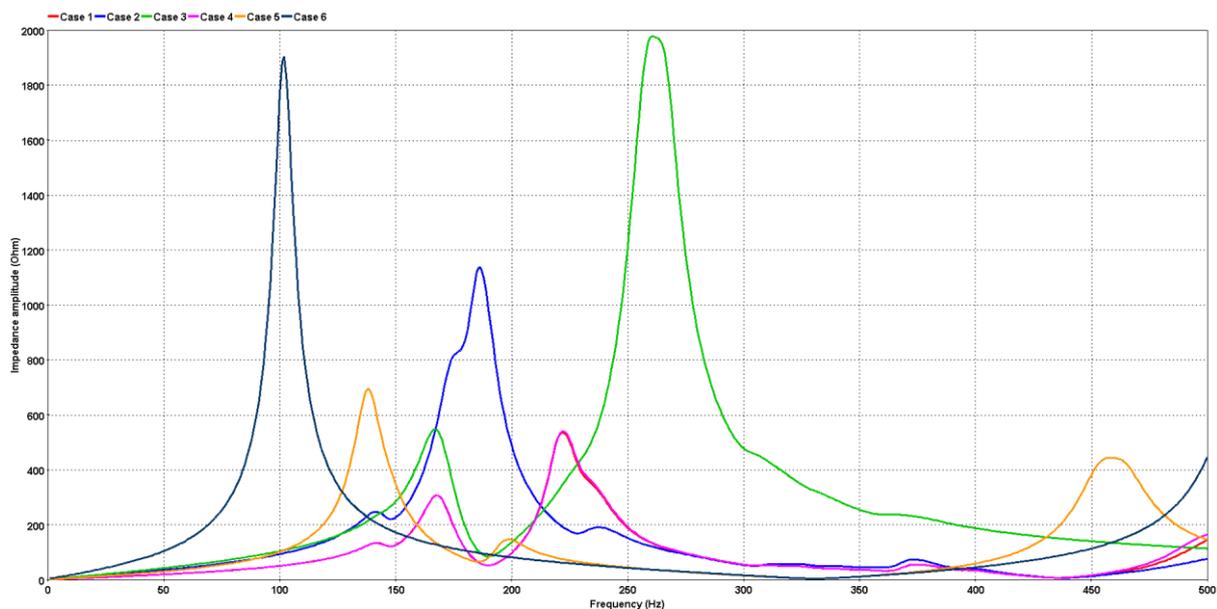


Figure 2-2: Impédance harmonique à 380 kV Romanel pour les 6 cas – faible SCL, scénario 3

L'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3 et 4 dans les 6 cas pour le scénario 3 est présentée dans le Tableau 2-3.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
100 Hz ±10 Hz	42-61	77-112	88-122	42-61	77-139	600-1904
150 Hz ±10 Hz	121-212	219-353	224-430	121-211	190-666	143-215
200 Hz ±10 Hz	52-217	298-988	85-217	52-215	79-146	72-92

Tableau 2-3: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 à 380 kV Romanel pour les 6 cas – faible SCL, scénario 3

Il convient de noter que deux cas sont mis en évidence dans le Tableau 2-3, où l'amplitude de l'impédance autour d'un certain rang harmonique dépasse les valeurs de seuils critiques définies dans le Tableau 2-2. On peut prévoir les phénomènes suivants dans le scénario 3 :

- La saturation ou re-saturation du transformateur à Romanel (par exemple, mise sous tension du côté 380 kV, élimination d'un défaut sur une ligne 380 kV voisine, etc.) sous contingence N-1 de 380 kV La Bâtiaz – Chamoson (cas 5) et conditions SCL bas conduirait potentiellement à des TOV avec une composante harmonique 3 significative en raison de la résonance du réseau proche de l'harmonique 3 avec une amplitude suffisamment élevée.
- On peut s'attendre à des TOV importants lorsque le transformateur à Romanel est saturé ou re-saturé par la mise sous tension du côté 380 kV, l'élimination d'un défaut sur une ligne 380 kV voisine, etc. dans les contingences N-2 de 380 kV La Bâtiaz – Chamoson et Romanel – Bois Tollot (cas 6). Ceci est dû au fait que cette topologie de réseau conduit à une résonance parallèle proche de l'harmonique 2 avec une amplitude d'impédance extrêmement élevée.

À titre de comparaison, l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour les trois scénarios (c.-à-d. les scénarios 1, 2 et 3) pour les cas 5 et 6 est représentée dans la Figure 2-3 et Figure 2-4. De même, les amplitudes d'impédance proches des harmoniques 2, 3, et 4 pour les trois scénarios dans les cas 5 et 6 sont présentées dans le Tableau 2-4 et Tableau 2-5 respectivement.

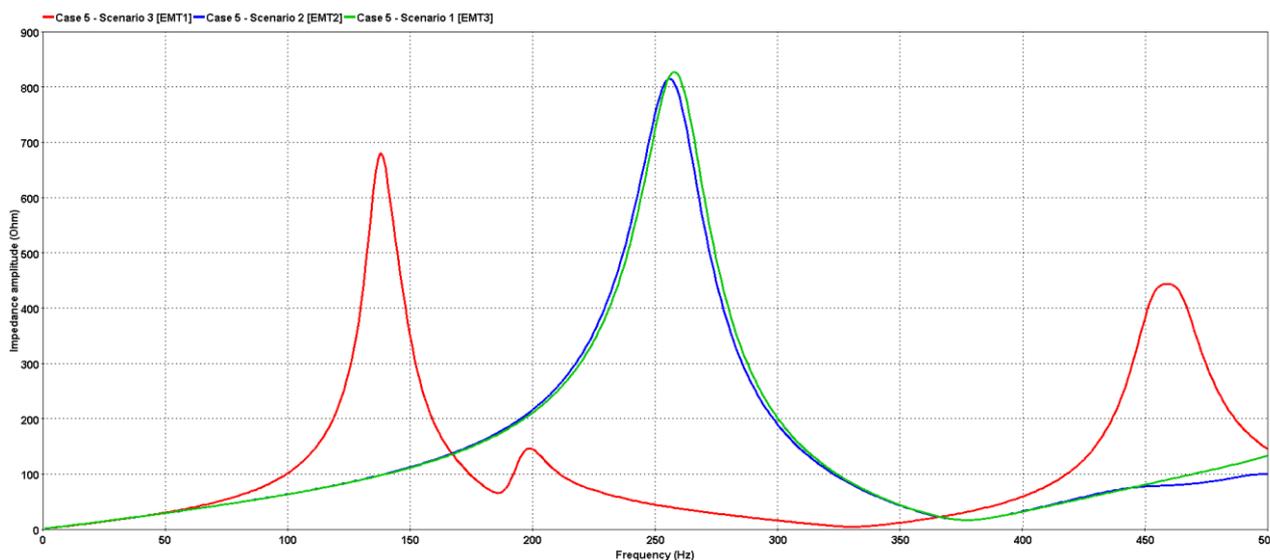


Figure 2-3: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour le cas 5 entre les scénarios 1, 2 et 3

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
100 Hz ±10 Hz	77-139	55-71	55-71
150 Hz ±10 Hz	190-666	100-125	99-124
200 Hz ±10 Hz	79-146	185-257	181-249

Tableau 2-4: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 à 380 kV Romanel pour le cas 5 – Comparaison entre les scénarios 1, 2 et 3

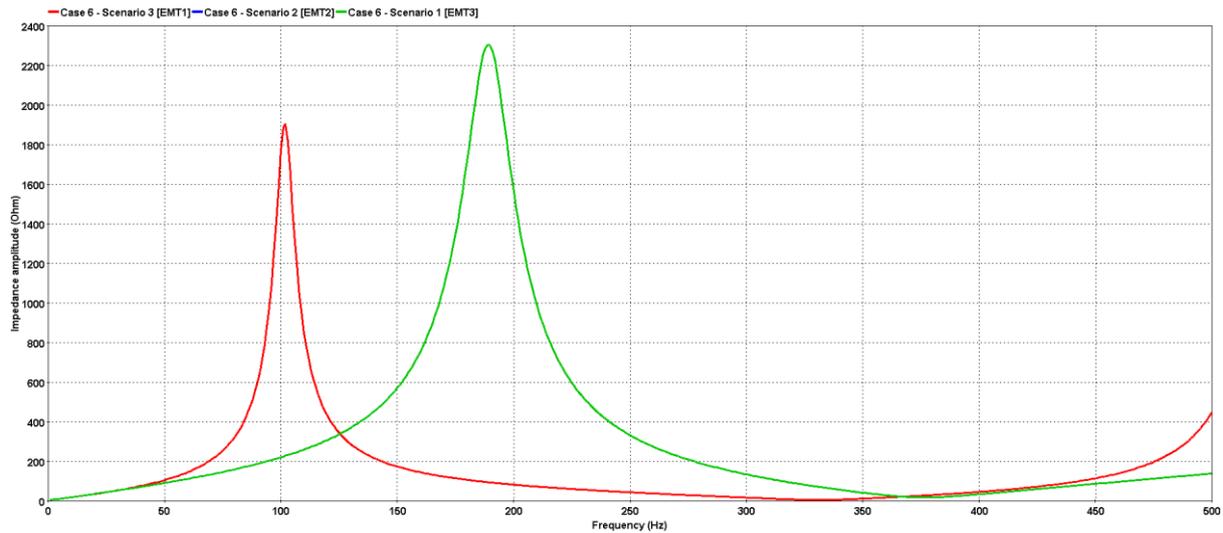


Figure 2-4: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour le cas 6 entre les scénarios 1, 2 et 3

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
100 Hz ±10 Hz	600-1904	186-258	186-258
150 Hz ±10 Hz	143-215	450-753	450-753
200 Hz ±10 Hz	72-92	988-2298	988-2298

Tableau 2-5: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 à 380 kV Romanel pour le cas 6 – Comparaison entre les scénarios 1, 2 et 3

On peut observer sur les deux graphiques que la résonance parallèle se déplace vers des fréquences plus élevées dans les scénarios 1 et 2 avec moins de projets de câbles. En particulier,

- **Cas 5**

La suppression des deux câbles de 8 km de 380 kV Romanel vers 380 kV La Bâtiaz et vers 380 kV Bois Tollot a l'impact le plus significatif sur le déplacement de la résonance du réseau, ce qui est évident en raison de leur proximité avec l'endroit du balayage de fréquences.

Le câble de 4,8 km sur 220 kV Foretaille – Verbois provoque un léger décalage de la fréquence de résonance entre les scénarios 1 et 2. En raison de sa faible longueur et de sa grande distance (couplée au réseau 380 kV à Verbois), son impact sur la résonance harmonique observée à 380 kV Romanel est insignifiant. D'autres câbles inclus dans le scénario 2, comme ceux à Innertkirchen et au Tessin, ont un impact minimal sur la résonance harmonique à 380 kV Romanel parce qu'ils sont électriquement plus éloignés.

La fréquence de résonance légèrement supérieure à l'harmonique 5 dans les scénarios 1 et 2 est due aux câbles 380 kV de Nant de Drance.

- **Cas 6**

La contingence N-2 considérée dans le cas 6 exclut le câble de 8 km de 380 kV Romanel vers 380 kV Bois Tollot. Par conséquent, le décalage de fréquence observé dans les scénarios 1 et 2 par rapport au scénario 3 est dû à la suppression des câbles de 8 km de 380 kV Romanel vers 380 kV La Bâtiaz.

Aucune différence n'est observable dans la résonance harmonique entre les scénarios 1 et 2. Cela s'explique par le fait qu'un îlot de 380 kV est créé de 380 kV Romanel à 380 kV Nant de Drance par la contingence N-2 envisagée et que tous les systèmes de câbles du scénario 2 sont couplés à l'îlot de 380 kV en des points électriquement éloignés.

En outre, l'exclusion de la ligne 380 kV Romanel – Bois Tollot dans la contingence N-2 diminue encore le SCL à 380 kV Romanel, ce qui conduit à une résonance parallèle inférieure à l'harmonique 4 dans les scénarios 1 et 2. Une fois de plus, cette résonance parallèle est le résultat des câbles 380 kV de Nant de Drance.

2.2.2.1.2 380 kV Magadino

Un segment de câble de 13 km est proposé dans le scénario 3 entre 380 kV Magadino et 380 kV Musignano en Italie. Comme le réseau autour de 380 kV Magadino n'est pas maillé, seuls deux cas ont été pris en compte dans les études de balayage de fréquences pour 380 kV Magadino. Ils sont présentés ci-dessous :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Magadino

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Magadino pour les deux cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 2-5.

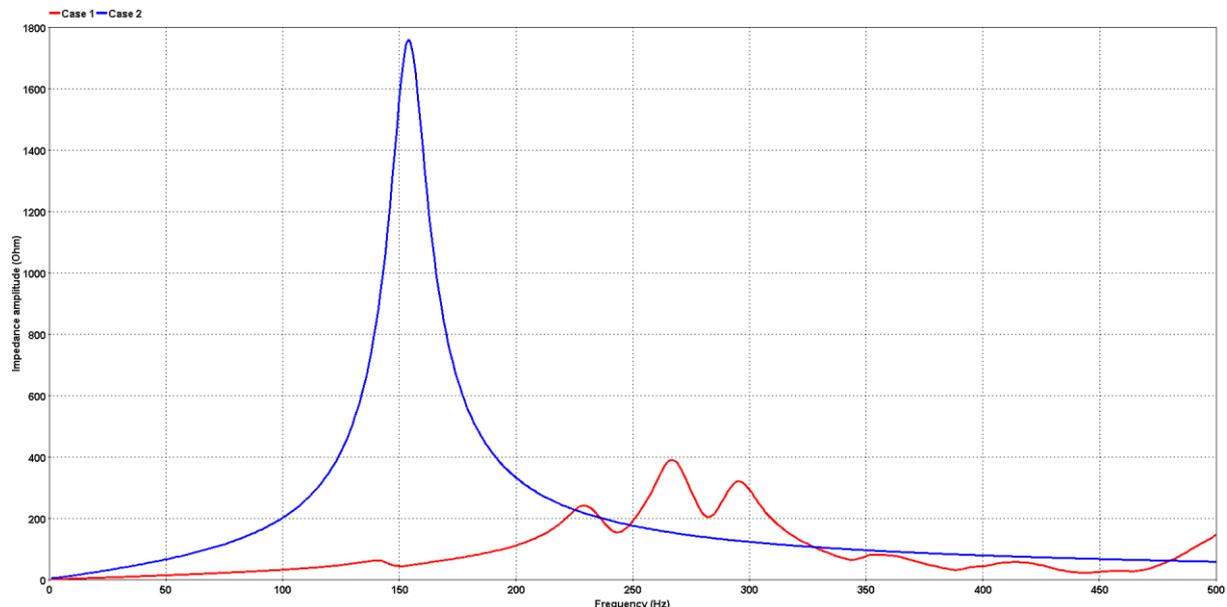


Figure 2-5: Impédance harmonique à 380 kV Magadino pour les deux cas – faible SCL, scénario 3

L'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 dans les deux cas pour le scénario 3 est présentée dans le tableau suivant, Tableau 2-6.

	Cas 1	Cas 2
100 Hz ±10 Hz	28-37	159-260
150 Hz ±10 Hz	44-62	829-1760
200 Hz ±10 Hz	90-140	280-411

Tableau 2-6: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 à 380 kV Magadino pour les deux cas – faible SCL, scénario 3

Il convient de noter que le cas avec N-1 sur 380 kV Magadino – Lavorgo est mis en évidence dans le Tableau 2-6. L'amplitude de l'impédance autour de l'harmonique 3 dépasse considérablement la valeur de seuil critique définie dans le Tableau 2-2. On peut donc prévoir le phénomène suivant dans le scénario 3 :

- La saturation ou la re-saturation du transformateur à Magadino (par exemple, mise sous tension du côté 380 kV, élimination du défaut sur une ligne 380 kV voisine, etc.) dans la contingence N-1 du 380 kV Magadino – Lavorgo (cas 2) et des conditions SCL bas conduiraient potentiellement à des TOV critiques avec une composante harmonique 3 significative en raison de la résonance du réseau proche de l'harmonique 3 avec une amplitude extrêmement élevée.

À titre de comparaison, l'impédance harmonique à 380 kV Magadino pour les trois scénarios (c.-à-d. les scénarios 1, 2 et 3) pour le cas 2 est représentée à la Figure 2-6. De même, les amplitudes d'impédance proches des harmoniques 2, 3, et 4 pour les trois scénarios du cas 2 sont présentées dans le Tableau 2-7.

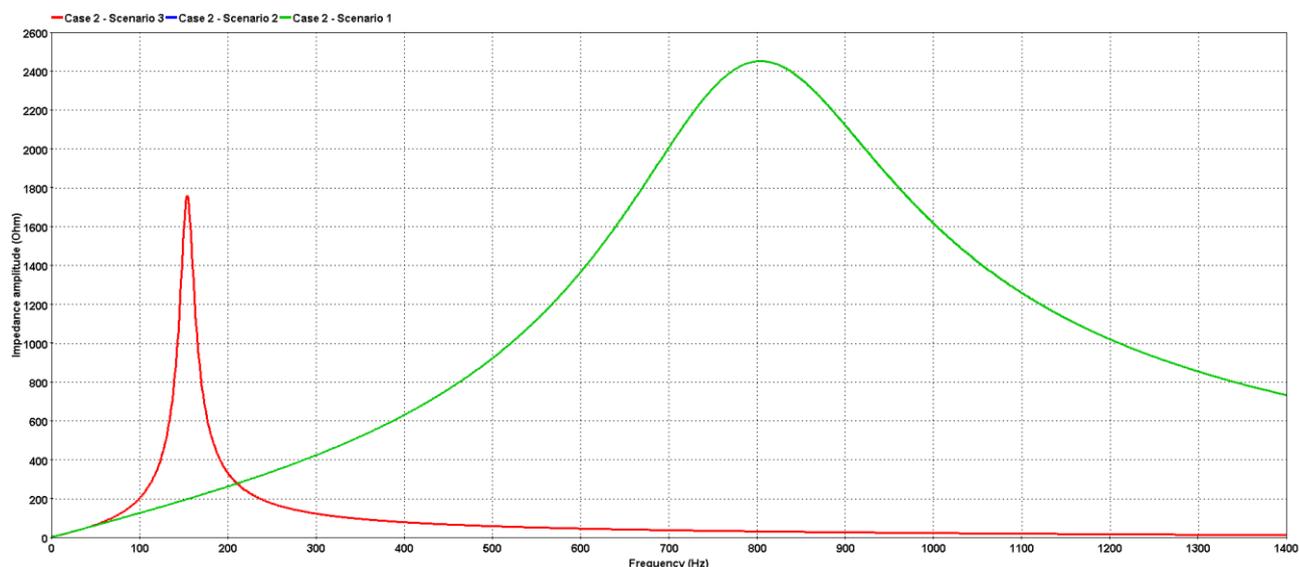


Figure 2-6: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Magadino pour le cas 2 entre les scénarios 1, 2 et 3

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
100 Hz ±10 Hz	159-260	112-138	112-138
150 Hz ±10 Hz	829-1760	178-205	178-205
200 Hz ±10 Hz	280-411	247-276	247-276

Tableau 2-7: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 à 380 kV Magadino pour le cas 2 – Comparaison entre les scénarios 1, 2 et 3

On peut observer sur le graphique que la résonance parallèle disparaît dans les scénarios 1 et 2, après la suppression du câble de 13 km reliant 380 kV Magadino à 380 kV Musignano.

En particulier, l'impédance harmonique dans les scénarios 1 et 2 présente les caractéristiques typiques des lignes aériennes dans la gamme de fréquences définie, avec une résonance parallèle due à l'impédance de la source et de la ligne elle-même et à la capacité de shunt de la ligne. Ceci est dû au fait que la contingence N-1 isole Magadino 380 kV du réseau Swissgrid, et que le réseau italien n'est représenté que par un équivalent Thévenin.

La différence d'impédance harmonique observée à 380 kV Magadino est à prévoir en réalité dans la contingence N-1 envisagée, car le réseau italien réel devrait entraîner une certaine dynamique. Pour plus de confirmation, il serait nécessaire d'obtenir des informations détaillées sur le réseau de Terna afin de modéliser un peu plus de lignes et de sous-stations au sud. Cependant, on peut supposer que les TOV critiques dus à la résonance parallèle autour de l'harmonique 3 peuvent être éliminés avec la suppression du câble 380 kV de 13 km Magadino – Musignano.

2.2.2.2 Fréquences de résonance dans un quatrième scénario

Afin de mieux comprendre l'impact des câbles sur les fréquences de résonance, un quatrième scénario a été créé avec un contenu de câbles supérieur à celle du scénario 3. Ce quatrième scénario n'a été utilisé que pour les calculs de résonance, ses besoins de compensation et l'amplification des harmoniques n'ont pas été étudiés. Les nouveaux câbles du scénario 4 sont représentés en bleu clair dans la Figure 2-7.

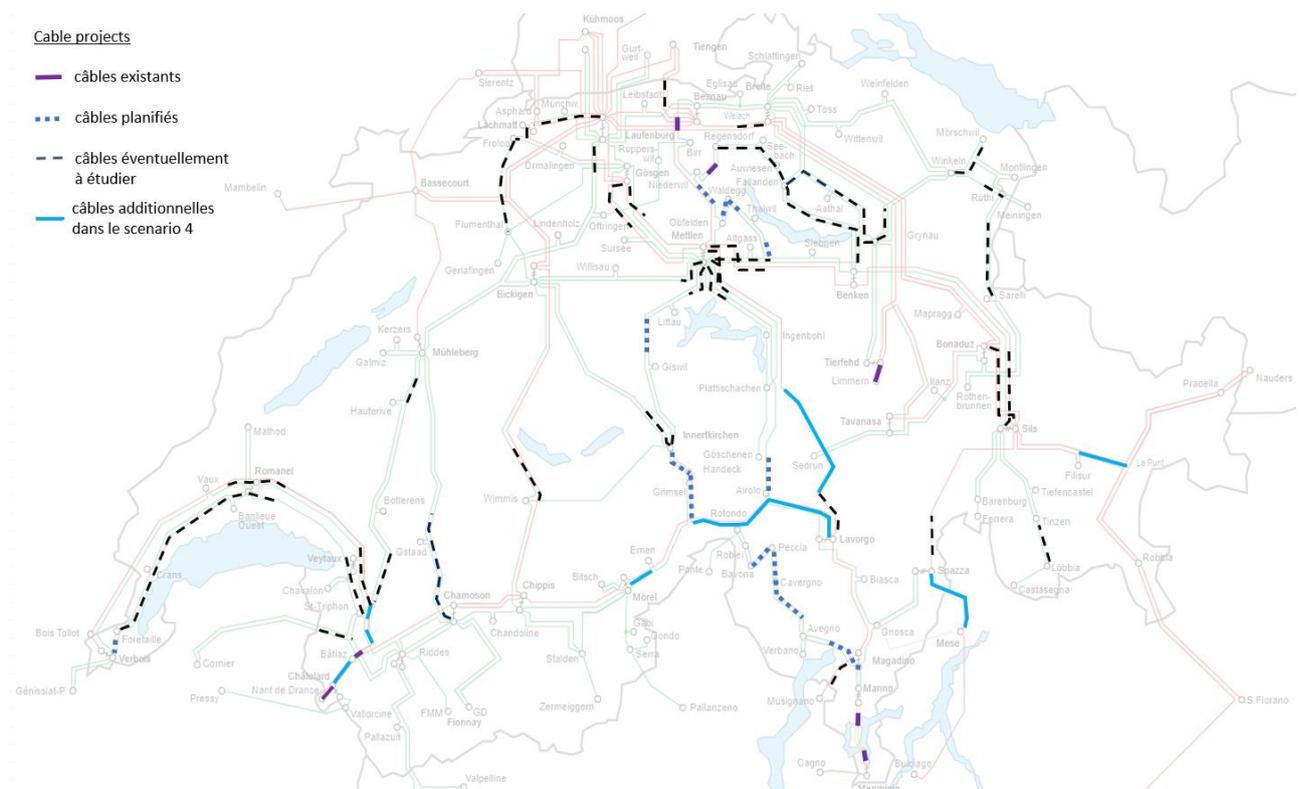


Figure 2-7: Projets de liaisons câblées dans le scénario 4

Les fréquences de résonance en différents points du réseau ont été étudiées dans ce scénario et seuls les résultats critiques sont présentés ci-dessous.

2.2.2.2.1 380 kV Châtelard

Une comparaison de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Châtelard entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 pour N-1 sur 380 kV Bâtiâz – Chamoson est présentée dans la Figure 2-8.

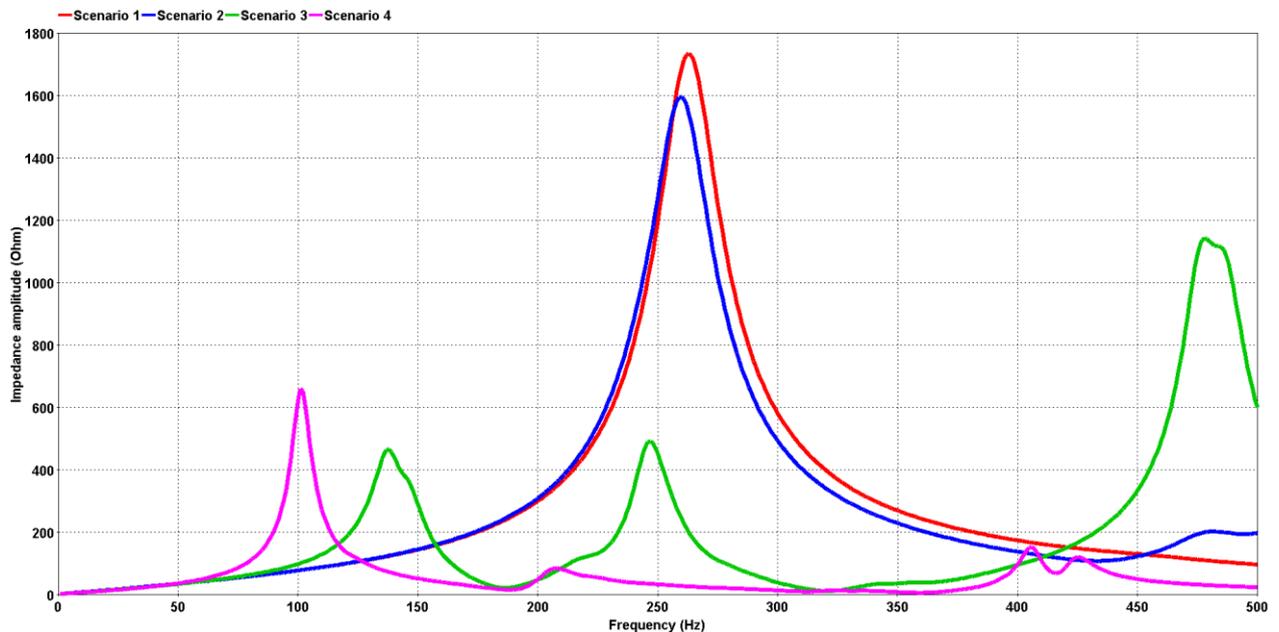


Figure 2-8: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Châtelard entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

La comparaison de l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 est présentée dans le Tableau 2-8.

Rang harmonique	2ème	3ème	4ème	5ème
Scénario 1 (Ohm)	67 - 87	126 - 163	252 - 362	805 - 1688
Scénario 2 (Ohm)	67 - 87	127 - 165	258 - 376	879 - 1595
Scénario 3 (Ohm)	77 - 128	131 - 442	23 - 84	242 - 490
Scénario 4 (Ohm)	203 - 659	39 - 67	15 - 84	27 - 37

Tableau 2-8 : Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 à 380 kV Châtelard - Comparaison entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

Remarques : Alors que cette contingence conduit à une résonance parallèle légèrement inférieure à l'harmonique 3 avec une amplitude d'impédance relativement faible dans le scénario 3, dans le scénario 4, la résonance parallèle se déplace à près de 100 Hz (l'harmonique 2) avec une amplitude d'impédance alarmante. On peut s'attendre à de graves risques de TOV.

2.2.2.2.2 380 kV Nant de Drance

Une comparaison de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Nant de Drance entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 pour N-1 sur 380 kV Bâtiâz – Chamoson est présenté dans la Figure 2-9.

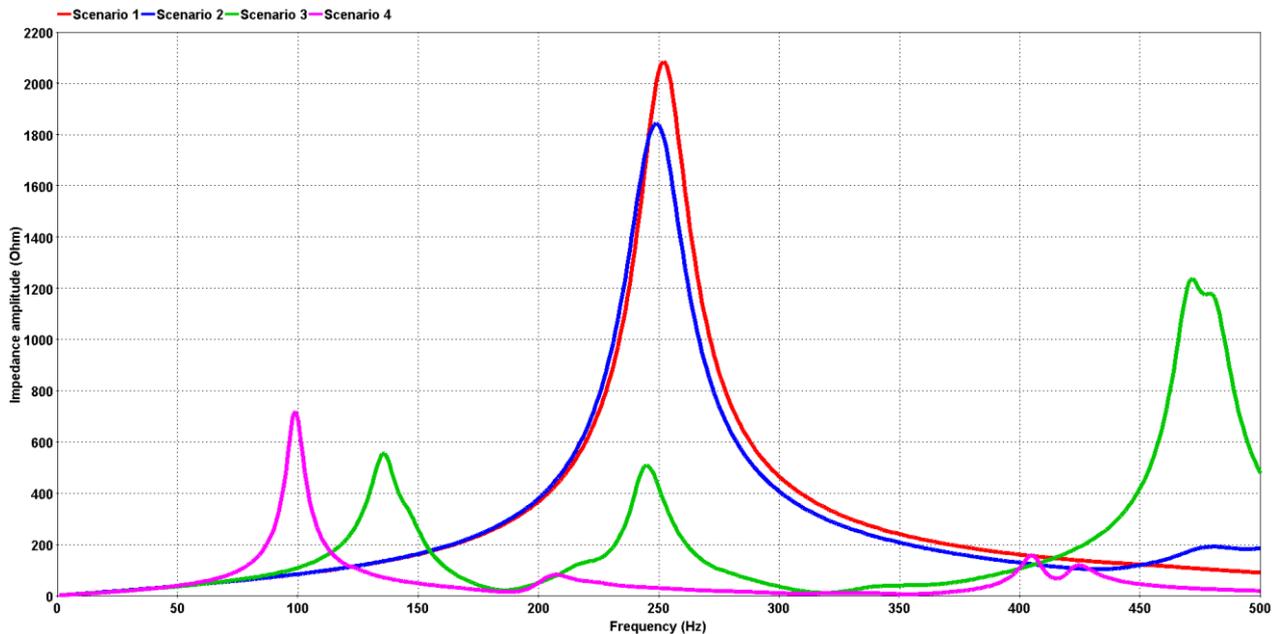


Figure 2-9: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Nant de Drance entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

La comparaison de l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 est présentée dans le Tableau 2-9.

Rang harmonique	2ème	3ème	4ème	5ème
Scénario 1 (Ohm)	73 - 96	141 - 186	301 - 461	1346 - 2084
Scénario 2 (Ohm)	73 - 96	142 - 188	309 - 484	1338 - 1844
Scénario 3 (Ohm)	86 - 147	122 - 454	25 - 91	220 - 510
Scénario 4 (Ohm)	224 - 720	37 - 63	15 - 82	24 - 35

Tableau 2-9: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 à 380 kV Nant de Drance – Comparaison entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

Remarque : Comme dans le cas précédent, la résonance parallèle se déplace à l'harmonique 2 et les amplitudes d'impédance augmentent jusqu'à une valeur significative, ce qui pose de grands risques de TOV pendant les événements transitoires à 380 kV Nant de Drance.

2.2.2.2.3 380 kV Mörel

Une comparaison de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Mörel entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 pour N-2 sur 380 kV Chippis – Mörel et Lavorgo – Magadino est présentée dans la Figure 2-10.

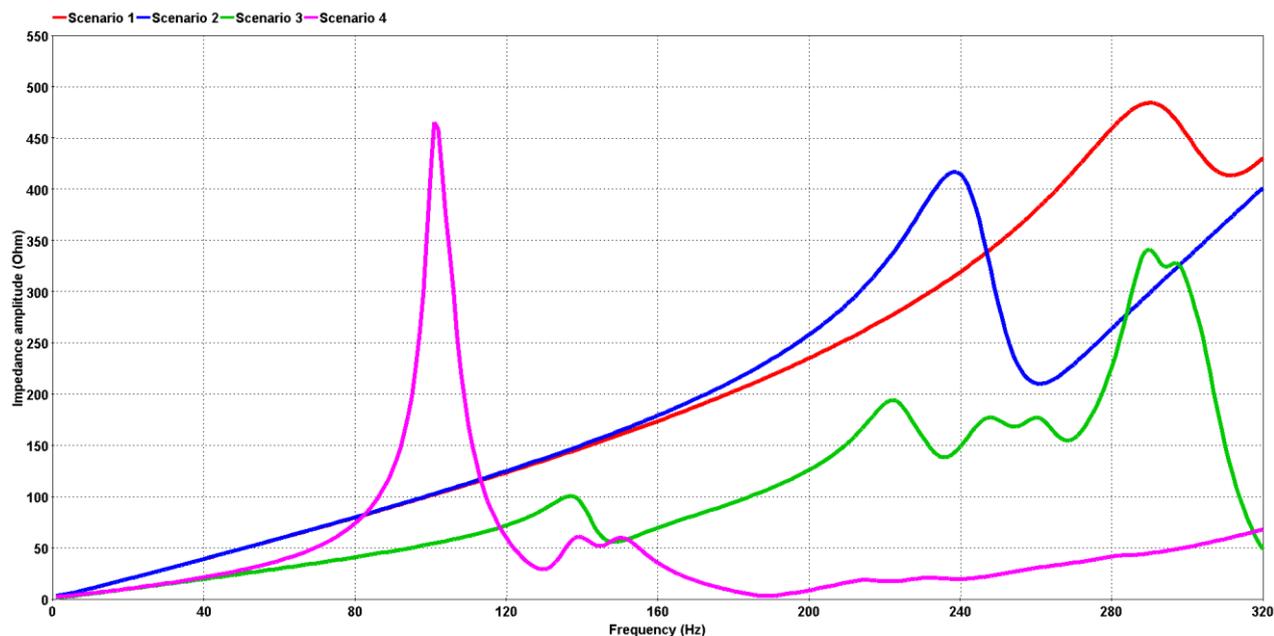


Figure 2-10: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Mörel entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

La comparaison de l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 est présentée dans le Tableau 2-10.

Rang harmonique	2ème	3ème	4ème	5ème
Scénario 1 (Ohm)	73 - 96	141 - 186	301 - 461	1346 - 2084
Scénario 2 (Ohm)	73 - 96	142 - 188	309 - 484	1338 - 1844
Scénario 3 (Ohm)	86 - 147	122 - 454	25 - 91	220 - 510
Scénario 4 (Ohm)	224 - 720	37 - 63	15 - 82	24 - 35

Tableau 2-10: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 à 380 kV Mörel – Comparaison entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

Remarque : Une résonance parallèle apparaît à l'harmonique 2 avec une amplitude d'impédance élevée dans le scénario 4 en raison des projets de câbles supplémentaires, ce qui n'est pas le cas dans les scénarios 1, 2 ou 3.

2.2.2.2.4 380 kV Lavorgo

Une comparaison de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Lavorgo entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 pour N-2 sur 380 kV Chippis – Mörel et Lavorgo – Magadino est présentée dans la Figure 2-11.

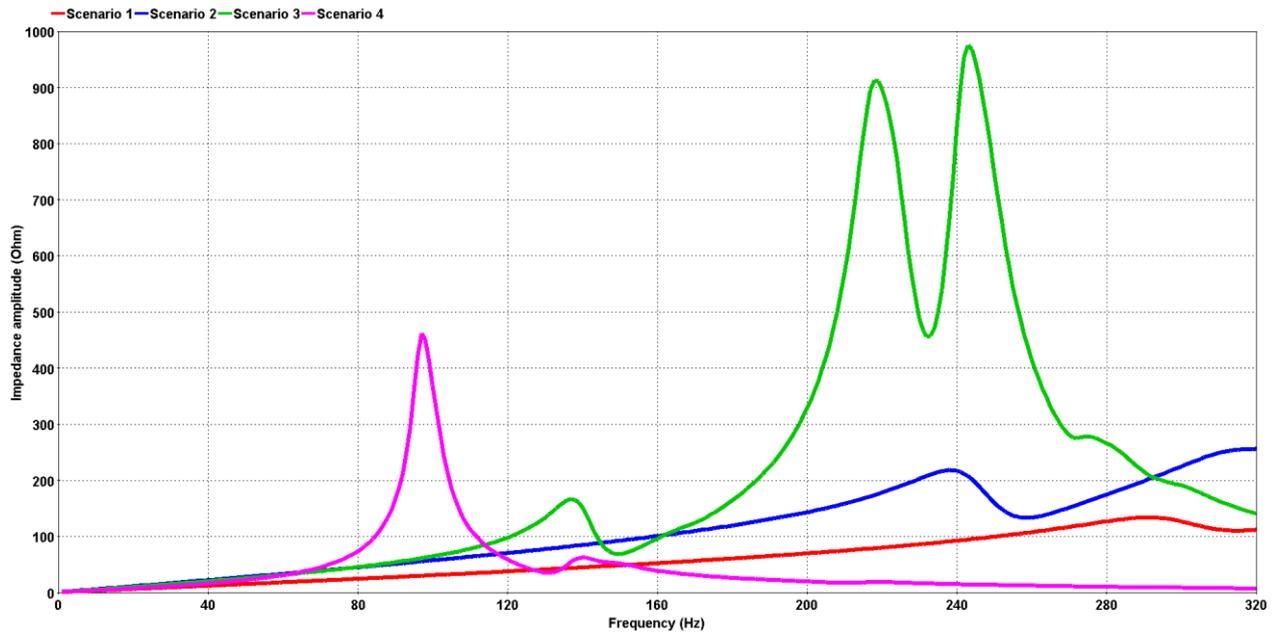


Figure 2-11: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Lavorgo entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

La comparaison de l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 est présentée dans le Tableau 2-11.

Rang harmonique	2ème	3ème	4ème	5ème
Scénario 1 (Ohm)	27 - 34	45 - 52	65 - 75	92 - 107
Scénario 2 (Ohm)	51 - 63	85 - 101	130 - 158	133 - 217
Scénario 3 (Ohm)	54 - 78	69 - 151	224 - 568	416 - 974
Scénario 4 (Ohm)	113 - 462	39 - 62	17 - 23	12 - 15

Tableau 2-11: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 à 380 kV Lavorgo – Comparaison entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

Remarque : Comme dans le cas précédent, une nouvelle résonance parallèle apparaît à l'harmonique 2 dans le scénario 4 avec une amplitude significative, posant des risques de TOV pour les événements transitoires à 380 kV Lavorgo.

2.2.2.2.5 380 kV Tierfehd

Une comparaison de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Tierfehd entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 pour N-1 sur 380 kV Tierfehd - Tavanasa est présentée dans la Figure 2-12.

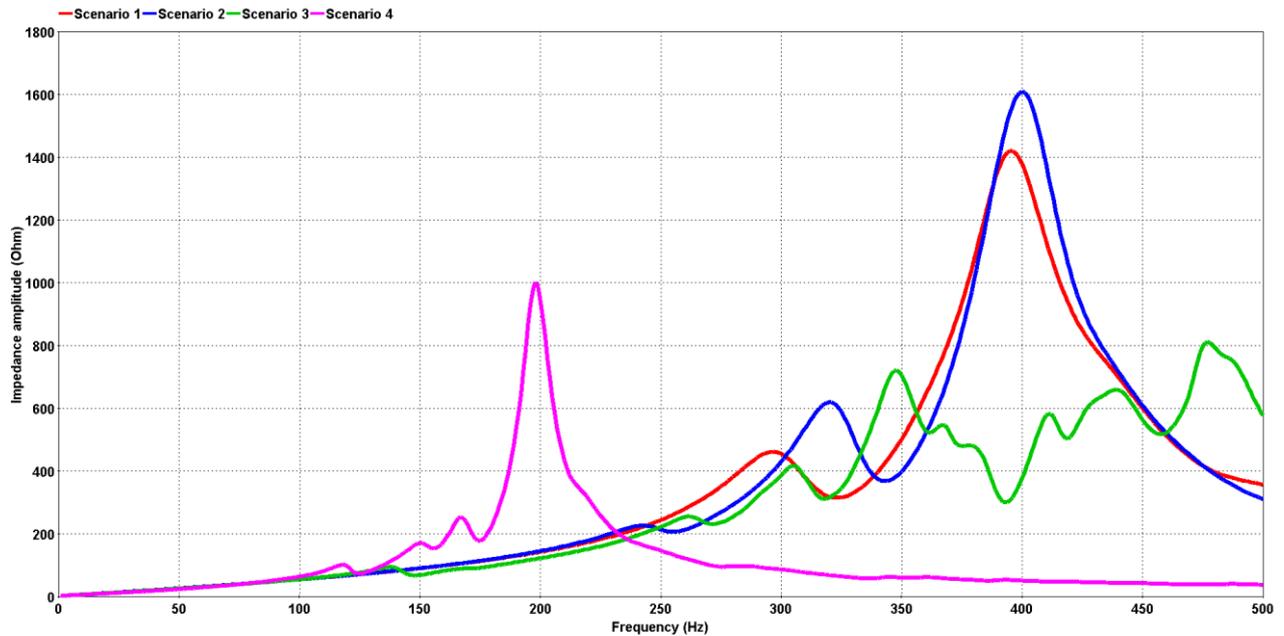


Figure 2-12: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Tierfehd entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

La comparaison de l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 est présentée dans le Tableau 2-12.

Rang harmonique	2ème	3ème	4ème	5ème
Scénario 1 (Ohm)	46 - 60	81 - 98	129 - 156	215 - 278
Scénario 2 (Ohm)	47 - 60	81 - 98	130 - 160	205 - 225
Scénario 3 (Ohm)	46 - 61	66 - 91	108 - 135	193 - 253
Scénario 4 (Ohm)	50 - 80	121 - 175	434 - 1001	120 - 169

Tableau 2-12: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 à 380 kV Tierfehd – Comparaison entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

Remarques : Une résonance parallèle avec une amplitude d'impédance élevée apparaît à l'harmonique 4 dans le scénario 4, ce qui n'est pas le cas dans les scénarios 1, 2 ou 3. Bien que cette résonance ne soit pas suffisamment élevée pour entraîner un TOV critique, une détérioration de la réponse en fréquence du réseau a été confirmée avec les câbles supplémentaires du scénario 4 et on peut s'attendre à une augmentation des contraintes diélectriques sur l'équipement du réseau dans la région pendant les événements transitoires à 380 kV Tierfehd.

2.2.2.2.6 380 kV Filisur

Une comparaison de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Tierfehd entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 pour N-1 sur 380 kV Filisur – Sils est présentée dans la Figure 2-13.

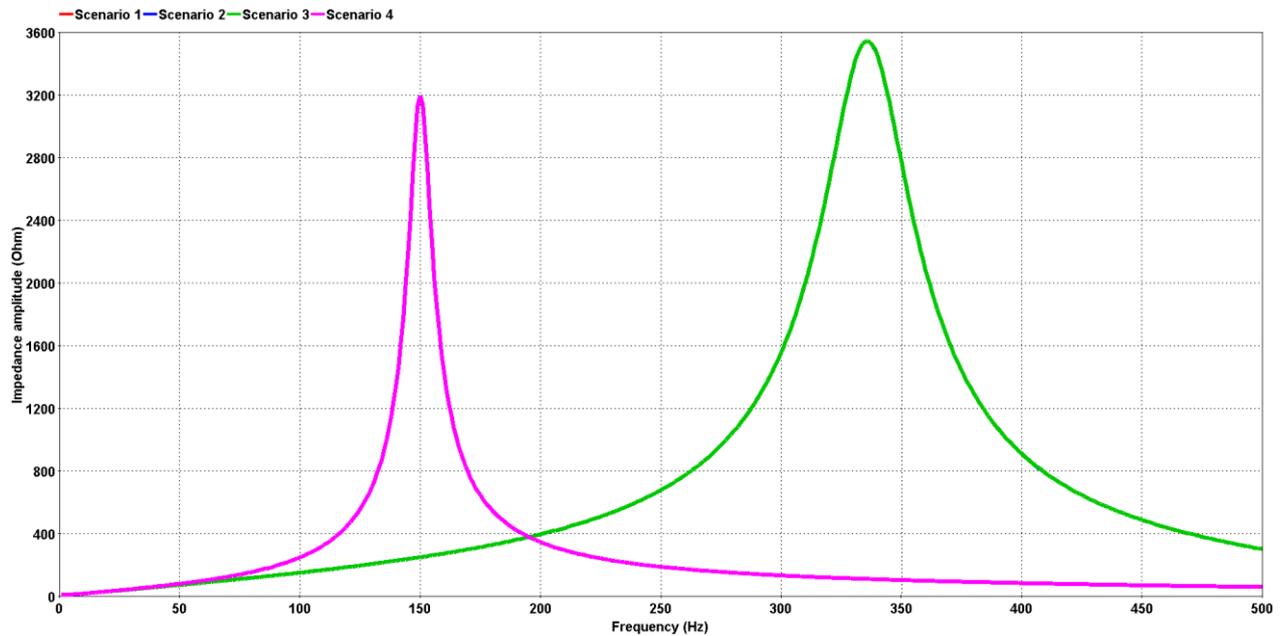


Figure 2-13: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Filisur entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

La comparaison de l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 est présentée dans le Tableau 2-13.

Rang harmonique	2ème	3ème	4ème	5ème
Scénario 1 (Ohm)	131 - 166	225 - 271	358 - 435	599 - 770
Scénario 2 (Ohm)	131 - 166	225 - 271	358 - 435	599 - 770
Scénario 3 (Ohm)	131 - 166	225 - 271	358 - 435	599 - 770
Scénario 4 (Ohm)	193 - 325	1345 - 3196	292 - 421	171 - 204

Tableau 2-13: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 à 380 kV Filisur – Comparaison entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

Remarques : La résonance précédemment non critique entre les harmoniques 5 et 6 se déplace maintenant vers l'harmonique 3 dans le scénario 4. L'amplitude extrêmement élevée de l'impédance indique de graves risques de TOV pendant les événements transitoires.

2.2.2.2.7 380 kV Soazza

Une comparaison de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Tierfehnd entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 pour N-1 sur 380 kV Sils – Soazza est présentée dans la Figure 2-14.

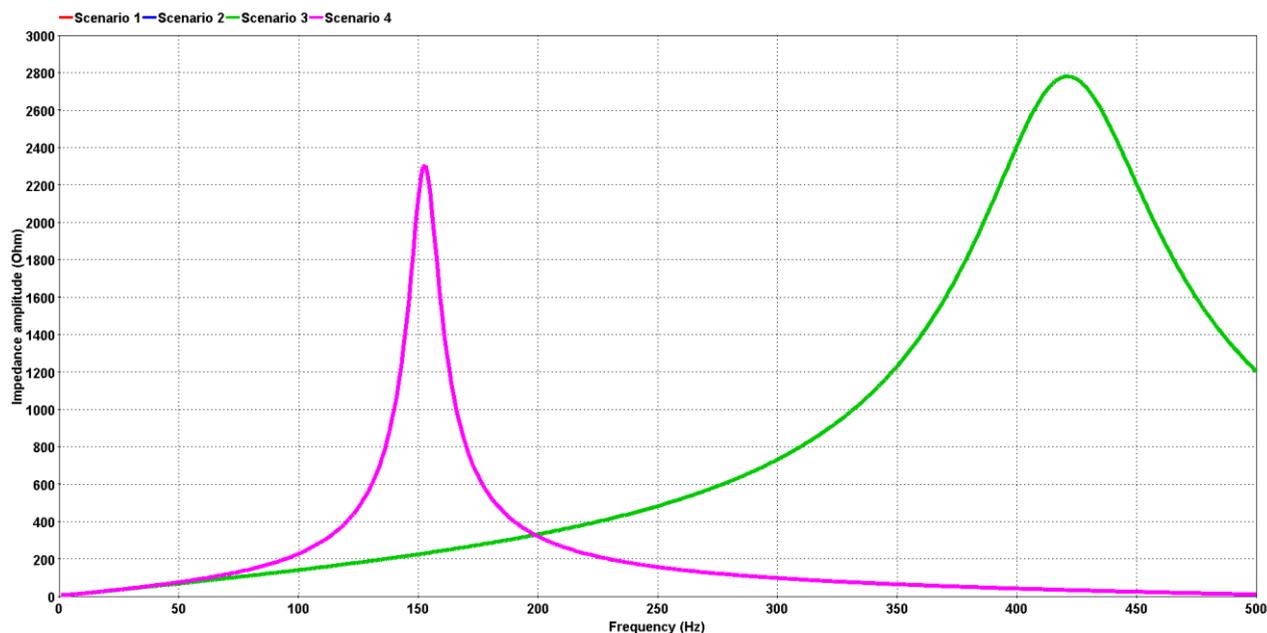


Figure 2-14: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Soazza entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

La comparaison de l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 entre les scénarios 1, 2, 3 et 4 est présentée dans le Tableau 2-14.

Rang harmonique	2ème	3ème	4ème	5ème
Scénario 1 (Ohm)	124 - 155	205 - 243	304 - 356	447 - 522
Scénario 2 (Ohm)	124 - 155	205 - 243	304 - 356	447 - 522
Scénario 3 (Ohm)	124 - 155	205 - 243	304 - 356	447 - 522
Scénario 4 (Ohm)	180 - 293	1000 - 2304	266 - 412	141 - 175

Tableau 2-14: Amplitude d'impédance proche des harmoniques 2, 3, 4 et 5 à 380 kV Soazza – Comparaison entre les scénarios 1, 2, 3 et 4

Remarques : Comme dans le cas précédent, la résonance précédemment non critique située au-delà de l'harmonique 8 se déplace maintenant vers l'harmonique 3 dans le scénario 4. L'amplitude extrêmement élevée de l'impédance indique de graves risques de TOV pendant les événements transitoires.

2.2.2.3 Déplacement de la fréquence de résonance du système avec davantage de projets de câbles

L'augmentation du nombre de projets de câbles déplace les fréquences de résonance du système vers des harmoniques plus basses à différents endroits du réseau, ce qui, à son tour, augmente les risques de TOV et de résonances à des harmoniques d'ordre inférieur pendant les transitoires du réseau.

Ceci peut être démontré en comparant l'impédance harmonique à différents endroits du réseau dans différentes conditions de réseau entre les trois scénarios proposés. Les comparaisons ont été effectuées sur quatre endroits de réseau non adjacents : 220 kV Verbois, 380 kV Romanel, 380 kV Mettlen et 220 kV

Fällanden, et l'accent est mis sur le premier pic résonant parallèle. Pour chaque endroit du réseau testé, deux conditions de réseau différentes (c.-à-d. une condition N et une contingence N-1) ont été prises en compte.

2.2.2.3.1 220 kV Verbois

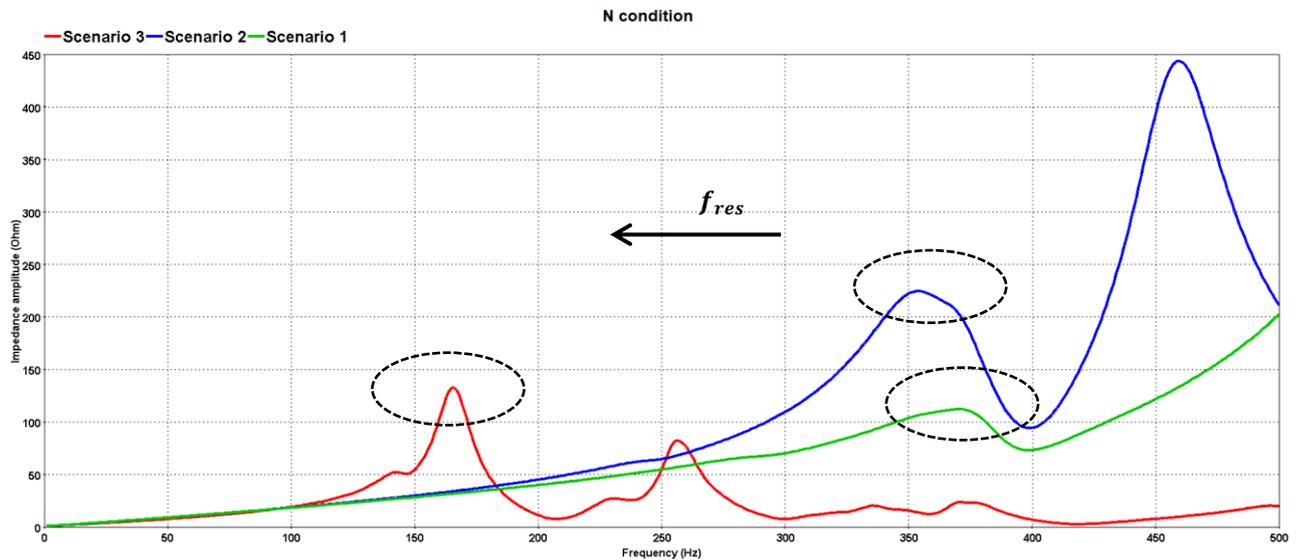


Figure 2-15: Comparaison de l'impédance harmonique à 220 kV Verbois entre les scénarios 1, 2 et 3 – condition N

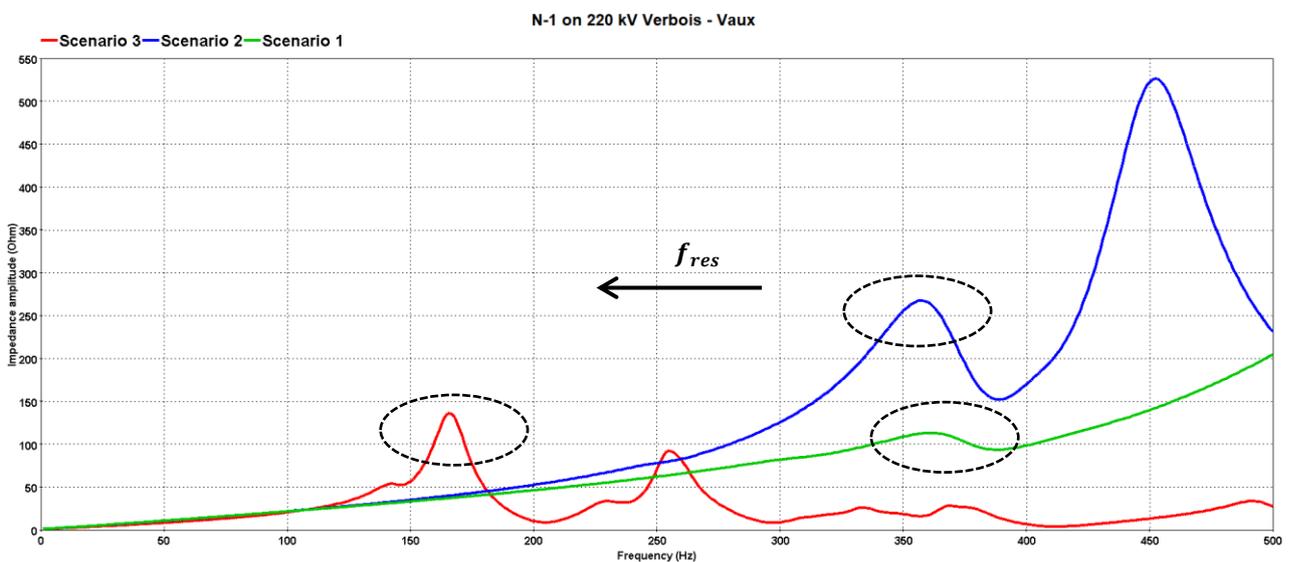


Figure 2-16: Comparaison de l'impédance harmonique à 220 kV Verbois entre les scénarios 1, 2 et 3 – contingence N-1

2.2.2.3.2 380 kV Romanel

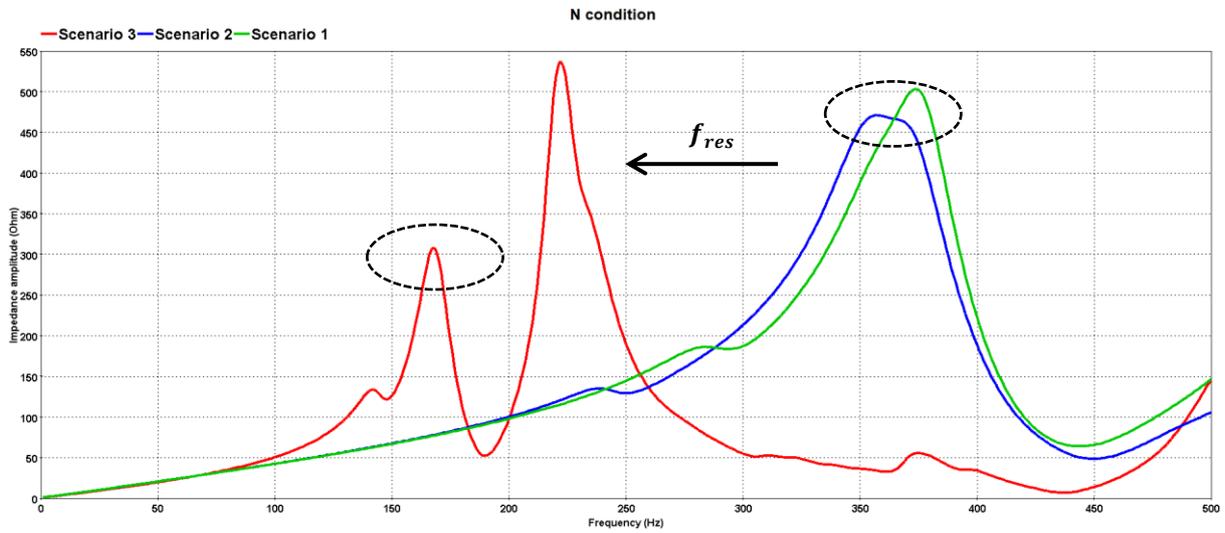


Figure 2-17: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Romanel entre les scénarios 1, 2 et 3 – condition N

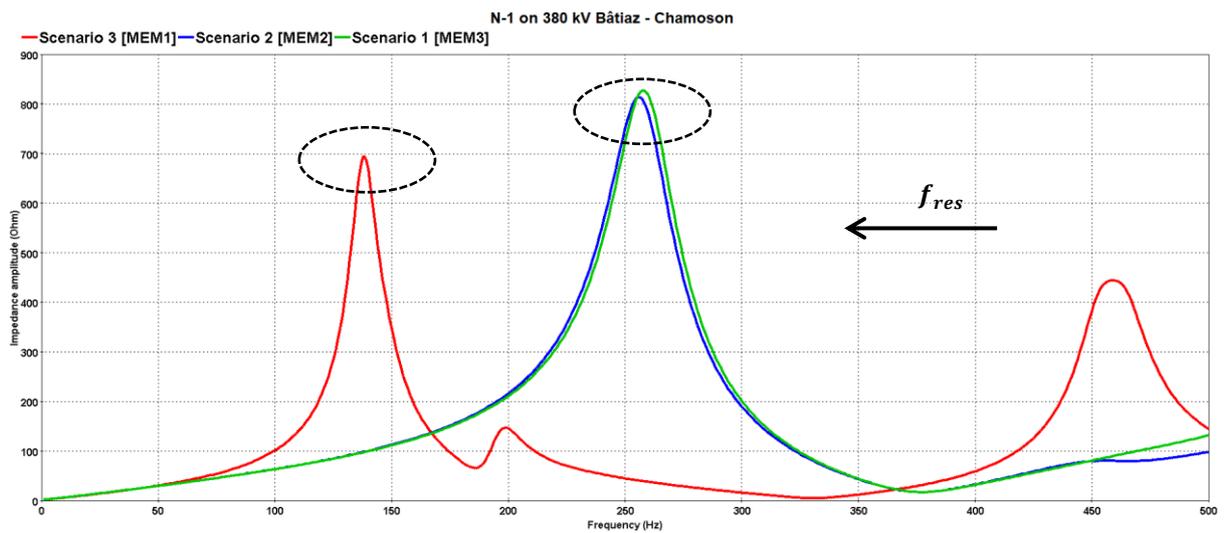


Figure 2-18: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Romanel entre les scénarios 1, 2 et 3 – condition N-1

2.2.2.3.3 380 kV Mettlen

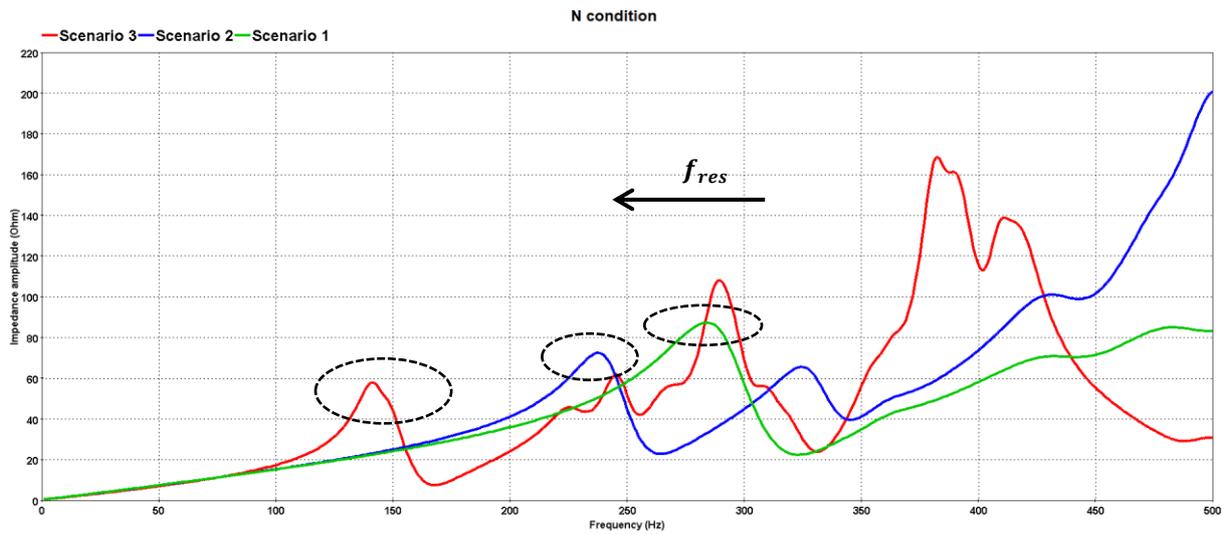


Figure 2-19: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Mettlen entre les scénarios 1, 2 et 3 – condition N

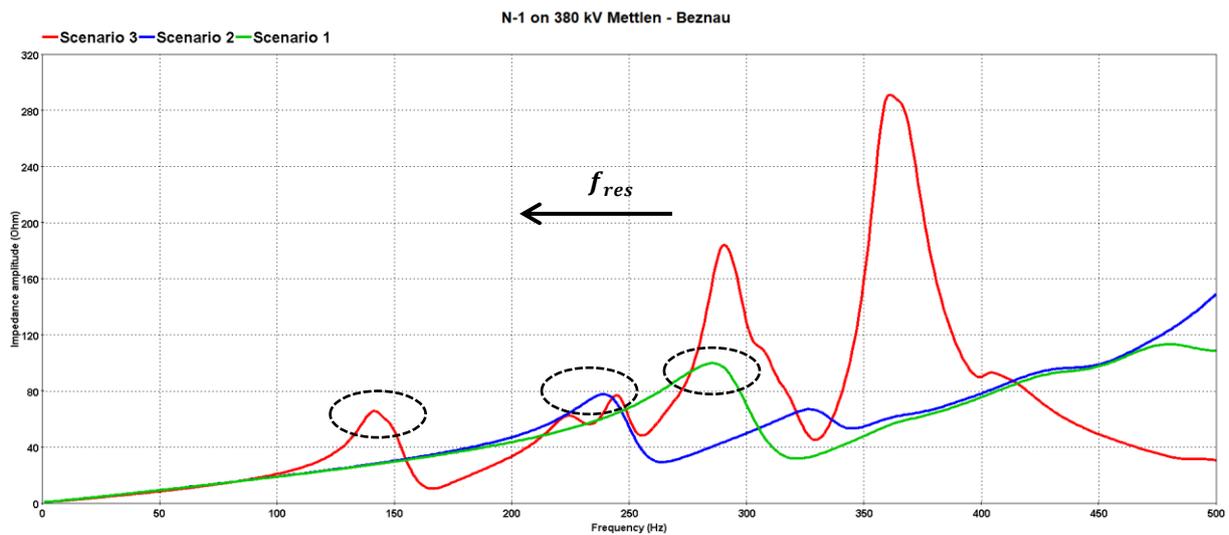


Figure 2-20: Comparaison de l'impédance harmonique à 380 kV Mettlen entre les scénarios 1, 2 et 3 – condition N-1

2.2.2.3.4 220 kV Fällanden

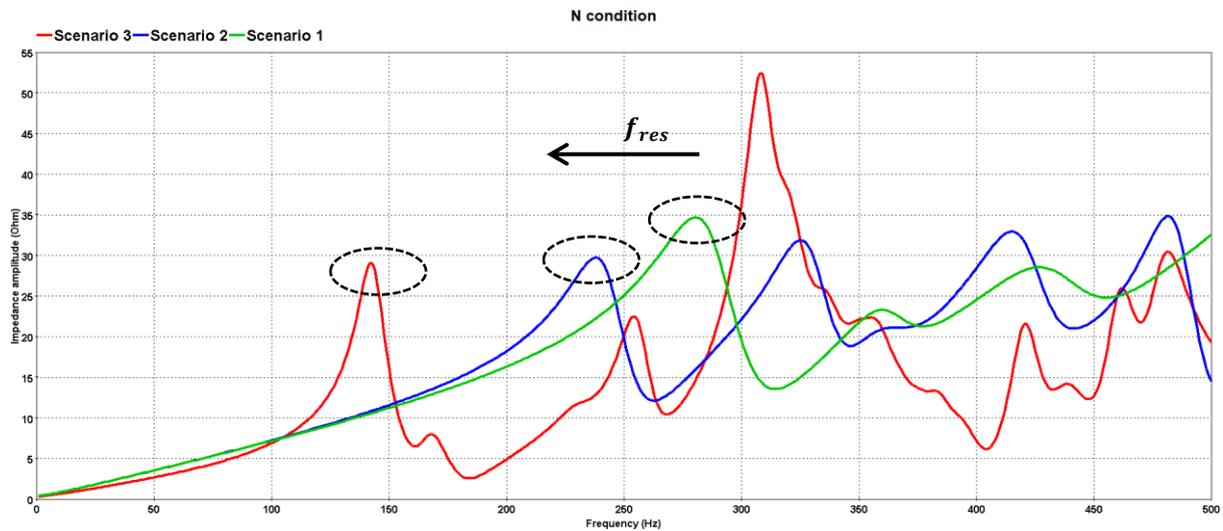


Figure 2-21: Comparaison de l'impédance harmonique à 220 kV Fällanden entre les scénarios 1, 2 et 3 – condition N

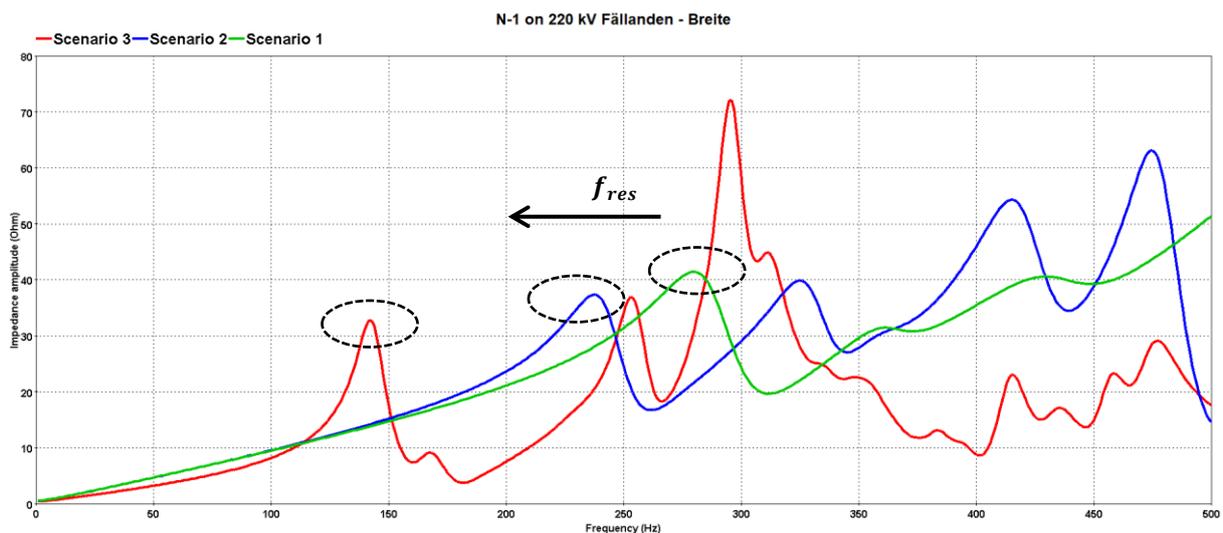


Figure 2-22: Comparaison de l'impédance harmonique à 220 kV Fällanden entre les scénarios 1, 2 et 3 – condition N-1

2.2.2.3.5 Remarques

Les résultats présentés dans les sections précédentes permettent de faire deux observations principales :

- Un premier pic de résonance parallèle notable peut être observé sur les 4 endroits du réseau testé et pour les 3 scénarios, à l'exception du scénario 1 à 220 kV Verbois où le premier pic est plutôt plat. Ceci est dû au fait que les projets de câbles 220 kV existants dans le scénario 1 sont tous extrêmement éloignés de 220 kV Verbois (c.-à-d. les câbles Spreitenbach, les câbles Riniken et les câbles Bâtiaz – Le Verney), ayant ainsi un impact limité sur l'impédance harmonique à 220 kV Verbois.
- Au fur et à mesure que le nombre de projets de câbles augmente du scénario 1 au scénario 3, la première résonance parallèle à tous les endroits du réseau testés se déplace vers des fréquences beaucoup plus basses, exposant ainsi l'endroit du réseau d'intérêt à des risques accrus de TOV et de résonances pendant les transitoires du réseau.

2.2.2.4 Comparaison de l'amortissement du système entre les réseaux 220 kV et 380 kV

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, les deux aspects de la résonance du réseau, la fréquence et l'amplitude de l'impédance, sont des facteurs déterminants pour la performance et le comportement du système pendant les événements transitoires. La fréquence de résonance étant déterminée par les éléments capacitifs et inductifs à la résonance, l'amplitude de l'impédance est davantage liée à l'amortissement du système, qui est lui-même lié à la configuration du réseau et aux conditions de charge.

Un faible amortissement du système tend à se traduire par une amplitude d'impédance plus élevée à la résonance, posant ainsi plus de risques de TOV pendant les événements transitoires. Cependant, un amortissement élevé du système atténue souvent l'impact des résonances du réseau et des TOV, améliorant ainsi les performances du réseau pendant les événements transitoires. Étant donné que le réseau 220 kV est beaucoup plus maillé que le réseau 380 kV à différents endroits du réseau, on estime que l'amortissement du système dans le réseau 220 kV est généralement beaucoup plus élevé que dans le réseau 380 kV sous des conditions de charge et de réseau similaires. Par conséquent, il serait généralement plus « sûr » de mettre en œuvre des projets de câbles sur le réseau 220 kV que sur le réseau 380 kV, étant donné que l'impact des TOV et des résonances peut être mieux atténué avec un amortissement plus important du système. L'amplitude de l'impédance harmonique des deux niveaux de tension sur 5 endroits du réseau non adjacents, Romanel, Bickigen, Mettlen, Laufenburg et Bonaduz, est présentée dans les sections suivantes. Il convient de noter que les simulations ont été réalisées pour la même condition de charge minimale et la même configuration de réseau (condition N).

2.2.2.4.1 Romanel

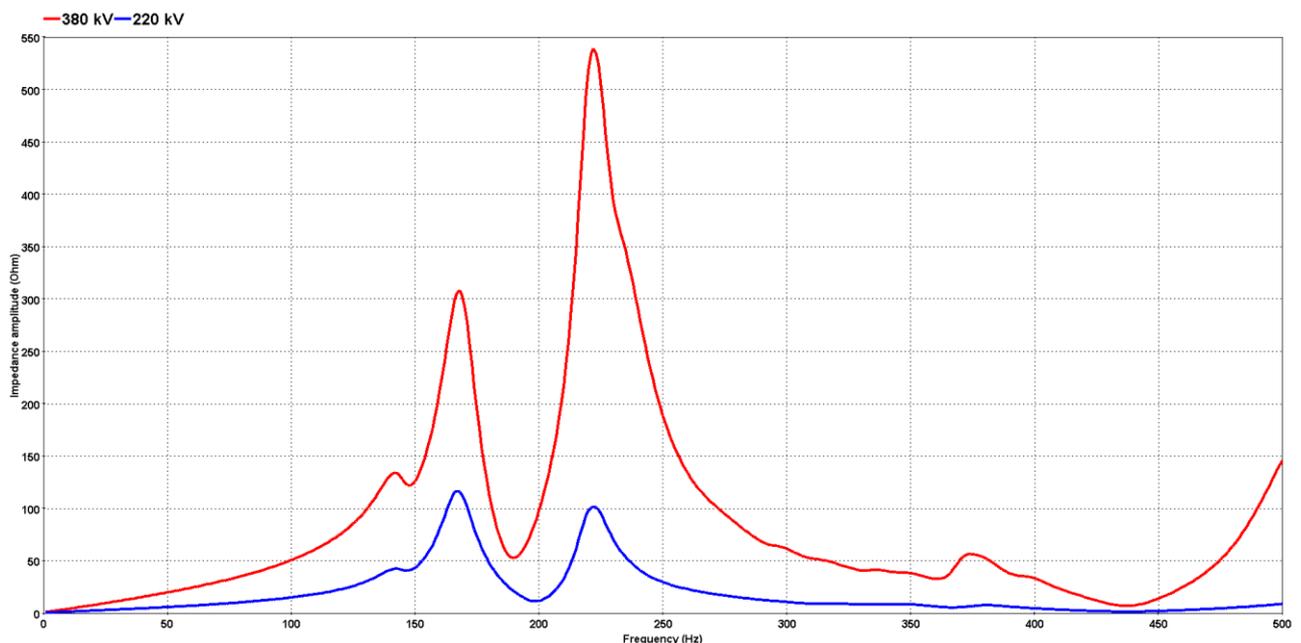


Figure 2-23: Comparaison de l'impédance harmonique entre 220 kV et 380 kV Romanel – condition N

2.2.2.4.2 Bickigen

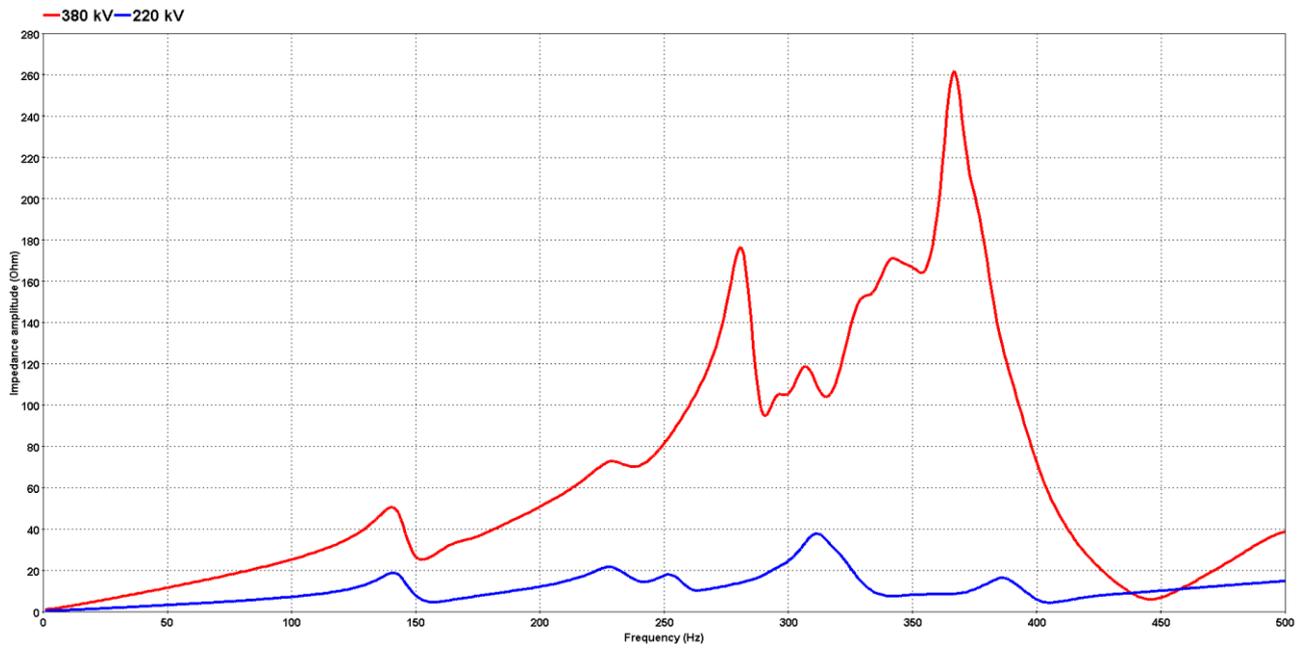


Figure 2-24: Comparaison de l'impédance harmonique entre 220 kV et 380 kV Bickigen – condition N

2.2.2.4.3 Mettlen

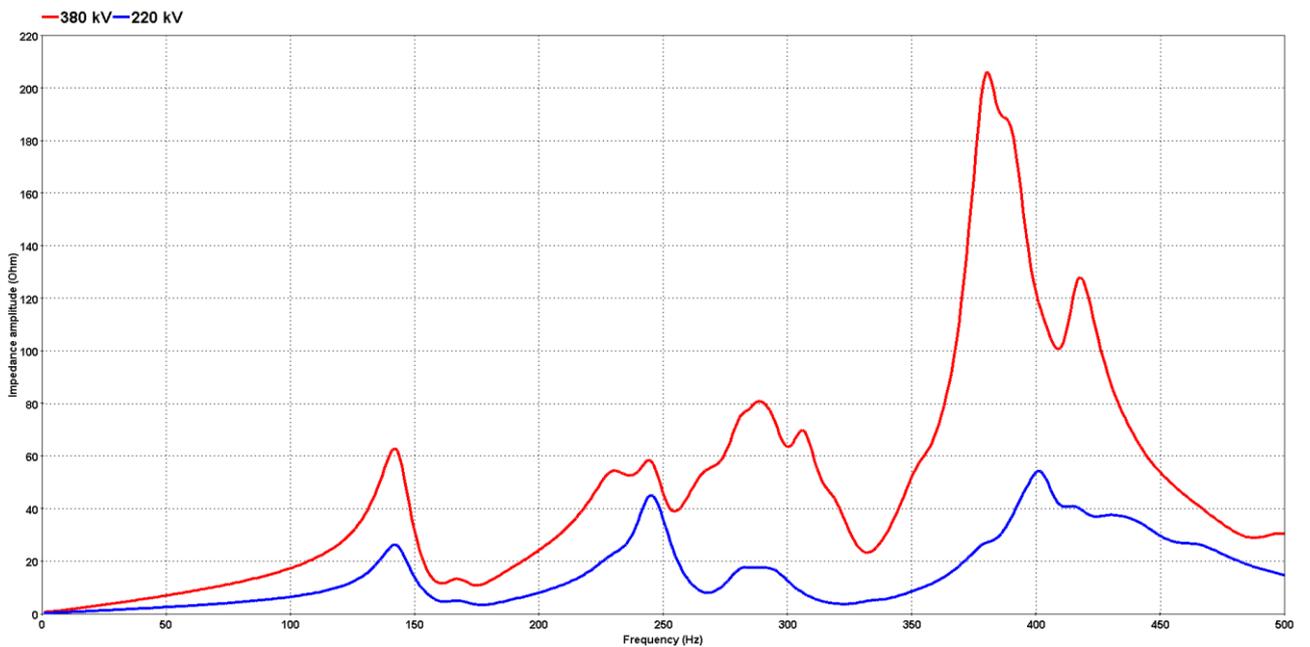


Figure 2-25: Comparaison de l'impédance harmonique entre 220 kV et 380 kV Mettlen – condition N

2.2.2.4.4 Laufenburg

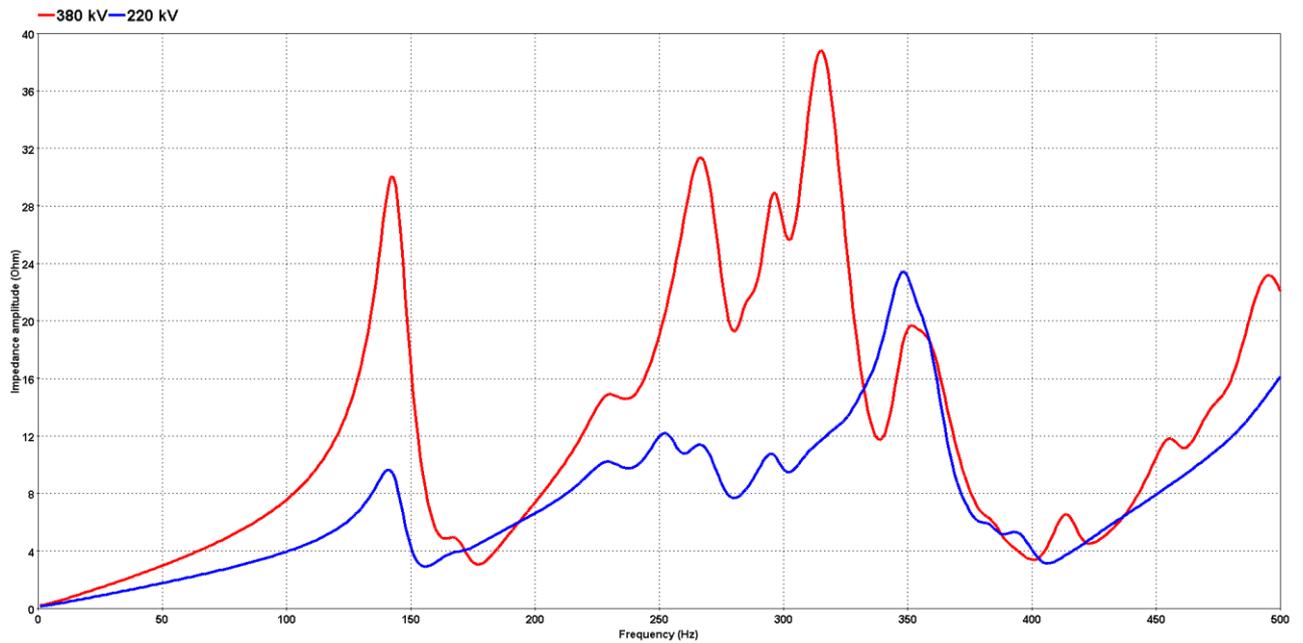


Figure 2-26: Comparaison de l'impédance harmonique entre 220 kV et 380 kV Laufenburg – condition N

2.2.2.4.5 Bonaduz

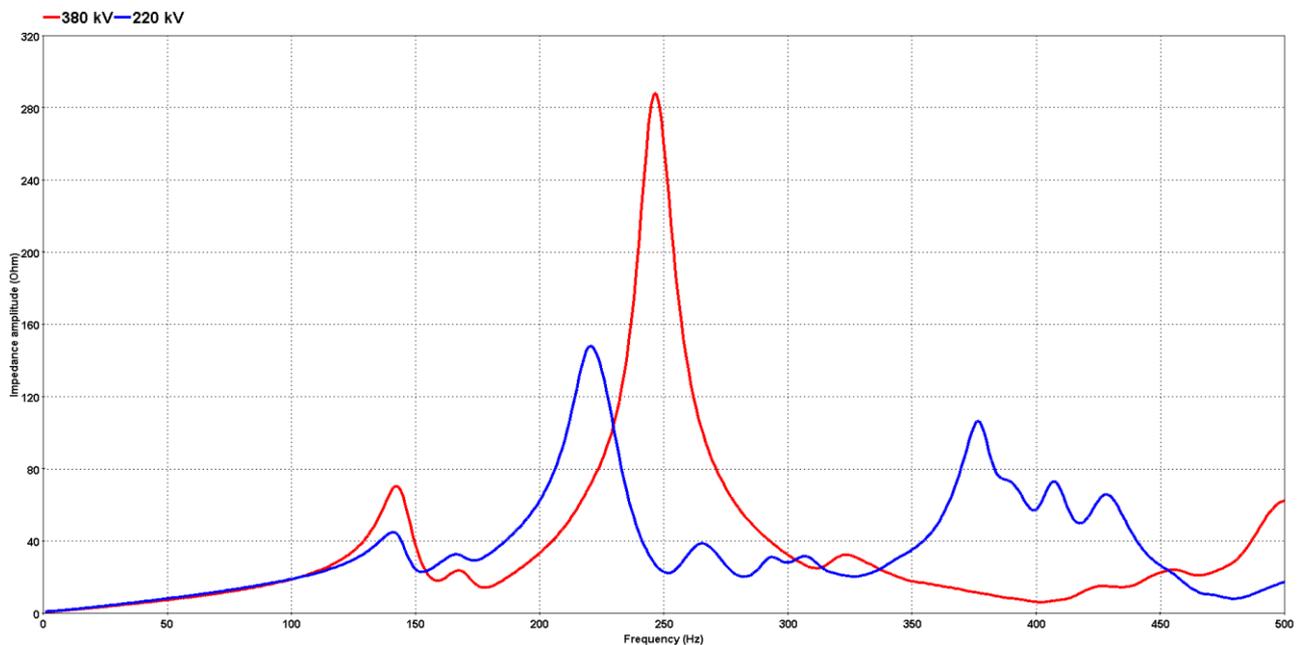


Figure 2-27: Comparaison de l'impédance harmonique entre 220 kV et 380 kV Bonaduz – condition N

2.2.2.4.6 Remarques

Comme prévu, l'impédance harmonique, que ce soit aux résonances ou sur l'ensemble du spectre de fréquences, est généralement plus faible au niveau 220 kV qu'au niveau 380 kV, ce qui indique que le réseau

220 kV offre un amortissement plus important. On peut donc prévoir que, même avec davantage de projets de câbles (et donc des fréquences de résonance parallèles encore plus basses), l'amortissement élevé du réseau de 220 kV tend à réduire l'impédance du système, de sorte que les TOV résultant d'événements transitoires sur site auraient un impact moins important sur les performances du système et poseraient moins de risques de stress thermique et diélectrique sur l'équipement du réseau. En d'autres termes, il serait relativement plus « sûr » en termes de TOV et de résonances de mettre en œuvre davantage de projets de câbles sur le réseau 220 kV que sur le réseau 380 kV.

2.2.3 Conclusion

La réponse en fréquence du réseau est directement liée aux TOV potentielles qui peuvent être rencontrées pendant les transitoires du réseau provenant des opérations sur site et des événements généraux tels que la mise sous tension, l'élimination des défauts, le rejet de la charge, l'îlotage du système, etc., qui, à leur tour, auraient un impact considérable sur la stabilité et la sécurité de l'exploitation du réseau.

Des études approfondies de balayage de fréquences au niveau du système ont été réalisées sur la base des scénarios de câbles proposés. Les études ont été réalisées sur plus de 20 endroits du réseau qui pourraient être sensibles à l'excitation de certaines résonances parallèles, tout en considérant des configurations de réseau défavorables en termes de contingences et de puissance de court-circuit, dans le but d'identifier les endroits du réseau et les configurations de réseau correspondantes qui pourraient potentiellement conduire à des TOV critiques lors d'événements transitoires du réseau.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des études réalisées :

- Des cas critiques de résonance parallèle ont été identifiés dans le scénario 3.

Alors que la réponse en fréquence à divers endroits du réseau dans différentes conditions d'exploitation reste plutôt non critique pour les scénarios 1 et 2 avec moins de projets de câbles, des cas extrêmement critiques de résonance parallèle ont été identifiés dans le scénario 3. Ces cas présentent de graves risques de résonance parallèle pour les harmoniques de bas ordre, notamment la 2^e, 3^e et 4^e, avec une amplitude d'impédance extrêmement élevée à la résonance. Une fois excités par des événements transitoires du réseau tels que la mise sous tension, l'élimination des défauts et l'îlotage du système, on peut s'attendre à des TOV fortement déformés et mal amortis dus à la résonance parallèle, entraînant des contraintes diélectriques et thermiques considérables sur l'équipement du réseau, voire une défaillance de l'équipement.

Les points problématiques du réseau sont 380 kV Romanel et 380 kV Magadino, et les contingences de réseau associées sont les suivantes :

- N-1 380 kV La Bâtiaz – Chamoson
 - N-2 380 kV La Bâtiaz – Chamoson et Romanel – Bois Tollot
 - N-1 380 kV Magadino – Lavorgo
-
- La réponse en fréquence du réseau peut encore se détériorer dans le scénario 4 avec un nombre de projets de câbles encore plus élevé que dans le scénario 3

Dans le scénario 4 où le nombre de projets de câbles est plus élevé que dans le scénario 3, la détérioration de la réponse en fréquence du réseau peut être confirmée. À 380 kV Nant de Drance, 380 kV Mörel, 380 kV Lavorgo, 380 kV Tierfehd, 380 kV Filisur et 380 kV Soazza, des résonances parallèles auparavant non critiques deviennent critiques avec des fréquences encore plus basses et une amplitude d'impédance plus élevée, tandis que dans d'autres cas, de nouveaux pics de résonances parallèles apparaissent à des

harmoniques d'ordre inférieur, ce qui pose des risques de TOV critiques pendant les événements transitoires du réseau.

- L'augmentation du nombre de projets de câbles dans le réseau déplace les fréquences parallèles du système vers des harmoniques plus faibles à différents endroits.

La comparaison de la réponse en fréquence à divers endroits du réseau entre les scénarios 1, 2 et 3 montre un déplacement notable de la résonance parallèle vers les harmoniques de rang inférieur. En particulier, les fréquences de résonance parallèle pour le scénario 3 à plusieurs endroits du réseau sont déplacées sous l'harmonique 4 (c'est-à-dire 200 Hz), ce qui exposerait le réseau à des risques considérables de TOV en raison de l'excitation de la résonance parallèle harmonique d'ordre inférieur pendant les transitoires du réseau, en particulier dans des conditions d'exploitation défavorables telles qu'un faible niveau de puissance de court-circuit et des situations de contingences.

- L'intégration des câbles a un impact plus important sur le réseau 380 kV que sur le réseau 220 kV en raison de l'amortissement plus faible du système dans le premier cas.

L'amplitude de l'impédance à la résonance, ou globalement, sur un spectre de fréquences défini, est liée à l'amortissement du système et aux conditions de charge. Comparé au réseau de 220 kV, le réseau de 380 kV est nettement moins maillé et il y a moins de groupes de production et de charges qui y sont connectés (des réseaux de moyenne ou basse tension), ce qui fait que l'amortissement du réseau de 380 kV est généralement plus faible que celui du réseau de 220 kV, d'où une plus grande amplitude de l'impédance aux résonances. Étant donné qu'un amortissement élevé du réseau permet d'atténuer les TOV et autres transitoires pendant les opérations et événements sur site, l'intégration des câbles sur le réseau 380 kV devrait avoir un impact plus important sur les performances globales du réseau et la sécurité des équipements que sur le réseau 220 kV. En d'autres termes, il serait plus « sûr » d'envisager la mise en œuvre de projets de câblage sur le réseau 220 kV que sur le réseau 380 kV.

2.3 Études d'amplification des harmoniques

Les sources typiques d'harmoniques dans les réseaux électriques sont les charges non linéaires (par exemple, certains équipements industriels, les drives à vitesse variable pour les moteurs AC/DC, les chargeurs de batterie, etc.) et les dispositifs d'électronique de puissance (par exemple, les convertisseurs HVDC, les parcs éoliens, les SVC, les STATCOM, etc.). Les harmoniques provenant de ces sources peuvent se propager à travers les impédances du système et être amplifiées plusieurs fois dans les zones à forte densité de câbles en raison des résonances, ce qui entraîne une détérioration de la tension d'alimentation. Ce phénomène peut être illustré de manière simplifiée, comme le montre la Figure 2-28.

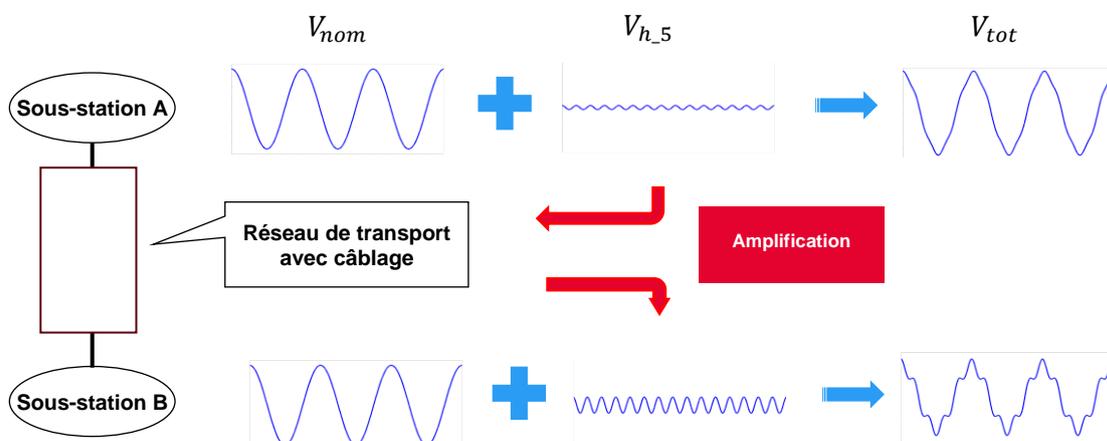


Figure 2-28: Illustration de l'amplification harmonique

Dans la Figure 2-28, l'harmonique 5 d'amplitude relative inférieure à celle définie dans la norme [2.2] se propage dans le réseau de la sous-station A à partir d'une charge non linéaire locale. Cette harmonique crée une distorsion mineure sur la tension mesurée à la sous-station A, ce qui est acceptable. Lorsqu'elle atteint la sous-station B après avoir traversé un axe de transmission composé de lignes et de segments de câbles, elle est amplifiée par la résonance et son amplitude relative dépasse désormais la limite définie dans la norme IEC 61000-3-6. Cette harmonique 5 amplifiée est superposée à la composante fondamentale des formes d'onde de tension, ce qui entraîne une grave distorsion de la tension.

Bien que l'amplification harmonique soit le résultat de la résonance du réseau due à l'interaction des éléments inductifs et capacitifs, le degré d'amplification dépend peu de l'impédance de résonance existant à la borne d'observation. Au contraire, le degré d'amplification à la borne d'observation est l'impact collectif des résonances harmoniques sur tous les trajets entre le point d'injection et le point d'observation. Ceci peut être compris à l'aide de l'illustration simple donnée dans la Figure 2-29.

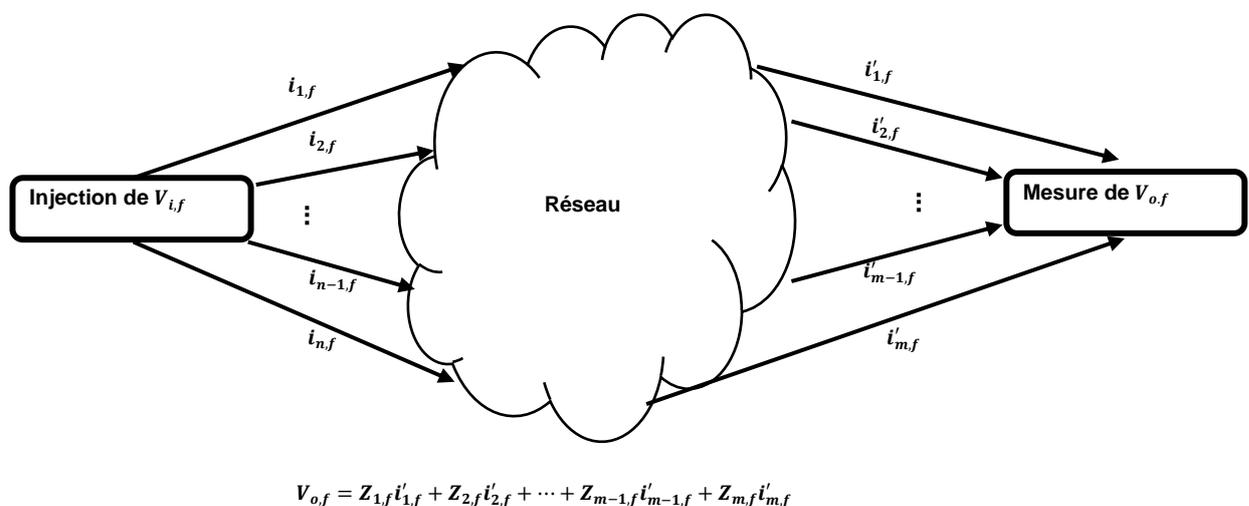


Figure 2-29: Illustration de la propagation et de l'amplification des harmoniques

Dans la Figure 2-29, des harmoniques d'une certaine amplitude et d'une certaine fréquence, $V_{i,f}$, sont injectées à un certain endroit du réseau. Ces harmoniques se propagent vers d'autres parties du réseau via les n départs de ligne à cet endroit du réseau sous la forme de courants harmoniques. Après d'autres fusions/séparations/etc. dans le réseau, certains courants harmoniques atteignent un autre point du réseau à partir des m trajets de déplacement observés au point d'observation, ce qui donne lieu à une tension harmonique de la même fréquence. Cette tension harmonique est la somme des produits de chaque courant harmonique atteignant le point d'observation et de l'impédance harmonique correspondante du trajet :

$$V_{o,f} = Z_{1,f}i'_{1,f} + Z_{2,f}i'_{2,f} + \dots + Z_{m-1,f}i'_{m-1,f} + Z_{m,f}i'_{m,f}$$

Par conséquent, il est facile de comprendre que si la résonance est excitée sur un certain trajet de déplacement ou plusieurs trajets de déplacement à la fréquence harmonique, l'impédance harmonique correspondante Z sera élevée, ce qui entraînera une tension harmonique beaucoup plus élevée au point d'observation qu'au point d'injection.

Une augmentation de la THD (distorsion harmonique totale, anglais : total harmonic distortion) résultant de l'amplification harmonique a plusieurs répercussions sur l'entretien normal des équipements et le

fonctionnement du système, en stressant le réseau et en risquant d'endommager les équipements. Ces répercussions comprennent (mais ne sont pas limitées à) :

- surchauffe de l'équipement (par exemple, transformateurs, moteurs, mise à la terre, etc.)
- bruit audible dans les transformateurs et les masses tournantes
- vibrations du moteur
- augmentation de l'effet de peau dans les conducteurs de ligne et de câble
- déclenchement thermique des dispositifs de protection et défauts logiques des dispositifs numériques
- défaillance du banc de condensateurs

Pour éviter des problèmes imprévus, il est recommandé de mener des études sur l'amplification harmonique au stade de la planification des projets d'intégration intensive des câbles.

2.3.1 Méthodologie

Les études d'amplification harmonique sont réalisées en injectant des tensions de différentes fréquences harmoniques (c.-à-d. 250 Hz, 350 Hz, 550 Hz, 650 Hz, 850 Hz, 950 Hz, etc.) avec une amplitude de 1 V à un certain endroit du réseau et en mesurant les tensions à divers autres endroits. Le rapport entre l'harmonique mesurée d'un certain rang et l'harmonique injectée du même rang définit le facteur d'amplification (AF, anglais : amplification factor), qui indique la gravité de l'amplification de l'harmonique en question ou le degré d'amplification. Au cours de ce processus, toutes les autres sources de tension (c.-à-d. les équivalents Thévenin) sont court-circuitées. Étant donné que la non-linéarité due au niveau de tension harmonique n'est pas attendue, les résultats resteraient cohérents même avec des valeurs d'injection plus importantes.

Il n'existe pas de normes internationales concernant le degré d'amplification qui devrait préoccuper les gestionnaires de réseaux de transport. Toutefois, l'expérience [2.3], [2.5] a permis d'adopter les lignes directrices suivantes dans le cadre de cette étude, comme le montre le Tableau 2-15.

AF<1	Pas de problèmes d'amplification harmonique
1<AF<3	Amplification harmonique moyenne, non critique
3<AF<10	Amplification harmonique modérée à critique
AF>10	Amplification harmonique extrêmement critique

Tableau 2-15: Lignes directrices générales sur la gravité de l'amplification harmonique

Il est à noter que l'on part du principe que tous les AF inférieurs à 3 (marqués en vert et en jaune) ne devraient pas poser de problèmes d'amplification harmonique grave, alors que ceux qui sont supérieurs à 3, et en particulier supérieurs à 10, devraient mériter l'attention du lecteur.

D'après notre expérience, l'amplification des harmoniques de bas ordre, en particulier les harmoniques 5 et 7 (c.-à-d. 250 Hz et 350 Hz), devrait mériter la plus grande attention dans le réseau Swissgrid pour les raisons suivantes :

- La présence d'harmoniques paires dans l'arrière-plan harmonique des réseaux de transport est généralement insignifiante.
- Les harmoniques impaires d'ordre élevé sont moins susceptibles de poser des problèmes en raison d'un amortissement plus important aux fréquences élevées.

- L'amplification des interharmoniques (c.-à-d. les harmoniques dont les valeurs sont comprises entre des multiples entiers de 50 Hz) n'est pas préoccupante en raison de l'absence de VSC-HVDC (anglais : Voltage Source Converter) directement connecté au réseau de transmission.

Les endroits des sources potentielles d'harmoniques doivent être soigneusement déterminés. En particulier, les postes de 220 kV et 380 kV connectés aux niveaux de moyenne et basse tension (avec des connexions possibles à des charges non linéaires) et au réseau CFF doivent être considérées comme des sources potentielles de pollution harmonique. En outre, l'amplification dans les zones à forte pénétration de câbles doit être évaluée en priorité. Sur la base de ces lignes directrices, les 12 endroits suivants ont été choisis et testés en tant que sources potentielles de pollution harmonique (une sélection des résultats est présentée à l'annexe 4.4.4) :

220 kV Verbois	380 kV Bois Tollot	380 kV Romanel	220 kV St. Triphon
220 kV Wimmis	220 kV Mettlen	380 kV Mettlen	220 kV Mühleberg
220 kV Gerlafingen	220 kV Fällanden	220 kV Sils	380 kV Musignano

En général, on peut s'attendre à ce qu'une pénétration croissante du câble et un faible SCL intensifient l'amplification d'un certain rang harmonique. Toutefois, ce n'est pas toujours le cas, en particulier lorsqu'il y a un câblage intensif dans une certaine zone du réseau, comme le montre la Figure 2-30.

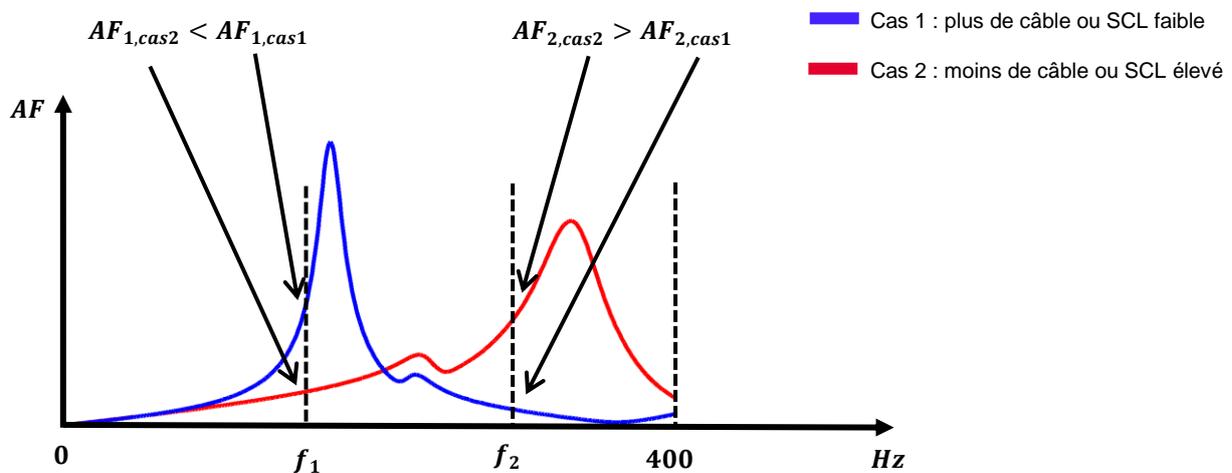


Figure 2-30: Explication générique de l'impact de la configuration du réseau sur les résonances harmoniques

Un câblage intensif peut déplacer la résonance du réseau vers des harmoniques d'ordre inférieur. Étant donné que nous nous intéressons principalement à l'amplification des harmoniques 5 et 7, nous nous concentrons sur le comportement de l'impédance du trajet de l'harmonique en dessous de 400 Hz (c.-à-d. l'harmonique 8).

Deux cas avec des fréquences de résonance harmoniques différentes ont été définis :

- Cas 1 (courbe bleue) : fréquence de résonance harmonique plus basse en raison d'un plus grand nombre de câbles connectés à proximité ou d'une faible puissance de court-circuit.
- Cas 2 (courbe rouge) : fréquence de résonance harmonique plus élevée en raison d'un nombre réduit de câbles connectés à proximité ou d'une puissance de court-circuit élevée.

Pour l'amplification d'un certain rang harmonique f_1 , l'amplification dans le cas 1 avec plus de câbles ou une faible puissance de court-circuit est plus élevée que dans le cas 2 avec moins de câbles ou une forte puissance de court-circuit. Toutefois, pour l'amplification d'un rang d'harmonique f_2 , c'est le cas 2 avec moins de câbles ou une puissance de court-circuit élevée qui a un facteur d'amplification plus élevé.

Au fur et à mesure que des câbles sont intégrés dans le réseau, en fonction de la localisation de la fréquence harmonique de résonance du (des) chemin(s) parcouru(s) ainsi que du rang harmonique d'intérêt, le résultat peut être imprévisible, ce qui rend **absolument nécessaire** la réalisation d'études détaillées sur l'amplification des harmoniques pour de multiples configurations de réseau et conditions d'exploitation.

2.3.2 Résultats et discussions

Les principales conclusions suivantes peuvent être tirées des études réalisées :

- En général, l'amplification des harmoniques de bas ordre (par exemple, les harmoniques 5 et 7) s'aggrave à mesure que le nombre de projets de câbles dans le réseau passe du scénario 1, 2 à 3 dans les mêmes conditions de réseau. En d'autres termes, plus il y a de câbles dans le réseau, plus les risques d'amplification des harmoniques graves sont élevés. Ce phénomène a été observé à plusieurs endroits du réseau (voir section 2.3.2.1.).
- La puissance de court-circuit du réseau a un impact important sur l'amplification des harmoniques. D'une manière générale, une forte puissance de court-circuit atténue généralement les résonances harmoniques, ce qui limite l'amplification des harmoniques de rang inférieur (voir la section 2.3.2.2).
- Le phénomène d'amplification des harmoniques se complique avec l'augmentation du degré de câblage dans le réseau. Dans un réseau densément câblé, un projet de câble n'aurait pas seulement un impact sur l'amplification des harmoniques dans la zone locale, mais il pourrait également avoir un impact sur l'amplification des harmoniques de bas ordre dans les zones éloignées. Ce phénomène a été observé au cours des études réalisées dans le cadre de ce projet (voir section 2.3.2.3).

Dans l'ensemble, l'amplification des harmoniques de bas ordre due à l'intégration des câbles est le résultat d'une résonance harmonique le long du trajet des harmoniques, ce qui en fait un problème complexe. **Plusieurs exceptions aux deux premières conclusions ont également été identifiées. Ces exceptions, ainsi que la troisième constatation, démontrent la nécessité absolue de réaliser des études détaillées sur l'amplification des harmoniques pour l'intégration de tout nouveau projet de câble à l'avenir, en tenant compte des variations des configurations et des conditions du réseau.**

Les trois principales conclusions ci-dessus sont développées dans les sections respectives.

2.3.2.1 Impact du nombre de projets de câbles dans le réseau sur l'amplification des harmoniques

Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, l'amplification des harmoniques de certains rangs est le résultat de la résonance harmonique le long de certains trajets de déplacement du courant harmonique avant d'atteindre le point d'observation. Si une zone de réseau est uniquement composée de lignes aériennes, il ne devrait pas y avoir de risques d'amplification des harmoniques de bas rang. Cependant, l'intégration de projets de câbles dans une zone de réseau initialement inductive composée principalement de lignes aériennes introduit des éléments capacitifs dans le réseau, ce qui pose des risques d'amplification de certaines harmoniques d'ordre inférieur. En outre, en général, plus le nombre de projets de câbles augmente, plus l'amplification des harmoniques de rang inférieur est importante.

Des études d'amplification harmonique pour les trois scénarios ont été menées à plusieurs endroits du réseau en tenant compte des variations des conditions du réseau (voir l'annexe 4.4.4). En comparant les facteurs d'amplification des harmoniques de rang inférieur entre les scénarios 1, 2 et 3, quelques zones problématiques ont été identifiées, notamment l'axe 220 kV Romanel – Banlieue Ouest – Crans – Foretaille, l'axe 380 kV Romanel – Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance et l'axe 220 kV Mettlen – Airolo.

Les cas d'essai suivants sont présentés pour démontrer l'impact du nombre de projets de câbles sur l'amplification des harmoniques de bas ordre (c'est-à-dire les harmoniques 5 et 7) (comparaison entre les scénarios 1, 2 et 3) :

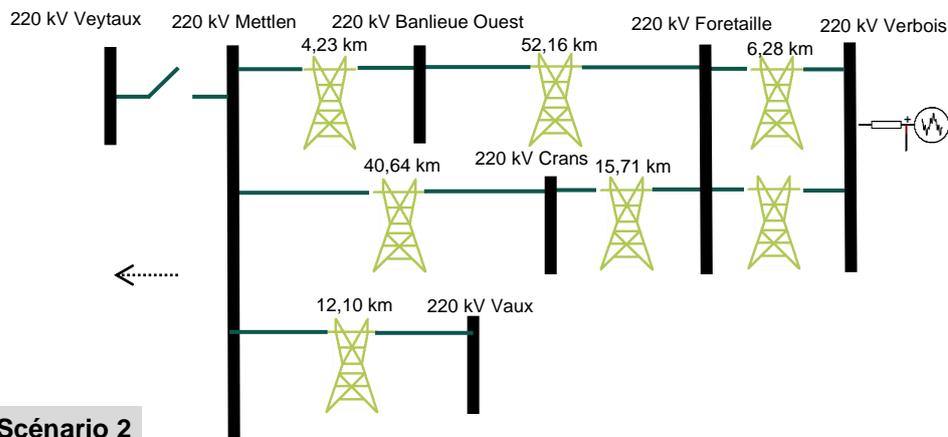
Point d'injection	Point d'observation	SCL	Configuration du réseau
220 kV Verbois	220 kV Crans	Faible	N-1 sur 220 kV Romanel – Veytaux
	220 kV Banlieue Ouest		
	220 kV Romanel		
	220 kV Vaux		
380 kV Romanel	380 kV Bâtiaz		N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Chamoson
	380 kV Châtelard		
	380 kV Nant de Drance		
	220 kV Châtelard		
220 kV Mettlen	220 kV Airolo		N-2 sur 220 kV Airolo – Rotondo et Airolo – Lavorgo

2.3.2.1.1 Amplification des harmoniques à 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel, et 220 kV Vaux

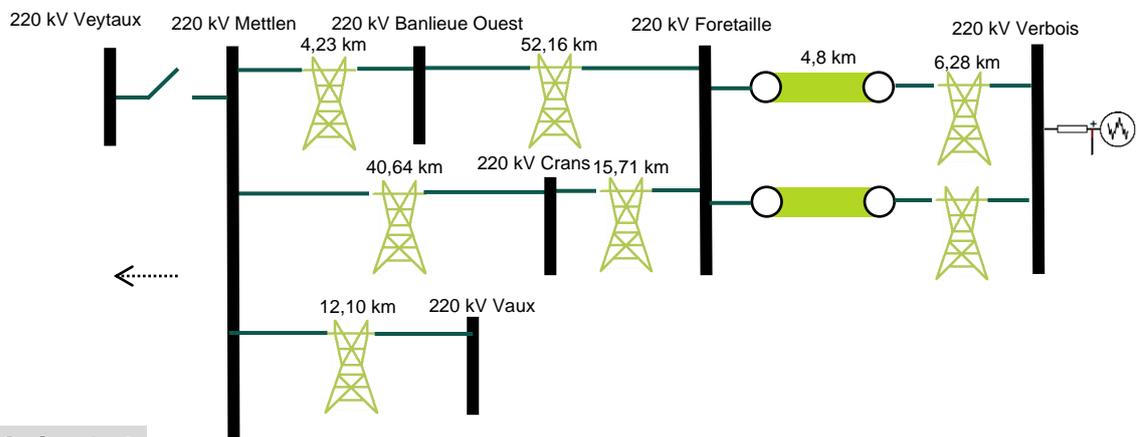
La configuration du réseau près de 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel et 220 kV Vaux pour les scénarios 1, 2 et 3 du cas démonstratif est illustrée dans la Figure 2-31.

Il est à noter que l'ensemble de la zone du réseau est constitué uniquement de lignes aériennes dans le scénario 1 alors que les seuls segments de câbles du scénario 2 dans cette zone sont le système de câbles à double circuit de 4,8 km entre 220 kV Foretaille et 220 kV Verbois. Cependant, la section entière de 57 km entre 220 kV Foretaille et 220 kV Romanel est réalisée par des câbles souterrains dans le scénario 3. En outre, un segment de câble d'une longueur totale de 16 km (8 km, deux câbles par phase) est également réalisé dans le scénario 3 entre 220 kV Romanel et 220 kV Vaux.

Scénario 1



Scénario 2



Scénario 3

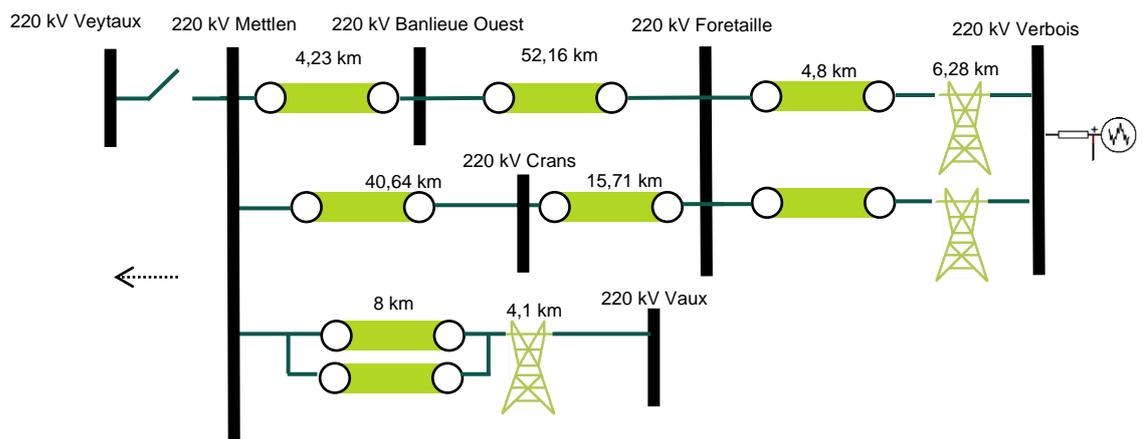


Figure 2-31: Configuration du réseau près de 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel et 220 kV Vaux pour le cas démonstratif – Scénarios 1, 2 et 3

Les facteurs d'amplification observés à 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Romanel et 220 kV Vaux pour le cas démonstratif pour les scénarios 1, 2 et 3 sont présentés dans le Tableau 2-16.

	AF sur la 5			AF sur la 7		
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
220 kV Crans	0.837	0.859	0.635	0.990	0.952	3.532
220 kV Banlieue Ouest	0.664	0.657	0.511	0.786	0.821	4.080
220 kV Romanel	0.642	0.630	0.607	0.773	0.805	3.812
220 kV Vaux	0.694	0.685	0.493	0.806	0.832	3.503

Tableau 2-16: Comparaison de l'AF à 220 kV Crans, 220 kV Banlieue Ouest, kV Romanel, et 220 kV Vaux entre les scénarios 1, 2 et 3 pour les injections d'harmoniques à 220 kV Verbois – Low SCL

Remarque : Alors qu'aucun risque d'amplification des harmoniques de bas ordre ne peut être identifié dans les scénarios 1 et 2, des facteurs d'amplification critiques sur l'harmonique 7 peuvent être observés dans le scénario 3 lorsque la zone allant de 220 kV Foretaille à 220 kV Romanel est intensivement câblée.

Pour plus d'informations, la résonance harmonique le long des chemins 220 kV Verbois – Romanel et 220 kV Romanel – Vaux pour les 3 scénarios dans les conditions de réseau données est représentée dans la Figure 2-32.

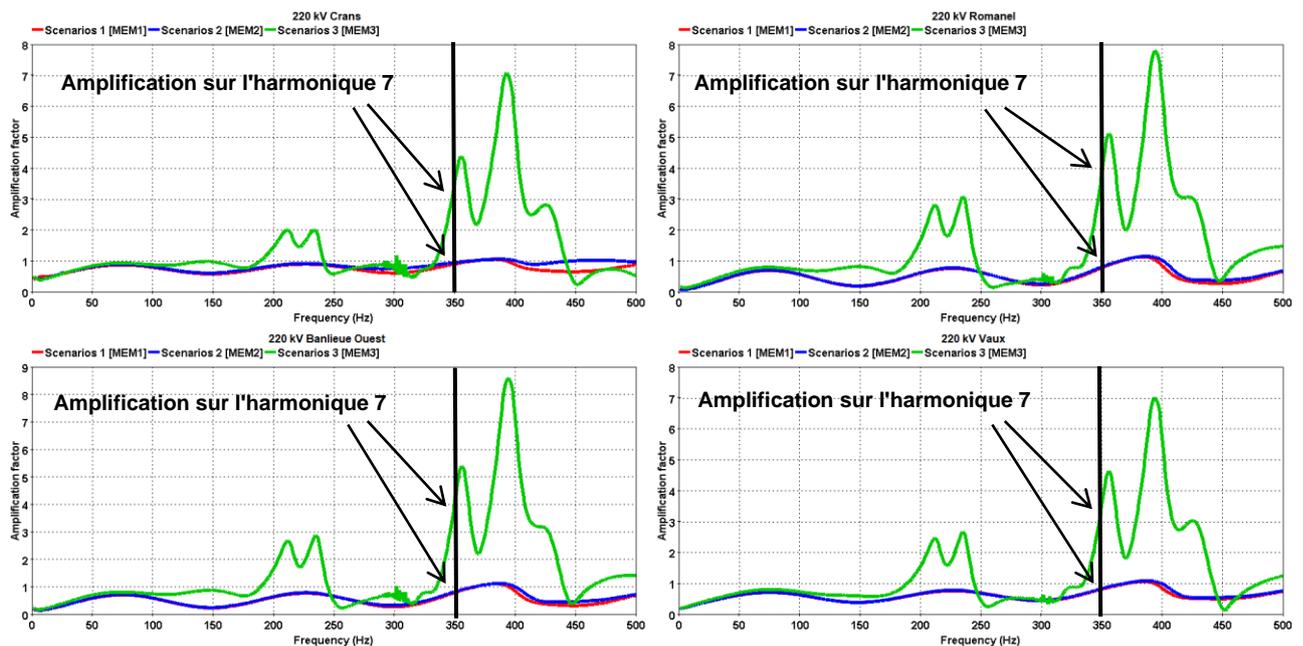


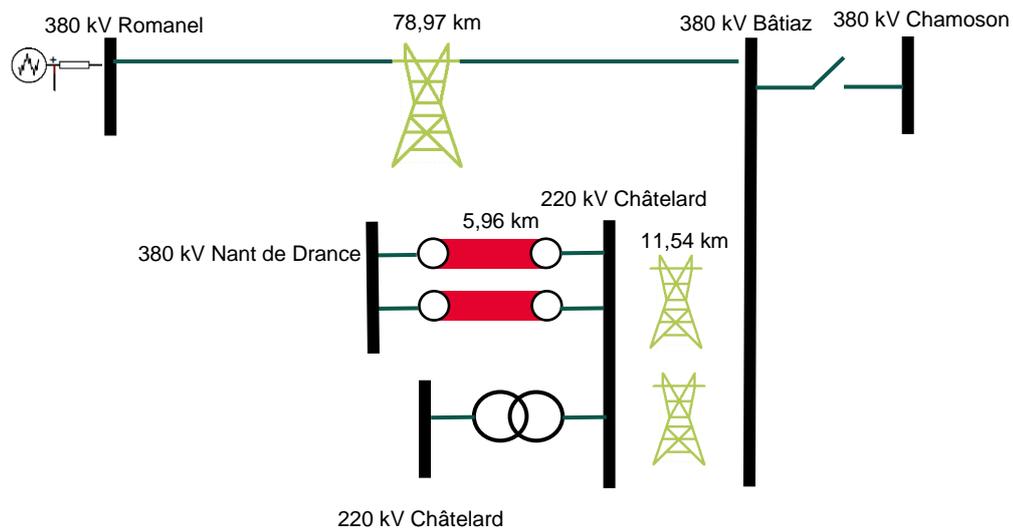
Figure 2-32: Résonance harmonique le long de 220 kV Verbois – Romanel et 220 kV Romanel – Vaux pour les scénarios 1, 2 et 3 dans les conditions de réseau données

Comme le montre la Figure 2-32, l'introduction de tous les câbles dans cette zone de réseau du scénario 3 mène à une résonance harmonique qui culmine à plus de 350 Hz (l'harmonique 7). Bien que le pic de la fréquence de résonance ne tombe pas exactement sur 350 Hz, cette résonance harmonique impose toujours un impact important sur l'harmonique 7, comme le montrent les résultats.

2.3.2.1.2 Amplification des harmoniques à 380 kV La Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance, et 220 kV Châtelard

La configuration du réseau près de 380 kV Romanel jusqu'à 380 kV Nant de Drance pour les scénarios 1, 2 et 3 pour le cas démonstratif est illustrée dans la Figure 2-33.

Scénario 1 et 2



Scénario 3

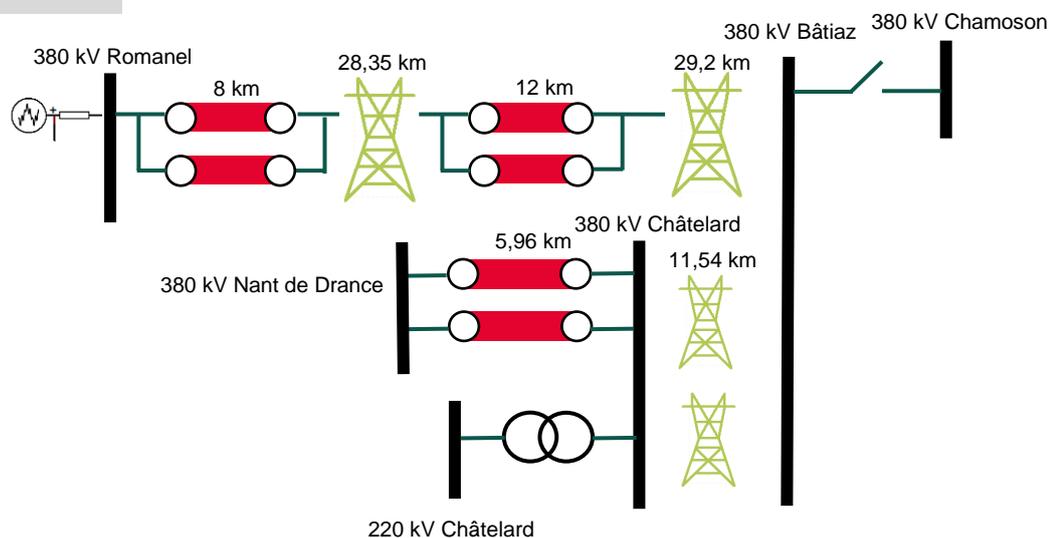


Figure 2-33: Configuration du réseau à proximité de 380 kV Romanel, 380 kV Bâtiaz, 220/380 kV Châtelard et 380 kV Nant de Drance pour le cas démonstratif – Scénarios 1, 2 et 3

Il est à noter que les seuls segments de câbles dans les scénarios 1 et 2 dans cette zone sont les câbles à double circuit de 380 kV Châtelard – Nant de Drance, d'une longueur de 5,96 km. Cependant, l'axe de transmission de 58,7 km dans le scénario 3 de 380 kV Romanel vers 380 kV La Bâtiaz devient une section mixte ligne/câble avec un total de 40 km de câbles (deux câbles par phase).

Les facteurs d'amplification observés à 380 kV Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance et 220 kV Châtelard pour le cas démonstratif pour les scénarios 1, 2 et 3 sont présentés dans le Tableau 2-17.

	AF sur la 5			AF sur la 7		
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
380 kV Bâtiaz	1.262	1.262	2.005	4.542	4.542	7.887
380 kV Châtelard	1.280	1.280	2.033	4.777	4.777	8.287
380 kV Nant de Drance	1.282	1.282	2.036	4.809	4.809	8.337
220 kV Châtelard	0.585	0.585	1.605	2.276	2.276	6.810

Tableau 2-17: Comparaison de l'AF à 380 kV Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance et 220 kV Châtelard entre les scénarios 1, 2 et 3 pour des injections d'harmoniques à 220 kV Verbois – Low SCL

Remarques : Des facteurs d'amplification critiques sur les harmoniques 7 peuvent être observés dans la zone de Nant de Drance pour les deux niveaux de tension avec des conditions SCL faibles lorsque les harmoniques sont injectées à 380 kV Romanel pour les trois scénarios. En particulier, il n'est pas surprenant que les facteurs d'amplification dans les scénarios 1 et 2 soient identiques puisque le réseau local a la même configuration dans la région de Nant de Drance. Au fur et à mesure que des projets de câbles sont intégrés dans le réseau entre 380 kV Romanel et 380 kV Bâtiaz, comme dans le scénario 3, les facteurs d'amplification sur l'harmonique 7 s'aggravent.

Il convient de noter que les problèmes d'amplification harmonique ont également été identifiés dans des études antérieures réalisées par RTEi [2.5]. Les facteurs d'amplification sont beaucoup plus élevés aux mêmes points d'observation dans les études de RTEi parce que des valeurs de court-circuit encore plus faibles ont été adoptées.

Pour plus d'informations, la résonance harmonique le long des axes 380 kV Romanel – Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance pour les scénarios 1, 2 et 3 dans les conditions de réseau données est représentée dans la Figure 2-34.

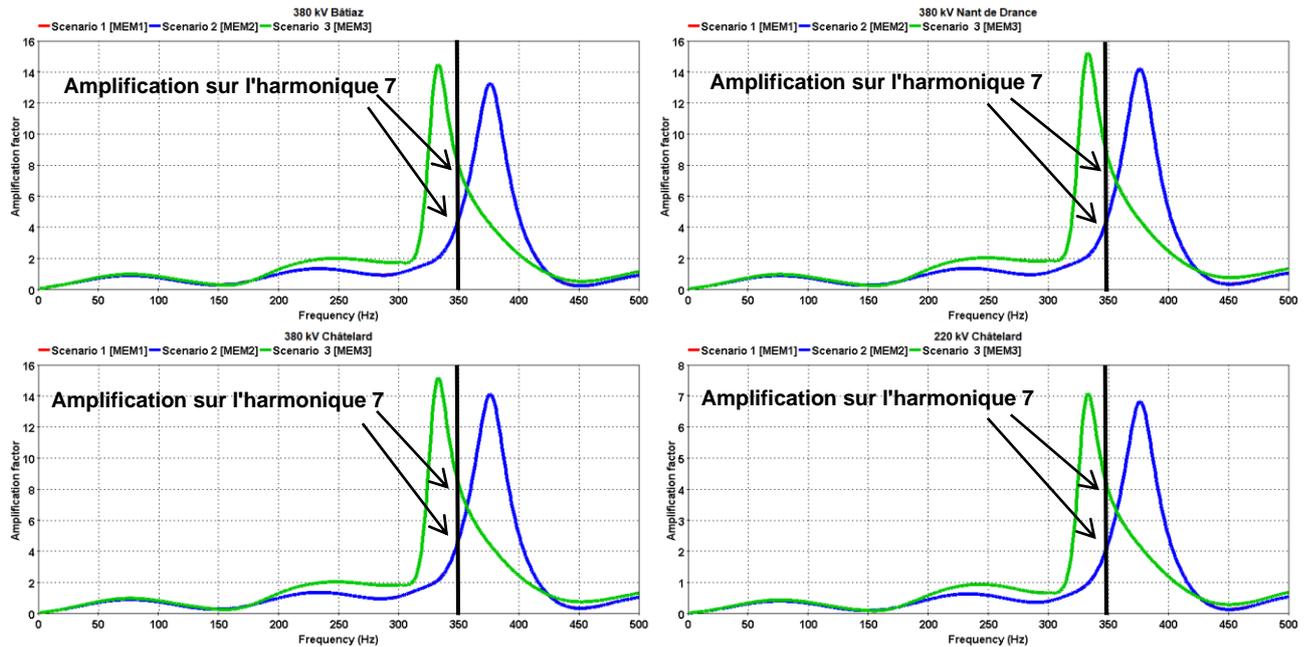


Figure 2-34: Résonance harmonique le long du 380 kV Romanel – Bâtiâz - Châtélard – Nant de Drance pour les scénarios 1, 2 et 3 dans les conditions de réseau données.

Comme le montre la Figure 2-34, dans les scénarios 1 et 2, les câbles de Nant de Drance, ainsi que la topologie du réseau (N-1 sur 380 kV Bâtiâz – Chamoson), entraînent une résonance harmonique culminant autour de 375 Hz. Cela conduit à une amplification relativement élevée sur l'harmonique 7 (c.-à-d. 350 Hz). Les courbes des scénarios 1 et 2 sont superposées à la courbe bleue vu que les conditions de réseau sont les mêmes dans la région.

Au fur et à mesure de l'introduction de projets de câbles dans le scénario 3, ce pic de résonance harmonique se déplace vers des fréquences plus basses, inférieures à 350 Hz. Les facteurs d'amplification à l'harmonique 7 deviennent plus importants en raison d'une impédance harmonique plus grande et d'une fréquence de résonance plus basse.

D'ailleurs, d'après une campagne de mesure d'harmoniques effectuée récemment à 380 kV Romanel [2.30], la composante de l'harmonique 7 pourrait s'élever à 4% (voir Figure 2-35), ce qui dépasse déjà la limite de 2% définie par la norme [2.2].

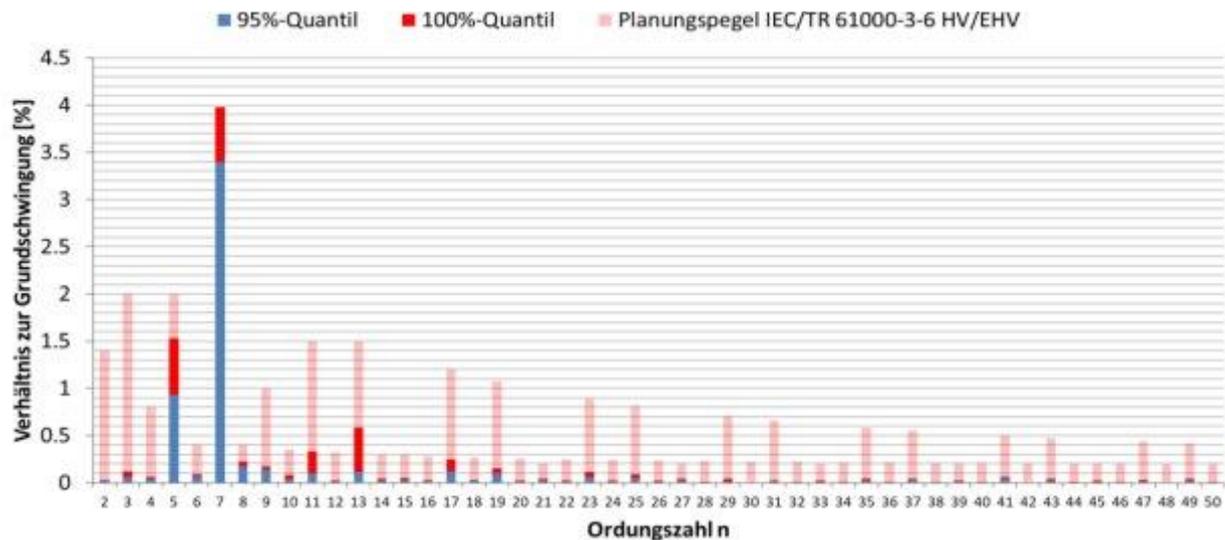


Figure 2-35: Composantes d’harmoniques par rapport à la composante fondamentale (%) mesurées à 380 kV Romanel

Avec un facteur d’amplification sur l’harmonique 7 atteignant 7,887 à 380kV Bâtiaz, 8,287 à 380kV Châtelard et 8,337 à 380 kV Nant de Drance dans le scénario 3 (voir Tableau 2-173), la distorsion de l’harmonique 7 à ces trois endroits serait respectivement de 31,548%, de 33,148% et de 33,348%. Une amplification aussi importante de l’harmonique 7 aurait un impact grave sur la qualité de l’énergie et l’équipement du réseau.

2.3.2.1.3 Amplification des harmoniques à 220 kV Airolo

La configuration du réseau près de 220 kV Airolo pour les scénarios 1, 2 et 3 du cas démonstratif est illustrée dans la Figure 2-36.

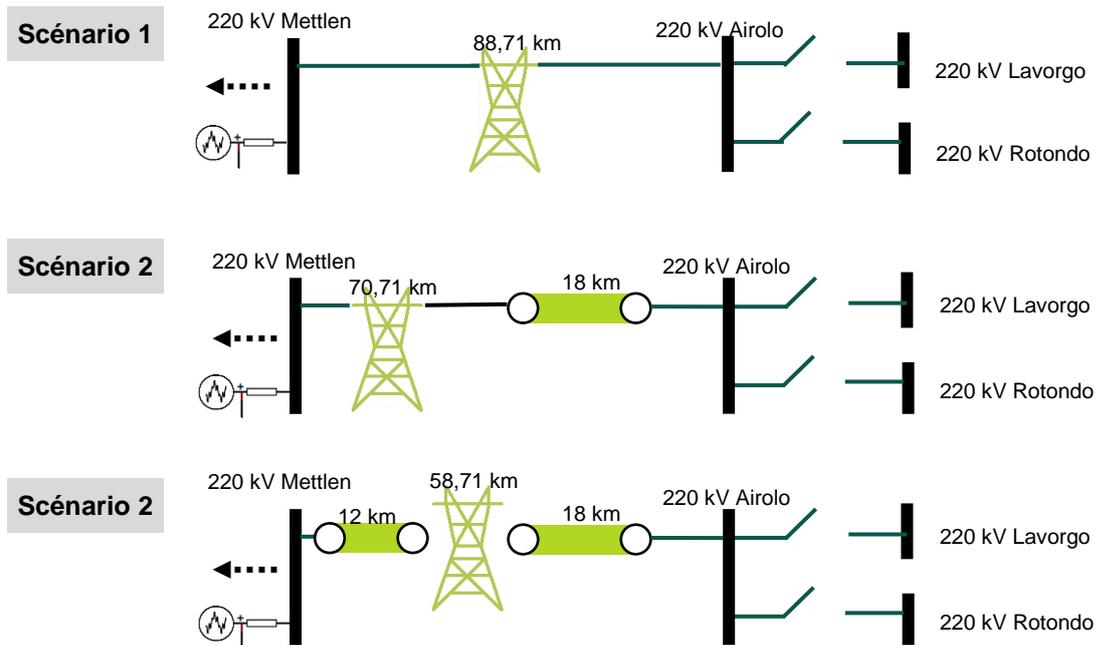


Figure 2-36: Configuration du réseau près de 220 kV Airolo pour les scénarios 1, 2 et 3 dans les conditions de réseau données

La liaison 220 kV Mettlen – Airolo est uniquement constituée de lignes aériennes dans le scénario 1, tandis que le câble du Gothard de 18 km est introduit dans le scénario 2 au nord de 220 kV Airolo. Dans le scénario 3, un autre segment de câble de 12 km est intégré au sud de Mettlen, ce qui porte à 30 km la longueur totale de la connexion par câble sur la liaison 220 kV Mettlen – Airolo.

La contingence N-2 220 kV Airolo – Lavorgo et 220 kV Airolo-Rotondo laisse le câble du Gothard connecté radialement à la source d'harmoniques via un long axe de transmission.

Les facteurs d'amplification observés à 220 kV Airolo pour le cas démonstratif pour les scénarios 1, 2 et 3 sont présentés dans le Tableau 2-18.

	AF sur la 5			AF sur la 7		
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
220 kV Airolo	1.058	11.32	6.143	1.191	1.306	1.913

Tableau 2-18: Comparaison de l'AF à 220 kV Airolo entre les scénarios 1, 2 et 3 pour les injections d'harmoniques à 220 kV Mettlen – Low SCL

Remarques : Aucune amplification des harmoniques de bas ordre ne peut être observée dans le scénario 1, ce qui est compréhensible puisque la connexion 220 kV Mettlen – Airolo n'est pas câblée.

Un facteur d'amplification extrêmement élevé de plus de 10 sur l'harmonique 5 peut être observé dans le scénario 2 à 220 kV Airolo en raison de l'introduction de projets de câbles (18 km de câble du Gothard) dans l'axe de propagation de l'harmonique. Ce cas a également été identifié dans des études antérieures menées par RTEi [2.3] et Enernex [2.4].

Toutefois, avec l'intégration d'un autre projet de câble de 12 km au sud de Mettlen dans le scénario 3, le facteur d'amplification de l'harmonique 5 diminue pour se situer légèrement au-dessus de 6. Ceci peut être compris en examinant la résonance harmonique le long de la liaison 220 kV Mettlen – Airolo pour les trois scénarios, comme le montre la Figure 2-37.

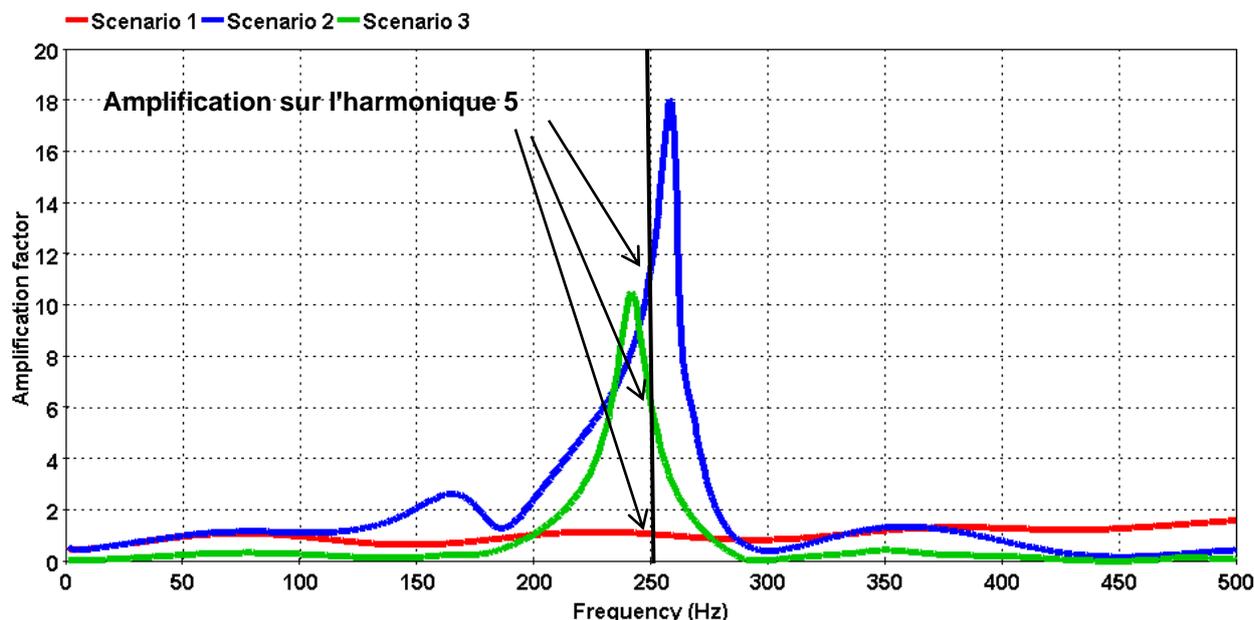


Figure 2-37: Résonance harmonique le long de 220 kV Mettlen – Airolo pour les scénarios 1, 2 et 3 dans les conditions de réseau données

Comme le montre la Figure 2-37, l'introduction du câble du Gothard de 18 km dans le scénario 2 entraîne une résonance harmonique culminant légèrement au-dessus de 250 Hz (l'harmonique 5), ce qui conduit à un facteur d'amplification élevé sur l'harmonique 5 à 220 kV Airolo. Cependant, bien que l'intégration d'un autre câble de 12 km au sud de Mettlen déplace la résonance harmonique en dessous de 250 Hz, le facteur d'amplification sur l'harmonique 5 de 250 Hz diminue également. Dans l'ensemble, il est entendu qu'en général, l'amplification harmonique s'intensifie au fur et à mesure que d'avantage de câbles sont intégrés dans le réseau. Cependant, quand la résonance harmonique se déplace dans des plages de fréquences suffisamment basses, la relation entre le facteur d'amplification pour un certain rang harmonique et le nombre de projets de câbles peut devenir imprévisible. Par conséquent, il est absolument nécessaire de réaliser des études détaillées sur l'amplification harmonique en tenant compte des variations des configurations et des conditions du réseau pour tout nouveau projet de câble à intégrer dans le réseau.

2.3.2.2 Impact de la puissance du court-circuit sur l'amplification des harmoniques

La puissance de court-circuit du réseau joue un rôle important dans l'amplification des harmoniques de rang inférieur. En général, l'amplification des harmoniques de rang inférieur s'intensifie lorsque la puissance de court-circuit du réseau est faible. Toutefois, l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau devrait permettre de déplacer la résonance harmonique vers des fréquences plus élevées et d'amortir le pic de résonance, atténuant ainsi l'amplification des harmoniques de rang inférieur.

Les cas d'essai suivants sont présentés pour démontrer l'impact de la puissance de court-circuit du réseau sur l'amplification des harmoniques de bas ordre (c'est-à-dire les harmoniques 5 et 7) (comparaison entre le SCL faible et le SCL élevé) :

Point d'injection	Point d'observation	Scénario	Configuration du réseau	Comparaison
220 kV Mettlen	220 kV Airolo	2	N-2 sur 220 kV Airolo – Rotondo et Airolo – Lavorgo	SCL faible et élevé
380 kV Romanel	380 kV Bâtiaz 380 kV Châtelard 380 kV Nant de Drance 220 kV Châtelard	2	N-1 sur 220 kV La Bâtiaz – Chamoson	SCL faible et élevé
380 kV Romanel	220 kV Romanel 220 kV Banlieue Ouest 220 kV Crans 220 kV Foretaille 380 kV Bâtiaz 380 kV Châtelard 380 kV Nant de Drance 220 kV Châtelard	3	N-1 sur 220 kV La Bâtiaz – Chamoson	SCL faible et élevé

2.3.2.2.1 Amplification des harmoniques à 220 kV Airolo

La configuration du réseau près de 220 kV Airolo pour le scénario 2 du cas démonstratif est illustrée dans la Figure 2-38.

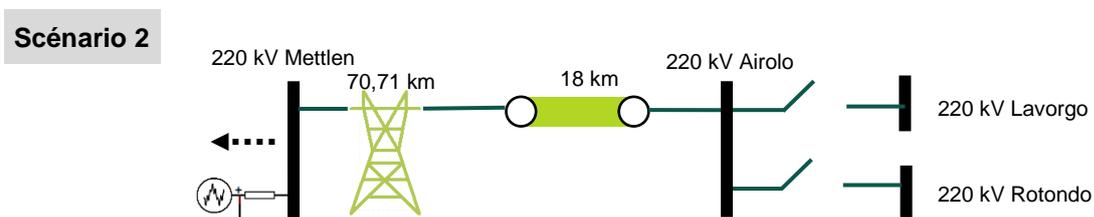


Figure 2-38: Configuration du réseau près de 220 kV Airolo pour le cas démonstratif – Scénario 2

Il convient de noter que le câble du Gothard de 18 km est introduit dans le scénario 2 au nord de 220 kV Airolo.

Les facteurs d'amplification observés à 220 kV Airolo pour le cas démonstratif avec SCL faible et élevé sont présentés dans le Tableau 2-19.

	AF sur la 5		AF sur la 7	
	SCL faible	SCL élevé	SCL faible	SCL élevé
220 kV Airolo	11.32	1.306	7.322	1.387

Tableau 2-19: Comparaison de l'AF à 220 kV Airolo entre le SCL bas et le SCL haut pour les injections d'harmoniques à 220 kV Mettlen – Scénario 2

Remarques : Comme nous l'avons déjà observé dans 2.3.2.1.3, l'harmonique 5 peut être sévèrement amplifiée avec des injections d'harmoniques à 220 kV Mettlen lorsque 220 kV Airolo est isolé de 220 kV Rotondo et 220 kV Lavorgo dans des conditions de faible SCL. Cependant, l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau peut effectivement diminuer le facteur d'amplification de près de 40%.

Pour plus d'informations, la résonance harmonique le long de la liaison 220 kV Mettlen – Airolo pour les SCL faible et élevé dans les conditions de réseau données est représentée dans la Figure 2-39.

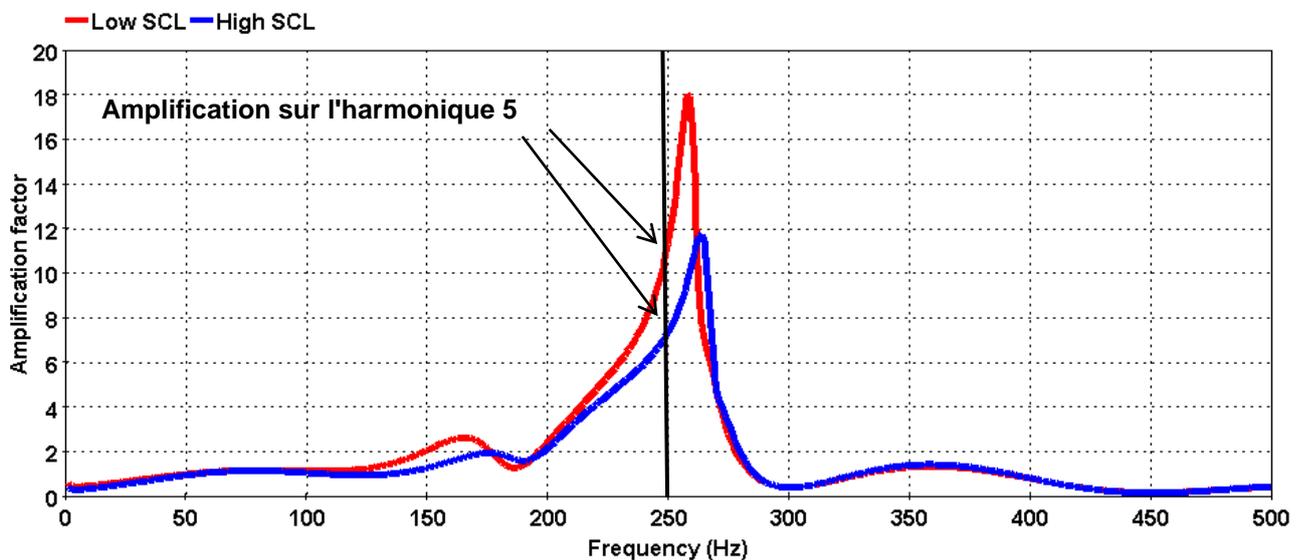


Figure 2-39: Résonance harmonique le long de 220 kV Mettlen – Airolo pour les SCL faibles et élevés dans les conditions de réseau données

Comme le montre la Figure 2-39, l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau ne déplace pas seulement légèrement la résonance harmonique vers des fréquences plus élevées, mais elle atténue également le pic de résonance le long de la liaison 220 kV Mettlen – Airolo. Avec une valeur supérieure à 7, bien que le facteur d'amplification avec un SCL élevé soit encore assez élevé, il a été efficacement réduit par rapport à une valeur très critique de 11.

2.3.2.2.2 Scénario 2 – amplification des harmoniques à 380 kV Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance et 220 kV Châtelard

La configuration du réseau près de 380 kV Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance, et 220 kV Châtelard pour le scénario 2 du cas démonstratif est illustrée dans la Figure 2-40.

Scénario 2

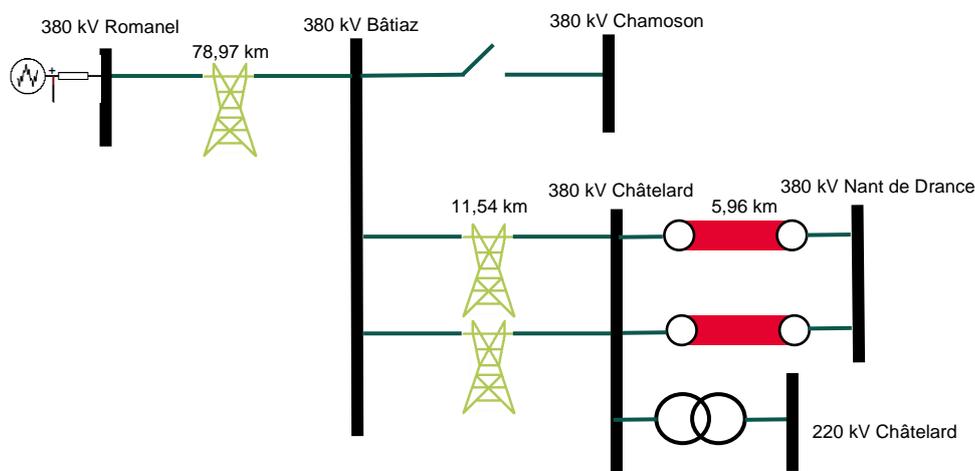


Figure 2-40: Configuration du réseau à proximité de 380 kV Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance et 220 kV Châtelard pour le cas démonstratif – Scénario 2

À noter que dans le scénario 2, les seuls systèmes de câbles dans cette zone de réseau sont les câbles à double circuit 380 kV Châtelard – Nant de Drance, d'une longueur de 5,96 km. Dans la configuration de réseau donnée, les câbles de Nant de Drance sont connectés radialement à la source harmonique à 380 kV Romanel.

Les facteurs d'amplification observés à 380 kV Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance et 220 kV Châtelard pour le cas démonstratif avec SCL faible et élevé sont présentés dans le tableau suivant, Tableau 2-20.

	AF sur la 5		AF sur la 7	
	SCL Faible	SCL élevé	SCL faible	SCL élevé
380 kV Bâtiaz	1.262	0.877	4.542	1.728
380 kV Châtelard	1.280	0.874	4.777	1.784
380 kV Nant de Drance	1.282	0.871	4.809	1.789
220 kV Châtelard	1.011	0.582	3.894	1.223

Tableau 2-20: Comparaison de l'AF à 380 kV Bâtiaz, 380 kV Châtelard, 380 kV Nant de Drance, et 220 kV Châtelard entre SCL faible et élevé pour les injections d'harmoniques à 380 kV Romanel – Scénario 2

Remarques : Comme nous l'avons déjà vu dans la section 2.3.2.1.2, des facteurs d'amplification critiques sur l'harmonique 7 peuvent être observés dans la zone de Nant de Drance pour les deux niveaux de tension avec des conditions SCL faibles lorsque les harmoniques sont injectées à 380 kV Romanel. Néanmoins, avec un SCL élevé dans le réseau, les facteurs d'amplification deviennent non critiques avec la même topologie de circuit.

Pour plus d'informations, la résonance harmonique le long des chemins 380 kV Romanel – Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance pour les SCL bas et élevés dans les conditions de réseau données est représentée dans la Figure 2-41.

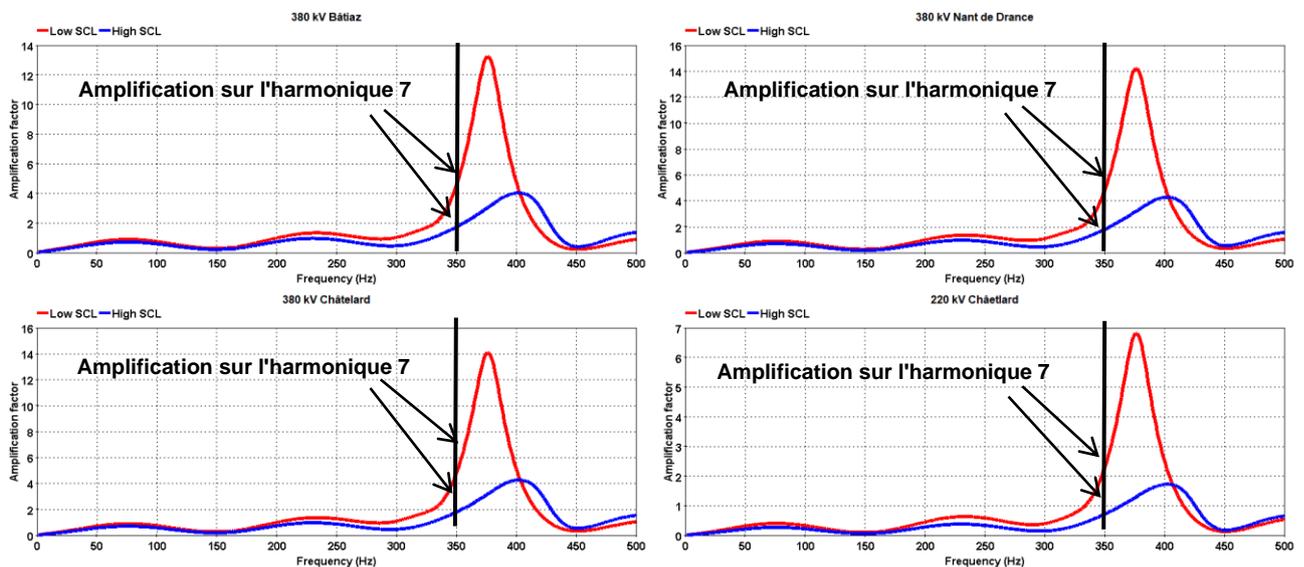


Figure 2-41: Résonance harmonique le long du réseau 380 kV Romanel – Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance pour des SCL faibles et élevés dans les conditions de réseau données

Comme le montre la Figure 2-41, les câbles de Nant de Drance, ainsi que la topologie du réseau (N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Chamoson) entraînent une résonance harmonique culminant autour de 375 Hz en condition de faible SCL. Cela conduit à une forte amplification de l'harmonique 7 (c.-à-d. 350 Hz). Cependant, l'augmentation du SCL non seulement déplace la résonance harmonique vers des fréquences encore plus élevées, mais elle atténue aussi considérablement le pic de résonance, ce qui se traduit par une amplification très atténuée sur l'harmonique 7.

La Figure 2-41 indique également qu'avec l'intégration d'un plus grand nombre de câbles dans cette zone de réseau, le pic de résonance harmonique est susceptible de se déplacer davantage vers l'harmonique 7. Avec son impédance de crête élevée, on peut s'attendre à des problèmes encore plus critiques d'amplification des harmoniques.

2.3.2.2.3 Scénario 3 – amplification des harmoniques le long des liaisons 380 kV Romanel – Nant de Drance et 220 kV Romanel – Foretaille

La configuration du réseau dans le scénario 3 près de 380 kV Romanel jusqu'à 380 kV Bâtiaz et 220 kV Foretaille est illustrée dans la Figure 2-42.

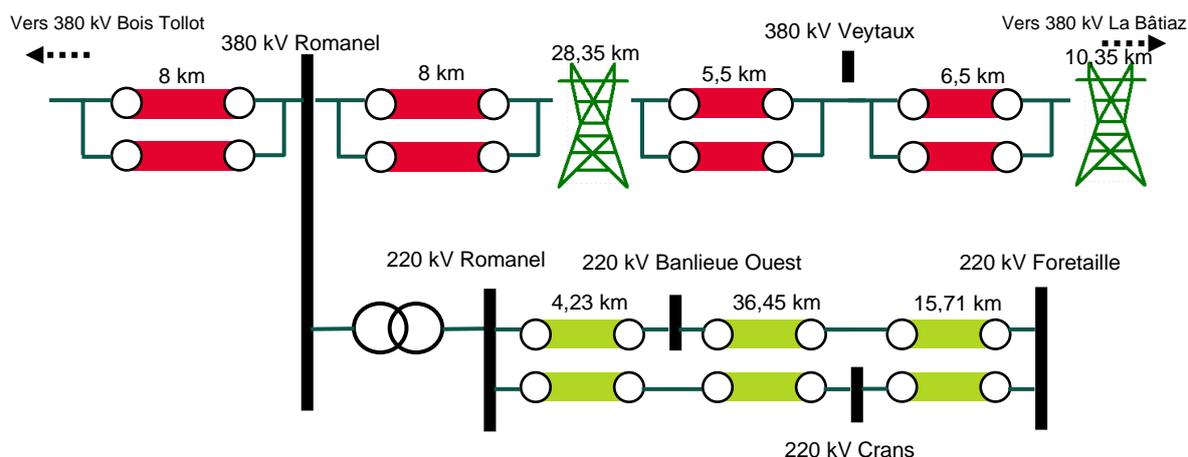


Figure 2-42: Configuration du réseau près de 380 kV Romanel pour le cas démonstratif – Scénario 3

Le chemin de transmission de 58,7 km dans le scénario 3 de 380 kV Romanel vers 380 kV La Bâtiaz devient une section mixte ligne/câble avec un total de 40 km de câbles (deux câbles par phase), tandis que la liaison de 57 km 220 kV Romanel – Foretaille est entièrement réalisée avec des câbles souterrains.

Les facteurs d'amplification aux points d'observation pour le cas démonstratif avec un SCL faible et élevé sont présentés dans le tableau suivant, Tableau 2-21.

	AF sur la 5		AF sur la 7	
	SCL faible	SCL élevé	SCL faible	SCL élevé
220 kV Romanel	1.278	3.051	0.335	0.250
220 kV Banlieue Ouest	1.355	3.204	0.408	2.257
220 kV Crans	1.461	3.433	0.529	0.343
220 kV Foretaille	1.368	3.207	0.496	0.306
380 kV Bâtiaz	2.005	1.364	7.887	11.260
380 kV Châtellard	2.033	1.360	8.287	11.627
380 kV Nant de Drance	2.036	1.355	8.337	11.660
220 kV Châtellard	1.605	0.906	6.810	7.972

Tableau 2-21: Comparaison de l'AF à 220 kV Romanel, 220 kV Banlieue Ouest, 220 kV Crans, 220 kV Foretaille, 380 kV Bâtiaz, 380 kV Châtellard, 380 kV Nant de Drance, et 220 kV Châtellard entre SCL faible et élevé pour les injections d'harmoniques à 380 kV Romanel – Scénario 3

Remarques : Dans des conditions de faible SCL, aucune amplification harmonique ne peut être observée sur le chemin 220 kV Romanel – Foretaille, alors que des facteurs d'amplification critiques sur l'harmonique 7 sont observés à différents endroits dans la région de Nant de Drance.

Au lieu d'atténuer les résonances harmoniques, l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau dans ce cas augmente encore les facteurs d'amplification sur l'harmonique 7 dans la région de Nant de Drance à plus de 10 (extrêmement critique). Parallèlement, les facteurs d'amplification initialement modérés sur l'harmonique 5 le long du chemin 220 kV Romanel – Foretaille deviennent également critiques avec une puissance de court-circuit du réseau élevée.

Pour plus d'informations, la résonance harmonique le long des chemins 380 kV Romanel – Bâtiatz – Châtelard – Nant de Drance et 220 kV Romanel – Banlieue Ouest – Crans – Foretaille pour des SCL faibles et élevés dans les conditions de réseau données est représentée dans la Figure 2-43.

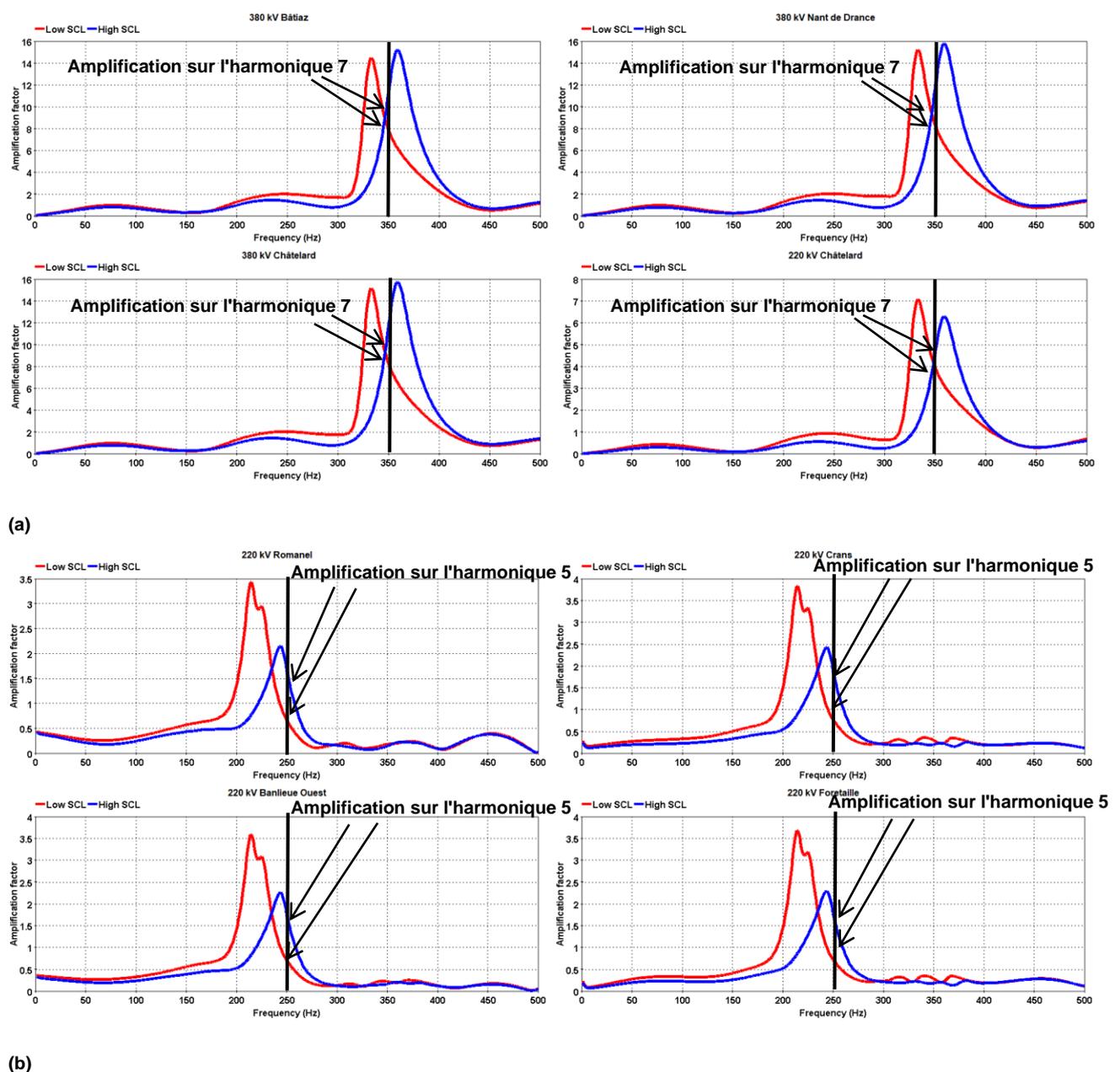


Figure 2-43: Résonance harmonique le long des chemins 380 kV Romanel – Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance et 220 kV Romanel – Banlieue Ouest – Crans – Foretaille pour des SCL faibles et élevés dans les conditions de réseau données, (a) 380 kV Romanel – Bâtiaz – Châtelard – Nant de Drance, (b) 220 kV Romanel – Banlieue Ouest – Crans – Foretaille.

Comme le montre la Figure 2-43 (a), la fréquence de résonance harmonique le long du chemin 380 kV Romanel – Nant de Drance dans des conditions de faible SCL en divers endroits de la région de Nant de Drance est inférieure à 350 Hz (c.-à-d. l'harmonique 7). Avec une augmentation de la puissance de court-circuit du réseau, cette résonance harmonique se déplace vers une fréquence légèrement supérieure à 350 Hz. La résonance harmonique passe d'une fréquence inférieure à la fréquence intéressée (c.-à-d. 350 Hz, l'harmonique 7) à une fréquence supérieure, ce qui entraîne le comportement observé dans ce cas.

Des observations similaires peuvent être faites pour la Figure 2-43 (b), où la fréquence de résonance harmonique le long de l'axe 220 kV Romanel – Foretaille dans des conditions de faible SCL est bien inférieure à 250 Hz (c.-à-d. l'harmonique 5). L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau rapproche la résonance harmonique de 250 Hz, ce qui entraîne une amplification plus importante de l'harmonique 5.

Globalement, on comprend qu'en général, une puissance de court-circuit élevée du réseau devrait déplacer la résonance harmonique vers des fréquences plus élevées et atténuer le pic de résonance, ce qui conduit à des facteurs d'amplification atténués sur les harmoniques de rang inférieur. Toutefois, dans une zone densément câblée où la résonance harmonique se situe bien dans la gamme des basses fréquences, l'impact réel de la puissance de court-circuit du réseau sur l'amplification des harmoniques de rang inférieur devient imprévisible en raison de la relation incertaine entre les fréquences de résonance harmonique et les fréquences d'intérêt (c.-à-d. les harmoniques 5 et 7). Par conséquent, une fois de plus, il est absolument nécessaire de réaliser des études détaillées sur l'amplification des harmoniques en tenant compte des variations des configurations et des conditions du réseau pour tout nouveau projet de câble à intégrer dans le réseau.

2.3.2.3 Impact d'un projet de câble sur l'amplification des harmoniques dans les zones éloignées

Le phénomène d'amplification harmonique devient une problématique complexe avec l'augmentation du degré d'intégration des câbles dans le réseau. Dans un réseau densément câblé, l'amplification des harmoniques de rang inférieur dans une certaine zone du réseau dépend non seulement des projets de câblage dans la zone locale, mais peut également être influencée par un autre projet de câblage dans une zone éloignée. En d'autres termes, la mise en œuvre spécifique d'un certain segment de réseau avec des lignes aériennes ou des câbles peut avoir un impact sur l'amplification des harmoniques de rang inférieur dans une zone éloignée. Un exemple est présenté dans cette section pour démontrer comment, dans le scénario 3, la mise en câble d'un segment de réseau de 14,56 km dans la région de Zurich aurait un impact sur l'amplification des harmoniques au Tessin.

Les deux zones de Zurich et du Tessin dans le scénario 3 sont densément câblées, comme le montre la Figure 2-44. Le cas de test suivant est présenté. Il est à noter que dans ce cas de test, des harmoniques sont injectées à 220 kV Mettlen et que les facteurs d'amplification sont observés à différents endroits dans les zones de Zurich et du Tessin dans des conditions SCL optimales. La contingence N-1 considérée, 220 kV Airolo – Lavorgo, est située dans la région du Tessin. L'impact de la mise en œuvre de la connexion 220 kV Altgass – Samstagern, comme le montre la Figure 2-44, avec des lignes aériennes ou des câbles est évalué.

Point d'injection	Point d'observation	Scénario	Configuration du réseau	Comparaison
220 kV Mettlen	220 kV Regensdorf	3	N-1 sur 220 kV Airolo – Lavorgo	Mise en œuvre du câble ou de la ligne du tronçon de 220 kV Altgass – Samstagern
	220 kV Seebach			
	220 kV Auwiesen			
	220 kV Fällanden			
	220 kV Bavona			
	220 kV Peccia			
	220 kV Cavigno			
	220 kV Avegno			

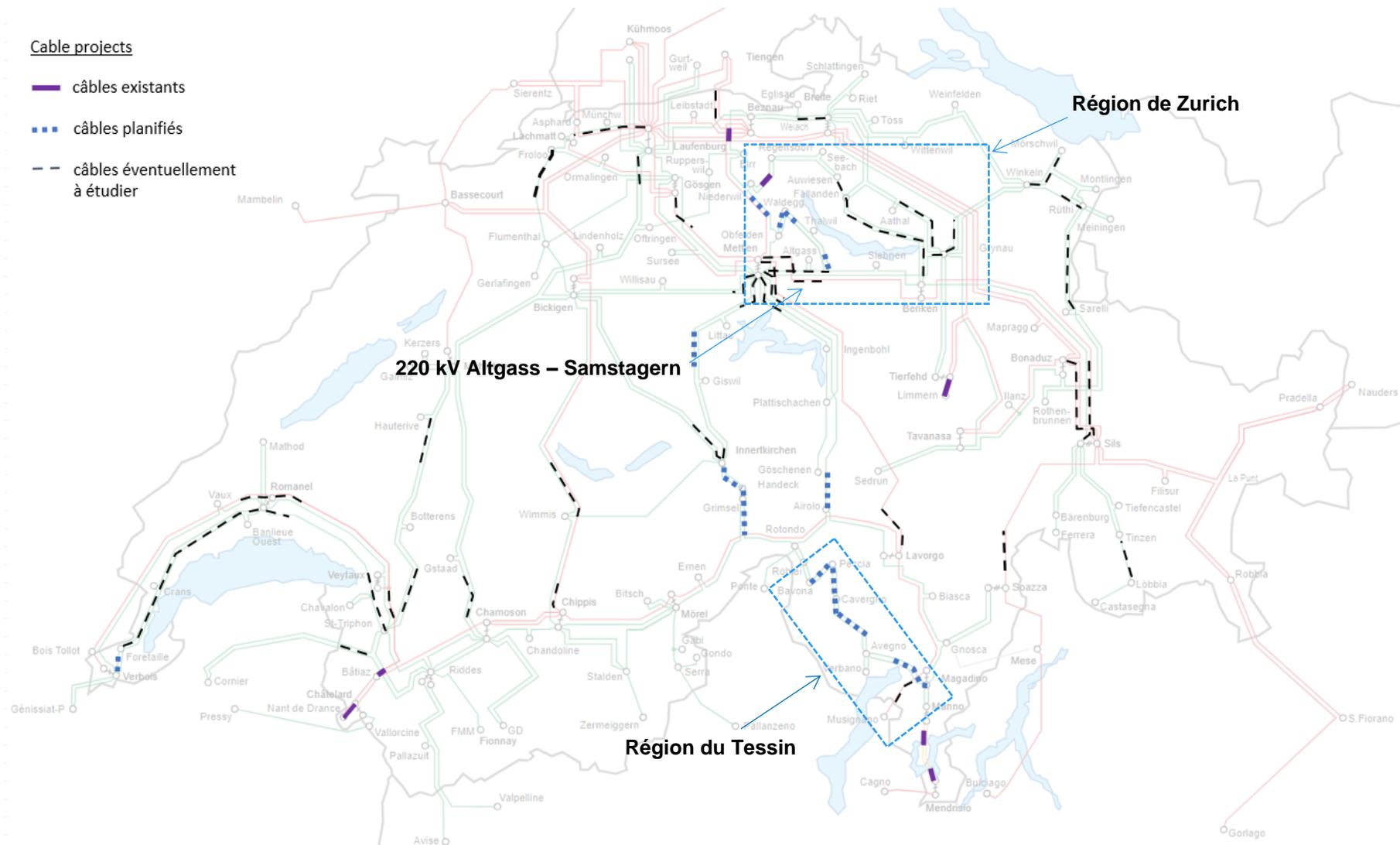


Figure 2-44: Schémas de câblage et de compensation prévus pour le scénario 3

Les facteurs d'amplification observés aux points d'observation pour le cas démonstratif avec les deux implantations de câble et de ligne pour la section 220 kV Altgass – Samstageren sont présentés dans le Tableau 2-22.

	AF sur la 5		AF sur la 7	
	Câble	Ligne	Câble	Ligne
220 kV Regensdorf	0.159	0.108	3.013	1.841
220 kV Seebach	0.120	0.085	3.192	1.956
220 kV Auwiesen	0.111	0.084	3.217	1.973
220 kV Fällanden	0.078	0.097	3.289	2.025
220 kV Bavona	0.582	0.670	3.085	2.421
220 kV Peccia	0.567	0.658	3.128	2.455
220 kV Cavergho	0.546	0.639	3.114	2.444
220 kV Avegno	0.391	0.476	2.170	1.698

Tableau 2-22: Comparaison de l'AF à plusieurs endroits dans les régions de Zurich et du Tessin entre deux mises en œuvre de la liaison 220 kV Altgass – Samstageren pour les injections d'harmoniques à 220 kV Mettlen – Scénario 3

Remarques : On peut l'observer dans le Tableau 2-22: lorsque la liaison 220 kV Altgass – Samstageren est réalisée avec des câbles, dans les conditions de réseau données, des facteurs d'amplification critiques sur l'harmonique 7 peuvent être observés à plusieurs endroits dans les régions de Zurich et du Tessin.

Toutefois, si la liaison 220 kV Altgass – Samstageren reste dans la configuration de la ligne aérienne, les facteurs d'amplification de l'harmonique 7 dans les deux régions de Zurich et du Tessin peuvent être modérément atténués pour être inférieurs aux valeurs critiques de 3.

La mise en œuvre d'un segment individuel et relativement court (~14,56 km) de 220 kV Altgass – Samstageren aurait un impact important sur l'amplification des harmoniques de bas ordre dans une zone géographique éloignée (Tessin), ce qui indique que la problématique d'amplification harmonique peut devenir très délicate lorsque les zones de réseau considérées sont densément câblées. Cela prouve, une fois de plus, la nécessité absolue de réaliser des études détaillées sur l'amplification harmonique pour tout nouveau projet de câble, tout en tenant compte des différentes façons de mise en œuvre possibles pour chaque projet (avec des lignes aériennes ou avec des câbles), en particulier lorsque le degré de câblage dans le réseau augmente.

2.3.3 Conclusions

Les harmoniques sont omniprésentes dans un réseau électrique car elles peuvent être émises par un grand nombre de charges non linéaires et de dispositifs électroniques de puissance. Les harmoniques provenant de ces sources peuvent se propager à travers les impédances du système et s'amplifier dans les zones à forte densité de câbles en raison des résonances, ce qui entraîne des problèmes de qualité de l'énergie, sollicitant et même endommageant différents types d'équipements de réseau.

Des études approfondies de l'amplification des harmoniques au niveau du système ont été réalisées sur la base des trois scénarios de câbles proposés. Les études ont été réalisées à plusieurs endroits du réseau qui peuvent être des points potentiels de pollutions harmoniques, tout en considérant différentes configurations du réseau en termes de contingences et de puissance de court-circuit, en mettant l'accent sur l'amplification des harmoniques 5 et 7 (les plus rencontrées dans les réseaux de transport).

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des études réalisées :

- L'amplification des harmoniques de bas ordre s'aggrave à mesure que le nombre de projets de câbles augmente dans le réseau.

Si une zone de réseau est uniquement composée de lignes aériennes, il ne devrait y avoir aucun risque d'amplification des harmoniques. L'intégration de projets de câbles dans une zone de réseau initialement inductive composée principalement de lignes aériennes introduit des éléments capacitifs dans le réseau, ce qui augmente considérablement les risques d'amplification de certaines harmoniques d'ordre inférieur. En général, plus le nombre de projets de câbles augmente, plus l'amplification des harmoniques de rang inférieur est importante. Il existe toutefois des exceptions à cette règle lorsque la zone du réseau est densément câblée, comme cela est présenté dans la section 2.3.2.1.3. C'est la raison pour laquelle des études détaillées sur l'amplification des harmoniques doivent être réalisées pour tout nouveau projet de câble afin de prévoir tout problème éventuel de résonance harmonique au stade de la planification.

- Une puissance de court-circuit élevée du réseau peut atténuer efficacement les problèmes d'amplification des harmoniques en amortissant les résonances harmoniques dans les zones de réseau faiblement câblées.

En général, l'amplification des harmoniques de rang inférieur est intensifiée lorsque la puissance de court-circuit du réseau est faible. Toutefois, l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau peut généralement atténuer les problèmes liés à l'amplification des harmoniques de rang inférieur en déplaçant la fréquence de résonance harmonique vers des fréquences plus élevées et en amortissant la résonance harmonique sur les différents trajets de déplacement des harmoniques. Toutefois, des exceptions à cette règle sont à nouveau découvertes, comme le montre la section 2.3.2.2.3, ce qui prouve la complexité du problème de l'amplification des harmoniques dans les réseaux densément câblés.

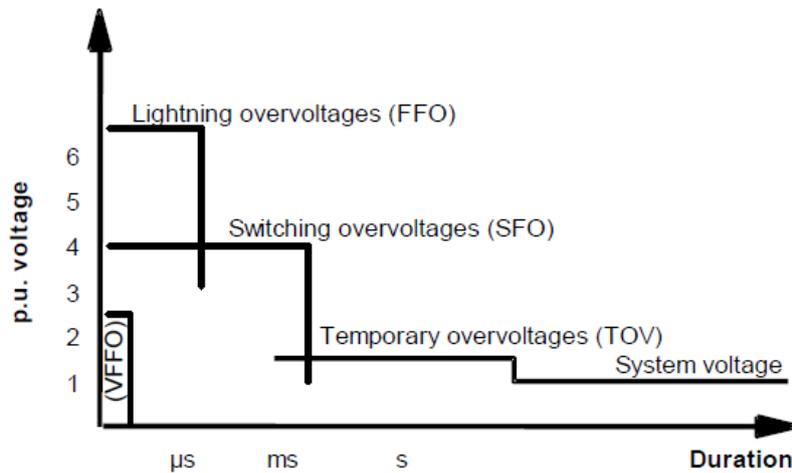
- Un seul projet de câblage dans un réseau densément câblé peut avoir un impact important sur l'amplification des harmoniques dans les zones éloignées.

La problématique d'amplification des harmoniques devient de plus en plus complexe à mesure que de plus en plus de câbles sont intégrés dans le réseau. Dans un réseau densément câblé, la mise en câble d'un certain segment de réseau n'aurait pas seulement un impact sur l'amplification des harmoniques dans la zone locale, mais il pourrait aussi avoir un impact important sur l'amplification des harmoniques de bas ordre dans une zone éloignée. La complexité de cette question démontre une fois de plus la nécessité de réaliser des études d'amplification des harmoniques pour tout nouveau projet de câble à intégrer dans le réseau, tout en tenant compte des différentes façons de mise en œuvre possibles (lignes ou câbles) de chaque projet.

Globalement, l'amplification des harmoniques de bas ordre pendant l'intégration des câbles (en particulier l'intégration intensive des câbles) peut être une question délicate, qui nécessiterait absolument des études détaillées sur l'amplification des harmoniques afin d'identifier les risques, de définir certains principes d'exploitation et de prendre des décisions sur la conception et l'installation des filtres.

2.4 Études temporelles

Avant d'aborder les études présentées dans ce chapitre, il est nécessaire de comprendre les types de surtensions rencontrées dans un réseau électrique. La Figure 2-45 extraite de la norme CEI 60071-4 [2.6] illustre les types et les caractéristiques des surtensions souvent rencontrées dans un réseau électrique.



(a) Types de surtensions à l'exception des surtensions à front très rapide

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_1 \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$3 \text{ ns} < T_1 \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes					1)
Standard withstand test	1)	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	1)

1) To be specified by the relevant apparatus committees.

(b) Classes et formes de surtensions

Figure 2-45: Types et caractéristiques des différentes surtensions rencontrées dans un réseau électrique [2.6]

Comme expliqué dans les chapitres précédents, les résonances harmoniques de bas ordre causées par l'intégration intensive de câbles peuvent être excitées lors de certains événements transitoires, ce qui entraîne la manifestation de TOV. Ces TOV correspondent au type «Low frequency (temporary)», comme le montre la Figure 2-45. Les TOV sont généralement déformés et mal amortis, ce qui peut entraîner des contraintes sur l'équipement haute tension pendant de longues durées, en raison des deux principaux mécanismes suivants [2.1] :

- Contrainte diélectrique pouvant entraîner une défaillance de l'isolement
- Surchauffe de l'équipement et de l'isolement

Étant donné que les normes internationales existantes relatives aux directives d'application de la coordination de l'isolement ne fournissent pas de méthodes pour évaluer ce type de surtensions, les exploitants de réseaux choisissent généralement d'éviter les conditions de résonance qui conduiraient à des TOV excessifs dans la conception et l'exploitation du réseau ou d'adopter des mesures d'atténuation adéquates pour limiter la gravité des TOV.

Par expérience, les événements transitoires suivants sont susceptibles de générer et d'injecter des harmoniques dans le système, entraînant ainsi des TOV dus à l'excitation par résonance :

- Mise sous tension de grands transformateurs de puissance et de réactances shunt saturables
- Mise sous tension des câbles et des bancs de condensateurs
- Élimination des défauts à la terre
- Réenclenchement automatique du disjoncteur
- Îlotage du système

Dans le but de démontrer qu'un niveau élevé d'intégration des câbles entraîne des résonances harmoniques de bas ordre, conduisant ainsi à des TOV excessifs, des études sur la mise sous tension des transformateurs à 380 kV Romanel et à 380 kV Magadino pour les topologies/configurations de réseau problématiques du scénario 3 identifiées dans le chapitre 2 ont été réalisées. Des comparaisons avec les scénarios 1 et 2 dans les mêmes conditions de réseau ont été fournies afin de vérifier si la performance du réseau peut être améliorée avec des degrés inférieurs d'intégration des câbles.

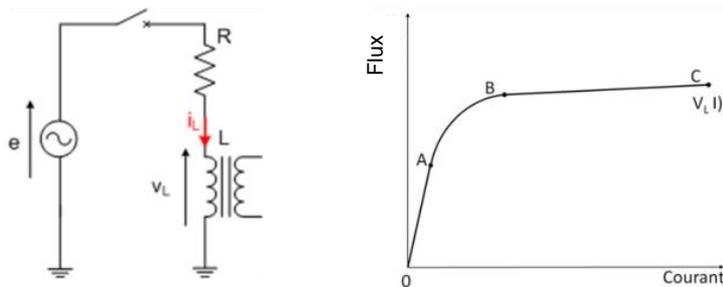
2.4.1 Contexte théorique

2.4.1.1 Saturation du transformateur

La mise sous tension des transformateurs est une opération courante dans le fonctionnement des réseaux électriques. Elle est généralement effectuée sans conséquences négatives pour le réseau car les courants et tensions transitoires générés au cours de ce processus peuvent être amortis en toute sécurité en quelques secondes dans le réseau électrique. Néanmoins, dans certaines situations, la surtension temporaire (TOV) générée par les résonances parallèles, excitées par les courants d'appel des transformateurs, peut entraîner des problèmes de qualité de l'énergie, voire une dégradation de l'isolement dans le transformateur.

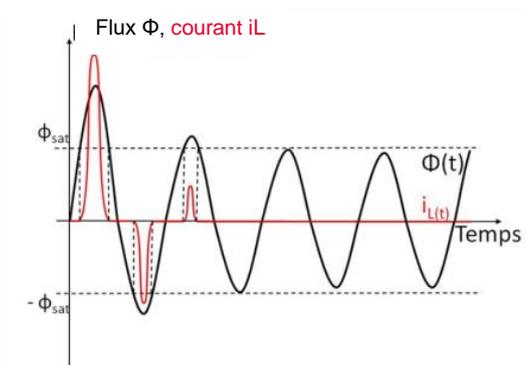
Les TOV causés par la résonance parallèle pendant la mise sous tension du transformateur proviennent des propriétés non linéaires de l'élément inductif du transformateur de puissance (noyau de fer) qui peut être saturé en raison d'un changement brusque de la tension (c.-à-d. commutation, synchronisation déphasée du générateur, défauts externes et leur élimination, etc.). Le courant magnétisant fortement déformé qui en résulte, à savoir le courant d'appel, contient de riches composantes harmoniques sur un large spectre de fréquences qui peuvent être amplifiées par de grandes amplitudes d'impédance à certains points de fréquence de résonance parallèles, ce qui conduit à un TOV aux bornes du transformateur.

Afin d'expliquer clairement le comportement non linéaire de la branche magnétisante d'un transformateur de puissance pendant la mise sous tension, le transformateur peut être simplifié à une inductance non linéaire L connectée en série avec une résistance R représentant la résistance série du réseau et la résistance de l'enroulement du transformateur, alimentée par une source de tension sinusoïdale représentée par e comme le montre la Figure 2-46 (a) [2.7].



a) Mise sous tension d'un transformateur non chargé

b) Courbe de saturation



c) Flux et courant d'une inductance non linéaire à l'excitation

Figure 2-46: Principe de fonctionnement d'un transformateur non chargé

La relation entre le flux magnétique de l'inductance non linéaire Φ et le courant de magnétisation I (tous deux en valeurs efficaces) est illustrée dans la Figure 2-46 (b). On peut observer que le courant I varie de manière non linéaire par rapport au flux Φ et trois régions différentes peuvent être distinguées :

- **La région linéaire OA** : Dans cette région, lorsque le flux magnétique Φ augmente, le courant I augmente linéairement. L'inductance correspondante n'est pas saturée et se comporte comme une inductance constante L_0 égale à l'inductance de l'enroulement du transformateur. En raison de sa valeur relativement élevée L_0 , une forte augmentation du flux magnétique Φ ne provoque qu'une augmentation marginale du courant.
- **La région linéaire BC** : Dans cette région, l'inductance du noyau de fer du transformateur est très saturée et le noyau lui-même, constitué de matériaux ferromagnétiques, se comporte presque comme de l'air avec une perméabilité relative proche de 1. La valeur de l'inductance correspondante peut être représentée par une constante L_{sat} . Dans cette région, même une augmentation marginale du flux magnétique entraînerait une amplification du courant en raison de la faible valeur de L_{sat} .
- **La région non linéaire AB** : il s'agit de la région où se trouve le coude du flux magnétique. Il n'est pas possible de définir une valeur d'inductance constante équivalente en raison de la relation non linéaire entre Φ et I .

Lorsqu'un transformateur fonctionne en régime permanent, la relation entre le flux magnétique et le courant se situe généralement dans la région linéaire OA avec la valeur de l'inductance L_0 comme défini précédemment. Cependant, lors de la mise sous tension, le flux magnétique peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées, déplaçant le point de fonctionnement de l'inductance au-delà de la région OA et provoquant ainsi la saturation du transformateur [2.7]. Étant donné que l'inductance du noyau du transformateur est différente dans les différentes régions distinguées dans la Figure 2-46 (b) (c.-à-d. $L_0 \gg L_{sat}$), lorsque le noyau du transformateur entre et sort de la saturation, c'est-à-dire lorsque le point de fonctionnement se déplace entre les différentes régions de la Figure 2-46 (b), le courant dans l'inductance ne reste pas sous une forme sinusoïdale cohérente (dans la Figure 2-46 (c)), ce qui donne lieu à un large spectre d'harmoniques.

2.4.1.2 Facteurs affectant le niveau de saturation du transformateur

Le niveau de saturation d'un transformateur peut être caractérisé par l'ampleur des courants d'appel induits. Les principaux facteurs affectant l'ampleur des courants d'appel pendant la mise sous tension [2.8] sont les suivants :

- Conception du transformateur
- Conditions initiales
- Facteurs liés au réseau

La conception d'un transformateur détermine son point de fonctionnement en régime permanent sur la courbe de saturation (Figure 2-46 (b)). Comme nous l'avons vu précédemment, un transformateur peut être facilement amené à saturation si son point de fonctionnement est proche du coude (région AB dans la Figure 2-46 (b)).

Les conditions initiales qui affectent l'ampleur du courant d'appel sont principalement le flux rémanent et l'excitation au point sur l'onde (POW, anglais : Point-on-Wave). Le flux rémanent est le flux qui reste piégé dans le noyau de fer du transformateur en raison d'un processus de désexcitation antérieur et qui détermine le décalage DC initial du flux dans le noyau. Il s'ajoute au flux pour saturer davantage le transformateur. D'autre part, le POW au moment de la mise sous tension détermine l'amplitude maximale du courant d'appel.

Les facteurs du réseau qui déterminent le niveau de saturation sont principalement la topologie du réseau et l'amortissement. Comme l'a montré le chapitre 2, plusieurs topologies qui provoqueraient des résonances parallèles à des fréquences harmoniques d'ordre inférieur ont été identifiées pour le scénario 3. Une fois ces résonances activées, il faut s'attendre à des TOV importants et peu amortis. En tant que facteur d'impact positif, un amortissement suffisant permet d'atténuer les résonances, améliorant ainsi le comportement transitoire du réseau et garantissant un fonctionnement stable.

2.4.2 Méthodologie

Pour un transformateur non chargé donné et les conditions du réseau, les facteurs déterminant les TOV exacts à rencontrer sont limités au flux rémanent et aux instants de fermeture du disjoncteur (POW). Afin de trouver les scénarios les plus défavorables en termes de TOV, il est nécessaire d'étudier différentes variations du flux rémanent du transformateur et des instants de fermeture du disjoncteur. Des exemples d'ensembles de variantes pour le flux rémanent du transformateur et les instants de fermeture du disjoncteur sont donnés dans le Tableau 2-23 et le Tableau 2-24.

Scénario	$\Phi_{0A}(\text{pu})$	$\Phi_{0B}(\text{pu})$	$\Phi_{0C}(\text{pu})$
1	0	0	0
2	0.8	-0.4	-0.4

3	0	0.8	-0.8
4	-0.8	0.4	0.4
5	0	-0.8	0.8
6	0.4	-0.2	-0.2
7	0	0.4	-0.4
8	-0.4	0.2	0.2
9	0	-0.4	0.4

Tableau 2-23: Exemple de variation pour le flux rémanent d'un transformateur

Scénario	$t_{close}(s)$
1	0.500
2	0.501
3	0.502
4	0.503
5	0.504
6	0.505
7	0.506
8	0.507
9	0.508
10	0.509
11	0.510
12	0.511
13	0.512
14	0.513
15	0.514
16	0.515

17	0.516
18	0.517
19	0.518
20	0.519

Tableau 2-24: Exemple de variation pour l'instant de fermeture du disjoncteur

Le Tableau 2-23 énumère 9 ensembles de valeurs possibles du flux rémanent du transformateur, et le Tableau 2-24 2 donne 20 instants possibles de fermeture du disjoncteur dans un cycle de 50 Hz. Il convient de noter que l'exemple du Tableau 2-24 considère que les trois phases du disjoncteur se ferment au même instant et entre [0.50s, 0.52s].

Au lieu d'effectuer les 180 simulations dans le but de trouver le scénario le plus défavorable pour les TOV, ce travail se concentre davantage sur la comparaison de la performance transitoire du réseau entre les trois différents scénarios de câbles lors de la mise sous tension des transformateurs dans certaines conditions défavorables du réseau. Ces conditions défavorables sont les suivantes :

- SCL faible
- Les contingences N-1 (et N-2) telles qu'identifiées dans les cas critiques de la section 2.2.2.1, conduisant à des résonances parallèles d'ordre inférieur
- Le disjoncteur se ferme au passage à zéro de la phase a, avec un flux rémanent maximal sur la phase a, ce qui entraîne une saturation profonde.

Les flux rémanents suivants ont été considérés :

$\Phi_{0A}(\text{pu})$	$\Phi_{0B}(\text{pu})$	$\Phi_{0C}(\text{pu})$
0.8	-0.4	-0.4

En fonction du flux rémanent choisi, les temps de fermeture des disjoncteurs suivants sont appliqués de manière à ce que la phase a soit fermée au passage à zéro de la tension :

t_A (s)	t_B (s)	t_C (s)
0.115375	0.115375	0.115375

2.4.3 Résultats et discussions

Les deux principales conclusions suivantes peuvent être tirées des études réalisées :

- On peut s'attendre à des TOV critiques dus à la résonance parallèle dans le scénario 3 lors de la mise sous tension de transformateurs dans des endroits du réseau où des risques potentiels de résonance parallèle ont été identifiés à partir d'études de balayage de fréquences, comme à 380 kV Romanel et à 380 kV Magadino (selon la section 2.2.2.1). Cependant, la réduction du nombre de projets de câbles, comme dans le scénario 2, peut considérablement atténuer les problèmes potentiels causés par les TOV (voir section 2.4.3.1).

- La puissance de court-circuit d'un endroit du réseau (nœud) joue un rôle important dans l'impact de l'intégration des câbles à proximité. Un câblage intensif à proximité d'un nœud faible (endroit du réseau avec une faible puissance de court-circuit) tend à augmenter considérablement les risques de TOV graves et mal amortis pendant les transitoires du réseau, alors que l'impact d'un câblage intensif autour d'un nœud fort (endroit du réseau avec une puissance de court-circuit élevée) est généralement atténué ou moins prononcé. Par conséquent, la puissance de court-circuit à un certain endroit du réseau pourrait servir de critère pour déterminer si un projet de câblage peut être mis en œuvre sans problème ou si des études dynamiques supplémentaires sont nécessaires. Ceci a été démontré dans l'étude complémentaire (voir section 2.4.3.2).

Les deux principales conclusions ci-dessus sont développées dans les sections respectives.

2.4.3.1 Cas critiques de TOV

Selon les résultats de la section 2.2.2.1 du chapitre 2, les cas suivants du scénario 3 de mise sous tension du transformateur ont été réalisés, où l'on peut s'attendre à des cas critiques de TOV provoqués par la résonance parallèle :

Emplacement du transformateur	Lieu de mise sous tension	Contingence	Résonance parallèle du réseau
Romanel	380 kV Romanel	(Cas 6) N-2 sur 380 kV Romanel – Bois Tollot et La Bâtiaz – Chamoson	Harmonique 2
Romanel	380 kV Romanel	(Cas 5) N-1 sur 380 kV La Bâtiaz – Chamoson	Harmonique 3
Magadino	380 kV Magadino	(Cas 1) N-1 sur 380 kV Magadino – Lavorgo	Harmonique 3

Des comparaisons avec le scénario 2 avec moins de projets de câblage sont fournies pour démontrer l'amélioration de la performance du système avec des degrés de câblage plus faibles.

2.4.3.1.1 Mise sous tension du transformateur à 380 kV Romanel avec contingence N-2 (cas 6)

2.4.3.1.1.1 Scénario 3

Tout d'abord, pour rappel, l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour la contingence N-2 correspondant (cas 6) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 sont présentées dans la Figure 2-47.

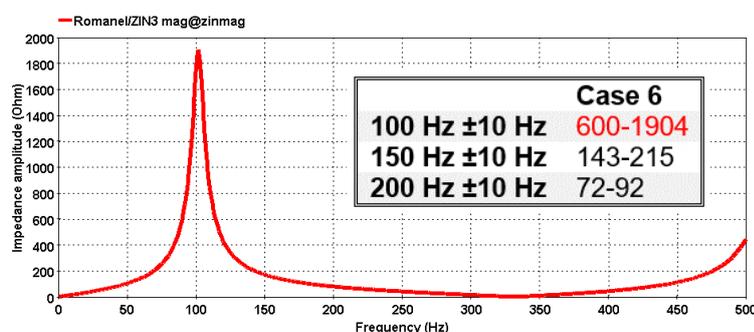


Figure 2-47: Impédance harmonique à 380 kV Romanel pour le cas 6 (contingence N-2) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques de rang inférieur

Comme cela a été expliqué au chapitre 2, section 2.2.2.1.1, les TOV causés par l'excitation de la résonance parallèle à l'harmonique 2 peuvent être attendus pendant la mise sous tension du transformateur à 380 kV Romanel dans les conditions de réseau considérées.

Les tensions phase-terre (en haut) et les tensions phase-phase (en bas) à 380 kV Romanel pour les 5 premières secondes et pour la première seconde de la simulation sont présentées dans la Figure 2-48.

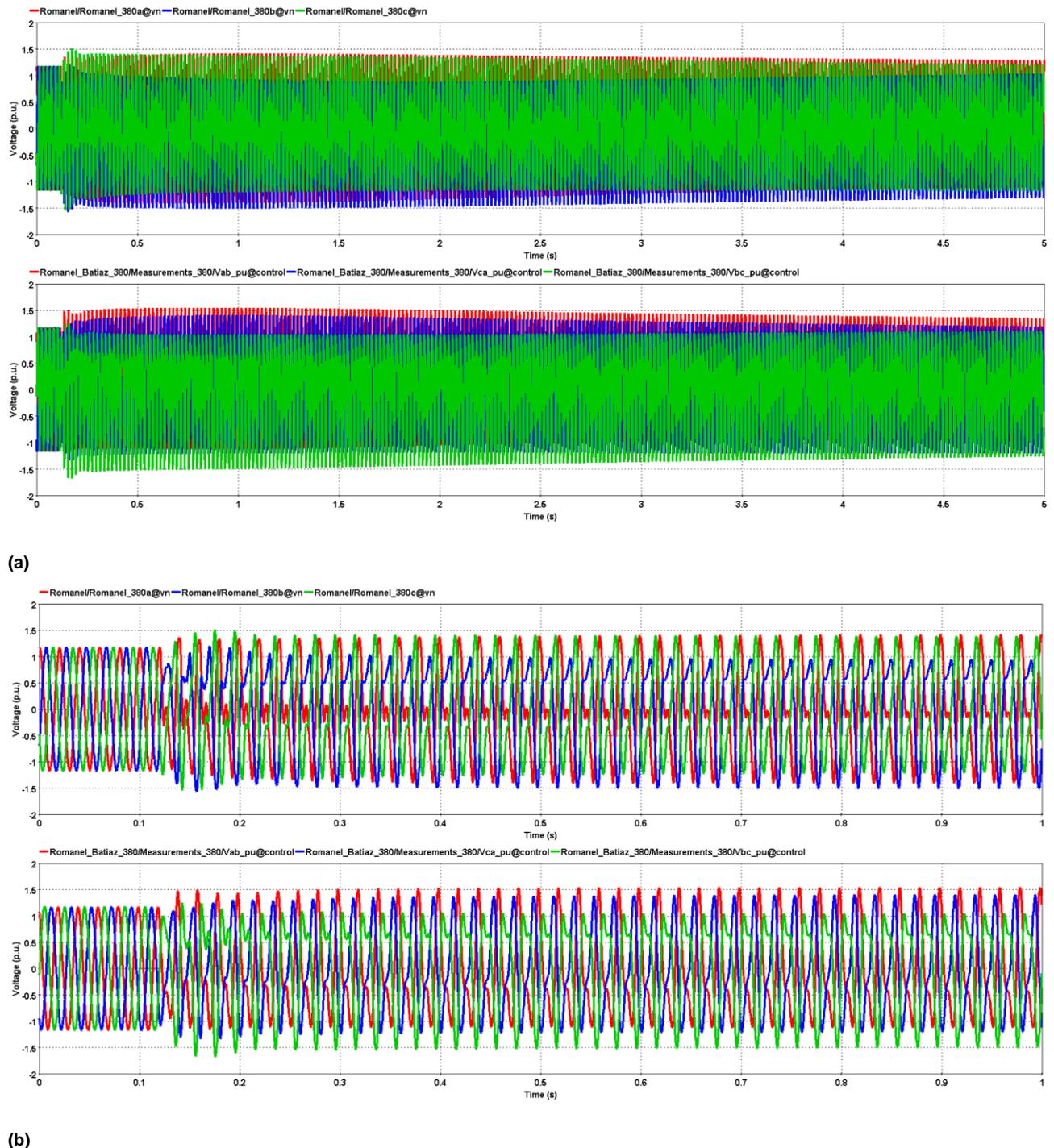


Figure 2-48: Tensions phase-terre et tensions phase-phase à 380 kV Romanel – cas 6, scénario 3, (a) pour les 5 premières secondes de simulation, (b) pour la première seconde de simulation

Remarques : De fortes distorsions harmoniques des TOV peuvent être observées après la fermeture du disjoncteur. L'amplitude maximale des tensions phase-terre et phase-phase dépasse 1,5 pu. Ce cas est extrêmement critique car les TOV élevés et mal amortis devraient exercer des contraintes diélectriques et thermiques considérables sur l'équipement et l'isolement du réseau à proximité de 380 kV Romanel.

Le courant d'appel du transformateur pour la première seconde de la simulation ainsi que ses composantes harmoniques (à partir de l'analyse de Fourier) pour l'intervalle de [0.2s,1.0s] sont représentés dans la Figure 2-49.

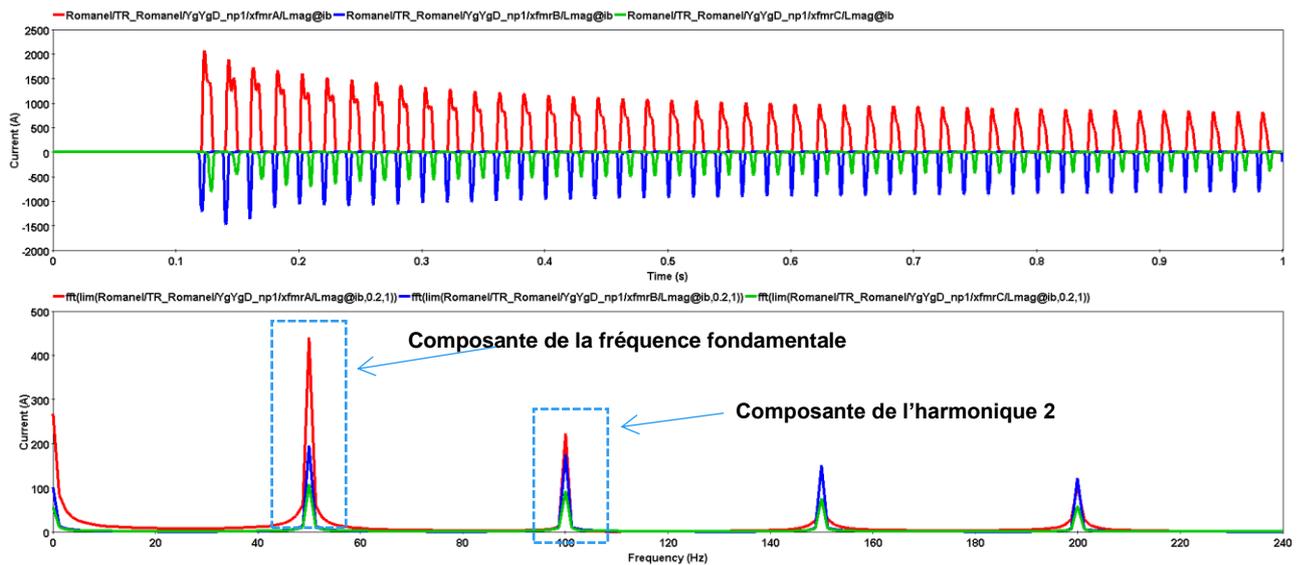


Figure 2-49: Courant d'appel du transformateur et ses composantes harmoniques pendant l'intervalle de [0.2s, 1.0s]

Remarques : Tout d'abord, comme le montre la Figure 2-49, le courant d'appel de la phase a a une amplitude maximale à la fréquence fondamentale. Ceci est raisonnable puisque l'instant de fermeture du disjoncteur est choisi au passage par zéro de la tension entre la phase a et la terre.

Deuxièmement, l'amplitude du courant d'appel diminue à mesure que l'ordre des harmoniques augmente (en règle générale, la diminution est proportionnelle à $1/n$ [2.1]). Cela indique que la composante de l'harmonique 2 sera amplifiée par la résonance parallèle, ce qui entraînera les graves TOV observés dans la Figure 2-48. Pour valider d'avantage ce point, une analyse de Fourier est effectuée sur les tensions triphasées à la terre à 380 kV Romanel pour l'intervalle de [0.2s,1.0s], comme le montre la Figure 2-50.

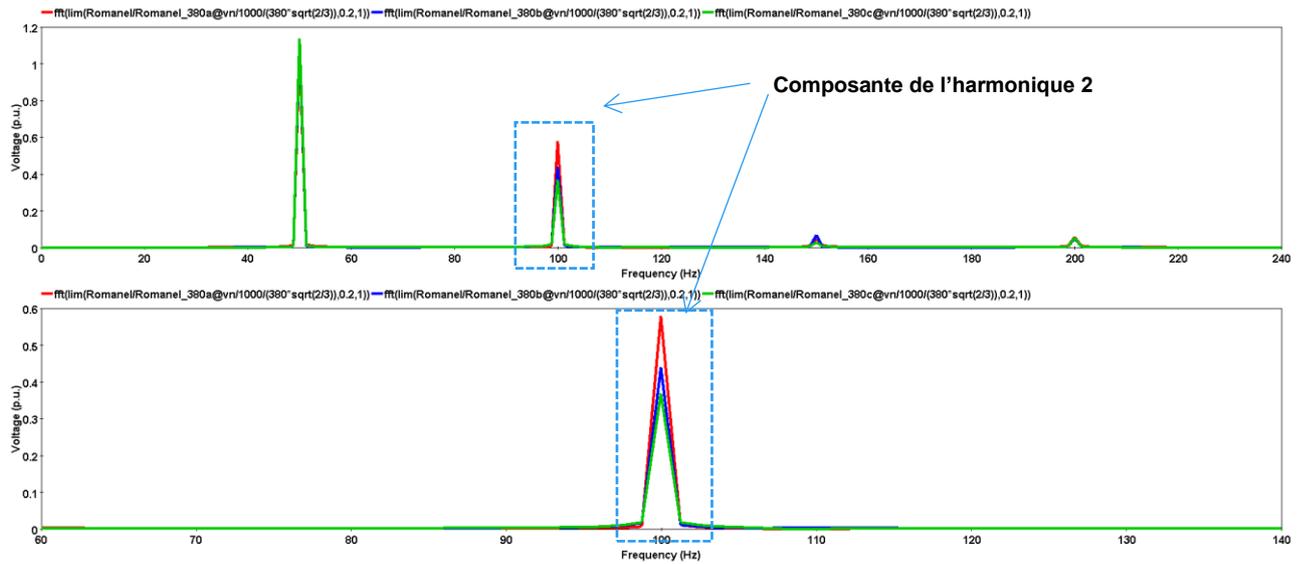


Figure 2-50: Composantes harmoniques des tensions phase-terre à 380 kV Romanel pour l'intervalle de [0.2s, 1.0s]

Remarques : La Figure 2-50 montre les composantes harmoniques des tensions phase-terre à 380 kV Romanel jusqu'à l'harmonique 4 tandis que la composante de l'harmonique 2 est zoomée dans la figure en bas.

Parmi toutes les composantes harmoniques du courant d'appel (malgré une amplitude décroissante au fur et à mesure que l'ordre des harmoniques augmente) montrées dans la Figure 2-49, c'est la composante de l'harmonique 2 qui est amplifiée par la résonance du réseau, entraînant une composante de l'harmonique 2 suffisamment élevée dans la tension terminale qui provoque les TOV déformés et mal amortis observés.

2.4.3.1.1.2 Comparaison entre les scénarios 2 et 3

Afin de vérifier si la performance du réseau lors d'événements transitoires tels que la mise sous tension de transformateurs peut être améliorée avec moins de câbles dans la zone de 380 kV Romanel, des simulations dans le domaine temporel sont également effectuées pour le scénario 2 et les résultats sont comparés à ceux du scénario 3. Notez que la comparaison n'est faite qu'entre les scénarios 2 et 3 puisque l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour les conditions de réseau données dans le scénario 1 est la même que dans le scénario 2.

Tout d'abord, l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour les scénarios 2 et 3 pour la contingence N-2 correspondante (cas 6) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 sont présentées dans la Figure 2-51.

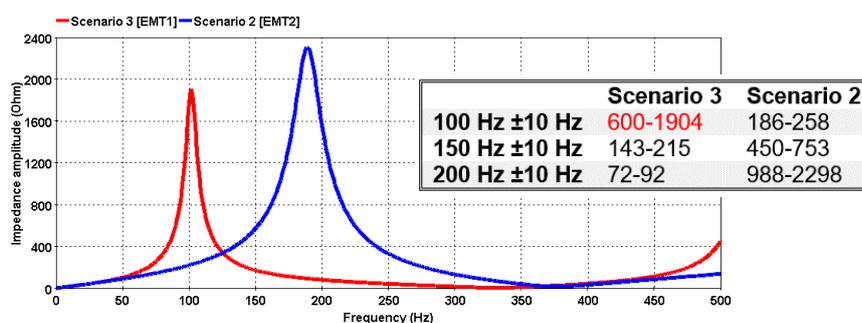


Figure 2-51: Impédance harmonique à 380 kV Romanel pour le cas 6 (contingence N-2) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques de rang inférieur pour les scénarios 2 et 3

La suppression des deux projets de câbles près de 380 kV Romanel dans le scénario 2 déplace considérablement la résonance parallèle vers des fréquences plus élevées, ce qui entraîne des valeurs d'impédance non critiques autour des harmoniques 2, 3, et 4 par rapport au scénario 3. Il ne faut pas s'attendre à des TOV graves susceptibles de solliciter, voire d'endommager l'isolement et l'équipement du réseau lors de la mise sous tension du transformateur à 380 kV dans les conditions de réseau considérées.

Les tensions phase-terre à 380 kV Romanel pour les scénarios 3 et 2 pendant la première 1 s de la simulation sont présentées dans la Figure 2-52.

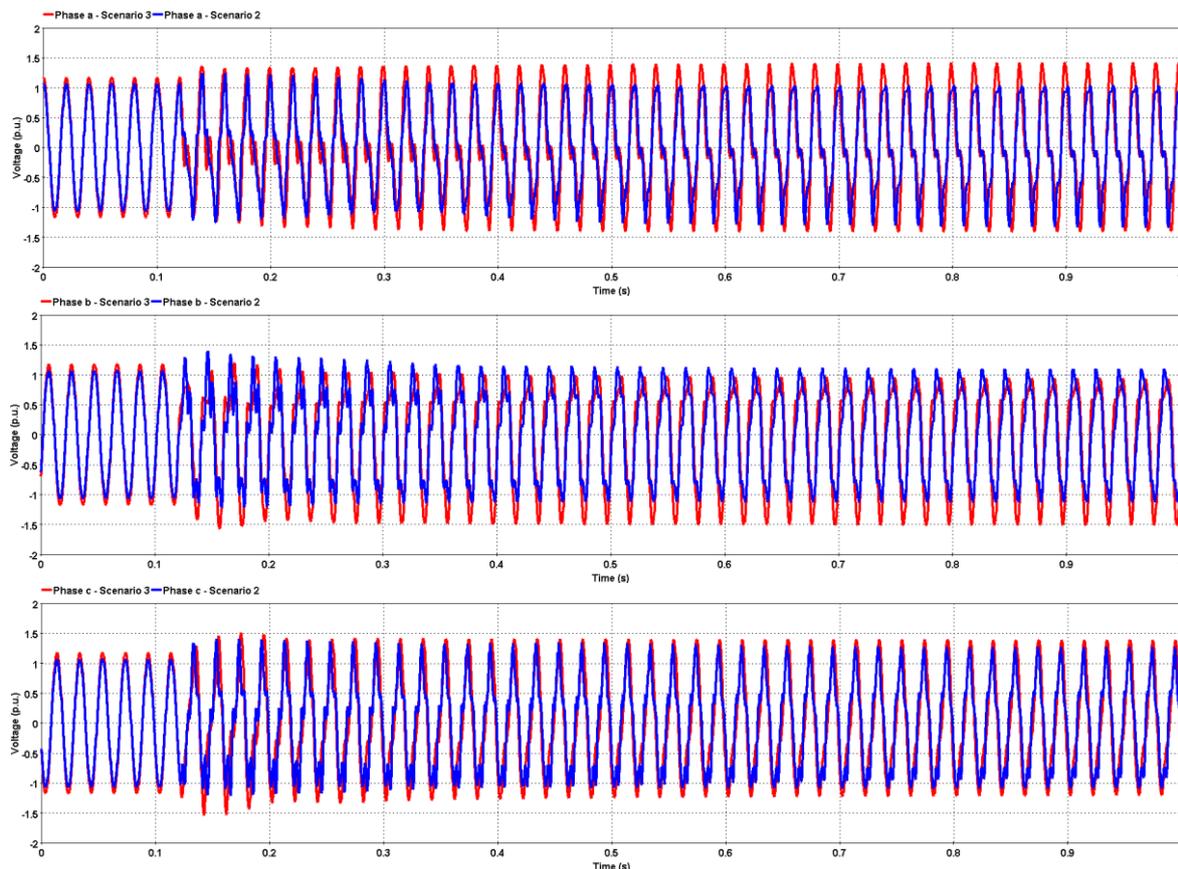


Figure 2-52: Tensions phase-terre à 380 kV Romanel – cas 6, Scénarios 2 et 3 pour la première 1 s de simulation

Remarques : Comme nous l'avons vu à la section 2.4.3.1.1.1, des TOV fortement déformés par des harmoniques et mal amortis dépassant 1,5 pu peuvent être observés dans le scénario 3 (rouge). Cependant, la suppression des systèmes de câbles dans le scénario 2 près de 380 kV Romanel donne lieu à des TOV très atténués, l'amplitude maximale atteignant 1,2 pu et diminuant rapidement, ce qui réduit considérablement les risques de stress diélectrique et thermique sur l'équipement et l'isolement du réseau (bleu).

En outre, une comparaison de l'analyse de Fourier sur les tensions phase-terre à 380 kV Romanel entre les scénarios 2 et 3 est présentée dans la Figure 2-53.

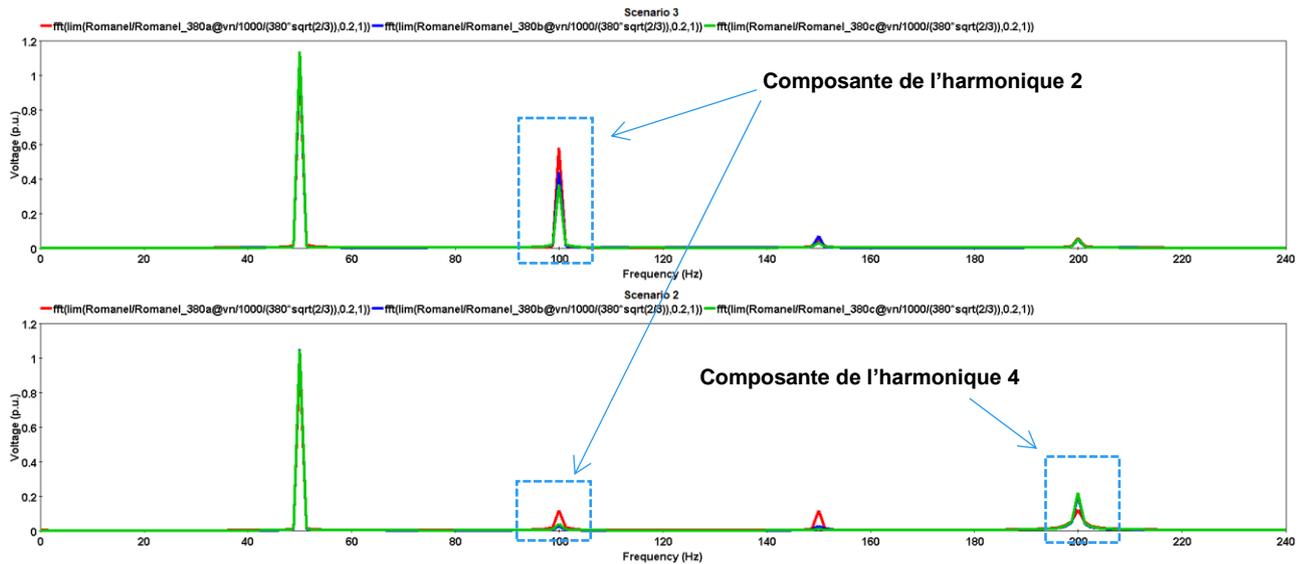


Figure 2-53: Comparaison des composantes harmoniques des tensions phase-terre à 380 kV Romanel entre les scénarios 2 et 3

Remarques : Par rapport au scénario 3, la composante de l'harmonique 2 des tensions phase-terre à 380 kV Romanel dans le scénario 2 est fortement réduite, ce qui explique les TOV atténués observés dans la tension terminale. Cependant, comme la résonance parallèle du réseau se déplace vers l'harmonique 4, une composante de l'harmonique 4 légèrement prononcée peut être observée dans le scénario 2. En raison de son ordre plus élevé et de son amplitude d'impédance insuffisante à l'harmonique 4 (voir Figure 2-51), les TOV résultants sont considérés comme non critiques et présentent donc moins de risques de contraintes diélectriques et thermiques sur l'équipement et l'isolement du réseau.

2.4.3.1.2 Mise sous tension du transformateur à 380 kV Romanel avec contingence N-1 (cas 5)

2.4.3.1.2.1 Scénario 3

Comme dans le cas précédent, pour rappel, l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour la contingence N-1 correspondant (cas 5) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 sont présentées dans la Figure 2-54.

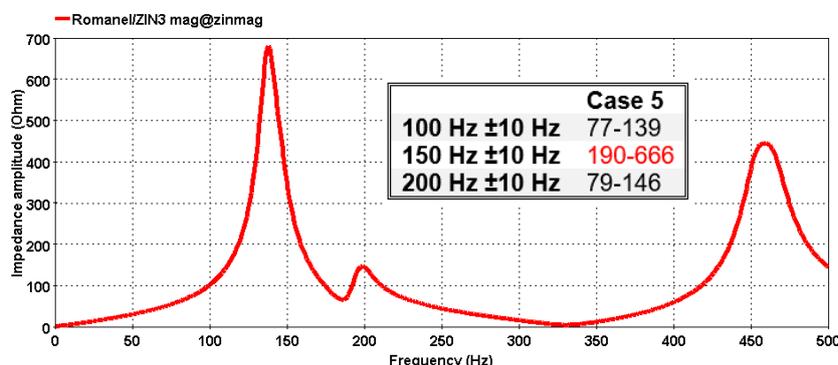
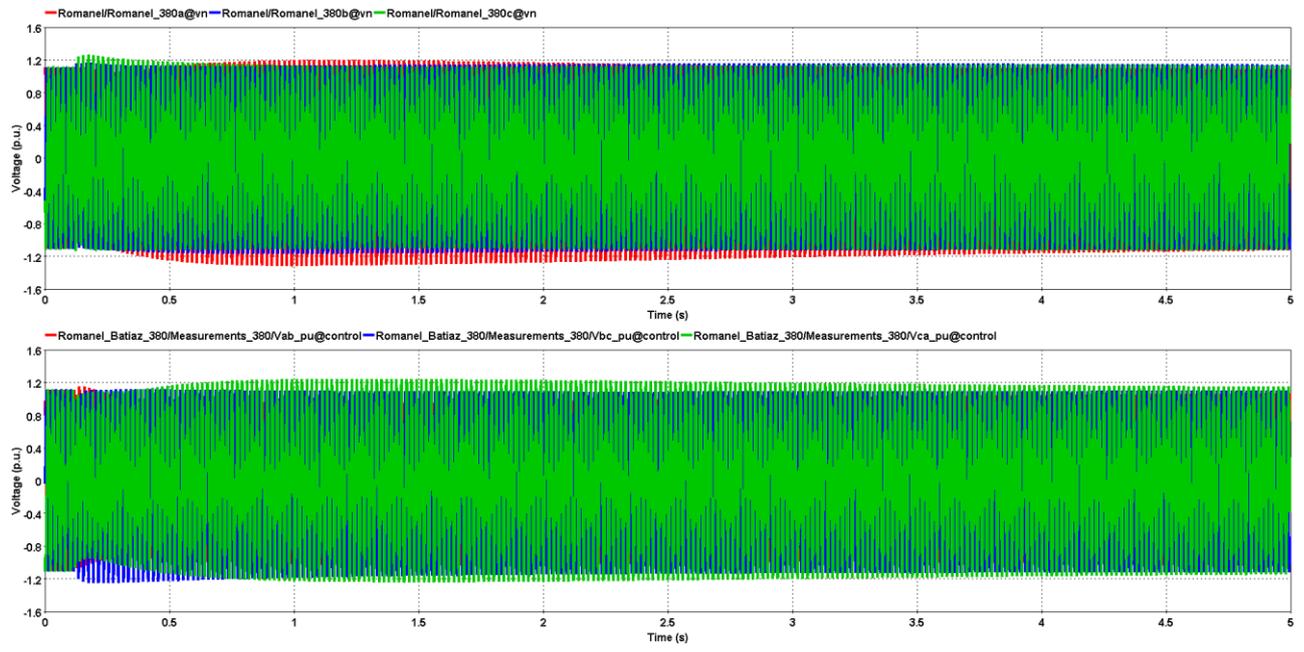


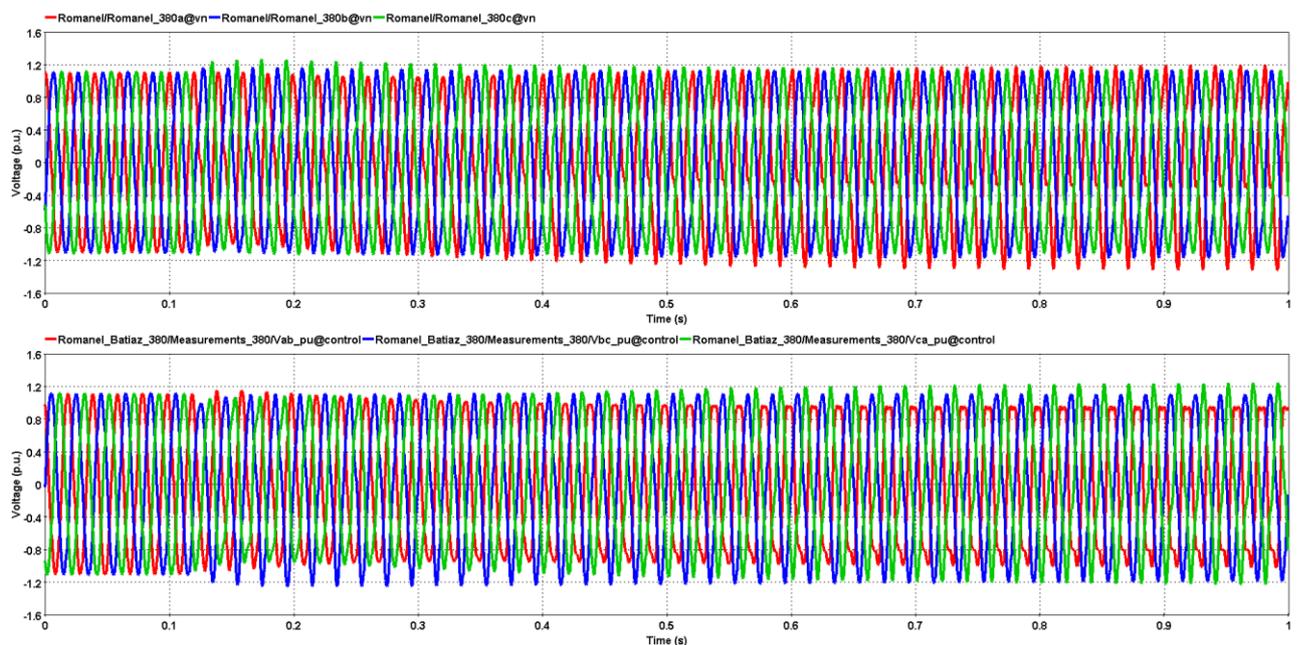
Figure 2-54: Impédance harmonique à 380 kV Romanel pour le cas 5 (contingence N-1) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques de rang inférieur

Comme expliqué au chapitre 2, section 2.2.2.1.1, les TOV causés par l'excitation de la résonance parallèle à l'harmonique 3 peuvent être attendus pendant la mise sous tension du transformateur à 380 kV Romanel dans les conditions de réseau considérées.

Les tensions phase-terre (en haut) et les tensions phase-phase (en bas) à 380 kV Romanel pour les 5 et 1 premières secondes de la simulation sont présentées dans la Figure 2-55.



(a)



(b)

Figure 2-55: Tensions triphasées à la terre et tensions entre phases à 380 kV Romanel – Cas 5, scénario 3, (a) pour les 5 premières secondes de la simulation, (b) pour la première seconde de la simulation

Remarques : Des TOV déformés peuvent être observés après la fermeture du disjoncteur. L'amplitude maximale de la tension phase-terre atteint 1,32 pu, tandis que la tension phase-phase a une amplitude maximale de 1,26 pu. Les TOV sont modérément amortis, ce qui pose des risques potentiels de stress diélectrique et thermique sur l'équipement et l'isolement à proximité.

Le courant d'appel du transformateur pour la première 1 s de la simulation ainsi que ses composantes harmoniques (à partir de l'analyse de Fourier) pour l'intervalle de [0.2s, 1.0s] sont représentés dans la Figure 2-56.

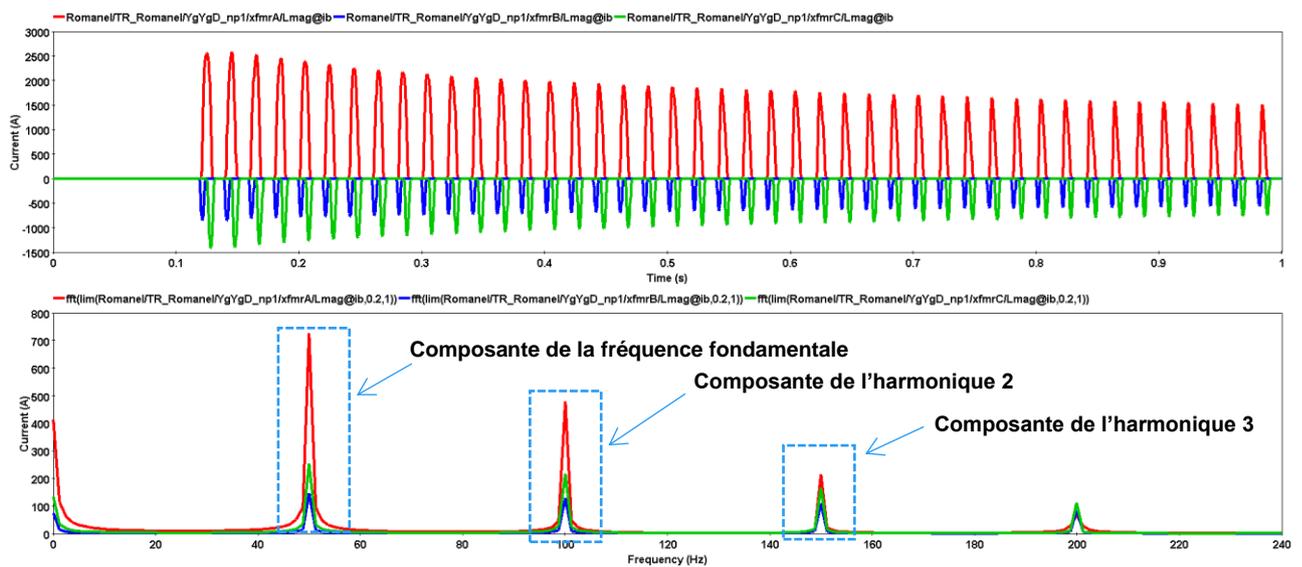


Figure 2-56: Courant d'appel du transformateur et ses composantes harmoniques pendant l'intervalle de [0.2s, 1.0s]

Remarques : Comme dans le cas précédent (scénario 3), le courant d'appel de la phase a a une amplitude maximale à la fréquence fondamentale. Ceci est raisonnable puisque l'instant de fermeture du disjoncteur est choisi au passage par zéro de la tension entre la phase a et la terre.

Deuxièmement, comme nous l'avons vu dans le cas précédent, l'amplitude du courant d'appel diminue lorsque l'ordre de l'harmonique augmente (en règle générale, la diminution est proportionnelle à $1/n$ [2.1]). Dans ce cas, c'est la composante de l'harmonique 3 qui sera amplifiée par la résonance parallèle de la configuration du réseau autour de l'harmonique 3, conduisant aux TOV observés dans la Figure 2-55. Pour valider ce point, une analyse de Fourier est effectuée sur les tensions phase-terre à 380 kV Romanel pour l'intervalle de [0.2s, 1.0s], comme le montre la Figure 2-57.

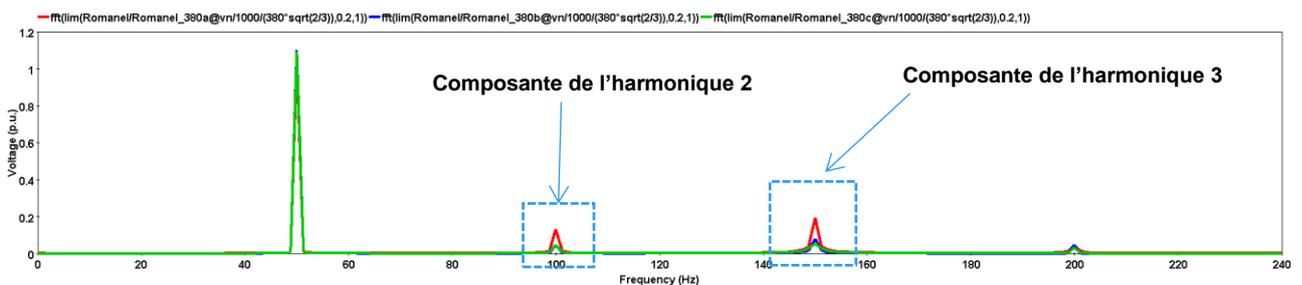


Figure 2-57: Composantes harmoniques des tensions phase-terre à 380 kV Romanel pour l'intervalle de [0.2s, 1.0s]

Remarque : Bien que la composante de l'harmonique 2 du courant d'appel ait une plus grande amplitude, c'est la composante de l'harmonique 3, amplifiée par l'impédance du réseau à la résonance du réseau, qui a une amplitude sensiblement plus élevée dans la tension terminale à 380 kV Romanel.

2.4.3.1.2.2 Comparaison entre les scénarios 2 et 3

Une comparaison est faite entre les scénarios 2 et 3 pour démontrer que la performance du réseau lors d'événements transitoires tels que la mise sous tension d'un transformateur peut être améliorée avec moins de câbles dans la zone. Une fois encore, la comparaison n'est faite qu'entre les scénarios 2 et 3 puisque l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour les conditions de réseau données dans le scénario 1 est assez similaire à celle du scénario 2.

Tout d'abord, l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour les scénarios 2 et 3 pour la contingence N-1 correspondante (cas 5) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 sont présentées dans la Figure 2-58.

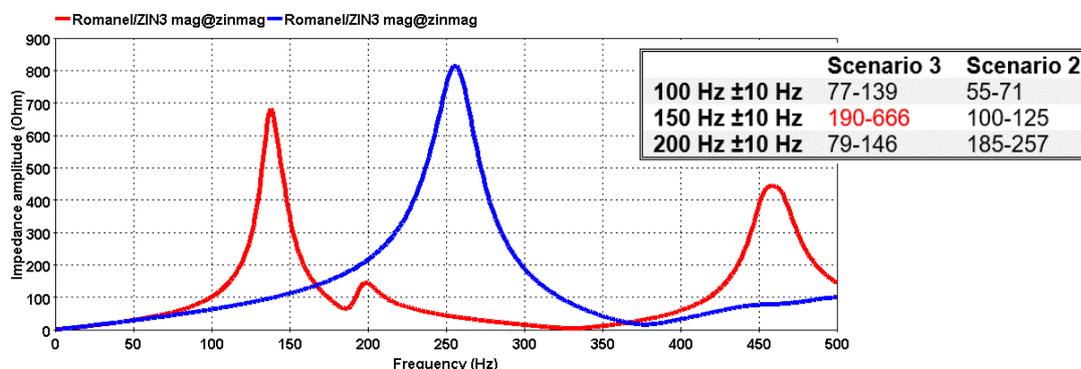


Figure 2-58 : Impédance harmonique à 380 kV Romanel pour le cas 5 (contingence N-1) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques de rang inférieur pour les scénarios 2 et 3.

La suppression des deux projets de câbles près de 380 kV Romanel dans le scénario 2 déplace considérablement la résonance parallèle vers des fréquences plus élevées, ce qui entraîne des valeurs d'impédance non critiques autour des harmoniques 2, 3, et 4 par rapport au scénario 3. Il ne faut pas s'attendre à des TOV graves susceptibles de solliciter, ni à l'endommagement de l'isolement et de l'équipement du réseau lors de la mise sous tension du transformateur à 380 kV Romanel dans les conditions de réseau envisagées.

Les tensions phase-terre à 380 kV Romanel pour les scénarios 3 et 2 pendant la première 1 s de la simulation sont présentées dans la Figure 2-59.

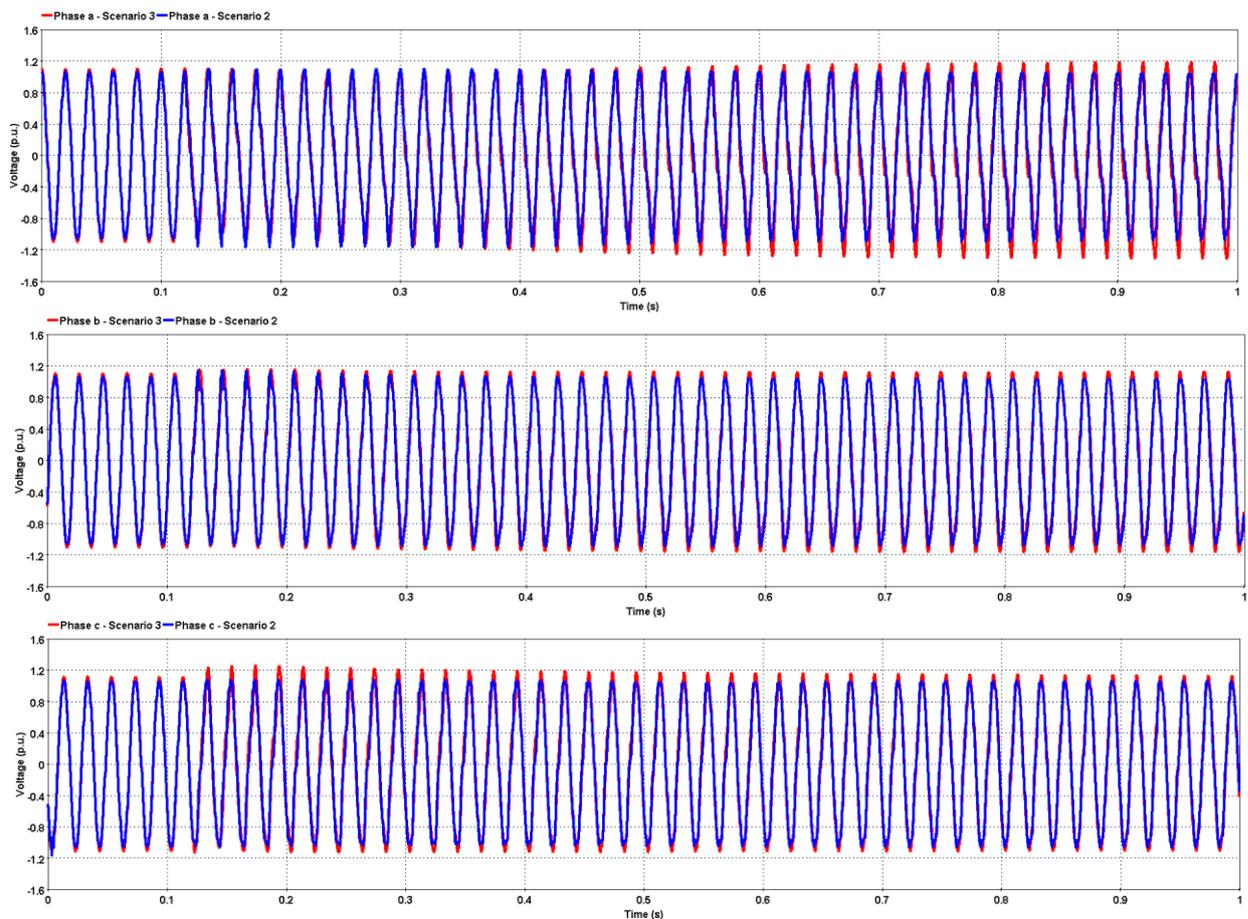


Figure 2-59: Tensions phase-terre à 380 kV Romanel – Cas 5, scénarios 2 et 3 pour la première 1 s de simulation

Remarques : Comme nous l'avons vu à la section 2.4.3.1.2.1, des TOV déformés et modérément amortis atteignant 1,32 pu peuvent être observés dans le scénario 3. Cependant, la suppression des systèmes de câbles dans le scénario 2 près de 380 kV Romanel donne lieu à des TOV très atténués avec l'amplitude maximale atteignant 1,18 pu et diminuant rapidement, ce qui réduit considérablement les risques de stress diélectrique et thermique sur l'équipement et l'isolement du réseau.

En outre, une comparaison de l'analyse de Fourier sur les tensions phase-terre à 380 kV Romanel entre les scénarios 2 et 3 est présentée dans la Figure 2-60.

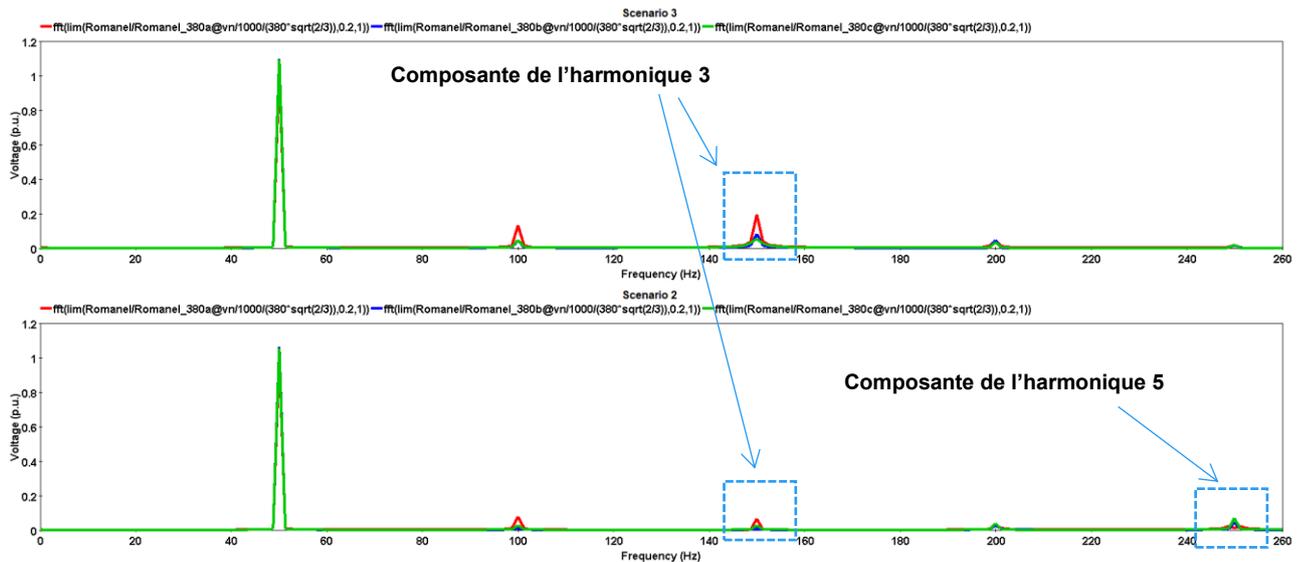


Figure 2-60: Comparaison des composantes harmoniques des tensions phase-terre à 380 kV Romanel entre les scénarios 2 et 3

Remarques : Par rapport au scénario 3, la composante de l'harmonique 3 des tensions phase-terre à 380 kV Romanel dans le scénario 2 est fortement réduite, ce qui explique les TOV atténués observés dans la tension terminale. Cependant, comme la résonance parallèle du réseau se déplace vers l'harmonique 5, une composante de l'harmonique 5 légèrement prononcée peut être observée dans la tension terminale dans le scénario 2. En raison de son ordre relativement plus élevé et de son amplitude d'impédance insuffisante à l'harmonique 5 (voir Figure 2-58), les TOV résultants sont considérés comme non critiques et présentent donc moins de risques de contraintes diélectriques et thermiques sur l'équipement et l'isolement du réseau.

2.4.3.1.3 Mise sous tension du transformateur à 380 kV Magadino avec contingence N-1

La contingence N-1 isole 380 kV Magadino du réseau Swissgrid, le laissant uniquement connecté au réseau italien représenté par un équivalent Thévenin. Étant donné que l'équivalent Thévenin n'est pas suffisamment détaillé pour représenter la dynamique réelle du réseau, seule la comparaison des performances du réseau entre les scénarios 2 et 3 est effectuée dans cette section, dans le but de démontrer que la suppression du câble de 380 kV Magadino – Musignano améliore les performances du système et garantit un fonctionnement stable et sûr du réseau.

Tout d'abord, l'impédance harmonique à 380 kV Magadino pour les scénarios 2 et 3 pour la contingence N-1 correspondante (cas 2) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 sont présentées dans la Figure 2-61.

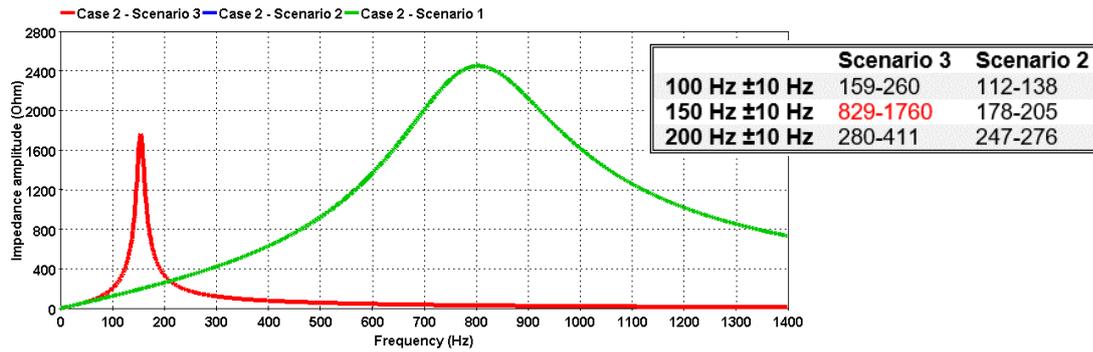


Figure 2-61: Impédance harmonique à 380 kV Magadino pour le cas 2 (contingence N-1) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques de rang inférieur pour les scénarios 2 et 3

Avec l'inclusion du câble de 13 km à 380 kV Magadino vers 380 kV Musignano, l'impédance harmonique à 380 kV Magadino a une résonance parallèle proche de l'harmonique 3 avec une amplitude d'impédance alarmante de presque 1800 ohm. Une telle amplitude indique des risques de TOV sévères avec le potentiel de stresser et même d'endommager l'isolement et l'équipement du réseau à proximité du 380 kV Magadino. Toutefois, si l'ensemble de l'axe de transmission de 19,29 km entre 380 kV Magadino et 380 kV Musignano est composé de lignes aériennes, la résonance parallèle se déplace vers 800 Hz (c.-à-d. l'harmonique 16), l'amplitude d'impédance considérablement réduite à ou près des harmoniques de rang inférieur implique des risques beaucoup plus réduits de TOV graves dans les mêmes conditions de réseau.

Les tensions phase-terre à 380 kV Magadino pour les scénarios 3 et 2 pendant la première 1 s de la simulation sont présentées dans la Figure 2-62.

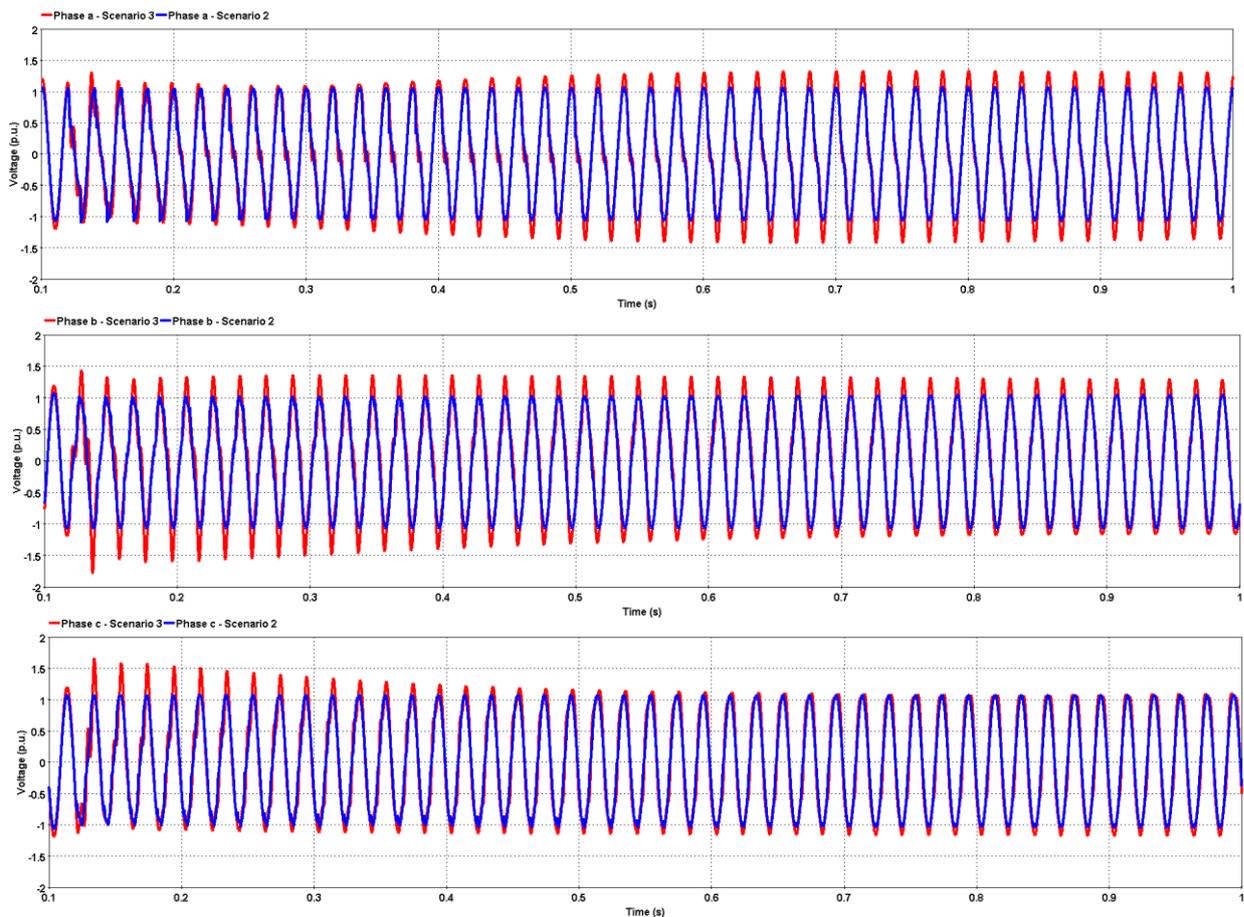


Figure 2-62: Tensions phase-terre à 380 kV Magadino - cas 2, scénarios 2 et 3 pour la première 1 s de simulation

Remarques : Comme le montre la Figure 2-62, on peut observer dans le scénario 3 des TOV déformés et mal amortis avec une amplitude maximale dépassant 1,5 pu. Cependant, la suppression du câble 380 kV Magadino – Musignano dans le scénario 2 près de 380 kV Magadino entraîne des TOV très atténués, l'amplitude maximale atteignant seulement 1,11 pu et s'amortissant rapidement, ce qui réduit considérablement les risques de contraintes diélectriques et thermiques sur l'équipement et l'isolement du réseau.

En outre, une comparaison de l'analyse de Fourier sur les tensions phase-terre à 380 kV Magadino entre les scénarios 2 et 3 est présentée dans la Figure 2-63.

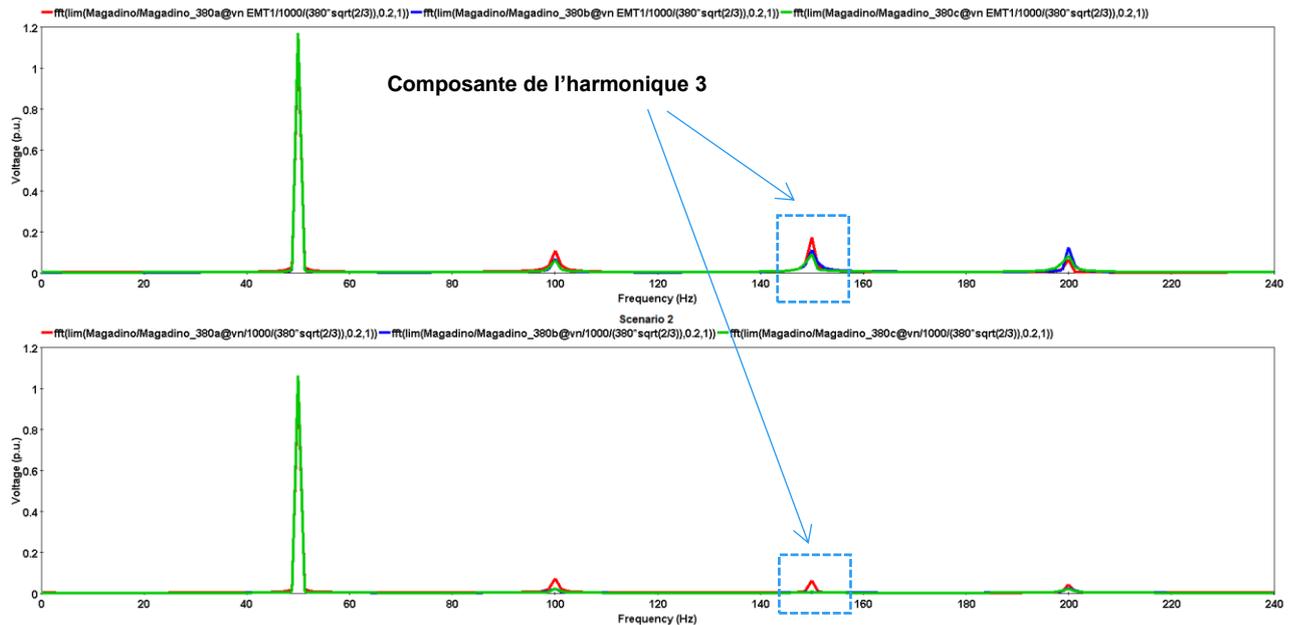


Figure 2-63: Comparaison des composantes harmoniques des tensions phase-terre à 380 kV Magadino entre les scénarios 2 et 3

Remarques : Par rapport au scénario 3, la composante de l'harmonique 3 des tensions phase-terre à 380 kV Magadino dans le scénario 2 est fortement réduite, ce qui explique les TOV atténués observés dans la tension terminale.

2.4.3.2 Études complémentaires – impact d'un câblage intensif à proximité de nœuds ayant des puissances de courts-circuits différentes

Si le réseau peut être simplifié en un réseau RLC, sa fréquence de résonance parallèle, observée à un certain endroit, est définie par les composants LC du réseau :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

où L est inversement proportionnel à la puissance de court-circuit du réseau à l'endroit considéré et C est le total des éléments capacitifs (tels que les câbles) connectés à proximité.

Il est facile de comprendre que pour un nombre donné de câbles connectés à proximité, plus la puissance de court-circuit est élevée à un certain endroit, plus la fréquence de résonance augmente. Par conséquent, l'impact d'un câblage intensif sur la réponse en fréquence d'un nœud fort serait moins important que celui d'un nœud faible, où l'on peut s'attendre à une dégradation des performances du système.

En outre, une puissance de court-circuit élevée indique un amortissement plus important du réseau. Un amortissement plus élevé du réseau est un facteur d'atténuation des phénomènes négatifs du réseau tels que les TOV et les résonances.

L'impact important de la puissance de court-circuit sur la réponse du système a été confirmé dans les résultats des trois scénarios analysés. C'est pourquoi il a été décidé d'aller plus loin et d'étendre la portée de l'étude en augmentant la quantité de câbles dans deux zones déjà dotées d'une grande quantité de câbles dans le scénario 3.

380 kV Romanel et 380 kV Laufenburg ont été choisis pour démontrer cette thèse. La puissance de court-circuit à 380 kV Romanel est de 11 GVA en fonctionnement normal, tandis que la puissance de court-circuit à 380 kV Laufenburg est de 43 GVA, ce qui est l'une des plus élevées de toutes les sous-stations du réseau Swissgrid.

2.4.3.2.1 Mise sous tension du transformateur à 380 kV Romanel avec câblage intensif

L'intégration de câbles près de 380 kV Romanel dans le scénario 3 est illustrée dans la Figure 2-64.

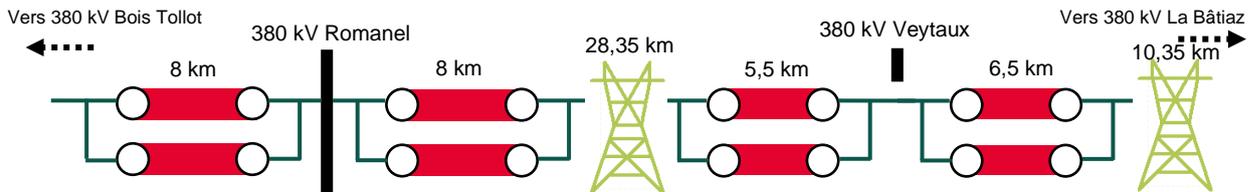


Figure 2-64: Intégration des systèmes de câbles de 380 kV à proximité de 380 kV Romanel

L'axe de transmission de 58,7 km dans le scénario 3 de 380 kV Romanel vers 380 kV La Bâtiaz est une liaison mixte ligne/câble avec un total de 40 km de câbles (deux câbles par phase). Des TOV critiques ont été observés lors de la mise sous tension du transformateur à 380 kV Romanel sous N-1 (section 2.4.3.1.2) ou N-2 (section 2.4.3.1.1), comme nous l'avons vu précédemment.

Considérons maintenant un cas fictif où l'ensemble de l'axe de transmission de 58,7 km de 380 kV Romanel vers 380 kV La Bâtiaz est réalisé avec des câbles souterrains, avec une longueur totale de câblage de 117,4 km (deux câbles par phase), comme le montre la Figure 2-65.



Figure 2-65: Systèmes de câbles de 380 kV à proximité de 380 kV Romanel dans le cas fictif

Le cas de N-1 sur 380 kV La Bâtiaz – Chamoson, comme le montre la section 2.4.3.1.2, est réutilisé pour démontrer l'aggravation des TOV dans le cas fictif par rapport au scénario 3.

De nouveau, l'impédance harmonique à 380 kV Romanel pour les scénarios 3 et le cas fictif pour la contingence N-1 correspondante (cas 5) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 sont présentées dans la Figure 2-66.

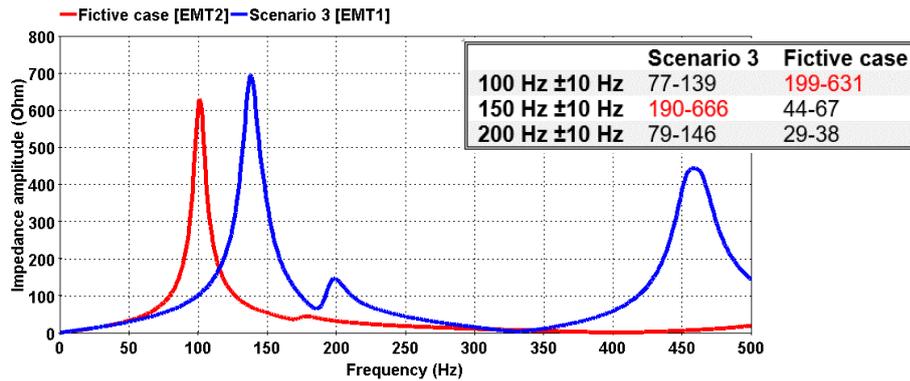


Figure 2-66: Impédance harmonique à 380 kV Romanel pour le cas 5 (contingence N-1) ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques de rang inférieur pour les scénarios 3 et le cas fictif

Tout d'abord, la puissance de court-circuit à 380 kV Romanel en condition N est d'environ 11 GVA. La perte de la connexion 380 kV Bâtiaz – Chamoson diminue encore la puissance de court-circuit à 380 kV Romanel. Comme le montre la Figure 2-66, un câblage total de 117,4 km à l'est de 380 kV Romanel dans le cas fictif déplace considérablement la résonance parallèle dans cette contingence N-1 des environs de l'harmonique 3 vers l'harmonique 2 avec une amplitude d'impédance critique telle que définie dans le Tableau 2-2. Par conséquent, il faut s'attendre à des TOV encore plus graves, susceptibles de solliciter et même d'endommager l'isolement et l'équipement du réseau, lors de la mise sous tension du transformateur à 380 kV Romanel dans les conditions de réseau considérées.

Les tensions phase-terre à 380 kV Romanel pour le scénario 3 et le cas fictif pour la première 1 s de la simulation sont présentées dans la Figure 2-67.

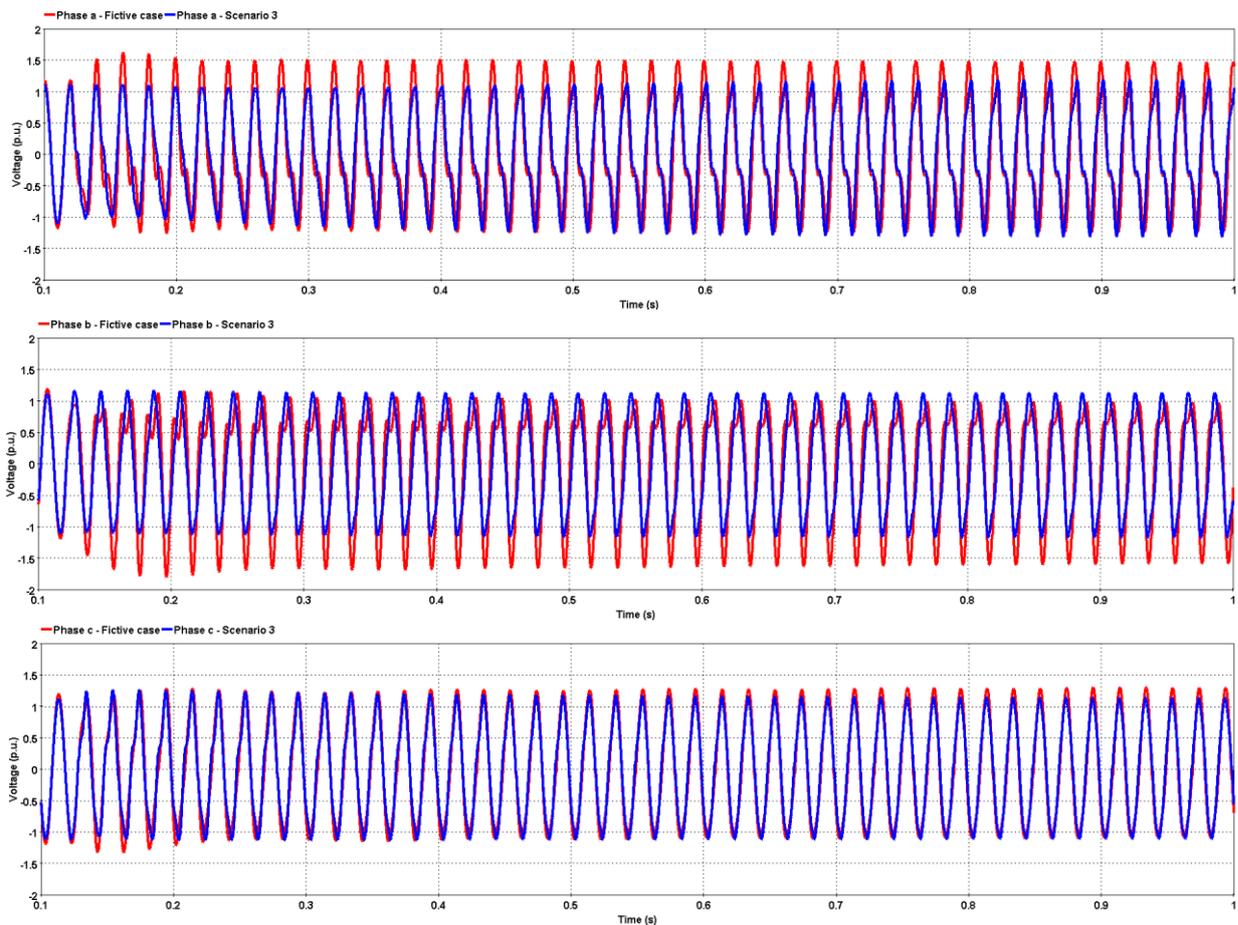


Figure 2-67: Tensions phase-terre à 380 kV Romanel – Scénarios 3 et cas fictif pour la première seconde de la simulation

Remarques : Comme le montre la Figure 2-67, des TOV déformés et faiblement amortis dépassant 1,5 pu peuvent être observés dans le cas fictif, alors que l'amplitude maximale du TOV dans le scénario 3 atteint 1,32 pu avant de redescendre. Ceci démontre que la résonance parallèle à l'harmonique 2 avec une amplitude d'impédance significativement élevée due à un câblage intensif près de 380 kV (le cas fictif) conduit à des TOV plus critiques pour la configuration de réseau donnée par rapport au scénario 3.

En outre, une comparaison de l'analyse de Fourier sur les tensions phase-terre à 380 kV Romanel entre le cas fictif et le scénario 3 est présentée dans la Figure 2-68.

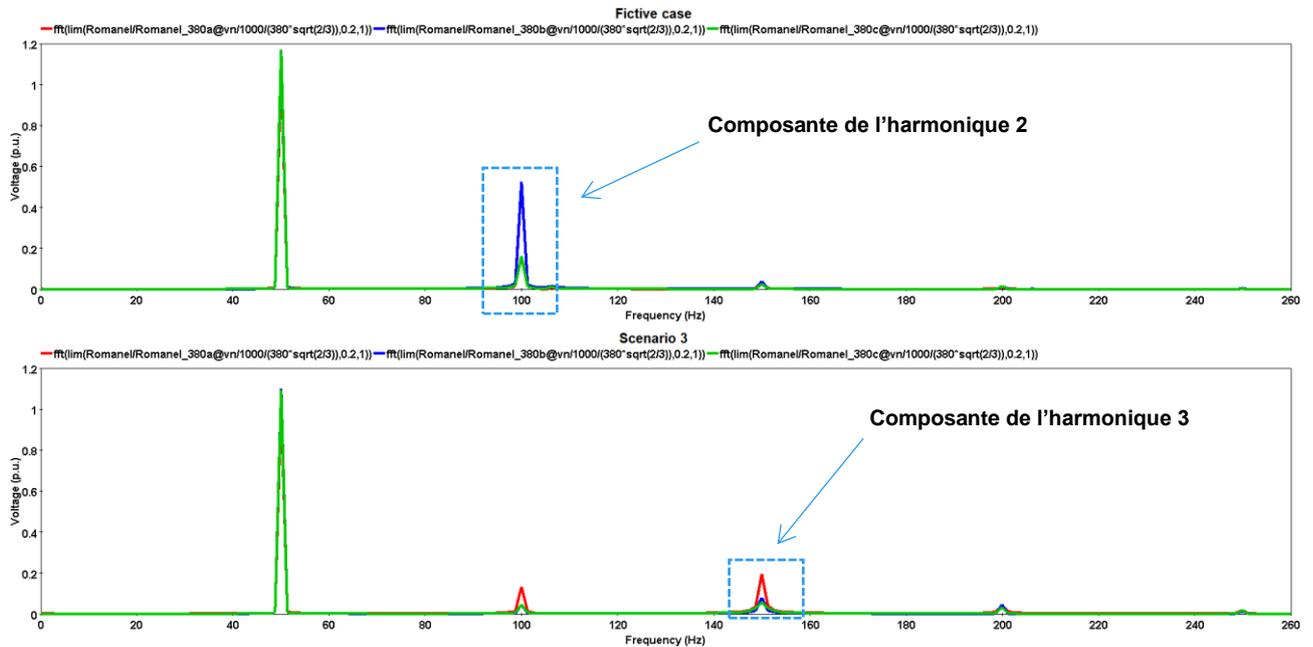


Figure 2-68: Comparaison des composantes harmoniques des tensions phase-terre à 380 kV Romanel entre le cas fictif et le scénario 3

Remarques : Un degré accru de câblage à l'est du nœud faible de 380 kV Romanel déplace encore la fréquence de résonance du réseau aux alentours de l'harmonique 2 pour la configuration de réseau donnée dans le cas fictif, ce qui conduit à une composante de l'harmonique 2 extrêmement élevée, représentant près de 50% de la fréquence fondamentale dans les tensions terminales. Cela explique les tensions terminales extrêmement déformées et sévères observées dans le cas fictif. D'autre part, la contingence N-1 envisagée entraîne une résonance parallèle autour de l'harmonique 3 dans le scénario 3 pour la configuration de réseau donnée. Bien que l'impédance à la résonance dans les deux cas soit assez similaire, une résonance à un ordre harmonique plus élevé indique des TOV moins sévères, ce qui a été démontré dans les résultats observés.

Cet exemple montre qu'un câblage étendu à proximité d'un nœud faible (endroit du réseau avec une faible puissance de court-circuit) a un impact important sur la réponse en fréquence à ce nœud, ce qui entraîne des risques de TOV pendant les événements transitoires.

2.4.3.2.2 Mise sous tension du transformateur à 380 kV Laufenburg avec câblage intensif

L'intégration des systèmes de câbles près de 380 kV Laufenburg dans le scénario 3 est illustrée dans la Figure 2-69.

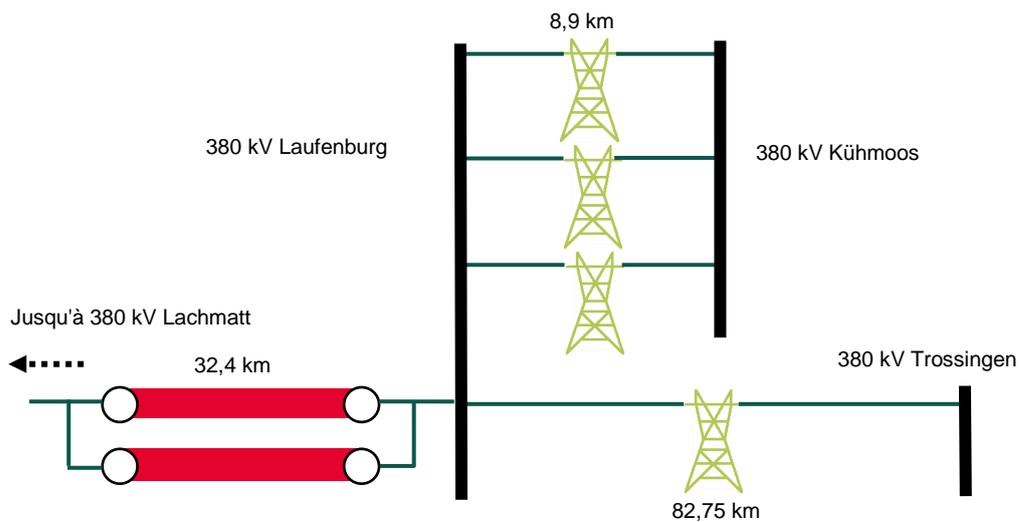


Figure 2-69: Intégration des systèmes de câbles de 380 kV près de 380 kV Laufenburg

Comme le montre la Figure 2-69, dans le scénario 3, il n'y a qu'un seul système de câble connecté directement à 380 kV Laufenburg, d'une longueur totale de 64,8 km (32,4 km, deux câbles par phase). Les trois connexions de 8,9 km entre 380 kV Laufenburg et 380 kV Kühmoos, ainsi que la connexion de 82,75 km entre 380 kV Laufenburg et 380 kV Trossingen sont composées uniquement de lignes aériennes.

Considérons maintenant un cas fictif où les trois liaisons aériennes entre 380 kV Laufenburg et 380 kV Kühmoos, ainsi qu'une partie de la longue liaison de 82,75 km entre 380 kV Laufenburg et 380 kV Trossingen, sont réalisées avec des câbles souterrains, comme le montre la Figure 2-70.

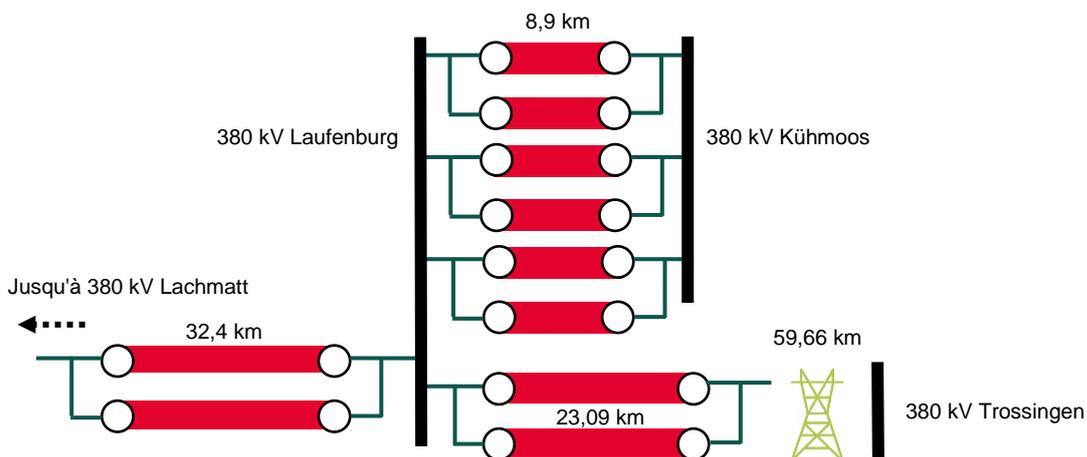


Figure 2-70: Systèmes de câbles de 380 kV près de 380 kV Laufenburg dans le cas fictif

Les systèmes de câbles supplémentaires représentent une longueur totale d'environ 106,94 km. Avec les câbles 380 kV Lachmatt – Laufenburg, la longueur totale des câbles connectés directement au 380 kV Laufenburg est de 171,74 km.

Considérons une contingence N-1 sur 380 kV Laufenburg – Beznau, la puissance de court-circuit originale à 380 kV Laufenburg diminue de 43 GVA à environ 30 GVA. L'impédance harmonique à 380 kV sous cette contingence N-1 pour le scénario 3 et le cas fictif, ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques 2, 3, et 4 sont présentées dans la Figure 2-71.

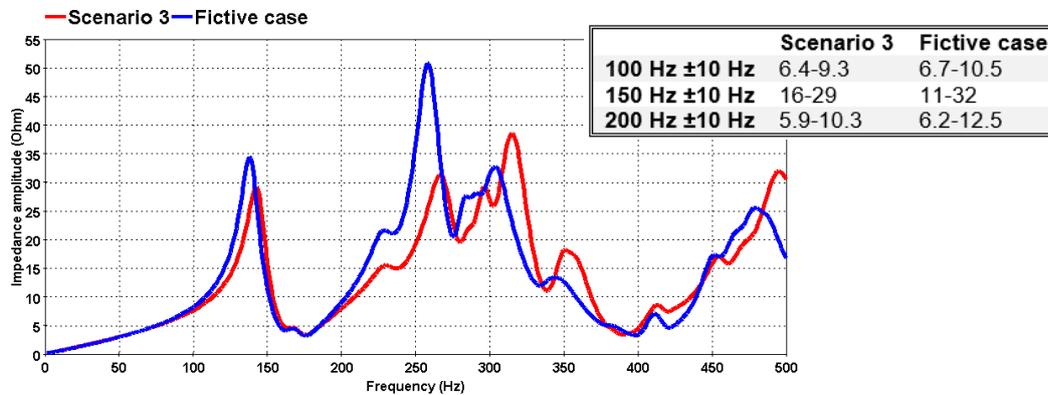


Figure 2-71: Impédance harmonique à 380 kV Laufenburg ainsi que l'amplitude de l'impédance proche des harmoniques de rang inférieur pour la contingence N-1 pour les scénarios 3 et le cas fictif

Comme le montre la Figure 2-71, l'ajout des 106,94 km de câbles déplace la fréquence de résonance parallèle du réseau à 380 kV Laufenburg vers des fréquences harmoniques plus basses. Toutefois, ce déplacement est beaucoup moins important que dans le cas précédent, malgré la grande longueur de câble. Ceci démontre l'affirmation selon laquelle les nœuds forts avec une puissance de court-circuit élevée auraient une plus grande capacité à incorporer plus de projets de câbles sans dégradation de la performance.

En outre, l'amplitude de l'impédance à la résonance ainsi qu'aux fréquences harmoniques de bas ordre est assez faible, grâce à l'amortissement élevé du réseau dû à la puissance de court-circuit élevée. De manière prévisible, il ne faut pas s'attendre à des TOV graves lors d'événements transitoires à 380 kV Laufenburg, tels que la mise sous tension de transformateurs, dans les deux cas.

Pour confirmer, les tensions phase-terre à 380 kV Laufenburg pour les deux scénarios 3 et fictif pour la première 1 s de la simulation sont présentées dans la Figure 2-72. Les courbes des deux scénarios sont superposées.

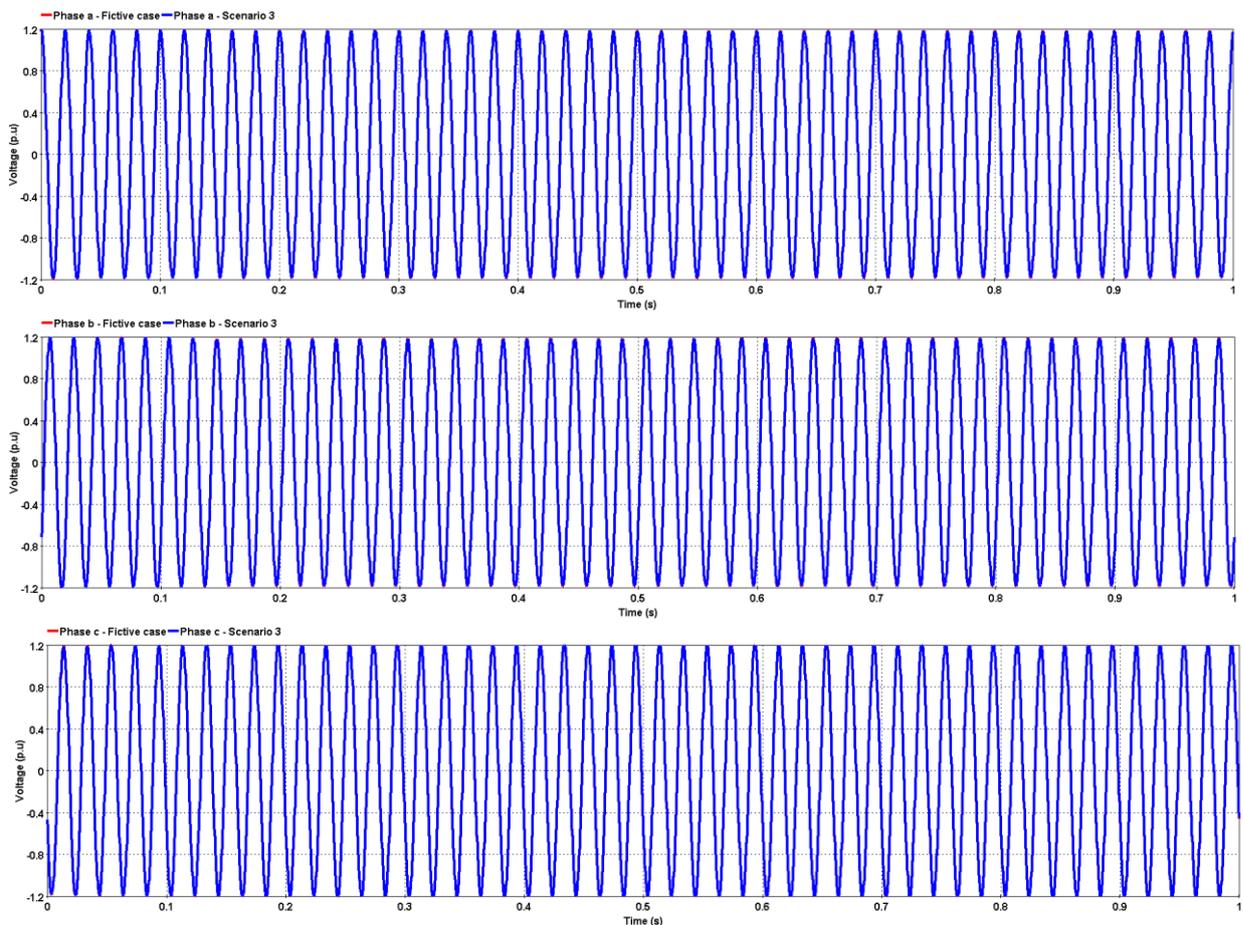


Figure 2-72: Tensions phase-terre à 380 kV Laufenburg – Scénarios 3 et cas fictif pour la première 1 seconde de la simulation

Remarques : Pour partir de conditions défavorables, la simulation a été réalisée avec une tension assez élevée à 380 kV Laufenburg avant la mise sous tension du transformateur. Cependant, malgré la tension terminale élevée et le câblage étendu, presque aucune TOV ne peut être observée pendant la mise sous tension du transformateur, tant dans le scénario 3 que dans le cas fictif, ce qui confirme qu'aucune résonance parallèle n'est excitée pendant l'événement transitoire dans l'un ou l'autre cas (voir la Figure 2-71).

Cet exemple montre qu'un câblage étendu à proximité d'un nœud fort (endroit du réseau avec une puissance de court-circuit élevée) tend à avoir un impact atténué sur la réponse en fréquence à ce nœud, ce qui ne devrait pas poser de problèmes supplémentaires pour les TOV pendant les événements transitoires.

2.4.4 Conclusion

Les études EMT dans le domaine temporel peuvent constituer une référence précieuse pour la planification et l'exploitation du système car elles permettent de visualiser les valeurs et les formes d'onde de divers paramètres du système et de l'équipement (par exemple, les tensions, les courants, la puissance active et réactive, les paramètres de contrôle, les références, etc.) dans le domaine temporel, soit en régime permanent, soit lors de perturbations (par exemple, mise sous tension de lignes/câbles/transformateurs, connexion de bancs de condensateurs ou de réactances shunt, défauts et élimination, îlotage du système, rejet de charge, actions de protection, changements d'étapes de contrôle des dispositifs d'électronique de puissance, etc.).

Suite aux conclusions du chapitre 2, des études temporelles au niveau de l'équipement ont été réalisées dans ce chapitre afin d'évaluer plus précisément l'impact des projets de câbles prévus dans les trois scénarios sur la performance et le comportement du réseau. Les études EMT dans le domaine temporel réalisées dans ce chapitre se concentrent sur la mise sous tension des grands transformateurs de Swissgrid aux endroits sensibles du réseau dans les configurations et conditions critiques du réseau qui ont été identifiées dans le chapitre 3.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des études réalisées :

- Des TOV critiques sont à prévoir lors de la mise sous tension des transformateurs dans les cas identifiés au chapitre 2.

Dans le chapitre 2, plusieurs cas de résonance parallèle critique aux harmoniques de bas ordre, notamment les harmoniques 2 et 3, ont été identifiés pour le scénario 3. Ces cas concernent des points sensibles du réseau tels que 380 kV Romanel et 380 kV Magadino dans certaines topologies de réseau (N-1 et N-2) et conditions (faible SCL). Sans surprise, des TOV importants et mal amortis peuvent être observés lors de la mise sous tension des grands transformateurs de Swissgrid sur ces sites dans les topologies et configurations de réseau identifiées. Avec une amplitude de TOV dépassant 1,5 pu dans certains cas, ces TOV posent des contraintes diélectriques et thermiques considérables sur l'équipement du réseau à proximité, entraînant un vieillissement prématuré de l'équipement, voire une défaillance.

Néanmoins, il est également observé que pour le scénario 2 avec beaucoup moins de projets de câbles, les mêmes topologies et configurations de réseau se traduiraient par des TOV très atténués, de sorte qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter de la stabilité et de la sécurité de l'exploitation du réseau.

Dans l'ensemble, on peut affirmer que l'intégration intensive des câbles, comme dans le scénario 3, augmenterait considérablement les risques de TOV critiques à plusieurs endroits du réseau lors d'événements transitoires sur le site.

- La puissance de court-circuit à un endroit du réseau joue un rôle important dans l'impact de l'intégration des câbles dans le voisinage (études complémentaires).

Comme nous l'avons vu précédemment, l'intégration des câbles tend généralement à diminuer les fréquences de résonance parallèle à divers endroits du réseau, ce qui les expose à des risques de TOV critiques lors d'événements transitoires sur site tels que la mise sous tension, l'élimination d'un défaut, l'ilotage du système, etc. Cependant, l'impact de l'intégration des câbles varie d'un nœud à l'autre, en fonction de la puissance de court-circuit du nœud. Deux endroits du réseau ont été choisis pour démontrer ce point avec des contingences N-1, qui sont 380 kV Romanel et 380 kV Laufenburg.

Avec une puissance de court-circuit légèrement supérieure à 11 GVA, le poste 380 kV Romanel est un nœud relativement faible parmi tous les postes 380 kV. L'augmentation de la longueur de câblage proposée dans le scénario 3 de 40 km à 117,4 km autour de 380 kV Romanel déplace davantage la résonance parallèle de l'harmonique 3 (dans le scénario 3) vers l'harmonique 2, conduisant à des TOV beaucoup plus aggravés (de 1,32 pu à plus de 1,5 pu) pour la contingence N-1 testée pendant la mise sous tension des transformateurs de Romanel.

D'autre part, le nœud 380 kV Laufenburg est l'un des nœuds les plus puissants du réseau 380 kV. Sa puissance de court-circuit s'élève à plus de 43 GVA en fonctionnement normal. Avec la contingence N-1 sur 380 kV Laufenburg – Beznau, sa puissance de court-circuit diminue à environ 30 GVA, ce qui reste assez élevé. Grâce à la forte puissance de court-circuit, le fait de presque tripler la longueur du câblage de 64,8 km à 171,74 km ne déplacerait que légèrement la fréquence de résonance parallèle de moins de 10 Hz. En outre, l'amortissement élevé du système dû à la puissance de court-circuit élevée fait que l'impédance

harmonique du réseau à 380 kV Laufenburg pour les harmoniques d'ordre inférieur (c.-à-d. les harmoniques 2, 3, et 4) est suffisamment faible pour éviter l'excitation de toute résonance parallèle d'ordre inférieur. Sans surprise, aucun TOV ne peut être observé pendant la mise sous tension du transformateur de Laufenburg pour les deux cas testés, même avec un câblage intensif à proximité de 380 kV Laufenburg.

En résumé, il serait plutôt sûr d'intégrer des projets de câbles à proximité d'un nœud fort, car on peut s'attendre à un impact minimal sur le réseau existant. Toutefois, il convient d'être attentif lors de l'intégration de projets de câbles à proximité d'un nœud faible, car des enquêtes ou des études plus détaillées pourraient s'avérer nécessaires.

2.5 Variations de tension dues à la connexion ou déconnexion des câbles et des dispositifs de compensation

Dans les sections 2, 3 et 4, l'impact de la puissance de court-circuit sur les fréquences de résonance, l'amplification des harmoniques et la mise sous tension de grands transformateurs ont été analysées. Dans cette section, il s'agit d'étudier l'influence de la puissance de court-circuit dans les variations de tension suite à la connexion des câbles ou à la déconnexion de bobines de compensation. L'objectif de cette analyse est d'estimer les valeurs maximales de longueur de câbles en fonction de la puissance de court-circuit d'un nœud. De façon similaire, l'estimation du montant de compensation maximal dont la perte n'entraîne pas d'augmentation de tension au-delà de la variation maximale admissible est présentée. Ces analyses tournent autour du fait que chez Swissgrid la variation de tension maximale admissible en régime permanent suite à la connexion d'un câble ou la déconnexion d'un élément de compensation est de 2% [2.29].

En raison de leurs caractéristiques capacitatives, les câbles ont tendance à augmenter la tension du nœud auquel ils sont connectés. Cette augmentation de tension peut être limitée par l'utilisation de dispositifs de compensation, qui absorbent une partie ou la totalité de la puissance réactive générée par le câble. Si le dispositif de compensation est déconnecté (en raison d'un défaut ou d'une fausse manœuvre) alors que le câble reste sous tension, un flux de puissance réactive se produit du câble vers son point de connexion. Par conséquent, un saut de tension se produira sur ce nœud, entraînant une augmentation de la tension en régime permanent. Cette augmentation de tension dépend non seulement de la quantité de compensation perdue, mais aussi de la puissance de court-circuit (SCL) du point de connexion ainsi que du maillage du réseau autour de celui-ci. En d'autres termes, plus le niveau de court-circuit ou le maillage du réseau est élevé, plus l'augmentation de la tension sera faible pour une quantité donnée de compensation perdue.

2.5.1 Variations de tension causées par la connexion/déconnexion d'un câble

Il est possible d'estimer approximativement l'augmentation de tension sur un nœud causée par un câble lorsque le dispositif de compensation est déconnecté. De manière simple, ce cas peut être approximé par un circuit LC, où la valeur de l'inductance est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit (L_{sc}) et la valeur de la capacité représente la capacité du câble (C_{cable}) :

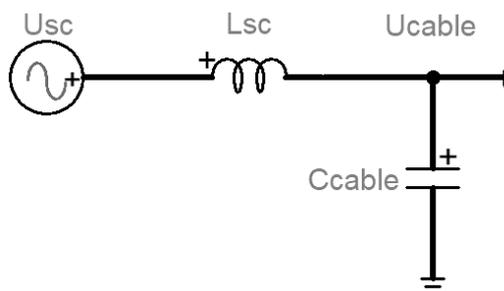


Figure 2-73: Représentation électrique simplifiée d'un câble connecté à un nœud

En résolvant ce circuit, il est possible d'identifier que l'augmentation de tension est directement proportionnelle à la quantité de puissance réactive générée par le câble (Q_{cable}) et inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit du nœud (S_{sc}) :

$$\Delta u_{pu} \propto \frac{Q_{cable}}{S_{sc}}$$

En considérant que la puissance réactive générée par le câble est fonction de la longueur du câble et de la tension d'exploitation, il est possible d'estimer la longueur totale maximale des câbles connectés à un nœud (l_{max}) pour une variation de tension maximale admissible (Δu_{max}). Cette relation est définie comme suit :

$$l_{max} = \frac{\Delta u_{max} (\Delta u_{max} + 1)}{k_{Q-l}} \cdot S_{sc}$$

où k_{Q-l} est la puissance réactive par unité de longueur générée par le câble (en Mvar/km), et Δu_{max} est la variation de tension maximale admissible en *per units* (pu).

Pour un système de câbles en cuivre de tension nominale 380 kV, d'une section de 2500 mm², fonctionnant sous une tension de 410 kV, la puissance réactive par unité de longueur générée par le câble (k_{Q-l}) est égale à 12,7 Mvar/km [2.22]. En supposant une variation de tension maximale admissible de 2% ($\Delta u_{max} = 0,02$ pu), il est possible de représenter la quantité maximale admissible de câble à installer sur un nœud en fonction de sa puissance de court-circuit :

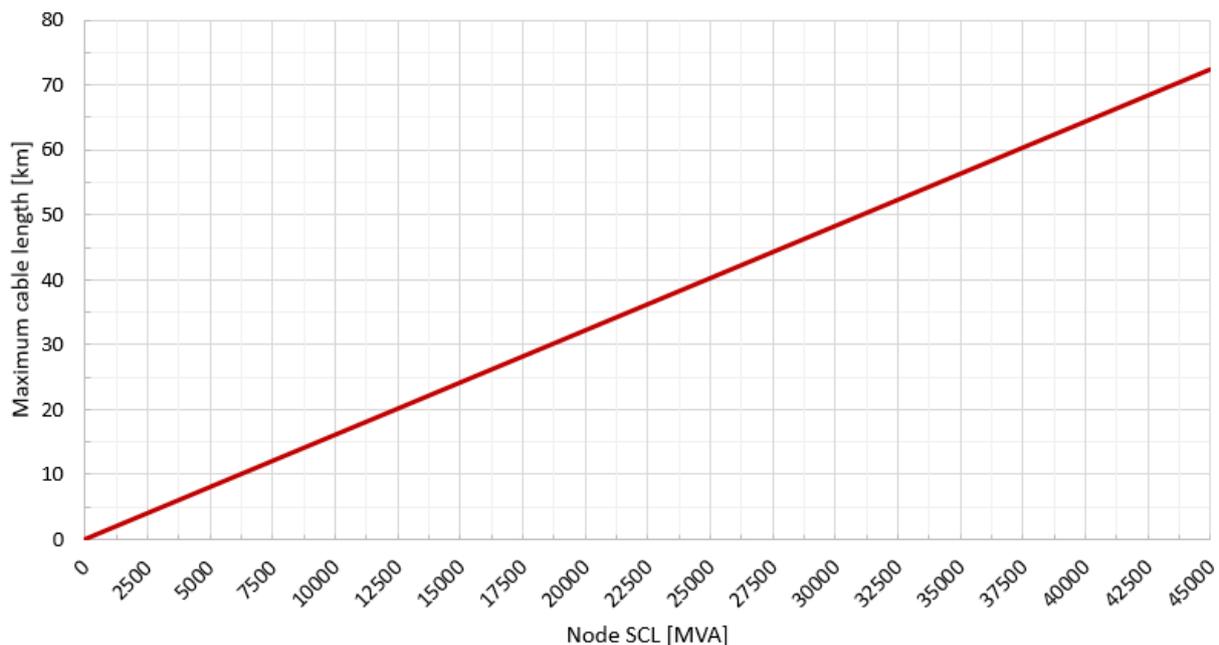


Figure 2-74: Longueur maximale de câble admissible sur un nœud 380 kV pour une augmentation de tension de 2%

Cette figure permet de constater, par exemple, que pour un nœud 380 kV dont la puissance de court-circuit est égale à 12,500 MVA, un câble (2500 mm²) d'une longueur de 20 km entraînerait une augmentation de 2% de la valeur de la tension en régime permanent. Logiquement, pour un nœud plus faible (SCL inférieur), la longueur totale de câble admissible est plus petite.

Si l'on considère un système de câbles en cuivre de tension nominale 220 kV, d'une section de 1600 mm², fonctionnant sous une tension de 235 kV, la puissance réactive par unité de longueur générée par le câble (k_{Q-}) est égale à 4,3 Mvar/km [2.22]. En admettant la même variation de tension maximale admissible de 2%, la relation entre la puissance de court-circuit du nœud et la longueur maximale de câble admissible devient :

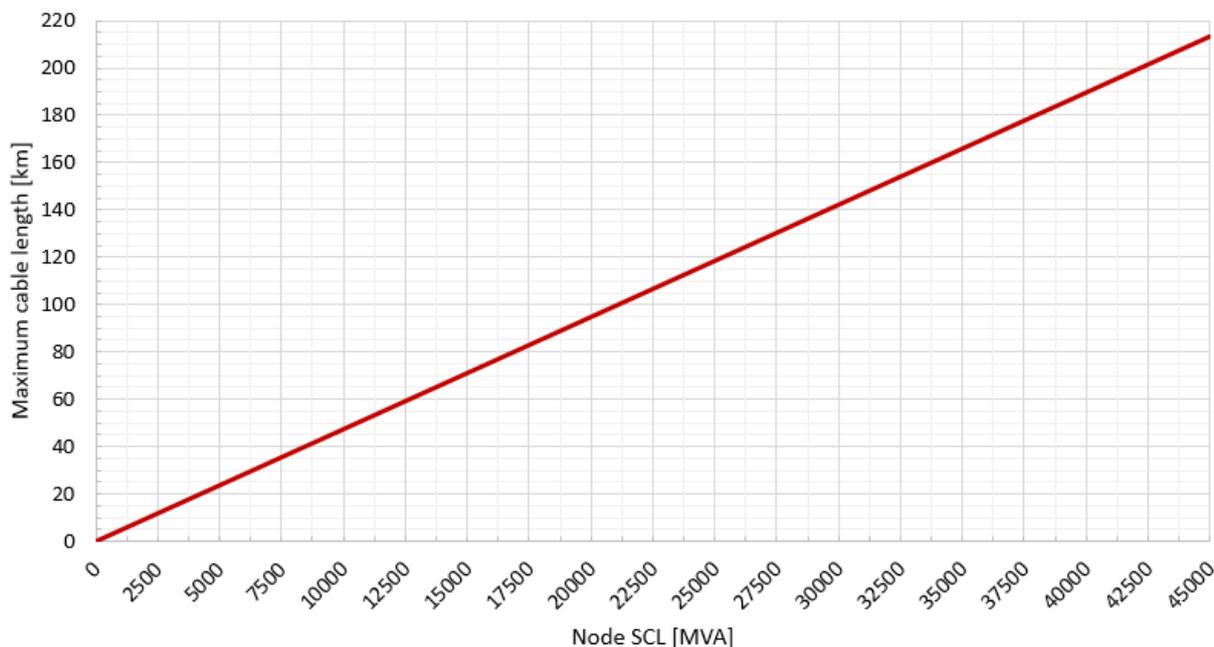


Figure 2-75: Longueur maximale de câble admissible sur un nœud 220 kV pour une augmentation de tension de 2%

Étant donné qu'un câble de 220 kV crée une plus faible injection de puissance réactive sur le réseau, la longueur de câble maximale admissible sur un nœud de 220 kV est considérablement plus élevée que sur un nœud de 380 kV.

Des figures équivalentes peuvent être extraites pour d'autres types de câbles avec des sections différentes et sous d'autres points de fonctionnement de tension.

Sur la base de cette relation entre longueur maximale et puissance de court-circuit, il est possible d'identifier où l'introduction de câbles selon le scénario 3 pourrait provoquer des augmentations de tension supérieures à 2%. En effet, l'arc lémanique se présente comme le cas problématique en ce qui concerne les augmentations de tension en régime permanent. Au total, il s'agit d'une installation de 57 km de câbles 220 kV entre Foretaille et Romanel dont les deux plus longs tronçons dépassent la longueur maximale admissible, comme résumé dans le tableau ci-dessous :

Ligne	Longueur câble prévue (km)	Poste 1	Poste 2	SCL min. entre poste 1 et 2 (MVA)	Longueur max. admissible (km)
220 kV Banlieue Ouest – Foretaille	52.2	B. Ouest	Foretaille	9500	45.1
220 kV Crans – Romanel	40.7	Crans	Romanel	7300	34.6

Tableau 2-25: Comparaison entre longueur de câble admissible et prévue dans l'arc lémanique – Cas problématiques

Dans le cas de la ligne 220 kV Banlieue Ouest – Foretaille, les 52,2 km de câble pourraient engendrer une augmentation de tension au-dessus des 2% admissibles. En raison de la puissance de court-circuit des nœuds, la longueur maximale admissible serait de 45,1 km, soit 7,1 km de moins que la longueur prévue.

Concernant la ligne 220 kV Crans – Romanel, une augmentation de tension au-delà du seuil maximum admissible pourrait survenir si les 40,7 km de câble sont installés. La puissance de court-circuit des postes permettrait l'enclenchement d'un câble de longueur maximale de 34,6 km sans dépasser la limite de 2%, ce qui correspond à 6,1 km de moins que la longueur considérée dans le scénario 3.

Il est important de remarquer que les limites de longueur de câbles indiquées ci-dessus ne doivent pas être entendues comme la seule limitation à prendre en compte. Il s'agit d'une première limitation, calculée de manière approximative, à laquelle doivent suivre toutes les études EMT pour les fréquences de résonance et l'amplification harmonique, comme présenté précédemment dans ce rapport.

2.5.2 Variations de tension causées par la déconnexion d'un élément de compensation

Dans le même sens, il est possible d'estimer la perte de compensation réactive maximale acceptable qui conduirait à une augmentation de tension en régime permanent ne dépassant pas la limite de 2%. Cette valeur peut être définie par la relation suivante :

$$Q_{comp\ loss} = (\Delta u_{max}^2 + \Delta u_{max}) \cdot S_{sc}$$

où $Q_{comp\ loss}$ représente la perte de compensation réactive conduisant à une augmentation de tension égale à la valeur maximale admissible (ΔU_{max}).

En considérant à nouveau la limite de 2% ($\Delta U_{max} = 0,02$ pu), il est possible de représenter graphiquement la perte de compensation réactive maximale admissible en fonction de la puissance de court-circuit du nœud.

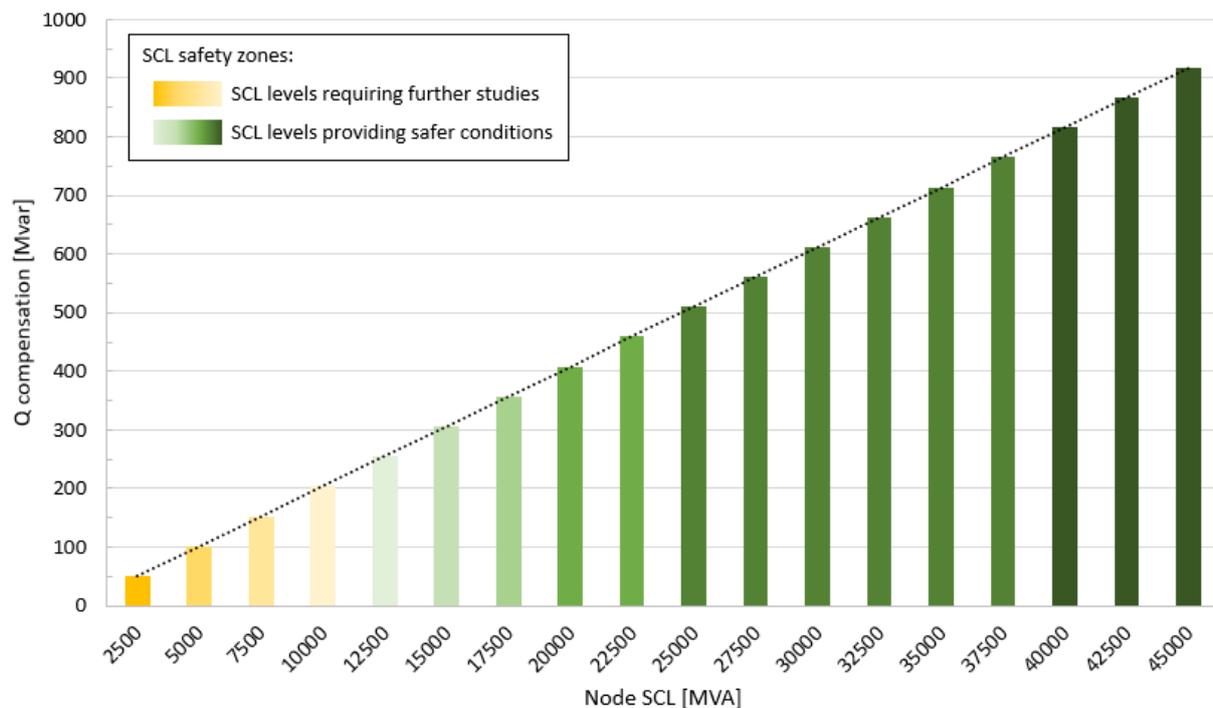


Figure 2-76: Perte maximale de compensation réactive entraînant un saut de tension de 2%

Selon la figure ci-dessus, la taille maximale possible d'une bobine de compensation pour une région où la puissance de court-circuit vaut 10 GVA serait de 200 Mvar. Comme la puissance maximale raisonnable envisagée par Swissgrid pour ses bobines est justement de 200 Mvar, il est judicieux de limiter la capacité des bobines si la puissance de court-circuit à l'endroit d'intérêt est inférieure à 10 GVA.

Finalement, il convient aussi d'observer qu'au cours des études EMT il a été possible d'identifier qu'avec une puissance de court-circuit supérieure à 12 GVA, l'installation de câbles est moins susceptible de créer des problèmes techniques. Néanmoins, en dessous de cette valeur, des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la situation au cas par cas. Ceci est indiqué dans la figure ci-dessus par les zones de sécurité des puissances de court-circuit (SCL safety zones).

3 WP 3 – Reconstruction du réseau après black-out

3.1 Introduction

Ce rapport fait partie de l'étude de câblage Suisse et constitue le troisième et dernier work package. L'objectif de cette partie du rapport est d'analyser l'impact des câbles sur la reconstruction du réseau après un black-out.

Les câbles dont il est question dans cette étude sont des câbles XLPE souterrains. Dorénavant, pour faciliter la lecture, seul le mot « câble » sera écrit.

Le concept actuel de reconstruction du réseau suisse de transport d'électricité repose sur quatre cellules de reconstruction réparties sur l'ensemble du territoire. Il s'agit des cellules sud, ouest, centre et est.

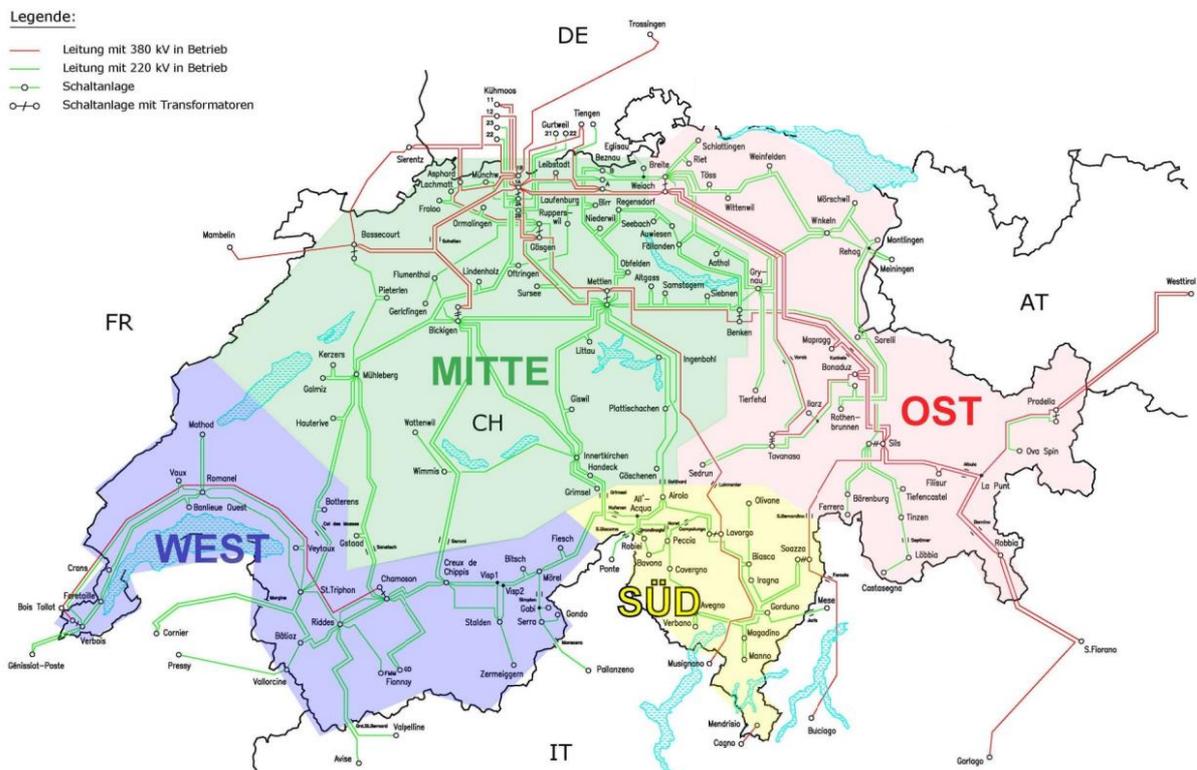


Figure 3-1: Cellules de reconstruction Swissgrid

Dans le cas d'une panne totale, il est prévu que les quatre cellules entament le processus de reconstruction de manière indépendante, puis se connectent les unes aux autres dans le cadre du processus de synchronisation. L'avantage de disposer de plusieurs cellules de reconstruction est d'accélérer le processus et de pouvoir rétablir le service en peu de temps. L'aide des pays voisins serait également très utile dans ce cas. Toutefois, la Suisse doit conserver la possibilité de rétablir le service même si les pays voisins sont en black-out.

Le meilleur scénario possible pour la reconstruction est que les lignes soient aériennes et pas trop longues. Les sections de câbles rendent la reconstruction très difficile pour un certain nombre de raisons décrites dans le présent rapport. L'augmentation des projets de câbles dans le réseau de transport rend nécessaire la réévaluation du processus de reconstruction. Certaines études déjà réalisées pour des projets de câbles en cours montrent clairement les défis auxquels Swissgrid doit faire face.

3.2 Reconstruction du réseau avec câbles

Le processus de reconstruction commence par une ou plusieurs machines capables de démarrer dans le noir c.-à-d. sans alimentation externe). Progressivement, les lignes et transformateurs voisins sont connectés jusqu'à ce qu'une charge, normalement une pompe, soit atteinte. La charge stabilise la cellule de reconstruction et après quelques minutes de fonctionnement stable, il est possible de raccorder des autres lignes pour élargir la cellule. Au cours de ces premières étapes, la puissance de court-circuit est très faible et le réseau est donc très sensible. La moindre perturbation peut entraîner la perte de la cellule et, par conséquent, la nécessité de repartir à zéro.

L'une des principales difficultés de la reconstruction est la connexion des longues lignes. Ces lignes nécessitent un courant de charge capacitif élevé, ce qui signifie que les générateurs sont très sollicités. Cet effet augmente avec la longueur de la ligne et est encore plus prononcé dans le cas des câbles qui ont un courant de charge très élevé en raison de leur caractère capacitif.

Pour éviter que la puissance réactive produite par les câbles ne surcharge les générateurs, des selfs de compensation peuvent être installées. Leur fonction est d'absorber la puissance réactive excédentaire et de donner ainsi aux générateurs une marge de manœuvre pour répondre aux variations imprévues de la charge. Si les selfs sont réglables, elles permettent également de maintenir le niveau de tension à des valeurs adéquates pendant la reconstruction.

Cependant, le problème de la production de puissance réactive par les câbles n'est pas le seul à entraver la reconstruction. Les câbles augmentent la probabilité de résonances de bas ordre provoquant des surtensions excessives. Cela augmente le risque d'activation non désirée des protections et d'endommagement des composants du réseau.

Lors d'échanges d'informations entre Swissgrid et d'autres TSO européens, il a été noté qu'il n'y a pas de précédent de reconstruction avec des câbles à proximité des cellules de reconstruction. En général, la pratique courante consiste à éviter les câbles jusqu'à ce qu'une cellule suffisamment solide et grande soit disponible. Cela est possible si les câbles se trouvent en dehors des cellules de reconstruction ou si le réseau est suffisamment maillé pour les éviter. Dans le cas de la Suisse, il n'y a souvent qu'un seul tracé pour relier les machines aux charges, ce qui ne permet aucune flexibilité.

Selon la planification actuelle, deux des quatre cellules disponibles sont concernées par ce problème des projets de câblage. Le projet de câble dans la vallée de la Maggia affecte la cellule de reconstruction sud et les projets de câble entre Mettlen et Ulrichen affectent la cellule de reconstruction centrale. Les conséquences sont expliquées dans les deux sections suivantes.

3.3 Celule de reconstruction sud (OFIMA-OFIBLE)

La cellule de reconstruction sud au Tessin est basée sur les générateurs Biasca et Olivone qui sont connectés à la pompe à Peccia via la ligne 220 kV Lavorgo – Peccia.

La ligne 220 kV Lavorgo – Peccia sera démantelée lorsque le projet Valle Maggia sera achevé. Cela signifie que la distance électrique entre les générateurs et la pompe de la cellule sud sera augmentée d'environ 27 km, dont 6 km de câble entre Bavona et Peccia. Le tracé de la reconstruction actuelle et future planifié en 2022 est indiqué en jaune dans la figure ci-dessous.

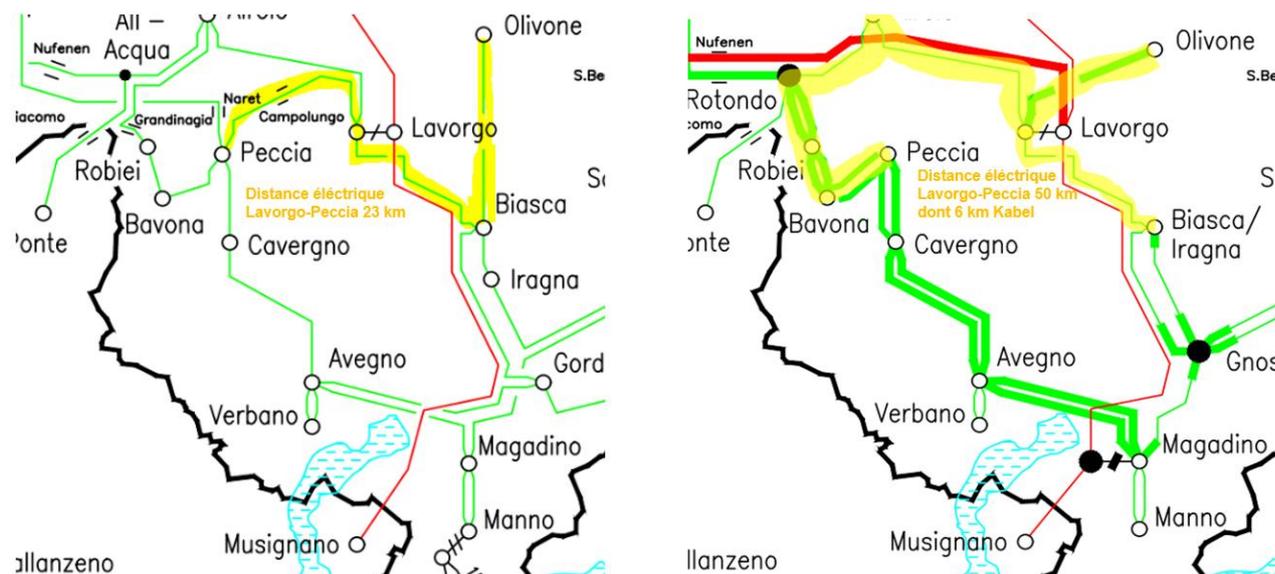


Figure 3-2: Chemin de reconstruction réseau avec configuration réseau actuelle (à gauche) et future (à droite)

Il faut à noter que depuis 2022 des changements ont eu lieu dans la planification du réseau tessinois. Notamment il n'y aura qu'une ligne 220 kV entre Biasca et Gnosca et la centrale d'Olivone sera en 150 kV. Cependant, les difficultés liées à l'axe de reconstruction plus long restent inchangées et l'injection d'Olivone en 150 kV pourrait encore compliquer la reconstruction.

S'il est vrai que la ligne 220 kV Bavona – Peccia est déjà un câble aujourd'hui, elle n'est pas utilisée dans la séquence de reconstruction car il existe un itinéraire plus court grâce à la ligne 220 kV Lavorgo – Peccia.

Le tronçon câblé et la longueur plus élevée en ligne aérienne représentent une variation importante dans le processus de reconstruction. C'est pourquoi une étude spécifique consacrée à la reconstruction [3.2] a été réalisée après les études dynamiques du projet de câble [3.1].

L'étude compare les tensions et l'absorption de puissance réactive des générateurs avec les deux configurations de réseau, actuelle et future. Les fréquences de résonance de la cellule de reconstruction sont également calculées dans les deux cas.

Les résultats montrent qu'il y a une nette diminution des fréquences de résonance avec la configuration future, ce qui provoque des surtensions lors de la mise sous tension du transformateur de la pompe à Peccia. Ce problème peut être résolu en installant une commutation contrôlée (POW Switching) dans le transformateur. Une autre conclusion importante est qu'à l'avenir, il faudra davantage de générateurs en service à Biasca et/ou Olivone pour augmenter la puissance de court-circuit de la cellule de reconstruction. Cela

permettra d'augmenter autant que possible les fréquences de résonance et d'alimenter les lignes, les câbles et les transformateurs nécessaires.

D'autres solutions ont été envisagées pour la cellule de reconstruction, comme l'utilisation des générateurs à Verbano. Cette option a toutefois donné de moins bons résultats que la cellule traditionnelle en raison de la faible puissance des générateurs à Verbano.

L'alternative qui pourrait simplifier le processus serait d'utiliser des pompes Robiei au lieu des pompes à Peccia. La distance électrique entre les générateurs et la pompe serait alors réduite, ce qui améliorerait les résultats.

En résumé, les résultats obtenus avec la future configuration du réseau sont nettement moins bons que les résultats actuels. Cependant, il existe des solutions aux problèmes rencontrés et la reconstruction avec la cellule sud reste toujours possible.

3.4 Cellule de reconstruction centrale (KWO)

Le problème de la cellule centrale étant plus exacerbé que celui de la cellule sud, il sera expliqué plus en détail dans ce rapport.

La reconstruction de la cellule centrale commence normalement avec le démarrage dans le noir d'un générateur de 43 MVA à Handeck. À Innertkirchen, il y a également un générateur de 52 MVA qui peut être démarré dans le noir. Après la mise en service d'un générateur, plusieurs autres générateurs doivent être ajoutés à Innertkirchen et à Handeck. La masse rotative nécessaire avant le raccordement de la pompe du Grimsel est obtenue en assemblant une génération d'environ 200 MVA. La pompe du Grimsel est connectée via un convertisseur qui permet de réguler la charge jusqu'à un maximum de 100 MVA.

La figure suivante montre la configuration du réseau dans la région après l'inclusion des câbles prévus (en lignes pointillées). La longueur des câbles est indiquée en km en bleu.

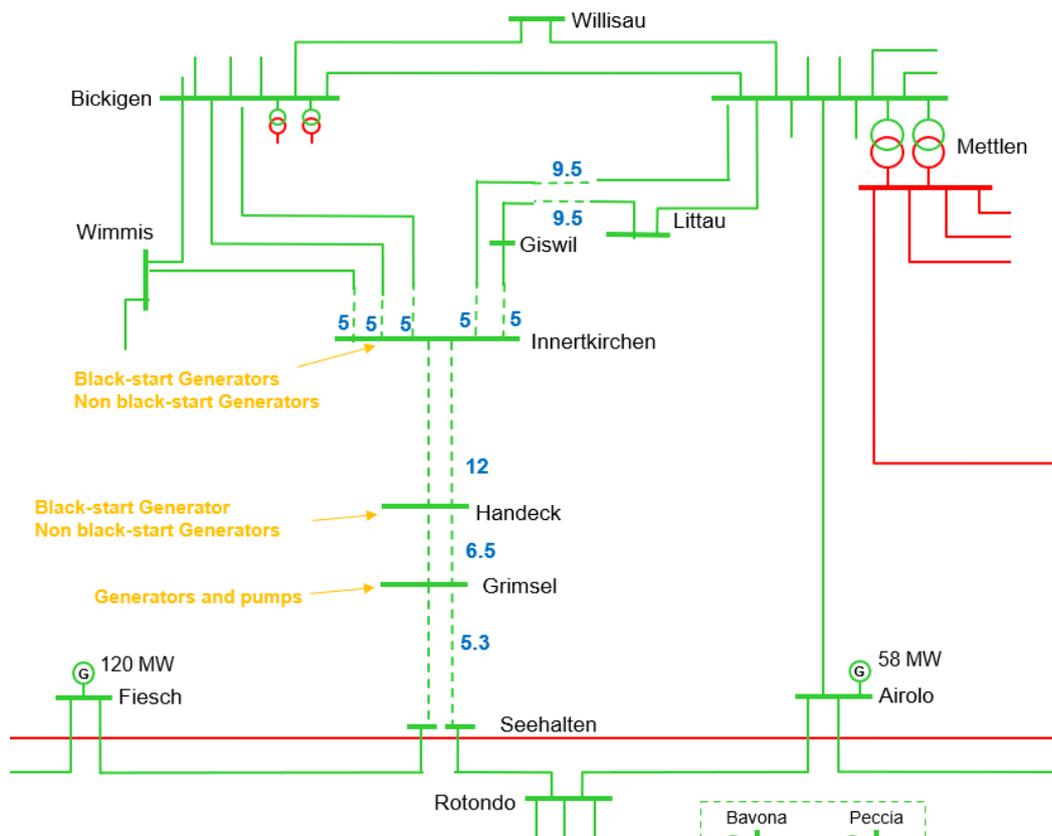


Figure 3-3: Configuration du réseau future dans la région de Grimsel

Comme le montre la Figure 3-3, la connexion des générateurs de Handeck et d'Innertkirchen à la pompe du Grimsel n'est possible qu'avec les câbles situés à l'intérieur de la cellule de reconstruction. Dans les résultats suivants, nous verrons comment cela complique considérablement le processus.

Plusieurs études ont été menées pour simuler différents scénarios de reconstruction afin d'adapter le processus actuel à la nouvelle configuration des câbles. Dans un premier temps, Enernex a simulé le processus actuel et 3 nouveaux scénarios proposés par Swissgrid et KWO pour améliorer les résultats [3.3] Ensuite, FKH a répété les analyses effectuées par Enernex pour confirmer les résultats obtenus [3.4] Enfin, les simulations ont été revérifiées au sein de Swissgrid et un nouveau scénario proposé par KWO a été simulé [3.5] Des études menées par trois entreprises différentes [3.3][3.4][3.5] ont montré que la reconstruction telle qu'elle est proposée actuellement ne peut pas fonctionner avec les nouveaux câbles planifiés. Le problème réside dans la faible puissance de court-circuit au départ avec un seul générateur de 43 MVA. La fréquence de résonance avec de longs câbles et une faible puissance de court-circuit est proche de 50 Hz, de sorte que des surtensions très élevées sont observées, qui se maintiennent et augmentent avec le temps.

La figure suivante montre la mise sous tension du câble Innertkirchen-Handeck de 12 km de long à $t=1,08$ s, suivie de la mise sous tension du transformateur d'Innertkirchen à $t=3$ s. Tout d'abord, les transitoires lors de la connexion du câble sont supérieurs à 2 p.u. et prennent jusqu'à 1 seconde pour s'amortir. Deuxièmement, et c'est plus inquiétant, la mise sous tension du transformateur d'Innertkirchen excite les résonances à basse fréquence, ce qui provoque des surtensions non amorties.

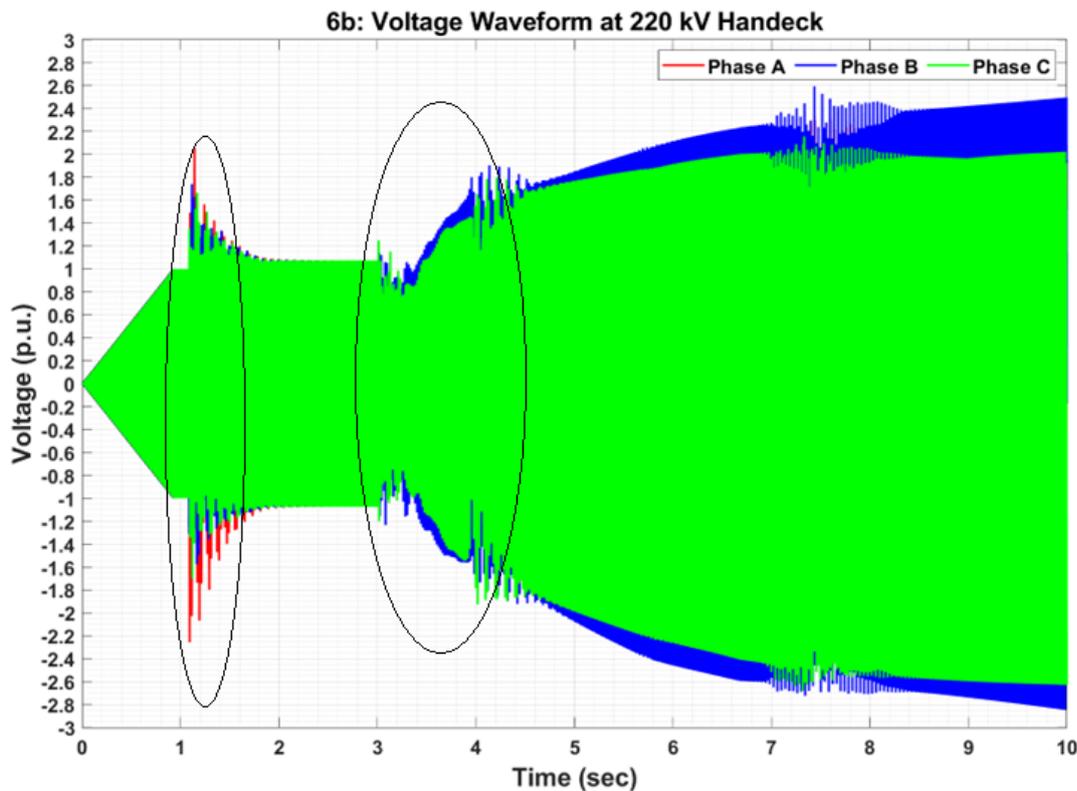


Figure 3-4: Tension à Handeck pendant le processus de reconstruction actuel avec configuration du réseau future

Ces résultats montrent clairement que, comme dans le cas de la cellule de reconstruction sud, il est nécessaire d'augmenter considérablement la masse tournante afin d'accroître la fréquence de résonance du système et de pouvoir mettre sous tension les câbles et les transformateurs sans transitoires dangereux. Cela se traduit par la nécessité d'inclure davantage de générateurs dans le processus.

Il est également nécessaire d'augmenter la tension sous forme de rampe afin d'éviter les sauts de tension soudains qui peuvent exciter les fréquences de résonance. Cette méthode consiste à connecter un groupe d'éléments de la cellule de reconstruction entre eux et à augmenter la tension petit à petit. Trois scénarios suivant cette méthodologie ont été préparés par Swissgrid et KWO et simulés par Enernex [3.3] et FKH [3.4].

Les simulations de ces trois nouveaux scénarios montrent une nette amélioration par rapport au processus actuel (qui ne fonctionne pas). Les transitoires, bien que marqués, sont amortis dans le temps. Cependant, il y a une asymétrie des phases de la tension pendant plus de 30 secondes après la mise en service de la charge.

La figure suivante montre la tension à Handeck selon le processus d'un de ces trois scénarios. La tension est augmentée en rampe avec l'ensemble de la cellule de reconstruction (Innertkirchen, Handeck et Grimsel) connectée dès le début, de sorte qu'aucun transitoire n'est observé dans cette phase. Ce sont les connexions d'éléments supplémentaires en dehors de la cellule de reconstruction qui provoquent les transitoires et les asymétries illustrées sur la figure. À $t=1,08s$ la 220 kV Giswil – Innertkirchen est mise sous tension, à $t=2s$ le transformateur 220/50 kV à Giswil, à $t=3,5s$ 10 MW de charge à Giswil, à $t=4s$ la 220 kV Giswil – Littau, à $t=5s$ le transformateur 220/110 kV à Littau, etc.

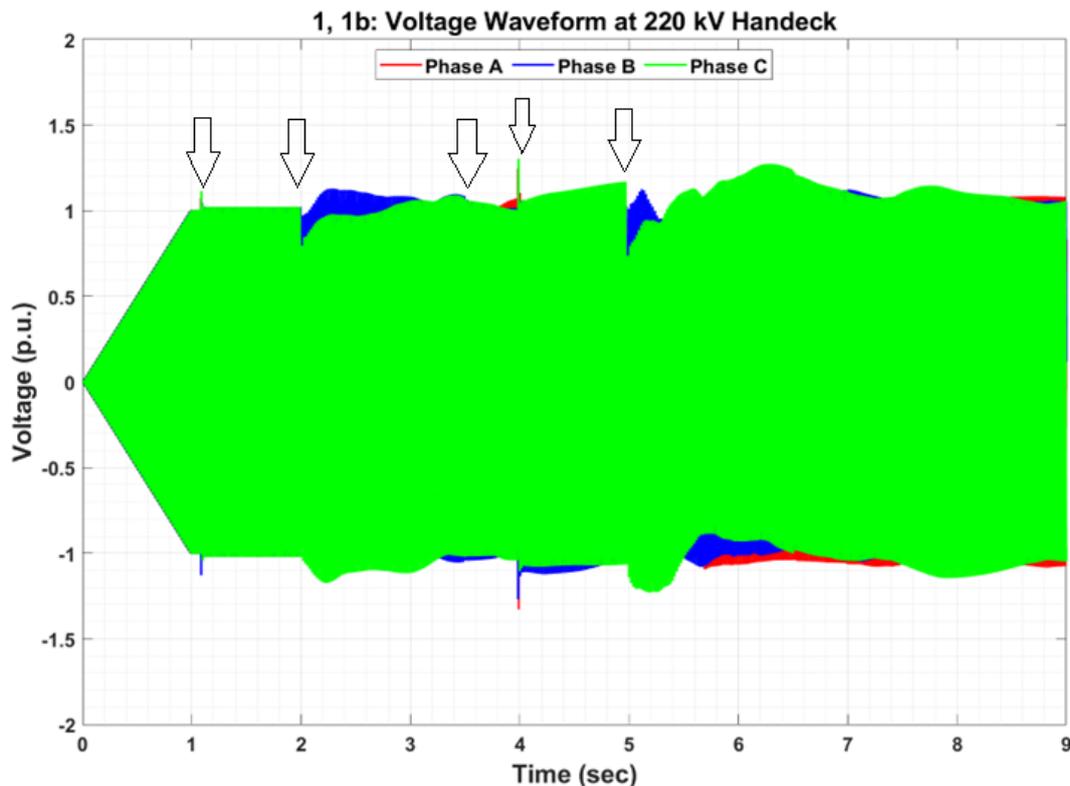


Figure 3-5: Tension à Handeck pendant un processus de reconstruction adapté à la configuration du réseau future

Les transitoires produits par les éléments connectés au cours du processus sont amortis et ne sont pas très élevés. Toutefois, le risque qu'une protection contre la surtension ou l'asymétrie soit activée en raison d'une distorsion pendant plusieurs secondes ne peut être exclu.

Dans la pratique, les spécialistes de KWO considèrent que la réalisation de ces scénarios est extrêmement difficile. D'une part, il s'agirait d'utiliser des générateurs qui ne peuvent pas démarrer à partir de zéro et qui devraient donc être adaptés. Des investissements supplémentaires de la part de KWO seraient nécessaires et ces investissements, à première vue, ne sont pas indemnisés ; d'autre part, il faudrait un système de contrôle qui permette d'augmenter la tension en même temps dans trois sous-stations séparées par des câbles. Il a donc été décidé de simuler un quatrième scénario dans lequel deux îles démarrent indépendamment et se synchronisent ensuite.

Les résultats de ce quatrième scénario, avec un démarrage dans le noir de deux cellules et une synchronisation ultérieure, sont décrits dans le document [3.5] En résumé, le démarrage à zéro des deux cellules serait possible, bien que dans l'une des cellules il y ait des difficultés notables qui requièrent de nombreuses conditions préalables difficiles à réaliser dans la pratique. La synchronisation ultérieure ne présente aucune difficulté, mais la connexion des lignes, des charges et des transformateurs à l'extérieur de la cellule est susceptible de provoquer des asymétries et des transitoires qui pourraient déclencher les protections.

En outre, plusieurs simulations de perte de charge pendant le processus de reconstruction ont été réalisées [3.6] L'objectif est de déterminer la résilience de la petite cellule une fois qu'elle a été construite et que les premiers éléments à l'extérieur de la cellule ont été connectés. La perte d'une petite charge est simulée pour vérifier qu'elle n'entraîne pas de défaillance du système. En fonction de la localisation de la charge perdue et de sa taille, il y a des cas où le système résiste à la perturbation et d'autres où il n'y parvient pas. Parmi ces

derniers, dans la figure suivante, l'exemple d'une perte de seulement 10 MW à Giswil qui a entraîné une défaillance du système.

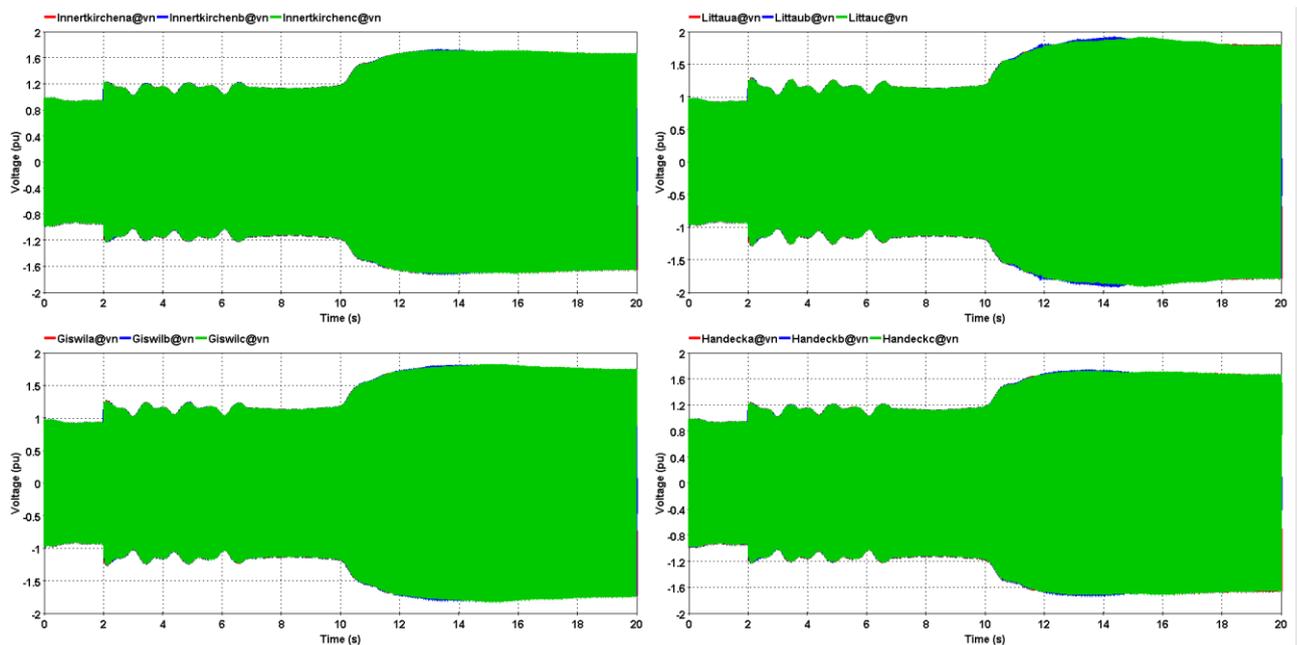


Figure 3-6: Profil de tension à Handeck, Innertkirchen, Giswil et Littau après une perte de 10 MW à Giswil (t = 2 s)

En résumant les conclusions de toutes les analyses effectuées, après la réalisation des projets de câbles prévus, la reconstruction telle qu'elle est proposée actuellement ne sera plus possible. La recherche de scénarios alternatifs montre une nette amélioration, mais les risques sont très importants et de multiples adaptations des infrastructures du réseau Swissgrid et de la centrale de KWO seraient nécessaires. Les adaptations nécessaires et les conditions préalables à respecter sans lesquelles il n'y a aucune chance de succès sont les suivantes :

- Les nouveaux grands générateurs d'Innertkirchen et de Handeck, respectivement de 150 et 90 MW, doivent être capables de démarrer dans le noir (pas prévu dans le projet de rénovation de la centrale).
- Ces générateurs doivent être en mesure de maintenir la tension à 0,85 p.u. pendant plusieurs minutes. Cela n'a jamais été fait et les spécialistes de la centrale ne savent pas si c'est possible. Les protections de surtension des générateurs risqueraient de déclencher.
- Les pompes raccordées à Innertkirchen et au Grimsel doivent être en mesure de maintenir un déséquilibre des trois phases de tension pendant au moins 30 secondes.
- S'assurer que ni les sous-tensions ni les déséquilibres de phase de la tension ne provoquent de déclenchements de protection.
- Self de compensation de réactif à Innertkirchen et à Handeck ou Grimsel. Cette solution de compensation est environ 32 millions CHF plus chère que la solution de compensation sans possibilité de reconstruction.
- Dispositifs d'enclenchement et de déclenchement contrôlé (POW-Switching) dans tous les transformateurs de la cellule et dans ceux qui seront prochainement raccordés.
- Mise à disposition de moyens pour démagnétiser les transformateurs et décharger les câbles (transformateurs inductifs et/ou selfs de compensation).

Une analyse des paramètres des protections de la centrale KWO effectuée par Swissgrid a déjà montré que le risque de déclenchements indésirables des protections est très important. Compte tenu de tous ces

facteurs, on peut conclure que pour laisser la porte ouverte à un processus de reconstruction dans le futur, il serait nécessaire de réaliser de nombreux investissements sans garantie de succès.

La reconstruction du réseau est un processus très extrême et donc très stressant. Même si une solution peut fonctionner en théorie, il n'est pas garanti que, dans cette situation exceptionnelle (black-out), tous les participants respectent correctement et sans erreur toutes les étapes. En d'autres termes, plus la procédure est compliquée et plus les conditions nécessaires à la réussite d'un démarrage dans le noir sont importantes, plus le risque d'échec dans la pratique est élevé.

3.5 Conclusions

L'expérience des autres TSO et celle de Swissgrid montre que la présence de câbles dans les cellules de reconstitution ou à proximité de celles-ci peut rendre la reconstitution après un black-out extrêmement difficile.

Selon la technologie de réalisation des développements prévus, de nouvelles stratégies de reconstruction du réseau peuvent s'avérer nécessaires. Les changements dans la localisation des centrales, le type de production et sa puissance peuvent changer énormément les concepts de reconstruction actuels et avoir un impact direct sur le temps nécessaire pour la reconstruction. Par ailleurs, il n'est pas certain que les nouveaux concepts fonctionnent, puisqu'il est impossible de les tester en conditions réelles avant la mise en place des projets de câblage. Dans ce cas, les décisions doivent être basées sur les résultats de simulations.

Comme le nombre de cellules de reconstitution disponibles a un impact direct sur le temps de rétablissement du service, la protection de nos cellules de reconstitution contre les câbles doit être considérée comme une priorité.

4 Références et annexes

4.1 Références WP 1

- [1.1] Markus Willi, «Technische Grundlagen Kabel als Netzbestandteil», ZSTD-25-011
- [1.2] Martin Hässig, RFI Drossel

4.2 Références WP 2

- [2.1] «Evaluation of Temporary Overvoltages in Power Systems due to Low Order Harmonic Resonances», CIGRÉ technical brochure, WG C4. 46, Ref. 913, 2023.
- [2.2] IEC 61000-3-6, «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV, and EHV power systems», Edition 2.0, 2008-02.
- [2.3] RTE international, «Technical report for EMTP cable feasibility studies – Mettlen – Ulrichen (Work Package 2)», R1, March 13, 2024.
- [2.4] Enernex (CESI), «Mettlen – Ulrichen Study Report for Work Package 1-3», June 10, 2024.
- [2.5] RTE international, «Technical report for EMTP cable feasibility studies Foretaille – Verbois (Work Package 2)», R0, October 30, 2023.
- [2.6] IEC TR 60071-4, «Insulation co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks», First edition, 2004-06.
- [2.7] Y. Fillion, «Ferrerésonance et surtension temporaires harmoniques», internal technical report, CNER, RTE.
- [2.8] «Transformer energization in power systems: A study guide», CIGRÉ technical brochure, WG C4. 307, Ref. 568, 2014.
- [2.9] RTE international, «Composite testing of HVDC-connected offshore wind farms», R4, March 10, 2021. Online: https://www.hvdccentre.com/wp-content/uploads/2021/03/Composite-Testing-of-HVDC-connected-OWF_110321.pdf.
- [2.10] «Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables», CIGRÉ technical brochure, WG C4. 502, Ref. 556, 2013.
- [2.11] «Line/Cable Data», user support document, EMTP-EMTPWorks.
- [2.12] W. I. Bowman and J. M. McNamee, «Development of Equivalent Pi and T Matrix Circuits for Long Untransposed Transmission Lines», IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, vol. 83, Issue 6, pp. 625-632, June 1964.
- [2.13] William D Stevenson Jr., «Elements of power system analysis», fourth edition, McGraw-Hill, 1982.
- [2.14] H. W. Dommel, «EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation», Vancouver, British Columbia, 1996.
- [2.15] A. Morched, B. Gustavsen, M. Tartibi, «A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, no. 3, July 1999, pp. 1032 -1038.
- [2.16] I. Kocar, J. Mahseredjian, «Accurate Frequency Dependent Cable Model for Electromagnetic Transients», IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 31, No. 3, June 2016, pp. 1281-1288.
- [2.17] M. Cervantes, I. Kocar, J. Mahseredjian, A. Ramirez, «Partitioned Fitting and DC Correction for the Simulation of Electromagnetic Transients in Transmission Lines», IEEE Power Delivery Letters, vol. 33, no. 6, Dec. 2018, pp. 3246 - 3248.
- [2.18] B. Gustavsen and A. Semlyen, «Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting», IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, no. 3, July 1999, pp. 1052-1061.
- [2.19] I. Kocar, J. Mahseredjian, G. Olivier, «Weighting Method for Transient Analysis of Underground Cables», IEEE Tran. on Power Delivery, Vol. 23, no. 3, July 2008, pp. 1629-1635.
- [2.20] I. Kocar, J. Mahseredjian, «New procedure for computation of time delays in propagation fonction fitting for transient modeling of cables», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 31, no. 2, July 2008, pp. 613-621.

- [2.21] «Cable Systems Electrical Characteristics», CIGRÉ technical brochure, WG B1. 30, Ref. 531, 2013.
- [2.22] Nexans, «60 – 500 kV High Voltage Underground Power Cables – XLPE insulated cables».
- [2.23] I. Lafaia, et al., «Field Test and Simulation of Transients on the RTE 225 kV Cable», IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, issue: 2, pp. 628-637, April 2017.
- [2.24] I. Lafaia, et al., «Frequency and Time domain Responses of Cross-Bonded Cables», IEEE Transactions on Power delivery, vol. 33, issue: 2, pp. 640-648, April 2018.
- [2.25] B. Gustavsen, et al., «Insulated Cables», in Power System Transients – Parameter Determination, Ed. J. A. Martinez-Velasco, CRC Press, 2010.
- [2.26] «Overhead conductor catalogues», Alfanair. Available: https://www.alfanar.com/catalogs/cables_wires/Overhead_Conductors.pdf
- [2.27] «Guide for electromagnetic transient studies involving VSC converters», CIGRÉ technical brochure, WG B4. 70, Ref. 832, 2021.
- [2.28] «Transformer energization in power systems: A study guide», CIGRÉ technical brochure, WG C4. 307, Ref. 568, 2014.
- [2.29] Markus Willi, «Technische Grundlagen Kabel als Netzbestandteil», ZSTD-25-011.
- [2.30] Swissgrid, «A22-126 Bg Swissgrid PQ Romanel Chamoson», interne.

4.3 Références WP 3

- [3.1] Technical support for Swissgrid on cable feasibility studies – Ticino. Ming Cai (RTEi)
- [3.2] Black-start cell south with future network configuration. Elena Giménez (Swissgrid)
- [3.3] Black-start Scenarios. Muhammad Humayun (Enernex)
- [3.4] Swissgrid Schwarzstart Szenarien. Gunnar Andrae (FKH)
- [3.5] Blackstart Note KWO Procedure. Ming Cai (Swisgrid)
- [3.6] Blackstart Note load rejection. Ming Cai (Swissgrid)
- [3.7] Blindleistungskompensation Innertkirchen – Seehalten. Elena Giménez (Swissgrid)

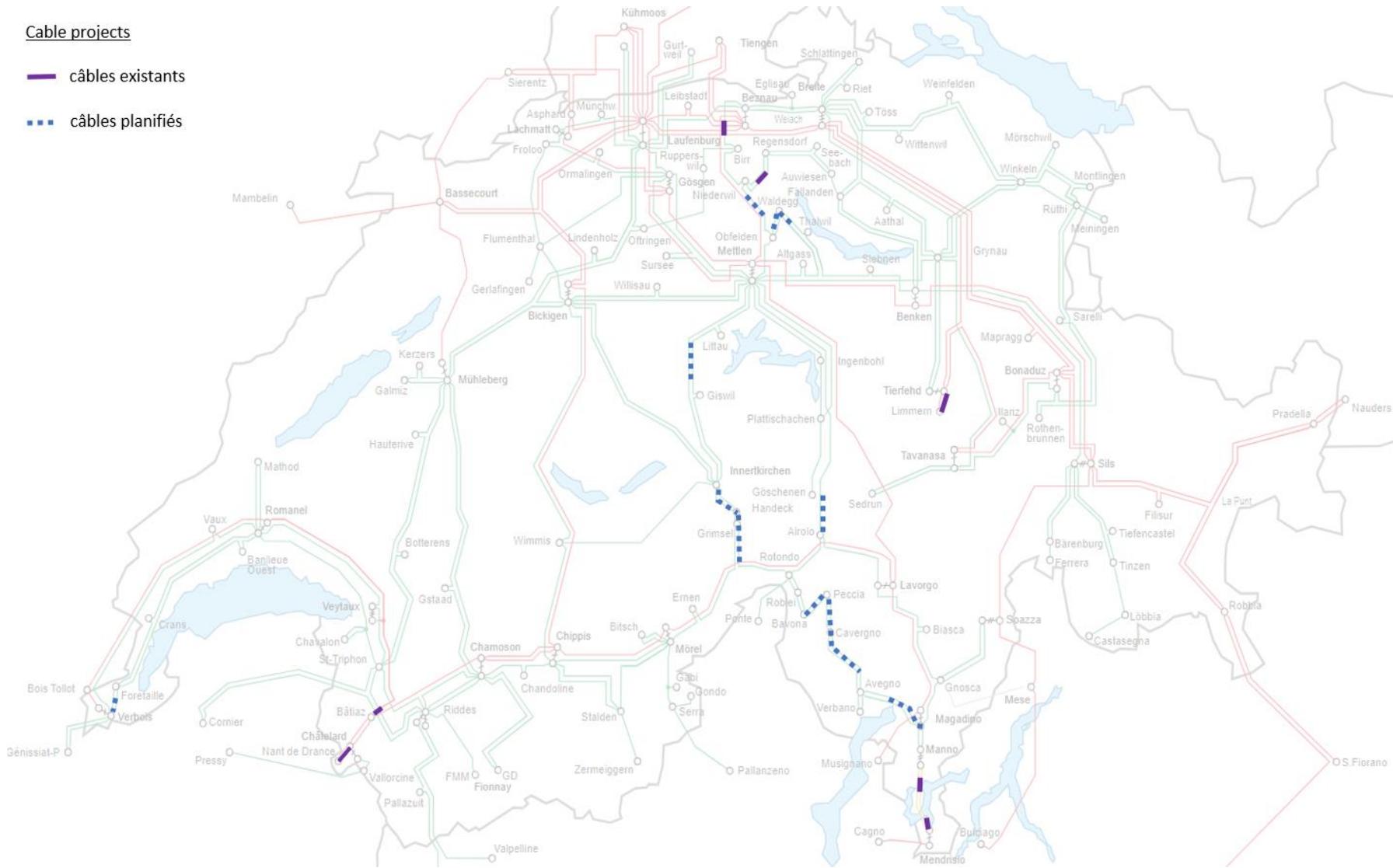


Figure 4-2: Câbles considérés dans le scénario 2

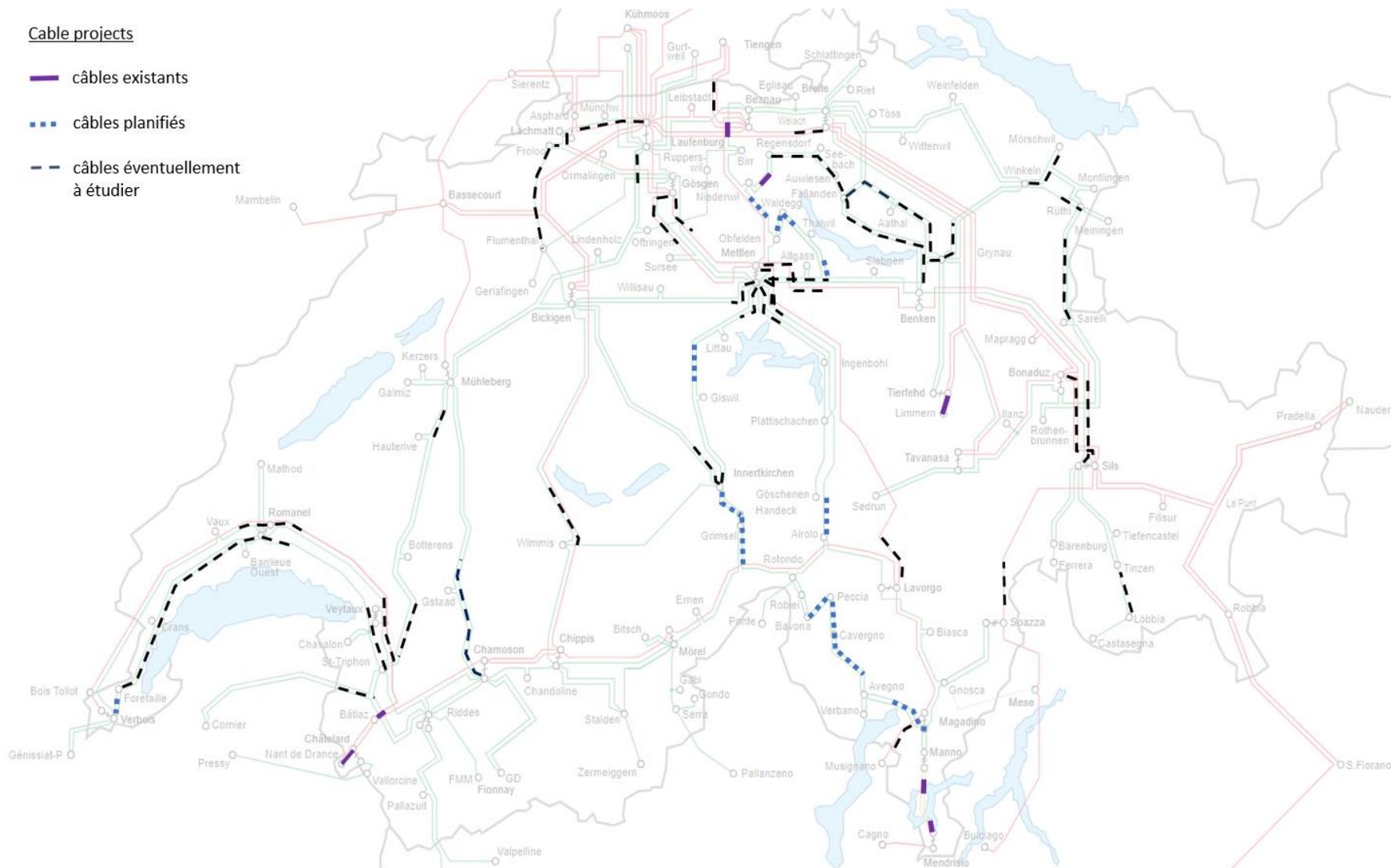


Figure 4-3: Câbles considérés dans le scénario 3

4.4.2 Modélisation du réseau dans EMTP

4.4.2.1 Avantages des simulations EMT

En raison de la complexité croissante du réseau, il ne suffit pas d'évaluer l'impact des systèmes de câbles prévus sur le profil de tension, la puissance de court-circuit et le flux d'énergie, car les réponses transitoires et dynamiques des câbles aux perturbations petites et grandes diffèrent de celles des lignes aériennes. Par conséquent, afin de garantir la stabilité des performances techniques et la sécurité de l'exploitation et de l'approvisionnement, des études sur les transitoires électromagnétiques (EMT, anglais : electromagnetic transients) doivent également être réalisées pour évaluer plus précisément les réponses du système aux harmoniques et aux résonances ainsi que le comportement du système lors de certains événements transitoires sur le site.

Pour démontrer les avantages des simulations EMT, une vue d'ensemble des trois principaux outils de simulation couramment utilisés dans l'analyse des réseaux électriques est présentée dans la Figure 4-5[2.9].

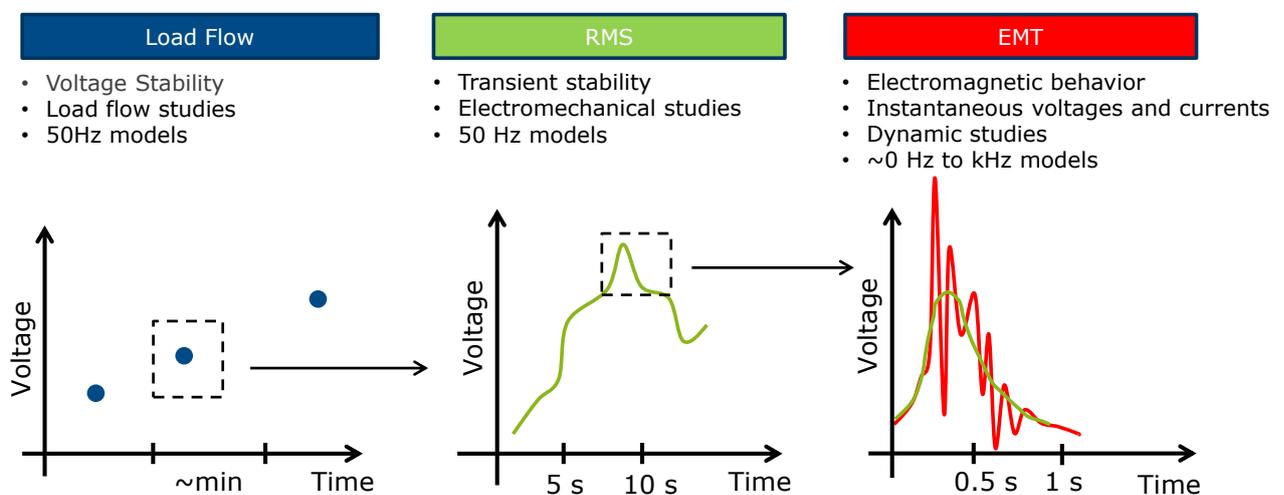


Figure 4-5: Vue d'ensemble des trois types d'outils pour l'analyse des réseaux électriques [2.9]

Les simulations EMT s'appliquent à une large gamme de fréquences et nécessitent donc des représentations détaillées de chaque composant du réseau (c.-à-d. l'équipement HT, les convertisseurs, les systèmes de C&P, le cas échéant, etc.) Comme le montre la Figure 4-5, dans le domaine temporel, au lieu de montrer un seul « snapshot » (flux de charge) ou une dynamique lente dans une plage de plusieurs secondes (RMS), les simulations EMT offrent une analyse dynamique transitoire détaillée en quelques microsecondes ou millisecondes en calculant les formes d'onde instantanées des variables d'état à un point temporel arbitraire dans le réseau simulé, représentant avec précision le comportement du système dans une large gamme de fréquences. Le prix à payer est toutefois un temps de simulation beaucoup plus long que pour les outils de flux de charge ou RMS.

La modélisation de plusieurs composantes majeures du réseau, y compris les approches de modélisation et les exemples de cas, est présentée dans les sections suivantes.

4.4.2.2 Introduction de modèles de lignes/câbles dans EMTP

4.4.2.2.1 Modèles de lignes/câbles disponibles en EMTP

Dans les études EMT des réseaux électriques, la modélisation des câbles souterrains et des lignes aériennes dépend des phénomènes à étudier et d'un certain nombre d'autres contraintes telles que la gamme de fréquence d'intérêt, le pas de temps d'intégration numérique par rapport à la complexité du réseau, etc.

Plusieurs modèles de câbles et de lignes ont été proposés dans la littérature et sont actuellement disponibles dans la plupart des outils de simulation de type EMT. Ces modèles peuvent être grossièrement classés en deux catégories : les modèles à paramètres forfaitaires et les modèles à paramètres distribués.

4.4.2.2 Modèles à paramètres groupés

Les modèles à paramètres groupés (anglais : lumped parameter models), également appelés modèles à section PI, considèrent la longueur totale d'un câble souterrain ou d'une ligne aérienne comme une section unique au lieu de tenir compte d'un nombre infini de segments de câbles ou de lignes. Deux types de modèles de câbles/lignes à paramètres groupés sont disponibles dans EMTP, comme indiqué dans le Tableau 4-1.

Nom du modèle	Caractéristiques	Plage de fréquence applicable
Nominal-PI	R, L, C à fréquence nominale fixe	50/60
Exact-PI	R, L, C calculés à des fréquences fixes et corrigés pour compenser les effets des longues lignes (nature distribuée). Uniquement applicable pour la simulation dans le domaine fréquentiel	DC à kHz

Tableau 4-1: Modèles de câbles/lignes à paramètres groupés disponibles dans EMTP

Les paramètres du modèle Nominal-PI sont directement dérivés de la multiplication des caractéristiques électriques du câble/de la ligne R' , L' et C' (résistance, inductance et capacité par unité de longueur, respectivement) calculées à la fréquence d'alimentation par la longueur totale du câble/ligne, ce qui donne une représentation du modèle avec une impédance série $R + j\omega L$ et des composantes shunt de C (capacité) en parallèle avec G (conductance). Le circuit équivalent du modèle triphasé Nominal-PI dans EMTP est présenté dans la Figure 4-6 (en négligeant la conductance de shunt G).

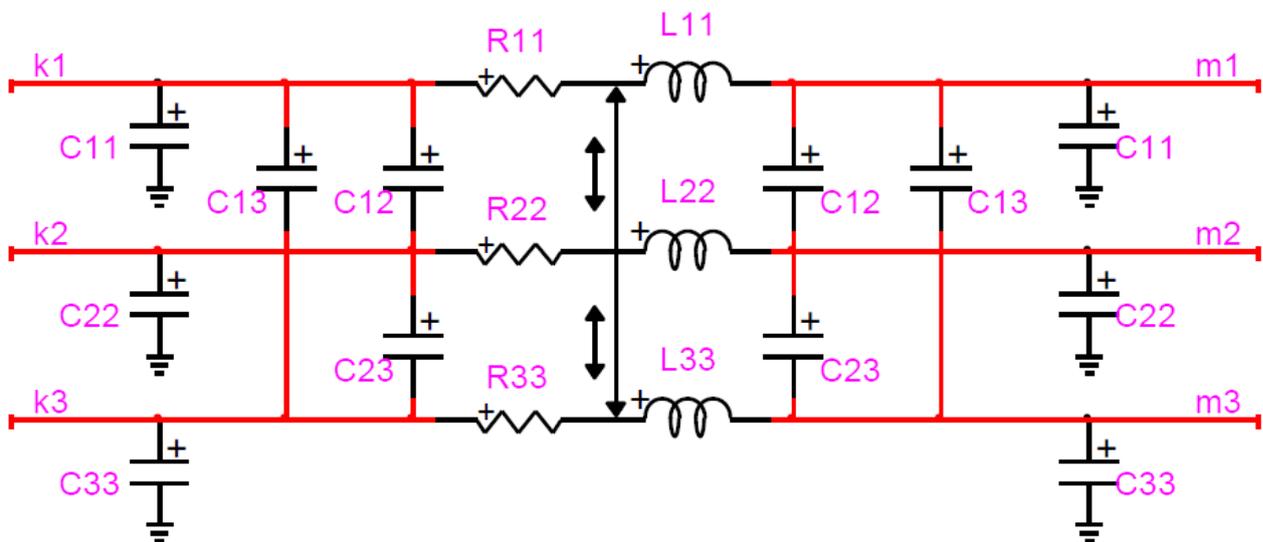


Figure 4-6: Circuit équivalent du modèle triphasé Nominal-PI dans EMTP (conductance de shunt G négligée)

Le modèle Nominal-PI peut être utilisé avec une précision suffisante pour les phénomènes de fréquence électrique en régime permanent. Il est donc principalement utilisé dans des études telles que les flux de puissance, les courts-circuits, la dynamique, etc.

Le modèle Exact-PI, quant à lui, est similaire au modèle Nominal-PI, avec des éléments groupés modifiés. R' , L' et C' modifiés pour tenir compte de la nature distribuée des longs câbles/lignes.

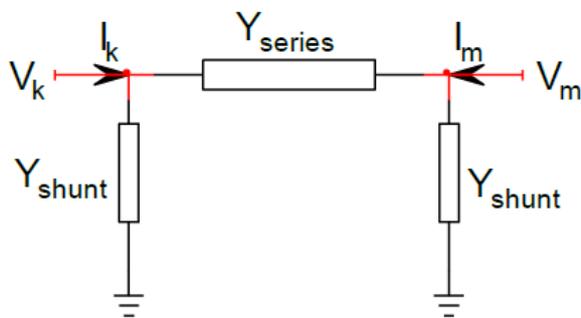


Figure 4-7: Représentation monophasée du modèle Exact-PI dans EMTP

Pour un câble/ligne monophasé représenté à l'aide du modèle Exact-PI, comme le montre la Figure 4-7, la relation entre la tension et le courant aux extrémités d'émission et de réception (k et m, respectivement) du câble/ligne peut être calculée à partir de l'équation suivante de la matrice d'admittance nodale :

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{series} + Y_{shunt} & -Y_{series} \\ -Y_{series} & Y_{series} + Y_{shunt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

où V_k, I_k et V_m, I_m représentent les tensions et les courants aux extrémités de l'émetteur et du récepteur, et les admittances en série et en dérivation sont données par :

$$Y_{series} = \frac{1}{Z_c \sinh(\gamma l)}$$

$$Y_{shunt} = \frac{1}{Z_c \tanh(\gamma l / 2)}$$

Il convient de mentionner que γ et Z_c sont respectivement la constante de propagation et l'impédance caractéristique. Elles peuvent être données par :

$$\gamma = \sqrt{(R' + sL')(G' + sC')} = \underbrace{\alpha}_{\text{attenuation constant}} + j \underbrace{\beta}_{\text{phase constant}}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + sL'}{G' + sC'}} = \widehat{Z}_c \angle \theta_{Z_c}$$

Dans EMTP, le modèle Exact-PI ne peut être utilisé que pour les analyses en régime permanent et les analyses par balayage de fréquences, avec la possibilité de fournir des résultats de simulation précis pour une gamme de fréquences spécifiée. Pour plus d'informations sur le modèle Exact-PI, voir [2.10] - [2.13].

4.4.2.2.3 Modèles à paramètres distribués

En réalité, un câble souterrain ou une ligne aérienne ont une certaine longueur. Leurs caractéristiques électriques (R' , L' et C') ne sont donc pas concentrées et groupées à un certain endroit du réseau, mais réparties uniformément sur toute la longueur du chemin de transmission. Une forme d'onde se déplaçant d'une extrémité à l'autre d'un segment de câble/ligne peut subir une atténuation d'amplitude et un déphasage en raison de la nature distribuée des caractéristiques électriques du câble/ligne et de la vitesse de propagation limitée

de la forme d'onde, ce qui doit être pris en compte dans les simulations transitoires détaillées. En outre, les perturbations transitoires dans les réseaux électriques peuvent provoquer des fronts d'onde de tension abrupts qui contiennent des composantes à haute fréquence, entraînant par la suite des surtensions au niveau des connexions de bus ou des réflexions au niveau des extrémités ouvertes. La dépendance à l'égard de la fréquence des caractéristiques électriques des câbles/lignes (c.-à-d. l'effet de peau dans les conducteurs, le chemin de retour à la terre, etc.). Trois types de modèles de câbles/lignes à paramètres distribués sont disponibles dans EMTP, comme indiqué dans le Tableau 4-2.

Nom du modèle	Caractéristiques	Plage de fréquence applicable
CP (paramètre constant)	Impédance de choc et vitesse de propagation à une fréquence fixe dans le domaine modal. Pas de dépendance à la fréquence. Efficacité de calcul relativement plus élevée.	Une fréquence fixe à laquelle l'impédance de choc et la vitesse de propagation sont évaluées.
FD (dépendant de la fréquence)	Dépendance en fréquence dans le domaine modal. Adoption de certaines approximations.	DC à kHz
Wideband	Dépendance totale de la fréquence dans le domaine de la phase. Plus précis. Lourde charge de calcul.	DC à kHz

Tableau 4-2: Modèles de câbles/lignes à paramètres distribués disponibles dans EMTP

Les modèles CP et FD sont tous deux basés sur la résolution des équations aux dérivées partielles (4.2) et (4.3) (en supposant que $\Delta x \rightarrow 0$) d'un segment infinitésimal d'élément grumeleux d'un câble/ligne monofilaire, tel que présenté dans la Figure 4-8.

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -R' i(x,t) - L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -G' i(x,t) - C' \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \quad (4.3)$$

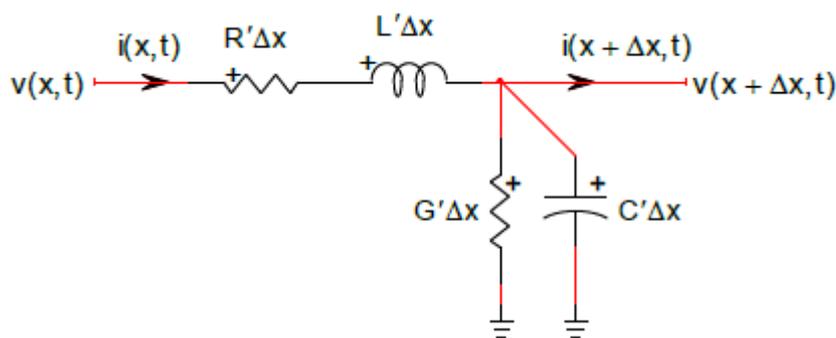


Figure 4-8: Circuit équivalent d'un segment infinitésimal de câble/ligne à élément grumeleux

En résolvant les équations (4.2) et (4.3) pour toute la longueur l du segment de câble/ligne (de $x = 0$ à $x = l$), on obtient les deux équations suivantes :

$$I_k = Y_c V_k - H[Y_c V_m + I_m] \quad (4.4)$$

$$I_m = Y_c V_m - H[Y_c V_k + I_k] \quad (4.5)$$

où V_k, I_k et V_m, I_m désignent les tensions et les courants aux extrémités de l'émetteur et du récepteur, et Y_c, H sont donnés par :

$$Y_c = Z_c^{-1}$$

$$H = e^{-\gamma l}$$

Pour un système multiconducteur (par exemple, des câbles/lignes triphasés), les équations (4.2) à (4.5) sont sous forme de vecteur et de matrice.

Par la suite, les équations (4.4) et (4.5) seront résolues dans le domaine modal à l'aide d'une certaine technique de décomposition modale avec transformations et reconverties dans le domaine temporel pour les études transitoires dans EMTP.

Il est à noter que pour le modèle CP, Y_c et H sont calculées pour une seule fréquence spécifiée, alors qu'elles sont échantillonnées pour une gamme de fréquences sélectionnées et ajustées par courbe à l'aide d'une technique basée sur Bode dans les fonctions rationnelles équivalentes pour le modèle FD. Des informations détaillées sur les modèles CP et FD sont disponibles dans [2.11] et [2.14].

Comme indiqué dans le Tableau 4-2, le modèle Wideband est de loin le modèle le plus précis pour les simulations dans le domaine temporel avec des câbles et des lignes pour une large bande de fréquences. Il fonctionne dans le domaine de la phase et tient compte de la dépendance totale à la fréquence des paramètres électriques du câble/de la ligne avec le moins d'approximations possible. Les théories et les algorithmes mis en œuvre derrière le modèle à large bande dans EMTP sont toutefois assez complexes et dépassent donc le cadre de ce rapport. De plus amples informations sur le modèle à large bande peuvent être trouvées dans un certain nombre de publications telles que [2.15] - [2.20].

Compte tenu des spécificités du projet, les modèles à paramètres groupés ne sont pas utilisés pour modéliser les câbles/lignes dans le cadre de ce projet en raison de leurs limites décrites précédemment. Parmi tous les modèles à paramètres distribués disponibles dans EMTP, il a été décidé d'utiliser le modèle Wideband pour modéliser toutes les lignes/câbles de ce projet, car il s'agit de loin du modèle le plus précis pour les simulations dans le domaine temporel, qui tient compte de la dépendance totale de la fréquence avec un minimum d'approximations.

4.4.2.3 Modélisation des segments de câbles souterrains

Afin de dériver les données du modèle de câble à utiliser dans les études transitoires, il est nécessaire de spécifier leurs caractéristiques géométriques et matérielles. En prenant comme exemple le câble 220 kV Froloo – Flumenthal de 35 km dans le scénario 3, les données géométriques et matérielles du câble sont présentées dans la Figure 4-9. Il convient de noter que ce câble a une section transversale de 1600 mm² sur la base des premières hypothèses.

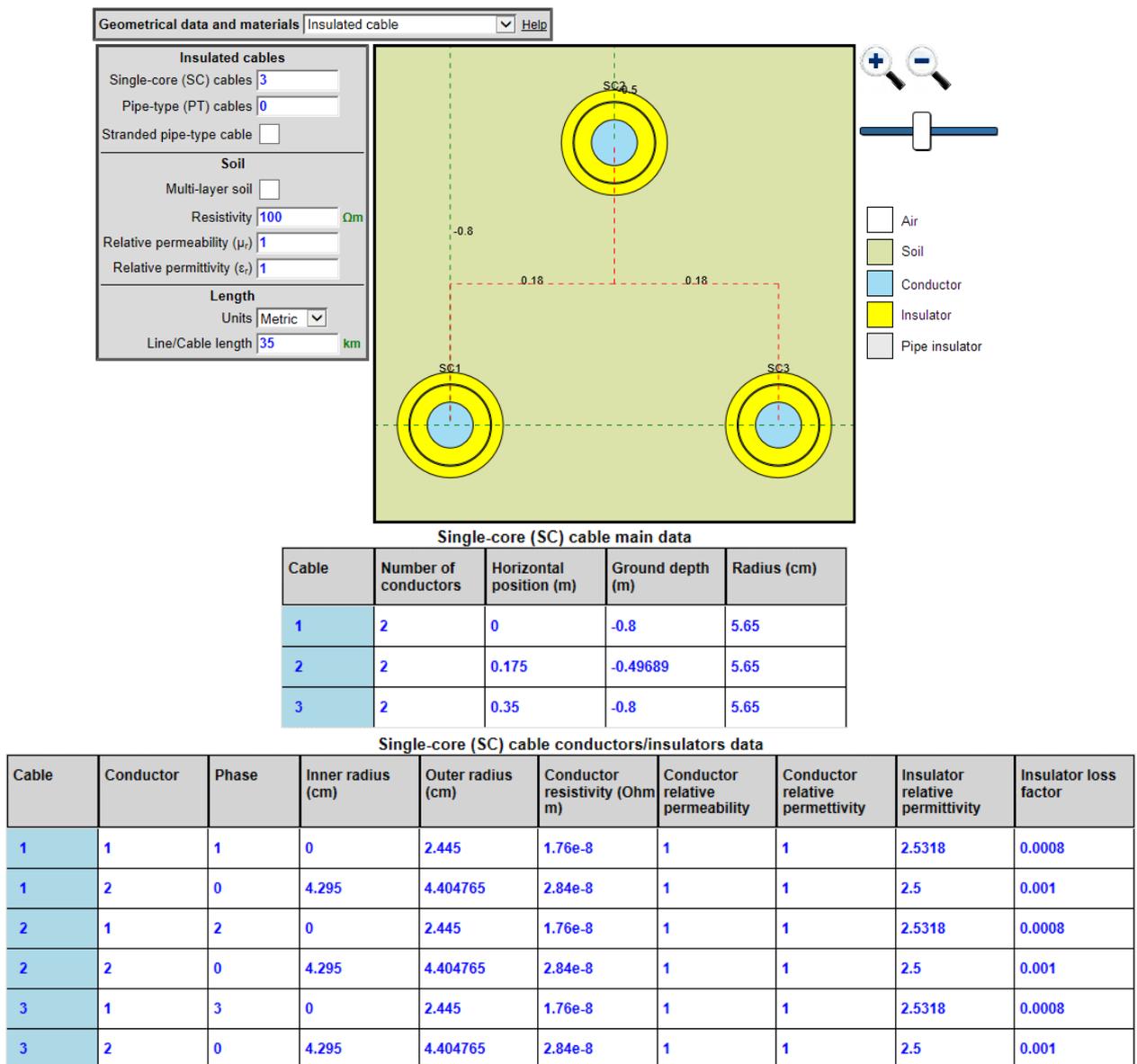


Figure 4-9: Données géométriques et matérielles du câble 220 kV Froloo – Flumenthal dans le scénario 3 (35 km)

Le choix et la dérivation de certains paramètres géométriques et matériels du câble ainsi que les hypothèses adoptées sont mis en évidence comme suit :

4.4.2.3.1 Paramètres du sol

Non seulement la résistivité de la terre joue un rôle important dans les surtensions transitoires de la gaine, mais elle contribue aussi partiellement à l'impédance homopolaire du système de câble, ce qui aurait un impact sur le comportement du système en cas de défauts asymétriques. Il a été décidé d'utiliser la valeur par défaut de 100 Ωm proposée par EMTP pour les raisons suivantes :

- La résistivité de la terre est de nature inhomogène et varie d'une zone à l'autre, ce qui rend difficile la modélisation de segments de câbles nécessitant une valeur de résistivité de la terre unique et fixe ;
- malgré la disponibilité de certains documents internes sur ce sujet, les mesures précises sur le terrain sont rares ;

- c. la résistivité de la terre par défaut de 100 Ωm fournit une précision adéquate dans la plupart des études transitoires, ce qui est suffisant à ce stade du projet.

Outre la résistivité du sol, les valeurs par défaut proposées par EMTP sont également adoptées pour la perméabilité relative du sol μ_r et la permittivité ϵ_r .

4.4.2.3.2 Données principales du câble à conducteur unique (SC, anglais : single-core)

En l'absence d'informations concrètes concernant la formation des câbles au stade actuel du projet, on suppose que la formation *trefoil* sera mise en œuvre, comme le montre la Figure 4-10 [2.21] On peut s'attendre à des différences mineures dans l'inductance et la capacité totales du câble dues à des changements dans le couplage de phase mutuel si un autre type de formation est mis en œuvre sur le site. Toutefois, les hypothèses actuelles sont pertinentes aux fins des études de faisabilité.

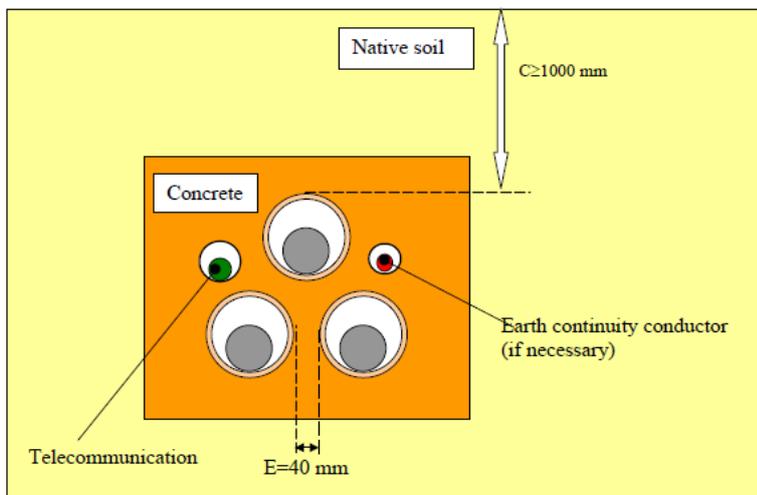


Figure 4-10: Schéma typique d'un système de câbles trefoil [2.21]

La profondeur du sol pour les systèmes de câbles souterrains est généralement inférieure à 2 m. Une profondeur de plus de 2 m implique des exigences plus strictes en matière de génie civil et est donc assez rare. Une profondeur de 0,8 m pour les phases a et c est considérée comme une hypothèse dans ce projet.

4.4.2.3.3 Données sur les conducteurs/isolation des câbles à conducteur unique (SC)

En supposant que le conducteur en cuivre de Milliken est solide pour simplifier la dérivation des paramètres, les rayons intérieur et extérieur du conducteur et de l'écran peuvent être déduits de la manière suivante [2.22].

La résistivité du conducteur et de l'écran en aluminium, ainsi que les facteurs de perte de l'isolant sont obtenus à partir de [2.23] [2.24] où sont présentés les résultats d'essais sur le terrain d'un long système de câble du même type (XLPE) à RTE.

La capacité nominale par unité de longueur d'un tel système de câble est de 0,25 µF/km selon [2.22]. La permittivité relative de l'isolant XLPE peut donc être calculée à l'aide de la formule suivante [2.10].

$$\epsilon_{r1} = \frac{C \ln(r_2/r_1)}{2\pi\epsilon_0} \quad (4.6)$$

où :

- C : capacité du câble par unité de longueur ($\mu\text{F}/\text{km}$)
- r_2 : rayon intérieur de l'écran
- r_1 : rayon extérieur du conducteur
- ε_0 : permittivité du vide

Cependant, comme pour d'autres câbles haute tension typiques, le conducteur du système de câble 220 kV Froloo – Flumenthal est également entouré de deux couches de matériau semi-conducteur sur la surface extérieure du conducteur et sur la surface intérieure de l'écran. Ces couches de semi-conducteurs ont pour fonction d'égaliser le champ électrique autour du conducteur en réduisant les contraintes électriques sur l'isolation et d'empêcher la corrosion électrolytique des couches d'armure métallique. En raison de la résistivité plus élevée du matériau semi-conducteur, les courants ont tendance à circuler dans le noyau alors que les charges passent à travers les semi-conducteurs. Par conséquent, les couches semi-conductrices font partie du système d'isolation pour les calculs de magnétisme et de courant, alors qu'elles font partie de l'âme pour le calcul de la capacité du câble. Il est donc nécessaire de modifier la permittivité relative de l'isolation en traitant les couches semi-conductrices comme une partie de l'isolation [2.25].

$$\varepsilon_{r1_mod} = \varepsilon_{r1} \frac{\ln(R_b/R_a)}{\ln(r_b/r_a)} \quad (4.7)$$

où :

- r_b : rayon extérieur de l'isolation
- r_a : rayon intérieur de l'isolation
- R_b : rayon extérieur de la seconde couche semi-conductrice
- R_a : rayon extérieur du conducteur

Il est donc possible d'obtenir la permittivité relative modifiée de l'isolant :

$$\varepsilon_{r1_mod} = 2.5318$$

Les couches extérieures du câble sont généralement constituées de matériaux en polyéthylène haute densité. Ces matériaux ne sont toutefois pas connus au stade actuel du projet. Compte tenu de leur épaisseur beaucoup plus faible que celle de la couche d'isolation (qui a donc moins d'impact sur les caractéristiques électriques du câble), une permittivité relative de 2,5 est supposée, comme dans [2.23].

Outre les discussions présentées précédemment, plusieurs options de modélisation supplémentaires doivent également être spécifiées dans EMTP pour améliorer les performances dynamiques globales du modèle de câble, comme le montre la Figure 4-11.

Modeling options

Model Wideband ▾

Frequency range

f_{\min} Hz

Points/decade

Decades

f_{\max} Hz

Options

Proximity effect

Earth return path

Crossbonded

Crossbonded and reduced

Wideband Fitting

Convergence tolerance %

Cable model correction

DC correction

Apply grouping

Figure 4-11: Options de modélisation pour les modèles de câbles Wideband

En Figure 4-11, l'option « Earth return path » est importante dans les modèles Wideband pour la stabilité et la représentation précise du comportement transitoire du câble (en particulier l'écran métallique) à des fréquences élevées (10 kHz et plus). Les deux options « Crossbonded » et « Crossbonded and reduced » sont choisies pour tenir compte de l'intégralité des jonctions à l'intérieur de chaque « major section » et pour obtenir une efficacité de calcul. Les paramètres d'ajustement sont soigneusement sélectionnés à l'aide d'une approche par essais et erreurs dans « Frequency range » afin d'éviter les problèmes de stabilité causés par des violations de la passivité. De plus amples informations sur la sélection d'autres options de modélisation peuvent être trouvées dans [2.11].

4.4.2.4 Modélisation des segments de lignes aériennes

Les caractéristiques électriques et physiques des lignes aériennes dans les modèles EMTP Wideband sont dérivées des matériaux et des données géométriques des conducteurs et des fils de terre, ainsi que des paramètres géométriques des pylônes. Veuillez noter que :

- Pour les segments de ligne existants, toutes les informations, y compris les Phasenpläne, sont disponibles. Par conséquent, des hypothèses minimales sont nécessaires.
- D'importants travaux d'amélioration des infrastructures sont prévus dans certaines zones du réseau. Par conséquent, des hypothèses appropriées sont adoptées dans la modélisation de ces segments de ligne qui seront mis en œuvre dans un avenir proche.

Pour les besoins de la démonstration, la dérivation des paramètres du modèle de ligne aérienne dans EMTP pour la ligne 220 kV 71,1 km à double circuit Bickigen – Innertkirchen est donnée dans cette section à titre d'exemple. Il convient de noter qu'un segment de câble de 15 km est prévu pour remplacer certaines sections de cette ligne, comme le prévoit le scénario 3.

Le Phasenplan TR1520 confirme que le chemin de transmission actuel Bickigen – Innertkirchen est constitué d'un système de lignes aériennes à double circuit de 220 kV montées sur le même pylône, la configuration dominante du pylône étant indiquée dans la Figure 4-12.

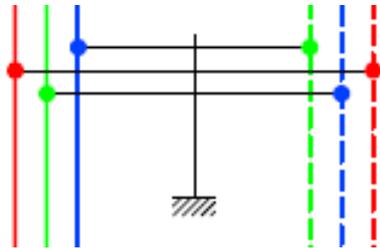


Figure 4-12: Configuration dominante des pylônes sur le trajet Bickigen – Innertkirchen (les deux lignes à 220 kV)

Les dimensions du pylône dominant identifié peuvent être obtenues à partir du projet A158 Trassendigitalisierung, comme présenté dans la Figure 4-13. Il est à noter que :

- la hauteur de chaque conducteur de phase peut être identifiée dans l'indicateur d'élévation à droite, tandis que l'espacement horizontal de chaque conducteur de phase est indiqué directement dans la figure (unité : mètre) ;
- W1 - W6 représentent les conducteurs de phase monofilaires et W7 représente le conducteur de terre monofilaire.

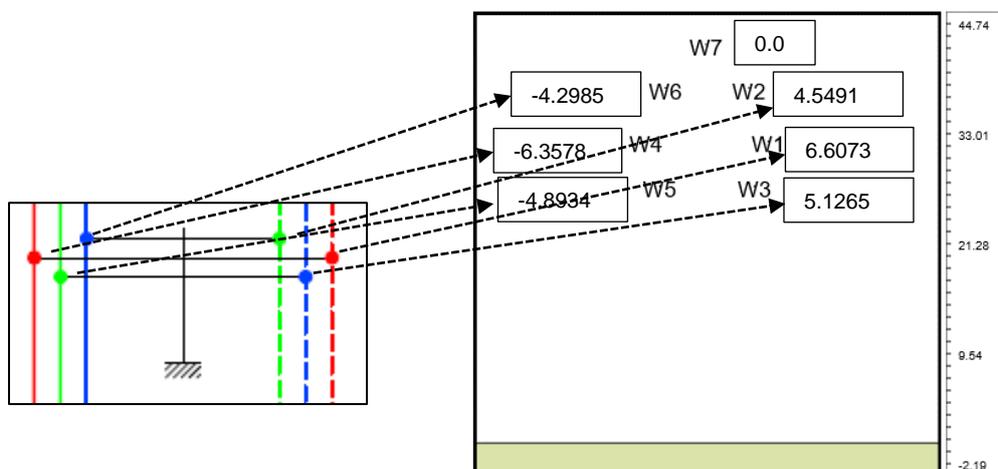


Figure 4-13: Pylône de 220 kV sur le trajet Bickigen – Innertkirchen

Outre les données géométriques du pylône, EMTP demande également les informations suivantes pour les conducteurs et les fils de terre :

- type de conducteurs (à fil unique ou en faisceau)
- nombre de conducteurs par phase s'ils sont groupés
- angle de référence en cas de regroupement
- rayon de du faisceau
- rayon du conducteur
- résistance DC du conducteur

4.4.2.4.1 Conducteurs de phase

Les données matérielles et géométriques pour la ligne 220 kV Bickigen – Innertkirchen sont données dans le Tableau 4-3.

Longueur (km)	L'offre groupée	Section transversale (mm ²)	Type
40,3	1	600	Aldrey
30,8	1	486+64	ACSR

Tableau 4-3: Données matérielles et géométriques pour la ligne 220 kV Bickigen – Innertkirchen

Selon le Tableau 4-3, un tronçon de 40,3 km de cette connexion est constitué d'un conducteur unifilaire en Aldrey (AAAC, All Aluminum - Alloy Conductors) pour chaque phase avec une section de 600 mm² tandis que chaque phase du tronçon restant de 30,8 km est constituée d'un conducteur unifilaire ACSR (Aluminum Conductors, Steel-Reinforced) avec une section de 486 (aluminium) + 64 (acier) mm².

Un catalogue de conducteurs Aldrey et ACSR de sections similaires, conformes aux normes IEC 61089 et DIN 48204, respectivement, peut être obtenu auprès d'un fabricant particulier [2.26] dont un extrait est présenté dans la Figure 4-14. Les valeurs correspondantes sont utilisées dans ce projet comme hypothèse.

Code Number	Nominal cross sectional area	Conductor construction	Approx. overall diameter	Approx. overall weight	Max. DC Resistance at 20 °C	Rated strength	AES Code
	mm ²	No. x Ø (mm)	mm	Kg / km	Ω / km	KN	
500	575.0	37 x 4.45	31.20	1585.5	0.05770	169.76	L02B800370IMX

(a)

Nominal cross sectional area	Nominal cross sectional area		Conductor construction		Approx. overall diameter	Approx. overall weight	Calculated DC Resistance at 20 °C	Ampacity (*)	Rated strength	AES Code
	Al	St	Al	St						
	mm ²		No. x Ø (mm)		mm	Kg / km	Ω / km	A	KN	
450 / 40	448.71	39.49	48 x 3.45	7 x 2.68	28.7	1553	0.06440	920	120.19	S02I400550DMX
490 / 65	490.29	63.55	54 x 3.40	7 x 3.40	30.6	1860	0.05900	960	152.85	S02I500610DMX
495 / 35	494.36	34.09	45 x 3.74	7 x 2.49	29.9	1636	0.05840	985	120.31	S02I600520DMX

(b)

Figure 4-14: Extrait du catalogue des conducteurs Aldrey et ACSR pour 220 kV Bickigen – Innertkirchen (Alfanar [2.26])

Le rayon du conducteur et la résistance DC peuvent ainsi être obtenus :

Pour le tronçon de 40,3 km :

$$r_{c220} = 1.560 \text{ cm}$$

$$R_{DC,220} = 0.0577 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Pour le tronçon de 30,8 km :

$$r_{c220} = 1.530 \text{ cm}$$

$$R_{DC,220} = 0.0590 \Omega/\text{km}$$

4.4.2.4.2 Conducteurs du fil de terre

Les informations relatives aux matériaux et à la géométrie du fil de terre pour les connexions 220 kV Bickigen – Innertkirchen sont indiquées dans le tableau suivant Tableau 4-4.

Longueur (km)	Section transversale (mm ²)	Type
71,1	70	ST

Tableau 4-4: Données matérielles et géométriques pour le fil de terre dans les connexions 220 kV Bickigen – Innertkirchen

Il est facile de comprendre que les deux lignes aériennes montées sur le même pylône partagent le même fil de terre, qui est principalement de 70 mm² St. En raison de l'absence de catalogue de conducteurs, les informations concernant la résistance au courant continu et le rayon du conducteur du fil de terre en acier de 70 mm² sont supposées être les mêmes que celles d'un fil de terre en acier de 74,05 mm² provenant de Hind Aluminium Industries Limited, dont un extrait est donné dans le document suivant Figure 4-15(en utilisant la norme ASTM B 416).

No and size of wires	Area	Diameter	Stranding and wire diameter		Nominal breakingload	MaximumDCresistanceat20°C	Standard Weight
	mm ²	mm	N°	Ø(mm)	daN	Ohm/km	kg/km
7No.7AWG	74.05	11.01	7	3.67	8,530	1.1566	492.9

Figure 4-15: Extrait du catalogue des conducteurs pour le fil de terre dans le 220 kV Bickigen – Innertkirchen (Hind Aluminium Industries Limited)

C'est pourquoi :

$$r_{c,g} = 0.5505 \text{ cm}$$

$$R_{DC,g} = 1.1566 \Omega/\text{km}$$

Sur la base des discussions présentées ci-dessus, les données géométriques et matérielles pour les lignes aériennes 220 kV Bickigen – Innertkirchen dans le modèle EMTP peuvent être dérivées et sont présentées dans la Figure 4-16.

Geometrical data and materials Overhead line

Overhead lines
Use Overhead Line Database

Single-wire (W) conductors

Bundled (B) conductors

Conductor characteristic

Midspan height available

Hollow conductors

Soil

Multi-layer soil

Resistivity Ωm

Relative permeability (μ_r)

Relative permittivity (ϵ_r)

Length

Units

Line/Cable length km

Drawing options

List of tables

Overhead line, Single-wire (W) conductors

Conductor	Phase	Horizontal position (m)	Height (m)	Radius (cm)	DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability (μ_r)	Conductor relative permittivity (ϵ_r)
1	1	6.6073	32.1960	1.56	0.0577	1	1
2	2	4.5491	37.9160	1.56	0.0577	1	1
3	3	5.1265	27.4060	1.56	0.0577	1	1
4	4	-6.3578	32.1960	1.56	0.0577	1	1
5	5	-4.8934	27.4060	1.56	0.0577	1	1
6	6	-4.2985	37.9160	1.56	0.0577	1	1
7	0	0	42.5460	0.5505	1.1566	1	1

(a)

Geometrical data and materials Overhead line

Overhead lines
Use Overhead Line Database

Single-wire (W) conductors

Bundled (B) conductors

Conductor characteristic

Midspan height available

Hollow conductors

Soil

Multi-layer soil

Resistivity Ωm

Relative permeability (μ_r)

Relative permittivity (ϵ_r)

Length

Units

Line/Cable length km

Drawing options

List of tables

Overhead line, Single-wire (W) conductors

Conductor	Phase	Horizontal position (m)	Height (m)	Radius (cm)	DC resistance (Ohm/km)	Conductor relative permeability (μ_r)	Conductor relative permittivity (ϵ_r)
1	1	6.6073	32.1960	1.53	0.059	1	1
2	2	4.5491	37.9160	1.53	0.059	1	1
3	3	5.1265	27.4060	1.53	0.059	1	1
4	4	-6.3578	32.1960	1.53	0.059	1	1
5	5	-4.8934	27.4060	1.53	0.059	1	1
6	6	-4.2985	37.9160	1.53	0.059	1	1
7	0	0	42.5460	0.5505	1.1566	1	1

(b)

Figure 4-16: Données géométriques et matérielles pour les lignes 220 kV Bickigen – Innertkirchen, a) : la section de 40,3 km, b) : la section de 30,8 km

Les options de modélisation des modèles de lignes Wideband sont présentées dans la Figure 4-17.

Modeling options

Model

Frequency range

f_{min} Hz

Points/decade

Decades

f_{max} Hz

Options

Proximity effect

Earth return path

Enter G shunt

Balanced line

Segmented ground-wires

Wideband Fitting

Convergence tolerance %

DC correction

Apply grouping

Figure 4-17: Options de modélisation pour les modèles de lignes Wideband

De plus amples informations sur la sélection d'autres options de modélisation peuvent être trouvées dans [2.11].

4.4.2.5 Modélisation des réseaux équivalents de Thévenin

Le réseau derrière chaque jeu de barres considéré comme un point d'extrémité du réseau étudié a été modélisé comme un équivalent de Thévenin, c'est-à-dire une source de tension idéale connectée à une impédance d'équivalent de Thévenin. L'impédance de Thévenin est déterminée par le niveau de court-circuit (SCL), le rapport X/R et le rapport Z_0/Z_1 du réseau derrière le jeu de barres en question. Cette approche est valable et constitue une pratique courante dans les études transitoires, à condition que les informations requises soient disponibles.

Les paramètres de l'équivalent de Thévenin dans toutes les sous-stations peuvent être dérivés des contributions de court-circuit fournies par ligne/câble ou groupe de production. Il convient de noter que les contributions de court-circuit des lignes/câbles qui doivent être incluses dans le modèle EMTP doivent être exclues du calcul des paramètres des équivalents de Thévenin. La formule suivante est utilisée pour calculer les contributions de court-circuit des lignes/câbles et des groupes de production à chaque PCC (point de couplage commun, anglais : point of common coupling, une sous-station connectée à des groupes de production ou à des systèmes externes du réseau modélisé) :

$$I_{cc}(3ph - fault) = \text{abs}(\sum I_{cc} * e^{i\theta}) \quad (4.8)$$

Dans l'hypothèse d'un réseau équilibré ($Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$, $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$), les impédances de séquence positive, négative et zéro à chaque PCC peuvent être calculées comme suit :

$$Z_1 = Z_2 = \frac{U_1}{I_{sc3ph} * \sqrt{3}} \quad (4.9)$$

$$Z_0 = \frac{3 \cdot U_1}{I_{sc1ph} \cdot \sqrt{3}} - Z_1 - Z_2 \quad (4.10)$$

Dans (4.9) et (4.10), I_{sc3ph} et I_{sc1ph} désignent les courants de défaut triphasés et monophasés au PCC étudié. La résistance et la réactance en série pour toutes les séquences à chaque jeu de barres peuvent ainsi être dérivées, respectivement.

Cette approche R-L classique suppose que l'impédance de Thévenin est composée d'une résistance en série avec une inductance, ce qui n'est valable que pour les applications à basse fréquence (c'est-à-dire en régime permanent). Lorsque la fréquence augmente, l'impédance de Thévenin ($R + j\omega L$) dans cette approche augmenterait de façon presque monotone, présentant ainsi un comportement inductif. Cependant, en raison de l'effet de peau, on s'attend à un comportement plus résistif de l'équivalent Thévenin lorsque la fréquence augmente, ce qui rend l'approche R-L classique incorrecte pour les applications à haute fréquence. Une autre approche, à savoir « l'approche R-L//R », avec une résistance supplémentaire en parallèle à l'inductance, offre une solution adéquate à ce problème. La représentation équivalente de Thévenin de l'approche R-L//R est donnée dans la Figure 4-18[2.27].

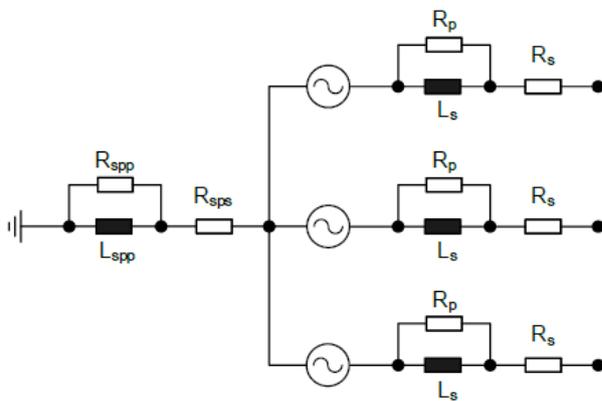


Figure 4-18: Équivalent de Thévenin selon l'approche R-L//R [2.27]

En outre, cette approche permet un degré de liberté supplémentaire, par exemple pour spécifier l'amortissement du réseau à une fréquence autre que la fréquence fondamentale (généralement l'harmonique 3 par défaut si aucune autre information n'est disponible). Elle inclut également une impédance en étoile qui tient compte des performances du système en cas de défauts déséquilibrés. Cette impédance en étoile s'accompagne d'un amortissement, comme le montre la Figure 4-18, afin d'obtenir des résultats réalistes.

Les expressions suivantes peuvent être utilisées pour calculer l'équivalent de Thévenin en utilisant l'approche R-L//R, en supposant que le rapport X/R est identique pour la fréquence nominale et l'harmonique n (habituellement l'harmonique 3 par défaut). La méthodologie suivie pour déterminer les valeurs des résistances et des inductances est basée sur la brochure CIGRE B4-832 [2.27].

Paramètres d'entrée :

- U_{nom} : tension efficace ligne à ligne (kV)
- θ : angle initial (degrés)
- f : fréquence (Hz)
- X/R : rapport X/R
- I_{sc3ph} : courant de court-circuit triphasé (kA)
- I_{sc1ph} : courant de court-circuit monophasé (kA)

- n : accordé pour la n-ième harmonique (généralement 3 par défaut)

Calculs :

$$\omega = 2\pi f$$

$$\varphi = \text{atan}(X/R)$$

$$Z_1 = Z_2 = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot I_{SC3ph}}$$

$$Z_0 = \frac{3U_1}{\sqrt{3} \cdot I_{sc1ph}} - 2 \cdot Z_1$$

$$A = Z_1 \cdot \sin(\varphi)$$

$$E = \sqrt{A} \cdot n \cdot (n - 1)$$

$$F = A \cdot \tan(\varphi) \cdot (1 - n^2)$$

$$G = A^2 \cdot (n - 1)$$

$$B_1 = \frac{-F + \sqrt{F^2 - 4EG}}{2E}$$

$$B_2 = \frac{-F - \sqrt{F^2 - 4EG}}{2E}$$

$$B_1 > 0 \wedge B_2 < 0 \Rightarrow B = B_1$$

Dans le cas contraire, $B = B_2$

$$L_p = \frac{B^2 + A}{\omega}$$

$$R_p = \frac{L_p \cdot \omega \cdot \sqrt{A}}{\sqrt{L_p \cdot \omega - A}}$$

$$R_s = \frac{\frac{\omega \cdot L_p \cdot n}{R_p \cdot \tan(\varphi)} - \left(\frac{\omega \cdot L_p \cdot n}{R_p}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega \cdot L_p \cdot n}{R_p}\right)^2} \cdot R_p$$

$$k = \frac{1}{3} \left(\frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right)$$

$$L_{spp} = L_p \cdot k$$

$$R_{spp} = R_p \cdot k$$

$$R_{sps} = R_s \cdot k$$

L'approche R-R/L nécessite des contributions de court-circuit monophasées et triphasées de chaque ligne/câble partant d'une sous-station pour définir avec précision les caractéristiques d'impédance de séquence positive, négative et zéro à chaque jeu de barres considéré dans le réseau modélisé.

4.4.2.6 Modélisation des transformateurs

Une représentation précise des transformateurs de puissance dans le réseau est cruciale dans les études transitoires. En raison de la nature non linéaire de leur noyau magnétique, les transformateurs peuvent provoquer de graves surtensions dans le réseau du fait de leur interaction avec d'autres éléments capacitifs. Il existe dans le réseau un grand nombre de transformateurs couplant les réseaux 220 kV et 380 kV, qui doivent être modélisés avec précision dans le cadre de ce travail. Il convient de noter que les transformateurs élévateurs reliant les groupes de production et les réseaux de moyenne et basse tension ne sont pas modélisés.

Les transformateurs ont été modélisés sur la base de leurs rapports d'essai, y compris les données de la plaque signalétique, la puissance et les tensions nominales, la régulation, l'impédance de court-circuit et les pertes à vide, etc. Des hypothèses appropriées ont été adoptées en raison de l'insuffisance des résultats des essais à vide de certains fabricants. La procédure de modélisation pour tous les transformateurs est expliquée dans cette section, en utilisant celui de Mettlen comme exemple.

Le transformateur de 600 MVA actuellement installé à Mettlen sera remplacé par deux transformateurs de 800 MVA, dont les données nominales sont résumées dans le tableau suivant Tableau 4-5.

Puissance nominale (MVA)	267/267/51.9
Tension nominale (kV)	420/ $\sqrt{3}$ /247 $\sqrt{3}$ /27.05
Configurations d'enroulement d'un transformateur triphasé	YNa0d11

Tableau 4-5: Données nominatives d'un transformateur monophasé à Mettlen

Le modèle EMTP d'un transformateur de Mettlen, ainsi que les composants du circuit à l'intérieur de chaque phase, sont présentés dans la Figure 4-19 dans laquelle les branches magnétisantes sont modélisées comme des inductances non linéaires et les enroulements tertiaires restent en circuit ouvert (mis à la terre par l'intermédiaire d'une grande résistance).

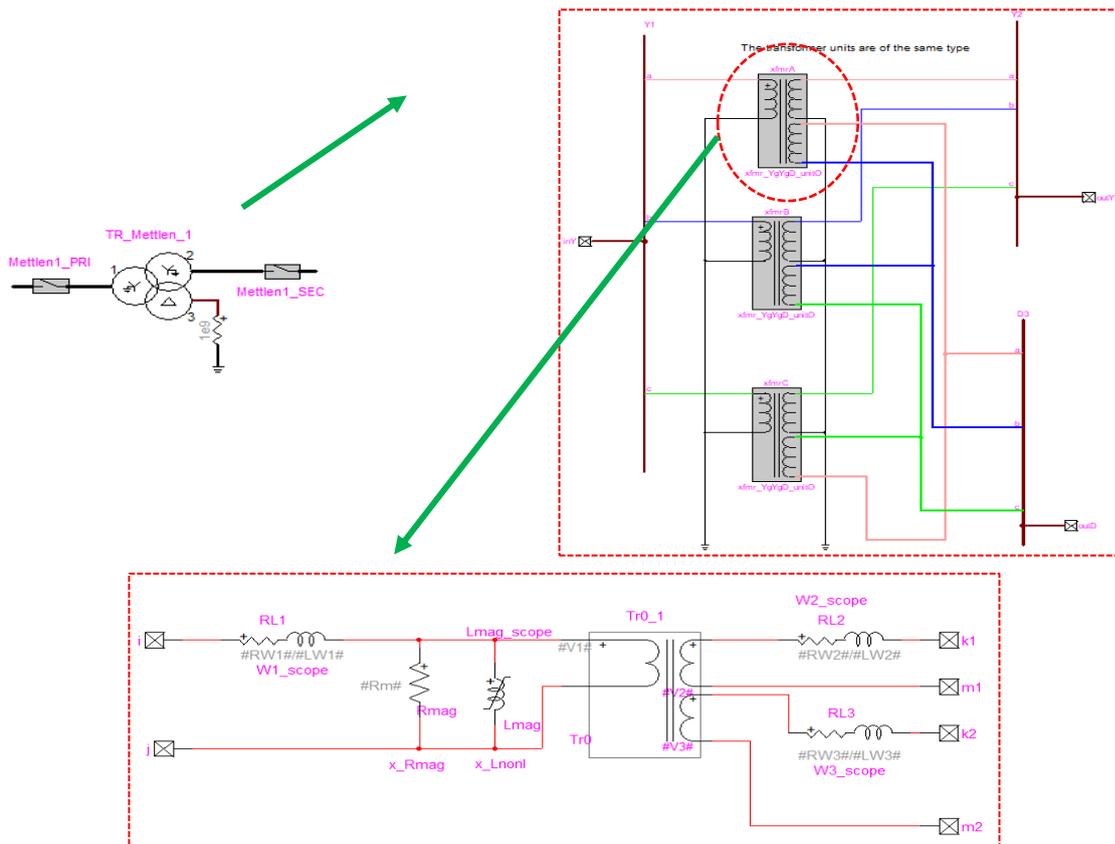


Figure 4-19: Modèle EMTD d'un transformateur de Mettlen et des composants du circuit dans chaque phase

La perte de cuivre (résistance de l'enroulement) et la perte de flux de fuite (réactance de l'enroulement) de chaque branche, désignées par RL_1 , RL_2 et RL_3 , sont calculées sur la base des résultats des essais de court-circuit, tandis que les pertes dans le noyau, y compris principalement les pertes par courant de Foucault (désignées par R_m) puisque l'hystérésis n'est pas représentée, sont calculées à partir des résultats des essais à vide.

4.4.2.6.1 Calcul de la résistance de l'enroulement et de la réactance de fuite

Le calcul de la résistance de l'enroulement et de la réactance de fuite des enroulements primaire et secondaire est basé sur les mesures extraites d'un test de court-circuit où la tension est appliquée sur l'enroulement primaire avec l'enroulement secondaire court-circuité et le changeur de prise sur l'enroulement secondaire à son point médian, en utilisant :

$$R_{12} = \frac{P_{sc}}{I_N^2} \quad (4.11)$$

$$Z_{12} = \frac{V_{sc}}{I_N} \quad (4.12)$$

$$X_{12} = \sqrt{Z_{12}^2 - R_{12}^2} \quad (4.13)$$

où :

- R_{12} : résistance totale sur les deux enroulements
- X_{12} : réactance de fuite totale sur les deux enroulements

- I_N : courant nominal sur l'enroulement primaire
- P_{sc} : puissance active mesurée convertie en 75°
- V_{sc} : tension de l'enroulement primaire appliquée au courant nominal

En supposant une répartition égale de la résistance des enroulements et de la réactance de fuite en pu pour les deux enroulements, les pertes de cuivre et de flux de fuite pour les deux enroulements peuvent donc être dérivées, comme le montre la Figure 4-19.

La même méthodologie peut être appliquée à un autre test de court-circuit où la tension est appliquée sur l'enroulement primaire avec l'enroulement tertiaire court-circuité pour obtenir la résistance totale et la réactance de fuite sur les deux enroulements. La résistance et la réactance de fuite de l'enroulement primaire ayant été calculées à l'étape précédente, il suffit de les soustraire des valeurs totales pour obtenir celles de l'enroulement tertiaire, comme le montre la Figure 4-19.

4.4.2.6.2 Calcul des pertes dans le noyau et de l'inductance de magnétisation

Le calcul des pertes dans le noyau et de l'inductance de magnétisation peut être réalisé en utilisant des mesures extraites d'un essai à vide au cours duquel une tension est appliquée sur l'enroulement tertiaire, les enroulements primaire et secondaire étant en circuit ouvert. Les expressions qui peuvent être utilisées pour obtenir ces paramètres sont les suivantes :

$$R_m = \frac{V_{OC}^2}{P_{OC}} \quad (4.14)$$

$$Z_m = |Z_m| = \frac{V_{OC}}{I_{OC}} \quad (4.15)$$

$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_m^2} - \frac{1}{R_m^2}}} \quad (4.16)$$

où :

- R_m : perte dans le noyau (résistance sur la branche magnétisante)
- V_{OC} : tension nominale appliquée pendant l'essai à vide
- I_{OC} : courant à vide mesuré
- P_{OC} : pertes à vide
- X_m : inductance de magnétisation

La résistance représentant la perte du noyau R_m peut être facilement obtenue en utilisant les résultats des essais à vide du fabricant. Il s'agit généralement d'une résistance extrêmement importante (c'est-à-dire de quelques centaines à quelques milliers de pu) qui n'a donc que peu ou pas d'impact sur le comportement dynamique transitoire du transformateur. L'inductance magnétisante, cependant, est un composant non linéaire qui dicte le comportement dynamique du transformateur sur l'ensemble de la plage de tension opérationnelle. Les caractéristiques $\phi - I$, caractéristiques typiques utilisées dans EMTP sont présentées dans la Figure 4-20.

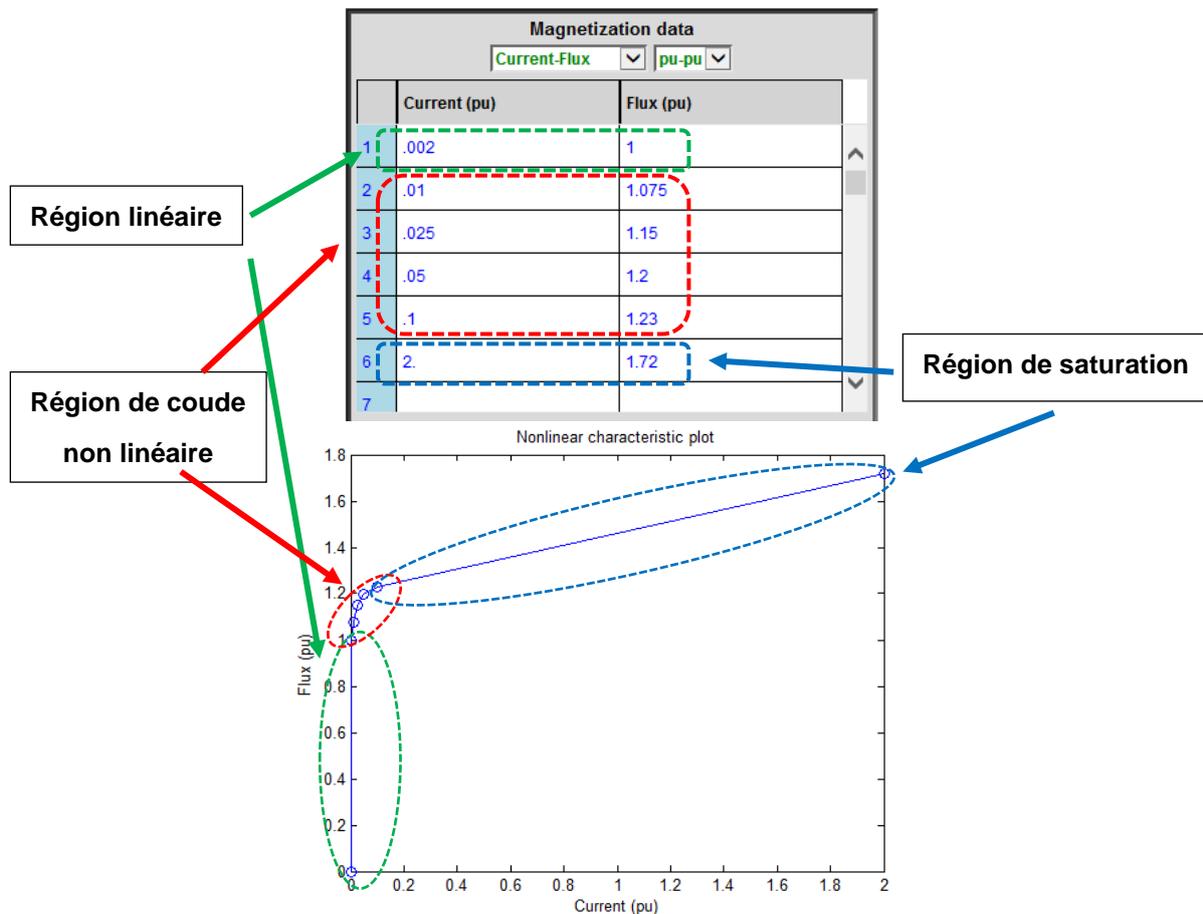


Figure 4-20: Caractéristiques ϕ -I et tracé typiques d'un transformateur non idéal dans EMTP

Il est à noter que les caractéristiques $\phi - I$ présentées dans la Figure 4-20 correspondent aux trois zones des caractéristiques du noyau de fer du transformateur $\phi - I$ du transformateur :

- **Zone linéaire (fonctionnement normal)**

Dans la zone linéaire (liaison de flux égale ou inférieure à 1 pu), le flux est relativement faible et une forte augmentation du flux n'entraînerait qu'une faible augmentation du courant de magnétisation.

- **Zone non linéaire de coude**

La zone de coude non linéaire est une zone où un transformateur passe du fonctionnement normal à la saturation, et vice versa. Sa bonne définition est d'une importance capitale dans l'étude du comportement dynamique transitoire d'un transformateur.

- **Zone de saturation**

Lorsque le flux dépasse un certain seuil provoqué par une tension appliquée supérieure à la normale ou un flux résiduel provenant d'une désexcitation antérieure, le transformateur entre dans la zone de saturation où une simple petite augmentation de la liaison de flux entraînerait une augmentation significative du courant de magnétisation.

En fonction des caractéristiques du transformateur $\phi - I$ définies dans la Figure 4-20, son inductance magnétisante est considérée comme non linéaire car le courant magnétisant n'est pas proportionnel au flux dans les différentes zones de fonctionnement. Dans EMTP, une approche « piecewise linear (linéaire par morceaux) » est généralement adoptée pour modéliser un composant non linéaire, ses caractéristiques non linéaires étant divisées en plusieurs segments linéaires. Des itérations dans les simulations du domaine temporel sont exécutées pour trouver le point de fonctionnement correct à chaque pas de temps de la simulation numérique.

Bien qu'idéalement la courbe de magnétisation d'un transformateur devrait être dérivée en utilisant les essais à vide du fabricant, la tension appliquée, généralement comprise entre 0,9 pu et 1,1 pu, est trop étroite pour représenter pleinement le comportement dynamique transitoire du transformateur dans les trois zones de fonctionnement, comme nous l'avons vu précédemment. Par conséquent, il est décidé d'adopter les caractéristiques $\phi - I$ par défaut d'EMTP pour tous les transformateurs modélisés dans le réseau. Il est à noter que le courant magnétisant en pu est calculé par rapport au courant nominal sur l'enroulement tertiaire, et que le flux peut être obtenue en utilisant :

$$\phi = \frac{V_{\text{peak,ph}}}{2\pi f} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{LL}}{2\pi f} \quad (4.17)$$

4.4.3 Balayage de fréquences pour le scénario 3

4.4.3.1 220 kV Romanel

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Romanel :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Banlieue Ouest – Romanel
3	N-1 sur 220 kV Romanel – Vaux
4	N-2 sur 220 kV Banlieue Ouest – Romanel et Romanel – Vaux

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Romanel pour les 4 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-21.

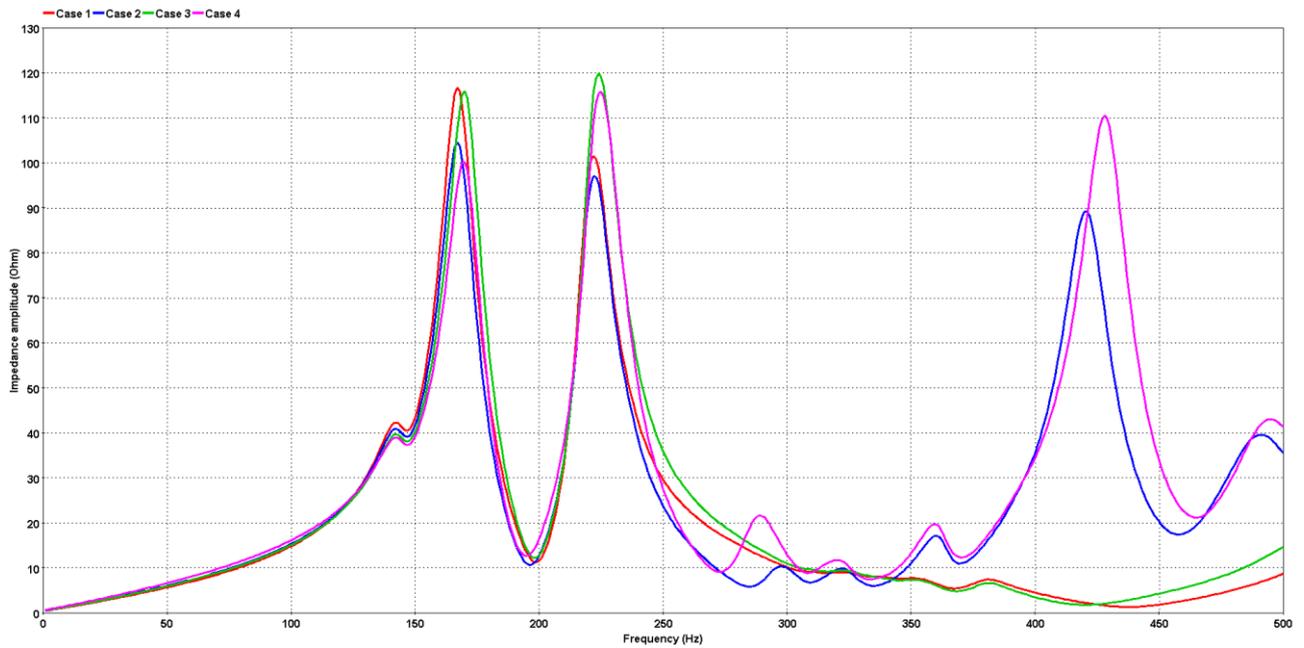


Figure 4-21: Impédance harmonique à 220 kV Romanel pour les 4 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.2 380 kV Châtelard

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour le 380 kV Châtelard :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Châtelard – La Bâtiaz
3	N-1 sur 380 kV Chamoson – La Bâtiaz
4	N-1 sur 380 kV Bois Tollot – Romanel
5	N-2 sur les 380 kV Châtelard – La Bâtiaz et Chamoson – La Bâtiaz

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Châtelard pour les 5 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-22.

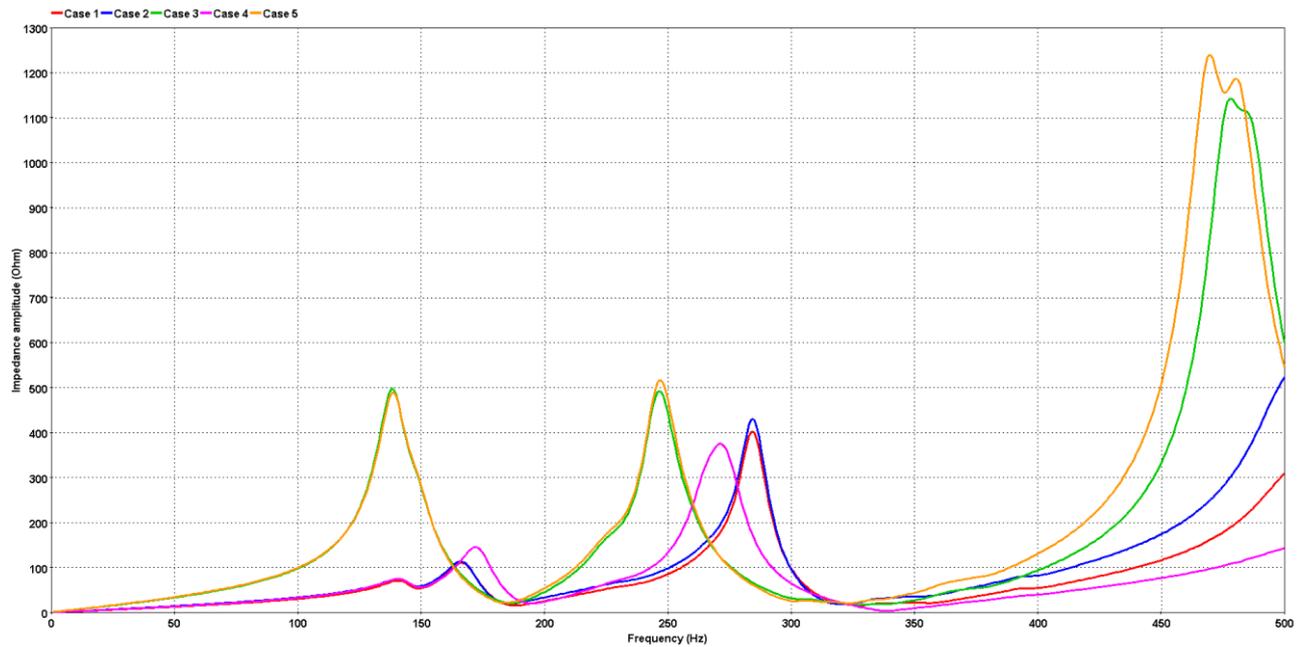


Figure 4-22: Impédance harmonique à 380 kV Châtelard pour les 5 cas – SCL faible, scénario 3

4.4.3.3 220 kV Chamoson

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Chamoson :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Chamoson – Fionnay GD
3	N-1 sur 220 kV Chamoson – Riddes
4	N-2 sur 220 kV Chamoson – Fionnay GD

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Chamoson pour les 4 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-23.

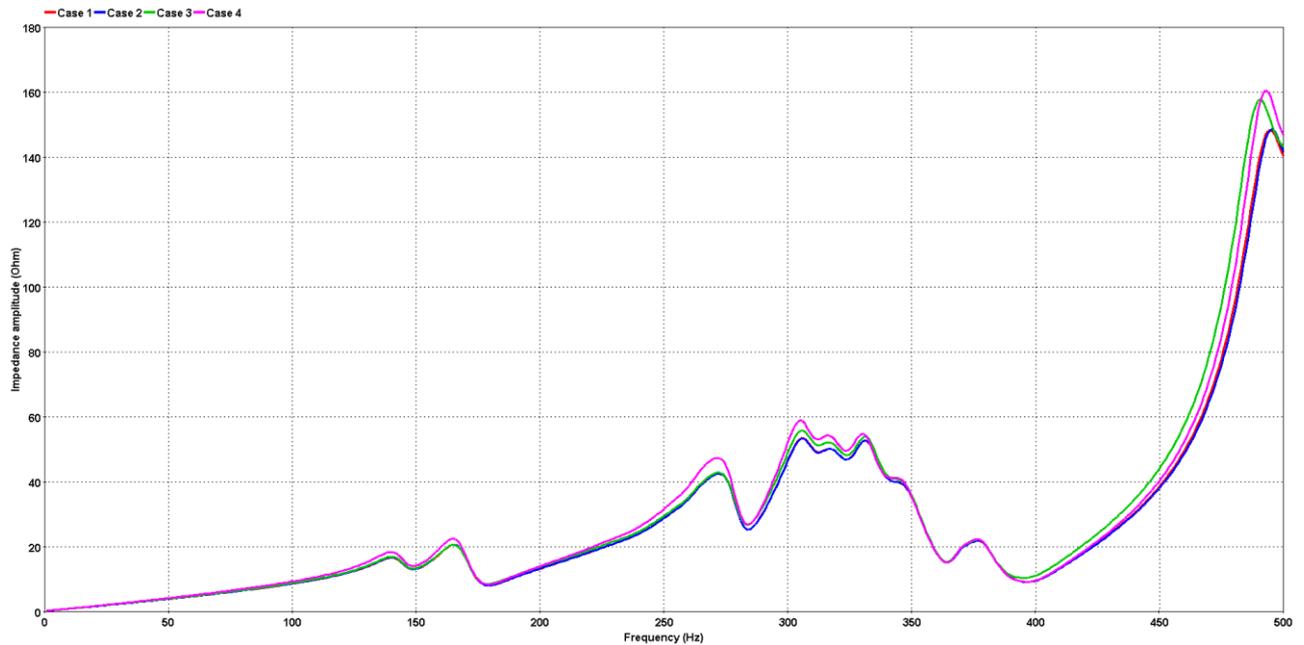


Figure 4-23: Impédance harmonique à 220 kV Chamoson pour les 4 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.4 220 kV Mühleberg

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Mühleberg :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Bickigen – Mühleberg
3	N-1 sur 220 kV Lindenholz – Mühleberg
4	N-2 sur 220 kV Bickigen – Mühleberg et Lindenholz – Mühleberg

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Mühleberg pour les 4 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-24.

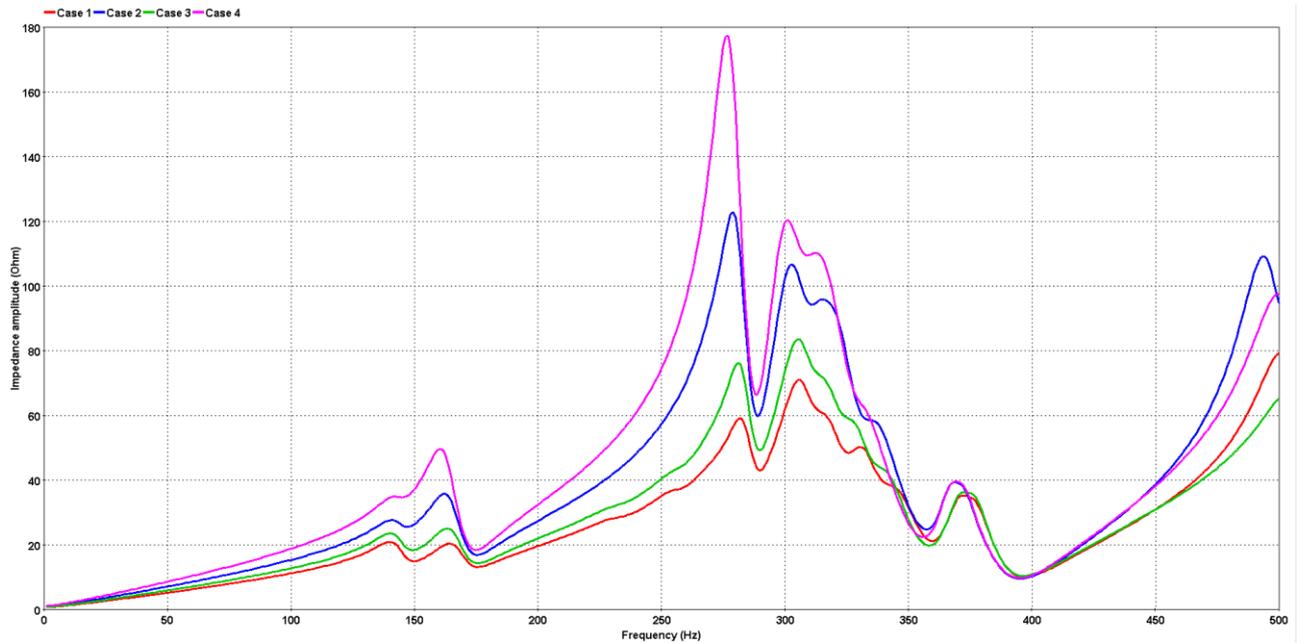


Figure 4-24: Impédance harmonique à 220 kV Mühleberg pour les 4 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.5 220 kV Flumenthal

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Flumenthal :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Flumenthal – Bickigen
3	N-1 sur 220 kV Flumenthal – Gösgen
4	N-2 sur 220 kV Flumenthal – Bickigen et Flumenthal – Gösgen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Flumenthal pour les 4 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-25.

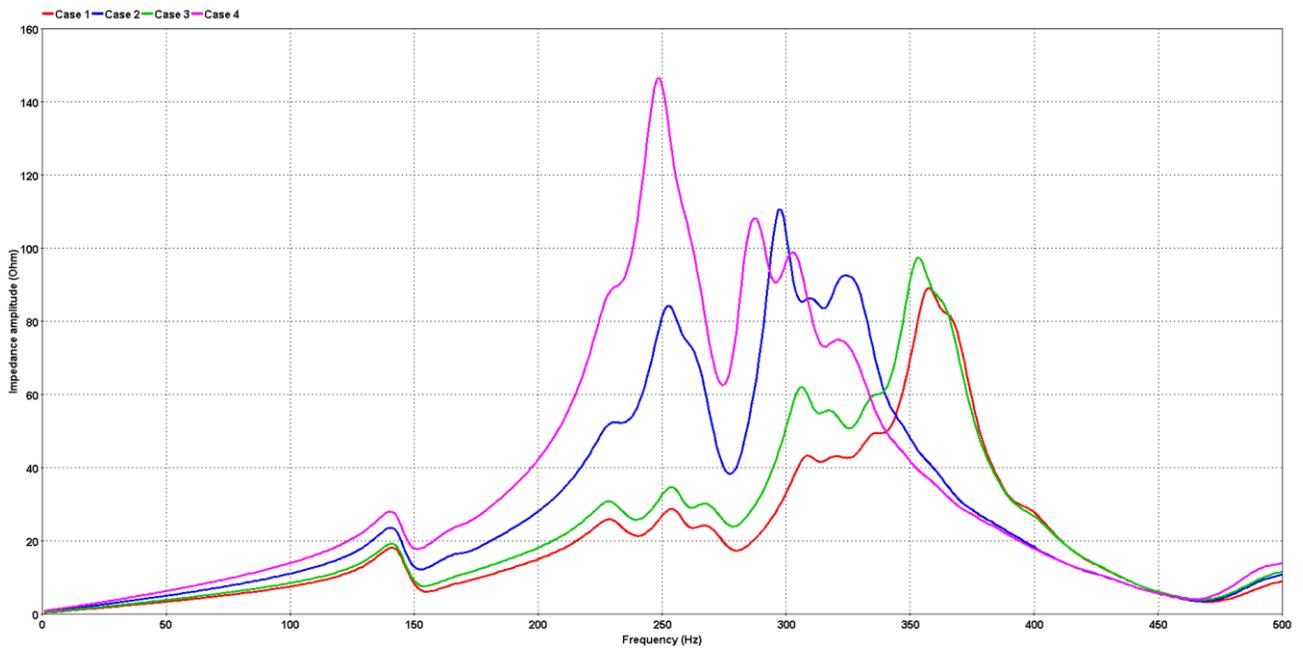


Figure 4-25: Impédance harmonique à 220 kV Flumenthal pour les 4 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.6 220 kV Froloo

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Froloo :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Froloo – Lachmatt
3	N-1 sur 220 kV Froloo – Flumenthal
4	N-1 sur 220 kV Lachmatt – Münchwilen
5	N-2 sur 220 kV Froloo – Lachmatt et Lachmatt – Münchwilen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Froloo pour les 5 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-26.

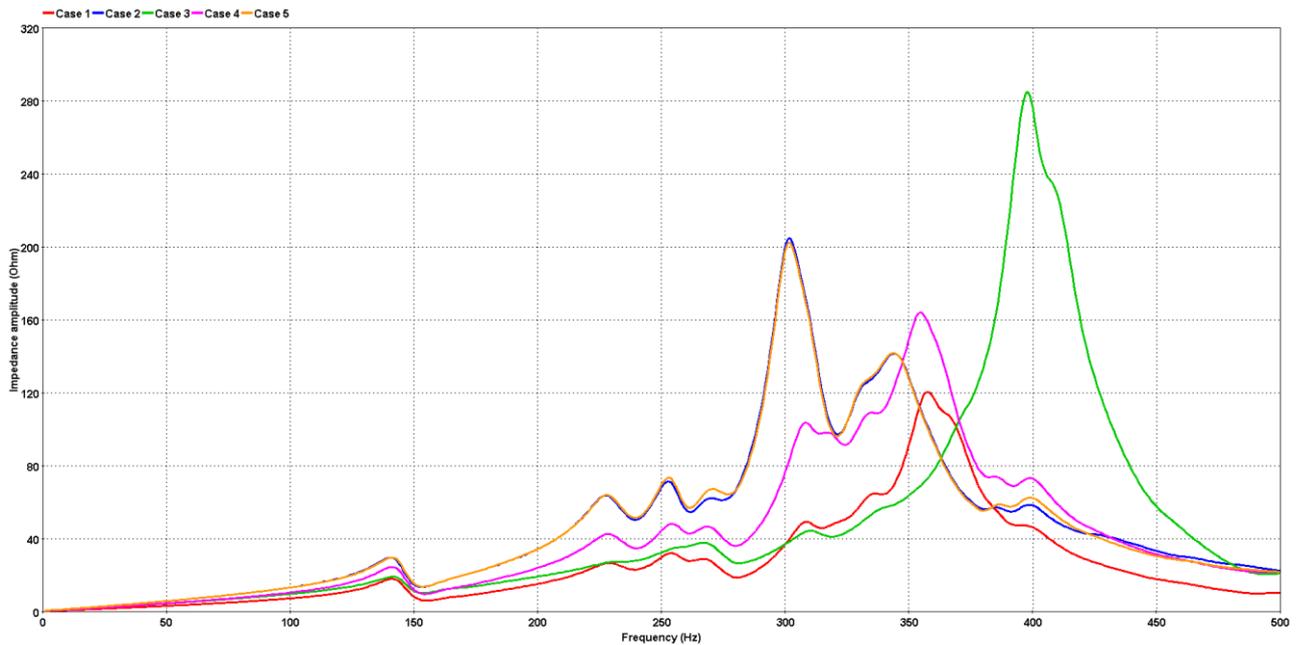


Figure 4-26: Impédance harmonique à 220 kV Froloo pour les 5 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.7 220 kV Lachmatt

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Lachmatt :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Lachmatt – Münchwilen
3	N-1 sur 220 kV Lachmatt – Froloo

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Lachmatt pour les 3 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-27.

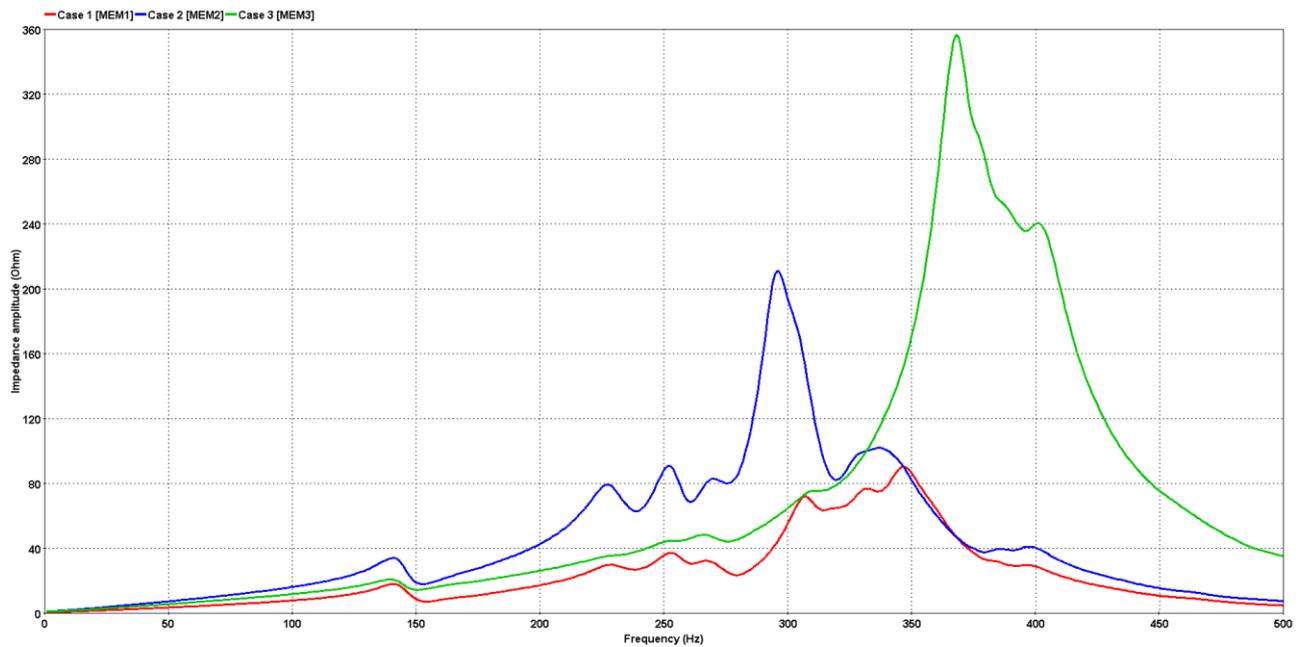


Figure 4-27: Impédance harmonique à 220 kV Lachmatt pour les 3 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.8 380 kV Lachmatt

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 380 kV Lachmatt :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Lachmatt – Gösgen
3	N-1 sur 380 kV Asphard – Sierentz
4	N-1 sur 380 kV Asphard – Kühmoos
5	N-2 sur 380 kV Lachmatt – Gösgen et Asphard – Sierentz

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Lachmatt pour les 5 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-28.

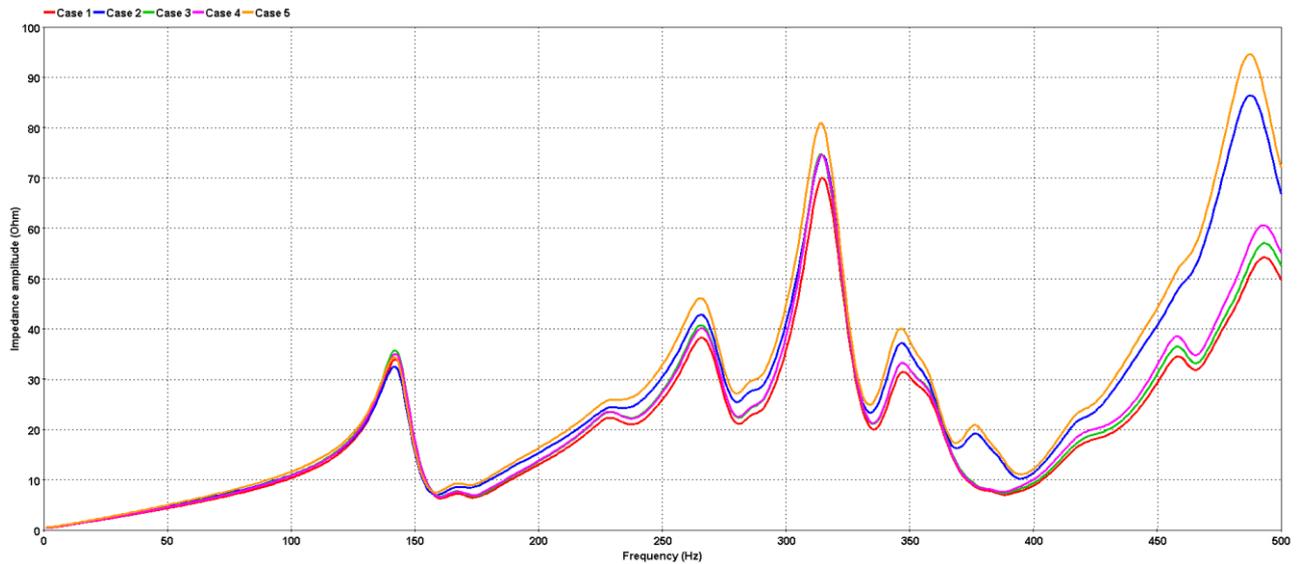


Figure 4-28: Impédance harmonique à 380 kV Lachmatt pour les 5 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.9 220 kV Laufenburg

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Laufenburg :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Laufenburg – Gösgen
3	N-2 sur 220 kV Laufenburg – Kühmoos
4	N-2 sur 220 kV Laufenburg – Gurtweil
5	N-2 sur 220 kV Laufenburg – Münchwilen et Laufenburg – Beznau

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Laufenburg pour les 5 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-29.

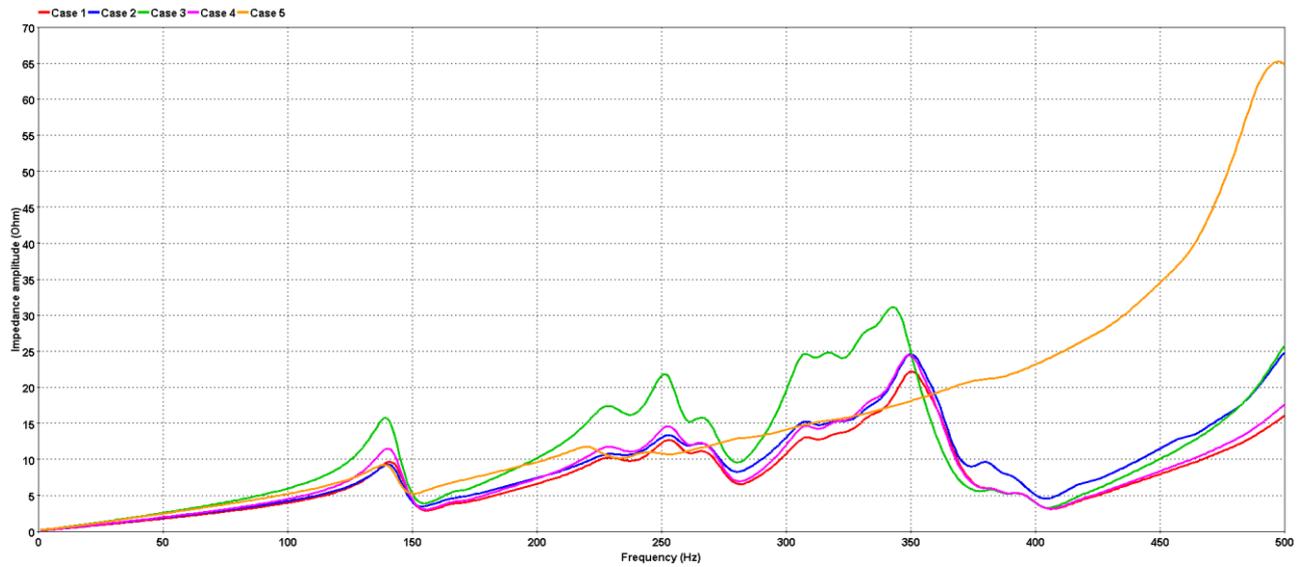


Figure 4-29: Impédance harmonique à 220 kV Laufenburg pour les 5 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.10 380 kV Laufenburg

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 380 kV Laufenburg :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-2 sur 380 kV Laufenburg – Kühmoos
3	N-2 sur 380 kV Laufenburg – Trossingen et Laufenburg – Tiengen
4	N-2 sur 380 kV Laufenburg – Sierentz et Laufenburg – Leibstadt
5	N-2 sur 380 kV Laufenburg – Bassecourt et Laufenburg – Bickigen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Laufenburg pour les 5 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-30.

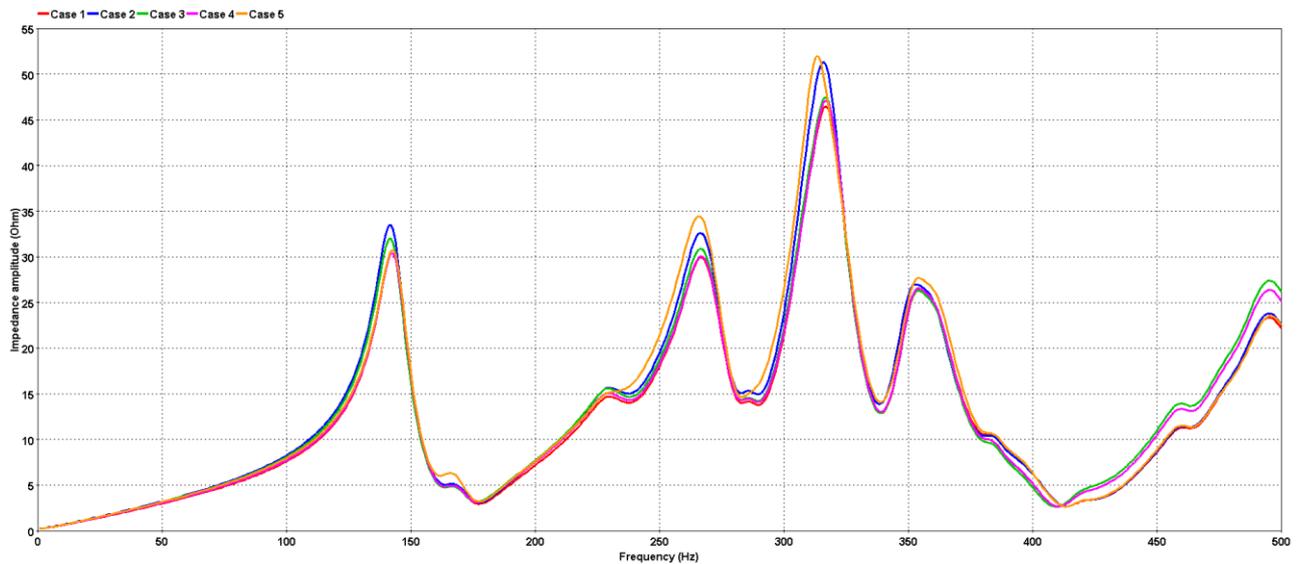


Figure 4-30: Impédance harmonique à 380 kV Laufenburg pour les 5 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.11 220 kV Bickigen

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Bickigen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Bickigen – Mühleberg
3	N-1 sur 220 kV Bickigen – Oftringen
4	N-1 sur 220 kV Bickigen – Mettlen
5	N-1 sur 220 kV Bickigen – Innertkirchen
6	N-2 sur 220 kV Bickigen – Mühleberg et Bickigen – Oftringen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Bickigen pour les 6 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-31.

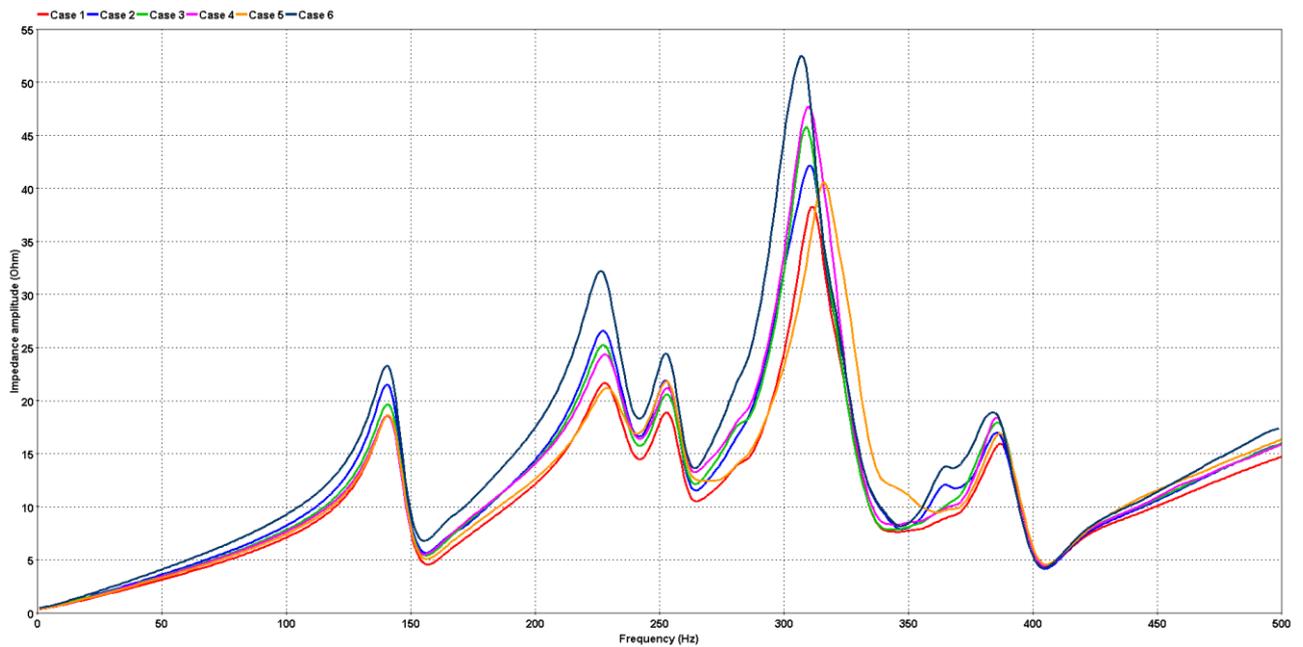


Figure 4-31: Impédance harmonique à 220 kV Bickigen pour les 3 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.12 380 kV Bickigen

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour le 380 kV Bickigen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Bickigen – Bassecourt
3	N-1 sur 380 kV Bickigen – Laufenburg
4	N-2 sur 380 kV Bickigen – Laufenburg et Bassecourt – Laufenburg
5	N-2 sur 380 kV Bickigen – Laufenburg et Bassecourt – Mambelin

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Bickigen pour les 5 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-32.

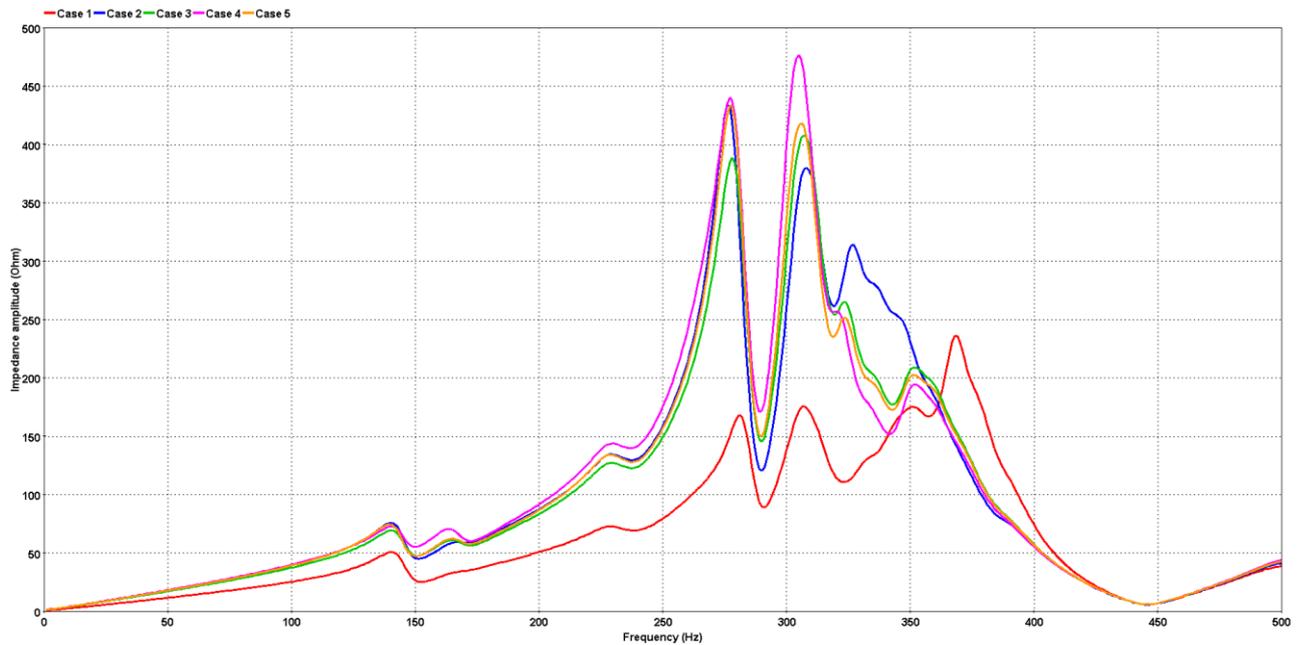


Figure 4-32: Impédance harmonique à 380 kV Bickigen pour les 5 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.13 220 kV Wimmis

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Wimmis :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Chippis – Wimmis
3	N-1 sur 220 kV Innertkirchen – Wimmis

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Wimmis pour les 3 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-33.

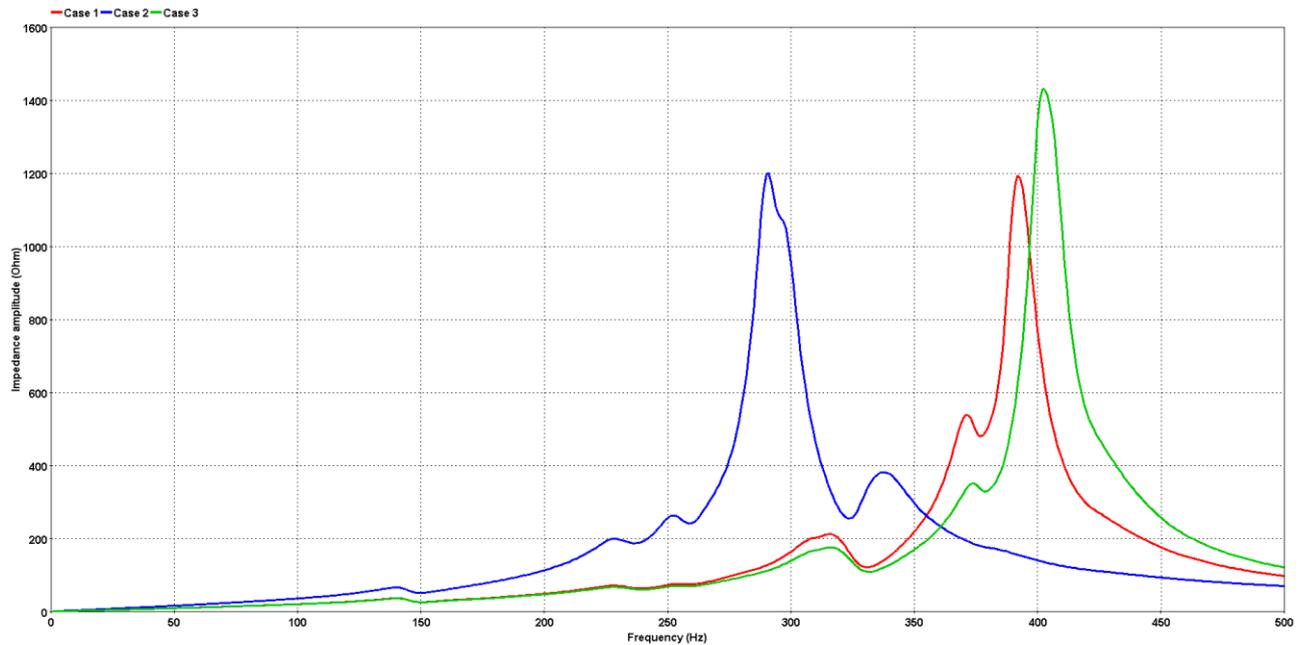


Figure 4-33: Impédance harmonique à 220 kV Wimmis pour les 3 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.14 220 kV Mettlen

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Mettlen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-2 sur 220 kV Mettlen – Obfelden et Mettlen – Sursee
3	N-2 sur 220 kV Mettlen – Innertkirchen et Mettlen – Littau
4	N-2 sur 220 kV Mettlen – Bickigen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Mettlen pour les 4 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-34.

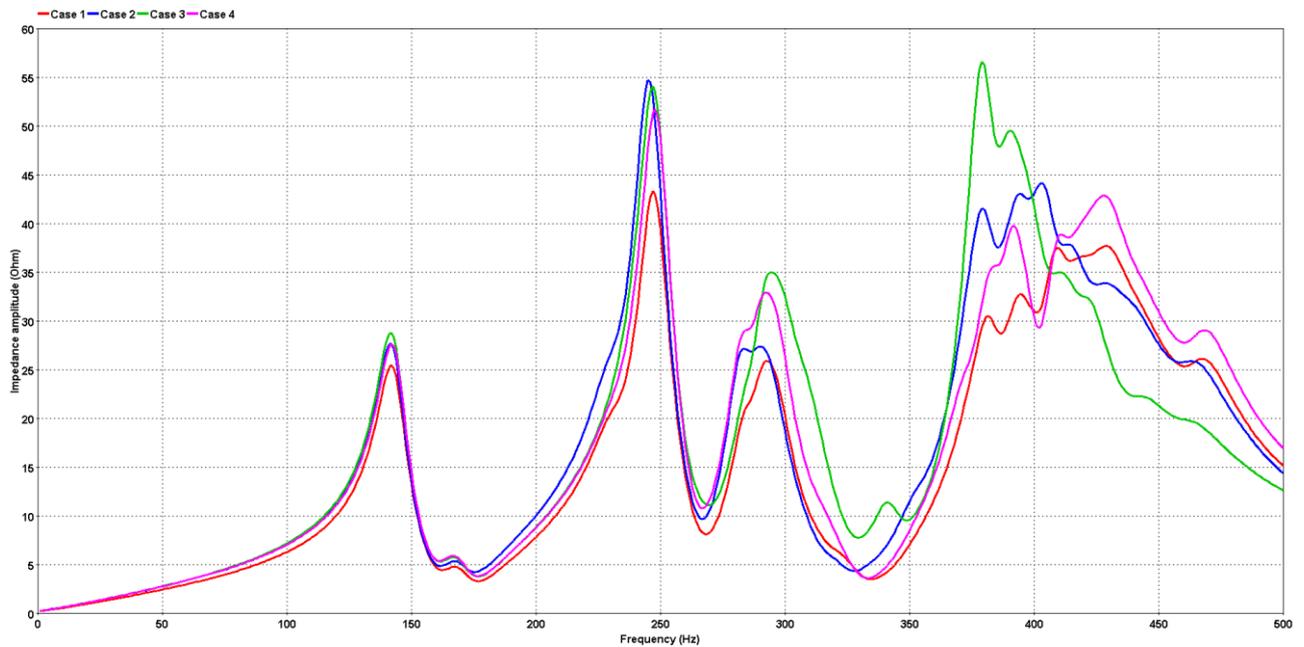


Figure 4-34: Impédance harmonique à 220 kV Mettlen pour les 4 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.15 380 kV Mettlen

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 380 kV Mettlen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Mettlen – Beznau
3	N-1 sur 380 kV Gösgen – Laufenburg
4	N-1 sur 380 kV Benken – Sils
5	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Magadino
6	N-1 sur 380 kV Mettlen – Gösgen
7	N-2 sur 380 kV Mettlen – Beznau et Gösgen – Laufenburg

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Mettlen pour les 7 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-35.

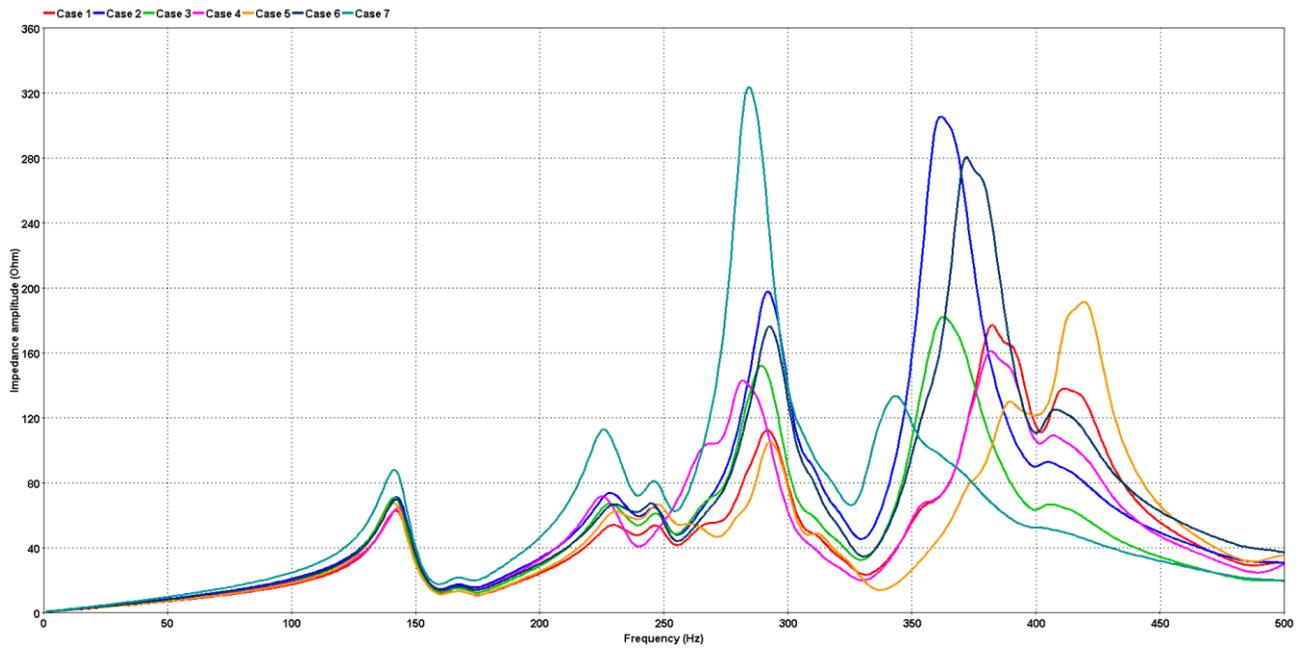


Figure 4-35: Impédance harmonique à 380 kV Mettlen pour les 7 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.16 220 kV Gösgen

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Gösgen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Gösgen – Laufenburg
3	N-1 sur 220 kV Gösgen – Ormalingen
4	N-1 sur 220 kV Gösgen – Flumenthal
5	N-2 sur 220 kV Gösgen – Laufenburg et Gösgen – Ormalingen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Gösgen pour les 5 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-36.

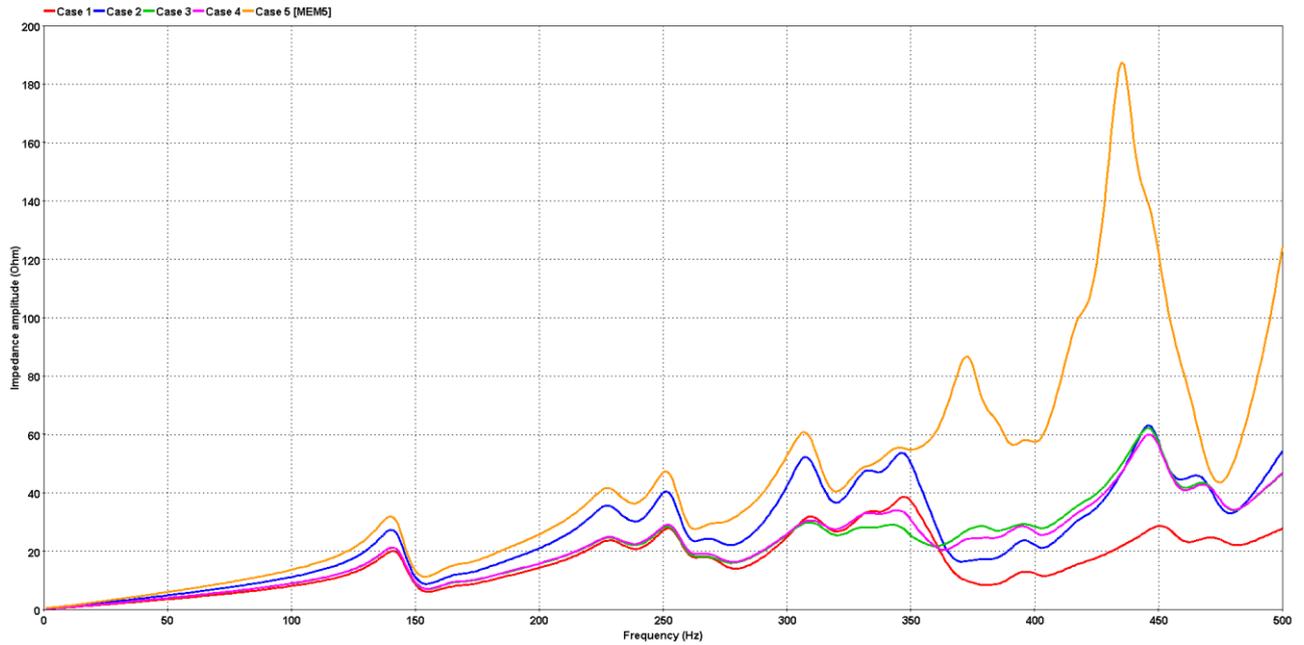


Figure 4-36: Impédance harmonique à 220 kV Gösgen pour les 5 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.17 380 kV Gösgen

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour le 380 kV Gösgen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Gösgen – Laufenburg
3	N-1 sur 380 kV Gösgen – Lachmatt
4	N-2 sur 380 kV Gösgen – Laufenburg et Gösgen – Lachmatt

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Gösgen pour les 4 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-37.

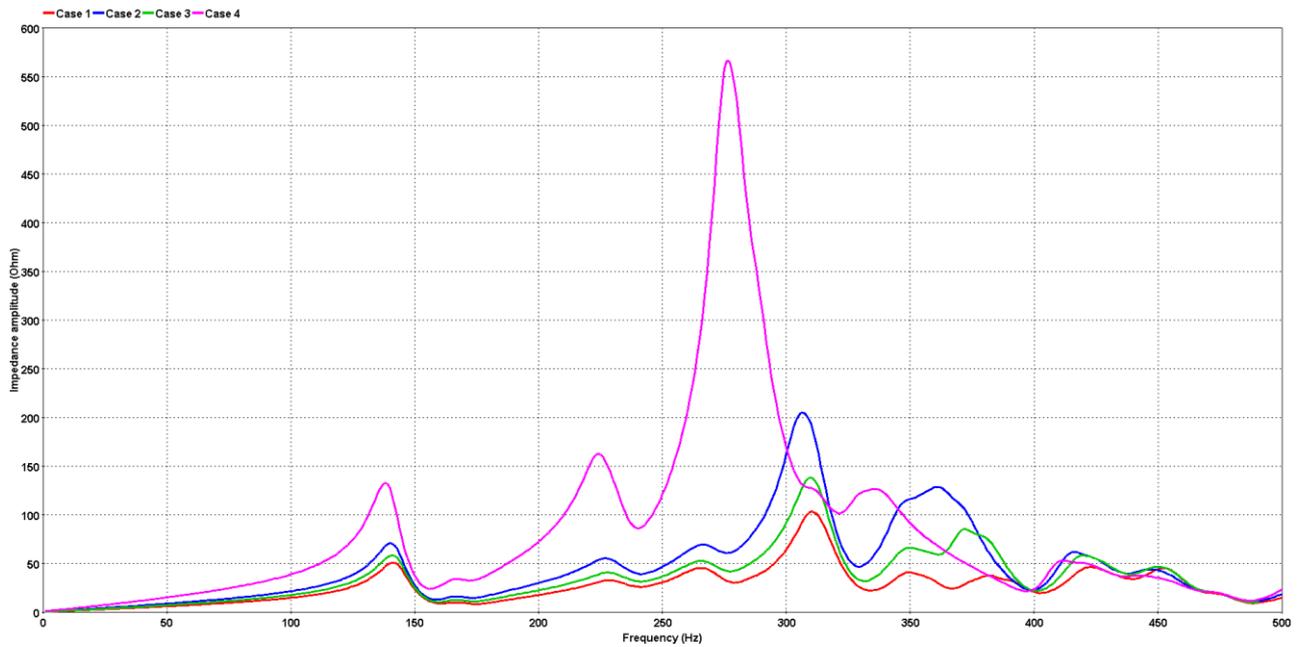


Figure 4-37: Impédance harmonique à 380 kV Gösgen pour les 4 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.18 220 kV Altgass

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Altgass :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Altgass – Mettlen
3	N-2 sur 220 kV Altgass – Mettlen et Samstagern – Siebnen
4	N-2 sur 220 kV Altgass – Mettlen et Obfelden – Mettlen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Altgass pour les 4 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-38.

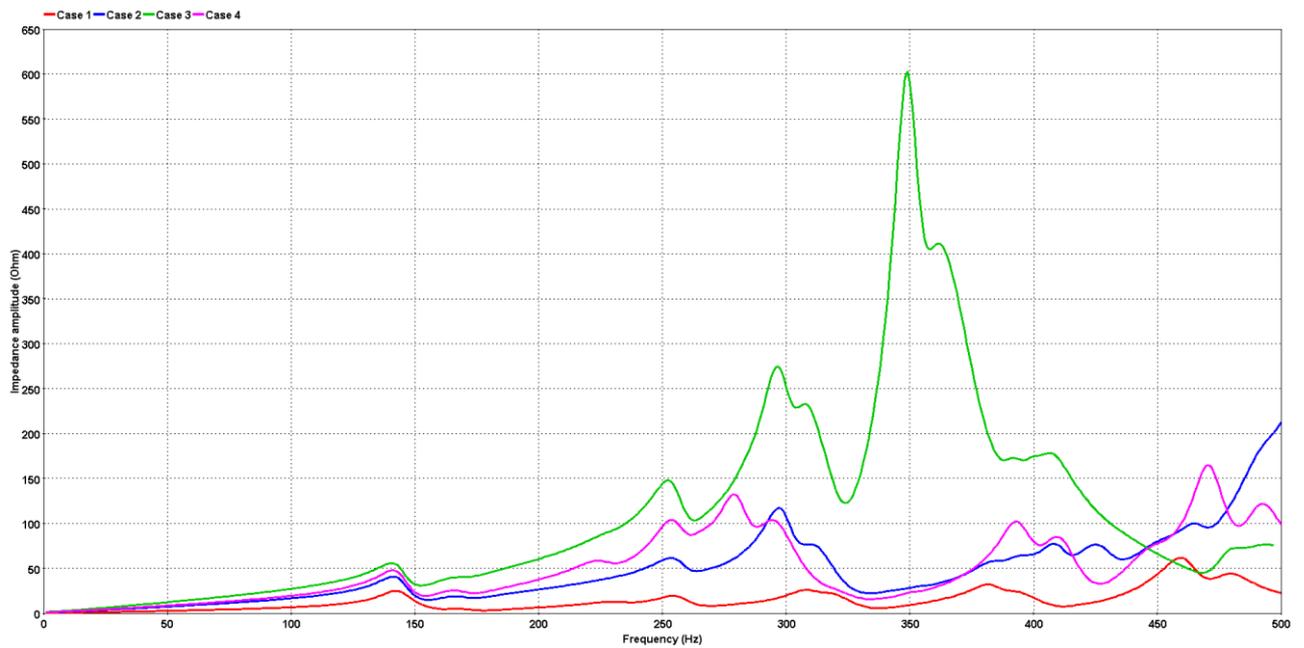


Figure 4-38: Impédance harmonique à 220 kV Altgass pour les 4 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.19 380 kV Lavorgo

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 380 kV Lavorgo :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Magadino
3	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Mörel

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Lavorgo pour les 3 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-39.

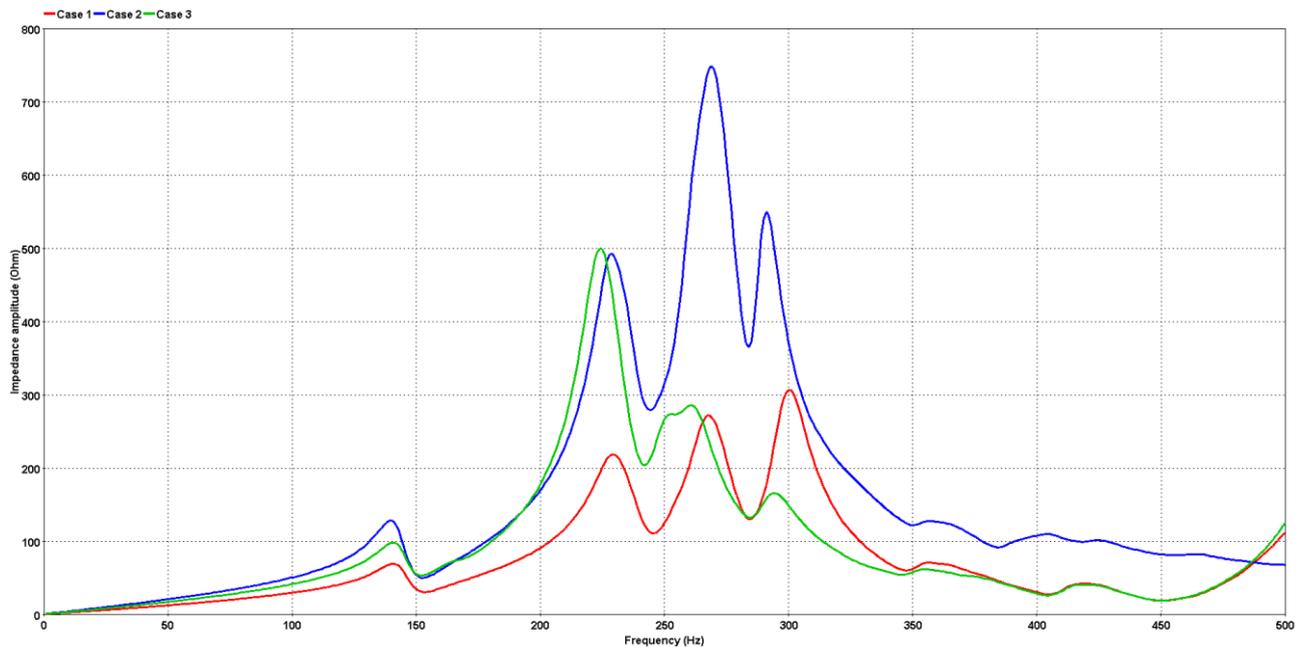


Figure 4-39: Impédance harmonique à 380 kV Lavorgo pour les 3 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.20 220 kV Auwiesen

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Auwiesen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Auwiesen – Seebach
3	N-1 sur 220 kV Auwiesen – Fällanden
4	N-1 sur 220 kV Niederwil – Regensdorf
5	N-1 sur 220 kV Fällanden – Breite
6	N-1 sur 220 kV Fällanden – Grynau
7	N-2 sur 220 kV Niederwil – Regensdorf
8	N-2 sur 220 kV Fällanden – Breite et Fällanden – Grynau

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Auwiesen pour les 8 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-40.

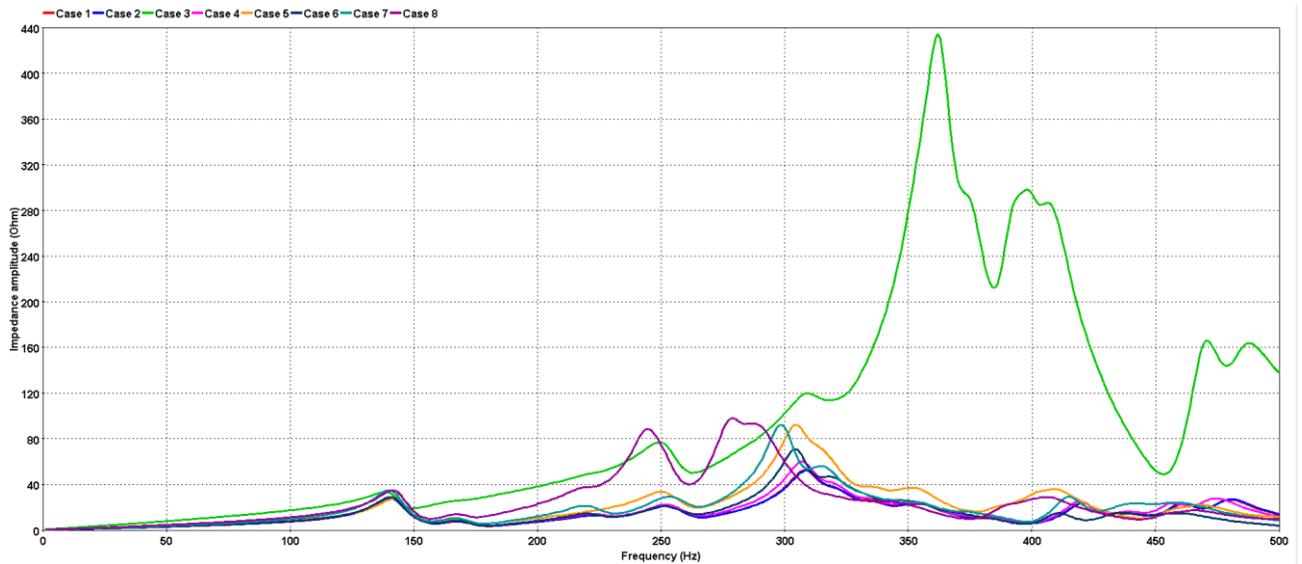


Figure 4-40: Impédance harmonique à 220 kV Auwiesen pour les 8 cas – SCL faible, scénario 3

4.4.3.21 220 kV Fällanden

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Fällanden :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Fällanden – Auwiesen
3	N-1 sur 220 kV Fällanden – Breite
4	N-2 sur 220 kV Benken – Siebnen et Benken – Sils
5	N-2 sur 220 kV Benken – Siebnen et Grynau – Mettlen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Fällanden pour les 5 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-41.

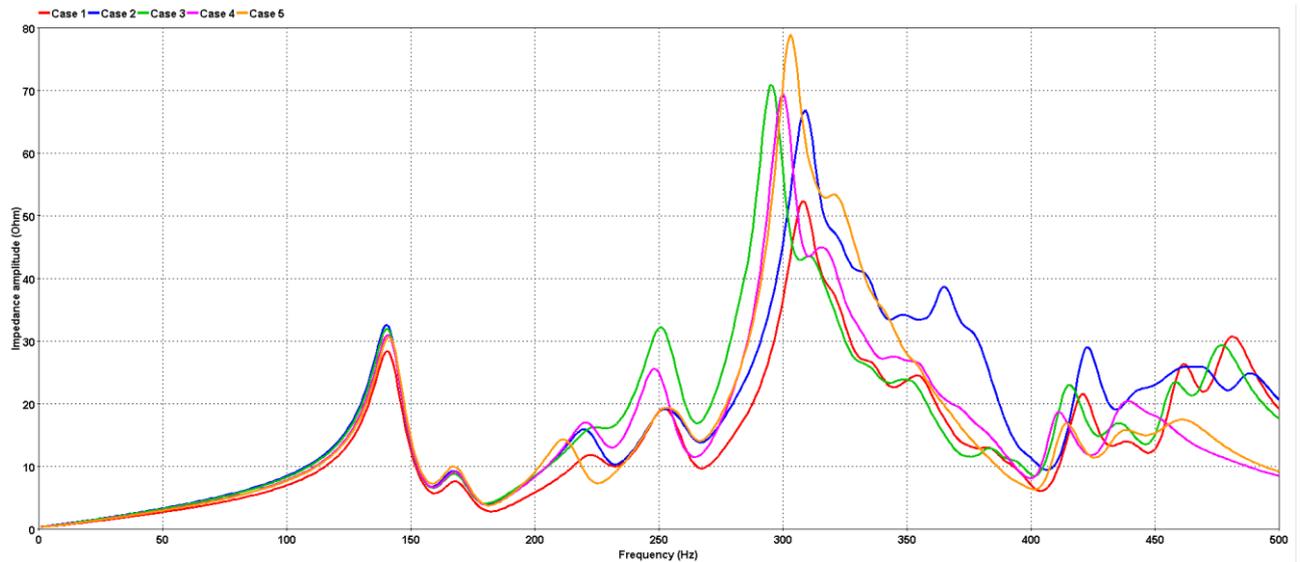


Figure 4-41: Impédance harmonique à 220 kV Fällanden pour les 5 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.22 220 kV Benken

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Benken :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Benken – Siebnen
3	N-1 sur 220 kV Benken – Sils
4	N-1 sur 220 kV Fällanden – Auwiesen
5	N-1 sur 220 kV Fällanden – Breite
6	N-2 sur 220 kV Benken – Siebnen et Benken – Sils

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Benken pour les 6 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-42.

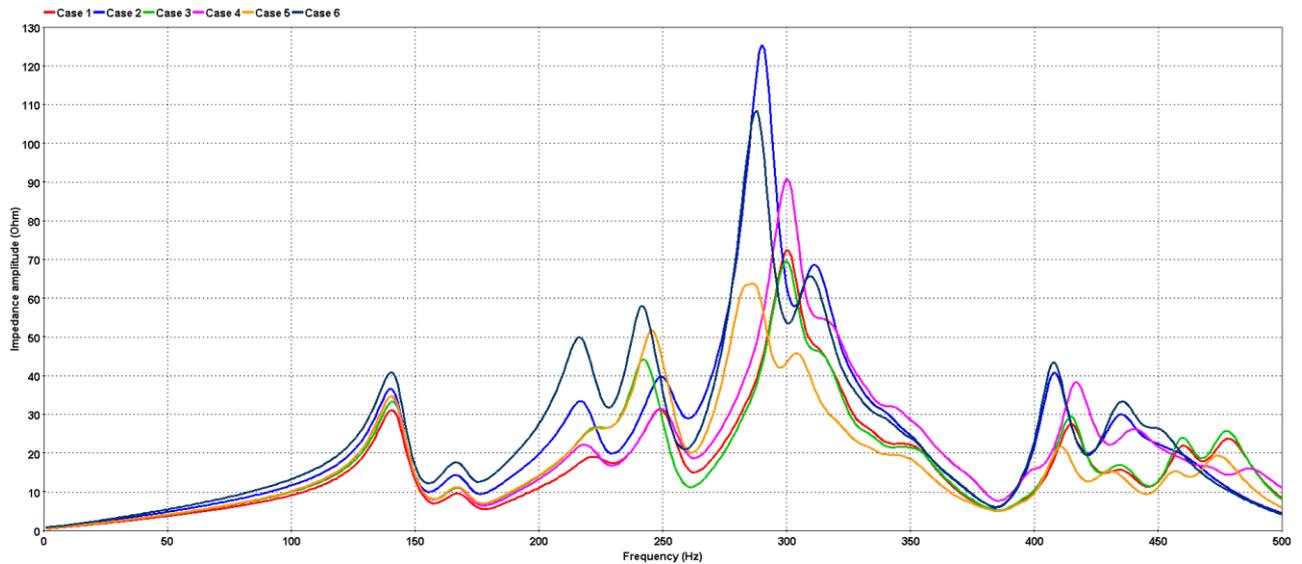


Figure 4-42: Impédance harmonique à 220 kV Benken pour les 6 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.23 220 kV Winkeln

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Winkeln :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Winkeln – Weinfeldern
3	N-1 sur 220 kV Winkeln – Wittenwil
4	N-1 sur 220 kV Winkeln – Rüthi
5	N-1 sur 220 kV Winkeln – Mörschwil
6	N-2 sur 220 kV Winkeln – Weinfeldern et Winkeln – Wittenwil

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Winkeln pour les 6 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-43.

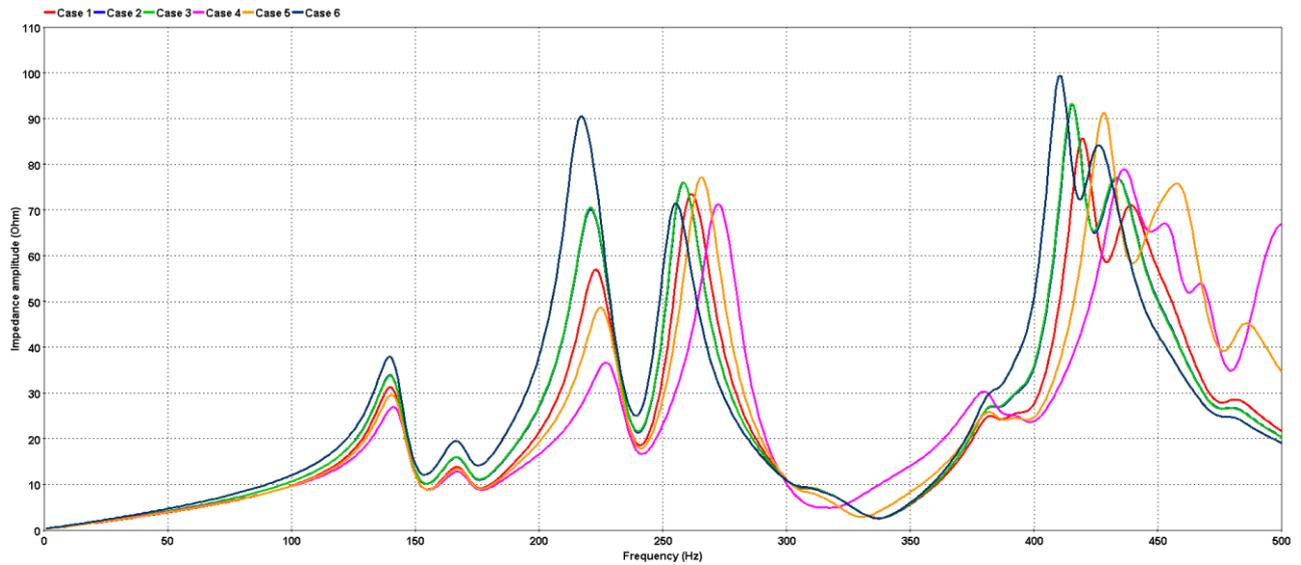


Figure 4-43: Impédance harmonique à 220 kV Winkeln pour les 6 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.24 220 kV Sarelli

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 220 kV Sarelli :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Sarelli – Rothenbrunnen
3	N-2 sur 220 kV Sarelli – Rothenbrunnen et Rüthi – Montlingen

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 220 kV Sarelli pour les 3 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-44.

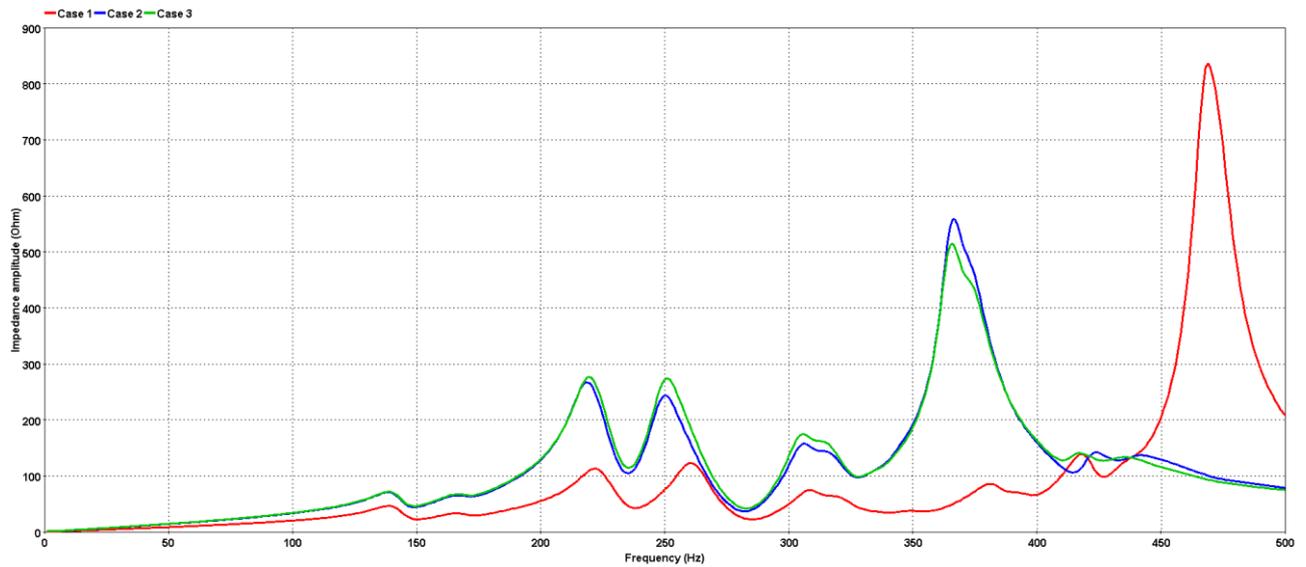


Figure 4-44: Impédance harmonique à 220 kV Sarelli pour les 3 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.25 380 kV Sils

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 380 kV Sils :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Sils – Filisur
3	N-1 sur 380 kV Sils – Pradella
4	N-1 sur 380 kV Bonaduz – Mapragg
5	N-1 sur 380 kV Bonaduz – Breite
6	N-2 sur 380 kV Sils – Filisur et Sils – Pradella

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Sils pour les 6 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-45.

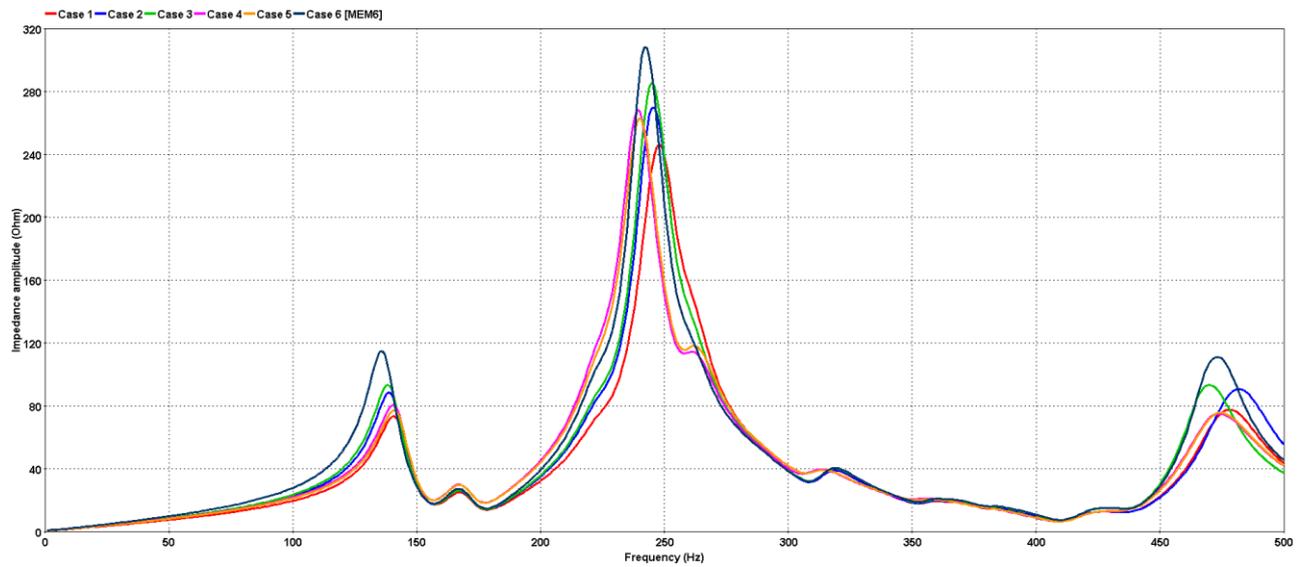


Figure 4-45: Impédance harmonique à 380 kV Sils pour les 6 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.3.26 380 kV Soazza

Les cas suivants ont été pris en compte dans les études du balayage de fréquences pour 380 kV Soazza :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Soazza – Mese
3	N-2 sur 380 kV Soazza – Mese et Sils – Filisur

L'impédance du réseau en fonction de la fréquence observée à 380 kV Soazza pour les 3 cas du scénario 3 est présentée dans la Figure 4-46.

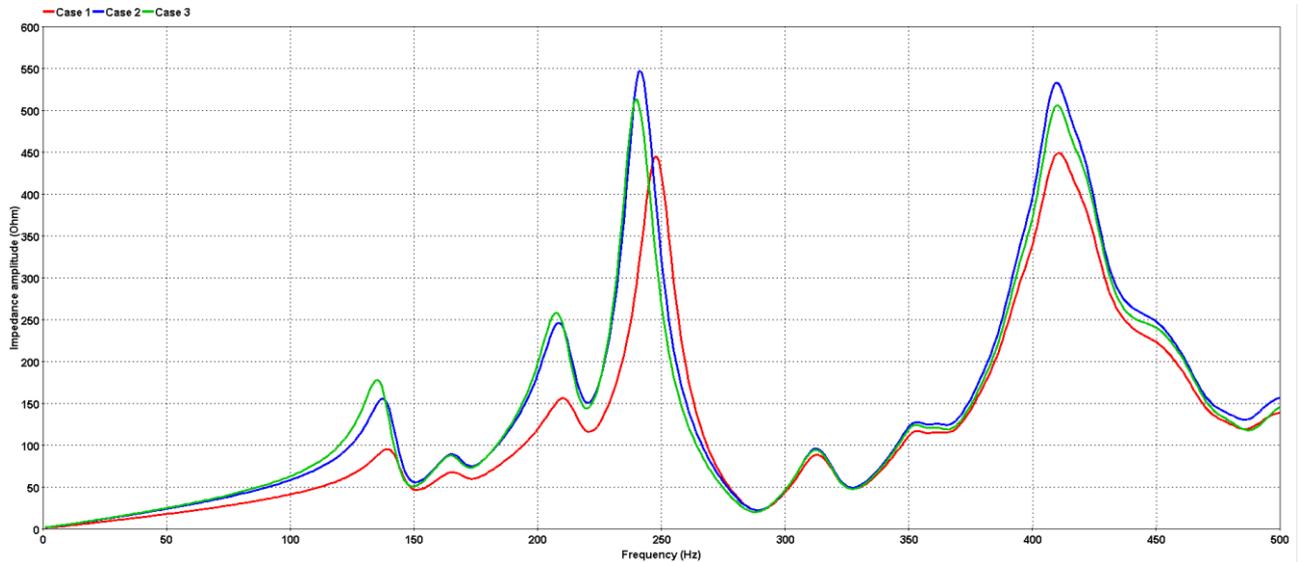


Figure 4-46: Impédance harmonique à 380 kV Soazza pour les 3 cas – faible SCL, scénario 3

4.4.4 Facteurs d'amplification pour les 3 scénarios et les différents points d'injection d'harmoniques

4.4.4.1 Scénario 3

4.4.4.1.1 Injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Regensdorf – Seebach
3	N-1 sur 220 kV Auwiesen – Seebach
4	N-1 sur 220 kV Benken – Siebnen
5	N-1 sur 220 kV Benken – Sils
6	N-1 sur 220 kV Grynau – Mettlen
7	N-2 sur 220 kV Benken – Sils et Benken – Siebnen
8	N-2 sur 220 kV Grynau – Tierfehd
9	N-2 sur 220 kV Grynau – Winkeln
10	N-2 sur 220 kV Niederwil – Regensdorf

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-6 et Tableau 4-7 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8		Cas 9		Cas 10	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0.972	1.030	0.963	1.001	0.971	1.021	0.966	1.009	0.976	1.029	0.972	1.025	0.969	1.007	0.978	1.032	0.958	1.034	1.037	1.090
220 kV Seebach	0.965	1.033	0.964	1.003	0.900	1.042	0.957	1.008	0.969	1.033	0.964	1.027	0.960	1.005	0.972	1.036	0.947	1.038	1.045	1.108
220 kV Regensdorf	0.920	1.015	0.856	0.941	0.887	1.015	0.907	0.974	0.928	1.014	0.919	1.004	0.913	0.970	0.932	1.019	0.892	1.022	1.054	1.134
220 kV Aathal	0.512	0.879	0.505	0.875	0.508	0.877	0.470	0.798	0.630	0.885	0.479	0.855	0.584	0.804	0.768	0.948	0.602	1.188	0.449	0.850
220 kV Grynau	0.514	0.845	0.506	0.841	0.510	0.843	0.466	0.766	0.644	0.848	0.475	0.813	0.591	0.768	0.820	0.922	0.619	1.177	0.447	0.814
220 kV Benken	0.791	1.216	0.790	1.208	0.791	1.215	0.860	1.252	0.901	1.263	0.792	1.171	0.985	1.309	0.800	1.239	0.801	1.221	0.784	1.154
380 kV Benken	0.164	0.525	0.159	0.518	0.161	0.524	0.126	0.399	0.171	0.560	0.146	0.430	0.128	0.426	0.235	0.564	0.106	0.544	0.119	0.470
220 kV Benken	0.791	1.216	0.790	1.208	0.791	1.215	0.860	1.252	0.901	1.263	0.792	1.171	0.985	1.309	0.800	1.239	0.801	1.221	0.784	1.154
380 kV Benken	0.164	0.525	0.159	0.518	0.161	0.524	0.126	0.399	0.171	0.560	0.146	0.430	0.128	0.426	0.235	0.564	0.106	0.544	0.119	0.470
220 kV Siebnen	0.732	1.110	0.728	1.098	0.730	1.108	0.476	0.775	0.834	1.147	0.726	1.039	0.536	0.791	0.764	1.135	0.695	1.136	0.696	1.015
220 kV Samstagern	0.613	0.949	0.602	0.929	0.607	0.948	0.482	0.781	0.694	0.972	0.590	0.787	0.542	0.797	0.730	0.980	0.464	1.039	0.503	0.786
220 kV Altgass	0.539	0.881	0.529	0.864	0.533	0.881	0.437	0.727	0.613	0.905	0.513	0.700	0.496	0.745	0.675	0.911	0.364	0.981	0.446	0.739
220 kV Thalwil	0.675	1.082	0.657	1.054	0.665	1.082	0.556	0.876	0.750	1.103	0.652	0.915	0.612	0.886	0.792	1.116	0.518	1.177	0.502	0.834
220 kV Waldegg	0.693	1.104	0.672	1.073	0.682	1.105	0.584	0.884	0.764	1.123	0.671	0.940	0.637	0.892	0.809	1.137	0.537	1.198	0.490	0.832
220 kV Obfelden	0.661	0.964	0.637	0.934	0.648	0.966	0.578	0.769	0.719	0.976	0.643	0.831	0.622	0.772	0.763	0.991	0.517	1.041	0.429	0.687
220 kV Niederwil	0.712	0.766	0.670	0.718	0.691	0.767	0.678	0.681	0.738	0.763	0.707	0.742	0.698	0.672	0.754	0.776	0.644	0.785	0.318	0.323
220 kV Mettlen	0.451	0.789	0.444	0.775	0.447	0.789	0.381	0.639	0.518	0.814	0.423	0.601	0.437	0.658	0.606	0.815	0.255	0.891	0.378	0.669
380 kV Mettlen	0.058	0.628	0.053	0.620	0.055	0.628	0.026	0.545	0.085	0.672	0.053	0.509	0.052	0.588	0.075	0.650	0.157	0.695	0.019	0.563
220 kV Breite	0.357	0.481	0.352	0.480	0.354	0.480	0.338	0.447	0.423	0.491	0.345	0.492	0.403	0.458	0.446	0.490	0.390	0.550	0.315	0.475
380 kV Breite	0.265	0.471	0.264	0.465	0.264	0.468	0.247	0.411	0.251	0.515	0.252	0.404	0.227	0.444	0.331	0.443	0.178	0.501	0.252	0.438

Tableau 4-6: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden – faible SCL (scénario 3)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8		Cas 9		Cas 10	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0.926	1.038	0.921	1.007	0.928	1.028	0.912	1.003	0.932	1.039	0.925	1.029	0.917	1.003	0.929	1.039	0.925	1.044	1.027	1.078
220 kV Seebach	0.908	1.044	0.922	1.009	0.775	1.078	0.890	1.001	0.915	1.046	0.907	1.033	0.897	1.001	0.912	1.046	0.907	1.051	1.033	1.094
220 kV Regensdorf	0.829	1.038	0.737	0.973	0.764	1.050	0.800	0.967	0.841	1.040	0.828	1.018	0.811	0.967	0.836	1.040	0.826	1.050	1.037	1.115
220 kV Aathal	0.356	0.780	0.362	0.774	0.361	0.778	0.382	0.708	0.371	0.779	0.452	0.674	0.404	0.710	0.496	0.862	0.440	1.151	0.414	0.732
220 kV Grynau	0.371	0.779	0.377	0.772	0.375	0.776	0.394	0.691	0.387	0.777	0.481	0.657	0.416	0.691	0.536	0.868	0.468	1.175	0.433	0.723
220 kV Benken	0.692	1.266	0.690	1.254	0.691	1.262	0.847	1.241	0.792	1.325	0.690	1.213	0.955	1.311	0.694	1.283	0.704	1.280	0.680	1.172
380 kV Benken	0.367	0.543	0.360	0.536	0.362	0.544	0.306	0.470	0.333	0.584	0.353	0.490	0.265	0.512	0.372	0.591	0.353	0.553	0.297	0.484
220 kV Benken	0.692	1.266	0.690	1.254	0.691	1.262	0.847	1.241	0.792	1.325	0.690	1.213	0.955	1.311	0.694	1.283	0.704	1.280	0.680	1.172
380 kV Benken	0.367	0.543	0.360	0.536	0.362	0.544	0.306	0.470	0.333	0.584	0.353	0.490	0.265	0.512	0.372	0.591	0.353	0.553	0.297	0.484
220 kV Siebnen	0.541	1.236	0.535	1.217	0.537	1.230	0.136	1.017	0.641	1.288	0.517	1.143	0.063	1.018	0.556	1.257	0.584	1.283	0.478	1.080
220 kV Samstagern	0.232	1.322	0.211	1.289	0.217	1.319	0.140	1.041	0.325	1.358	0.134	1.091	0.064	1.041	0.267	1.365	0.408	1.466	0.026	1.029
220 kV Altgass	0.127	1.276	0.107	1.243	0.113	1.272	0.181	0.982	0.214	1.307	0.060	1.025	0.098	0.982	0.161	1.323	0.346	1.433	0.072	0.989
220 kV Thalwil	0.272	1.487	0.242	1.448	0.251	1.488	0.056	1.141	0.361	1.524	0.187	1.241	0.037	1.142	0.310	1.532	0.432	1.642	0.025	1.129
220 kV Waldegg	0.289	1.512	0.255	1.471	0.265	1.515	0.019	1.145	0.374	1.547	0.209	1.267	0.077	1.145	0.328	1.556	0.441	1.666	0.045	1.142
220 kV Obfelden	0.289	1.298	0.251	1.262	0.262	1.304	0.070	0.970	0.361	1.324	0.228	1.098	0.135	0.971	0.325	1.334	0.410	1.425	0.079	0.967
220 kV Niederwil	0.502	0.875	0.442	0.836	0.460	0.887	0.420	0.715	0.534	0.882	0.485	0.822	0.450	0.715	0.520	0.884	0.530	0.911	0.088	0.551
220 kV Mettlen	0.067	1.187	0.061	1.157	0.063	1.184	0.220	0.883	0.115	1.213	0.141	0.930	0.135	0.883	0.065	1.237	0.308	1.350	0.166	0.917
380 kV Mettlen	0.396	0.639	0.394	0.634	0.395	0.642	0.414	0.682	0.344	0.706	0.392	0.599	0.347	0.763	0.378	0.676	0.458	0.672	0.390	0.609
220 kV Breite	0.225	0.384	0.229	0.383	0.228	0.384	0.256	0.389	0.233	0.382	0.276	0.371	0.269	0.392	0.273	0.404	0.223	0.488	0.263	0.380
380 kV Breite	0.426	0.178	0.417	0.176	0.420	0.174	0.362	0.232	0.411	0.216	0.411	0.181	0.338	0.284	0.451	0.164	0.345	0.132	0.343	0.179

Tableau 4-7: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden – SCL optimal (scénario 3)

4.4.4.1.2 Injection d'harmoniques à 220 kV Verbois

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Romanel – Veytaux
3	N-1 sur 220 kV Romanel – Vaux
4	N-1 sur 220 kV Vaux – Verbois
5	N-2 sur 220 kV Romanel – Vaux et Vaux – Verbois

Les facteurs d'amplification sur les harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-8 et Tableau 4-9 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.854	0.853	0.979	0.787	0.638	0.797	0.601	0.835	0.633	0.796
220 kV Foretaille	0.854	1.475	0.858	2.472	0.829	1.398	0.827	1.397	0.829	1.398
220 kV Crans	0.619	1.844	0.635	3.532	0.570	1.694	0.566	1.748	0.570	1.694
220 kV Banlieue Ouest	0.464	1.867	0.511	4.080	0.372	1.643	0.363	1.842	0.367	1.642
220 kV Romanel	0.561	1.685	0.607	3.812	0.482	1.467	0.474	1.695	0.477	1.466
380 kV Romanel	2.379	1.069	2.621	0.925	1.950	0.923	1.878	1.079	1.943	0.924
220 kV Vaux	0.450	1.560	0.493	3.503	0.939	0.938	0.447	1.685	0.000	0.000
220 kV Veytaux	0.755	1.225	0.807	1.192	0.660	1.045	0.652	1.247	0.656	1.046
220 kV St Triphon	0.689	1.715	0.752	1.044	0.597	1.460	0.584	1.728	0.592	1.462
220 kV Riddes	0.678	1.956	0.742	1.609	0.575	1.683	0.559	1.954	0.572	1.683
380 kV Bâtiaz	1.764	1.221	1.934	2.032	1.441	1.079	1.389	1.187	1.436	1.075
380 kV Nant de Drance	1.792	1.295	1.964	2.156	1.463	1.144	1.410	1.259	1.458	1.139
380 kV Châtelard	1.790	1.287	1.962	2.140	1.462	1.137	1.409	1.250	1.457	1.132
220 kV Châtelard	1.414	1.052	1.549	1.758	1.155	0.930	1.113	1.023	1.151	0.926
220 kV Vallorcine	1.399	1.042	1.532	1.741	1.142	0.921	1.100	1.012	1.138	0.917

Tableau 4-8: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois – SCL bas (scénario 3)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	1.237	0.467	1.479	0.321	0.931	0.485	0.868	0.481	0.920	0.490
220 kV Foretaille	1.005	0.747	1.052	1.611	0.923	0.730	0.910	0.619	0.920	0.730
220 kV Crans	0.984	0.915	1.120	2.044	0.805	0.823	0.772	0.639	0.799	0.822
220 kV Banlieue Ouest	1.255	1.434	1.454	2.188	1.007	1.263	0.958	1.120	0.996	1.263
220 kV Romanel	1.365	1.531	1.563	2.043	1.125	1.357	1.078	1.246	1.114	1.358
380 kV Romanel	3.335	0.440	3.841	0.333	2.698	0.390	2.563	0.351	2.680	0.394
220 kV Vaux	1.150	1.303	1.321	1.875	0.735	0.792	1.019	1.207	0.000	0.000
220 kV Veytaux	1.340	3.019	1.112	3.055	1.111	2.659	1.076	2.455	1.103	2.663
220 kV St Triphon	1.153	3.066	1.101	2.852	0.947	2.694	0.907	2.493	0.939	2.698
220 kV Riddes	0.888	1.628	0.916	1.562	0.725	1.429	0.693	1.325	0.719	1.430
380 kV Bâtiaz	2.188	0.566	2.481	0.949	1.761	0.503	1.675	0.436	1.750	0.500
380 kV Nant de Drance	2.171	0.588	2.461	0.983	1.748	0.522	1.663	0.452	1.737	0.519
380 kV Châtelard	2.180	0.586	2.471	0.980	1.755	0.521	1.669	0.451	1.744	0.517
220 kV Châtelard	1.452	0.396	1.645	0.672	1.169	0.352	1.112	0.304	1.161	0.350
220 kV Vallorcine	1.422	0.388	1.611	0.659	1.144	0.345	1.089	0.297	1.137	0.343

Tableau 4-9: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois – SCL optimal (scénario 3)

4.4.4.1.3 Injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Romanel
3	N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Chamoson
4	N-2 sur 380 kV Chamoson – Chippis

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le tableau suivant Tableau 4-10 et Tableau 4-11 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.825	0.870	0.825	0.905	0.905	0.901	0.826	0.945
220 kV Foretaille	1.147	1.062	1.217	0.359	0.384	0.263	1.091	0.896
220 kV Crans	1.301	1.127	1.366	0.417	0.468	0.340	1.248	0.882
220 kV Banlieue Ouest	1.347	0.843	1.397	0.402	0.525	0.390	1.306	0.538
220 kV Romanel	1.310	0.692	1.352	0.367	0.516	0.371	1.271	0.414
380 kV Romanel	0.331	0.866	0.351	1.121	1.091	0.071	0.355	0.298
220 kV Vaux	1.229	0.652	1.282	0.340	0.451	0.313	1.188	0.422
220 kV Veytaux	1.319	1.273	1.346	0.893	0.598	0.352	1.295	1.230
220 kV St Triphon	1.150	1.635	1.195	0.901	0.436	0.337	1.128	1.458
220 kV Riddes	0.622	1.377	0.658	0.365	0.250	0.292	0.616	1.028
380 kV Bâtiаз	0.151	0.502	0.246	0.942	2.154	0.569	0.303	0.671
380 kV Nant de Drance	0.154	0.532	0.250	0.997	2.188	0.604	0.308	0.710
380 kV Châtelard	0.153	0.528	0.250	0.990	2.185	0.600	0.307	0.705
220 kV Châtelard	0.120	0.436	0.197	0.813	1.715	0.492	0.241	0.581
220 kV Vallorcine	0.118	0.432	0.195	0.806	1.696	0.488	0.238	0.576

Tableau 4-10: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot – SCL bas (Scénario 3)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.782	0.936	0.805	0.897	0.826	0.919	0.766	0.931
220 kV Foretaille	2.016	0.301	3.159	0.384	1.043	0.158	2.120	0.248
220 kV Crans	2.254	0.238	3.473	0.464	1.232	0.166	2.377	0.174
220 kV Banlieue Ouest	2.318	0.126	3.446	0.455	1.360	0.228	2.446	0.111
220 kV Romanel	2.272	0.154	3.339	0.416	1.353	0.245	2.396	0.155
380 kV Romanel	1.219	0.390	1.446	1.089	1.294	0.065	1.361	0.392
220 kV Vaux	2.088	0.091	3.137	0.386	1.188	0.178	2.200	0.078
220 kV Veytaux	1.937	0.605	2.686	0.787	1.122	0.485	2.016	0.468
220 kV St Triphon	1.639	0.668	2.280	0.797	0.894	0.502	1.686	0.504
220 kV Riddes	0.878	0.514	1.067	0.475	0.430	0.312	0.873	0.352
380 kV Bâtiаз	0.879	0.671	0.448	0.398	1.742	0.635	1.032	0.693
380 kV Nant de Drance	0.873	0.696	0.445	0.413	1.729	0.658	1.025	0.719
380 kV Châtelard	0.876	0.693	0.446	0.412	1.735	0.656	1.028	0.717
220 kV Châtelard	0.583	0.475	0.297	0.282	1.153	0.449	0.684	0.491
220 kV Vallorcine	0.571	0.466	0.291	0.276	1.129	0.440	0.670	0.481

Tableau 4-11: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot – SCL optimal (scénario 3)

4.4.4.1.4 Injection d'harmoniques à 380 kV Romanel

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Romanel :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Chamoson
3	N-1 sur 380 kV Bois Tollot – Romanel
4	N-2 sur 380 kV Chamoson – Chipps

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Romanel dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-12 et Tableau 4-13 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.183	0.877	0.213	0.361	0.574	0.672	0.197	0.636
220 kV Foretaille	1.538	1.129	1.368	0.496	0.947	1.118	1.620	0.886
220 kV Crans	1.639	1.046	1.461	0.529	0.955	1.054	1.724	0.841
220 kV Banlieue Ouest	1.514	0.485	1.355	0.408	0.788	0.539	1.589	0.468
220 kV Romanel	1.424	0.288	1.278	0.335	0.716	0.348	1.493	0.337
380 kV Romanel	0.197	0.956	0.198	0.550	0.286	0.935	0.079	1.117
220 kV Vaux	1.429	0.368	1.282	0.348	0.724	0.423	1.499	0.399
220 kV Veytaux	1.365	1.927	1.283	0.349	0.659	1.814	1.397	1.298
220 kV St Triphon	1.192	2.242	1.135	0.322	0.565	2.143	1.206	1.513
220 kV Riddes	0.546	1.445	0.622	0.286	0.216	1.451	0.517	1.057
380 kV Bâtiaz	0.553	1.460	2.005	7.887	0.630	1.363	0.757	3.060
380 kV Nant de Drance	0.561	1.550	2.036	8.337	0.640	1.446	0.769	3.238
380 kV Châtelard	0.561	1.538	2.033	8.287	0.639	1.435	0.769	3.216
220 kV Châtelard	0.443	1.265	1.605	6.810	0.505	1.181	0.607	2.649
220 kV Vallorcine	0.438	1.253	1.587	6.745	0.499	1.170	0.600	2.624

Tableau 4-12: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Romanel – SCL bas (Scénario 3)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	1.109	0.350	1.008	0.358	1.039	0.232	1.101	0.302
220 kV Foretaille	3.645	0.444	3.207	0.306	2.334	0.531	3.534	0.420
220 kV Crans	3.908	0.469	3.433	0.343	2.462	0.521	3.783	0.459
220 kV Banlieue Ouest	3.648	0.347	3.204	0.286	2.257	0.299	3.529	0.368
220 kV Romanel	3.473	0.290	3.051	0.250	2.139	0.214	3.360	0.313
380 kV Romanel	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
220 kV Vaux	3.385	0.309	2.974	0.249	2.080	0.241	3.276	0.325
220 kV Veytaux	2.832	0.509	2.474	0.466	1.741	0.467	2.709	0.309
220 kV St Triphon	2.412	0.554	2.101	0.522	1.487	0.590	2.294	0.252
220 kV Riddes	1.129	0.481	0.996	0.320	0.678	0.616	1.046	0.141
380 kV Bâtiaz	0.549	1.572	1.364	11.260	0.512	1.621	0.657	1.612
380 kV Nant de Drance	0.545	1.627	1.355	11.660	0.509	1.678	0.652	1.670
380 kV Châtelard	0.547	1.623	1.360	11.627	0.511	1.674	0.654	1.665
220 kV Châtelard	0.364	1.112	0.906	7.972	0.340	1.147	0.435	1.141
220 kV Vallorcine	0.356	1.091	0.887	7.819	0.333	1.125	0.426	1.119

Tableau 4-13: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Romanel – SCL optimal (scénario 3)

4.4.4.1.5 Injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Ernen – Seehalten
3	N-1 sur 220 kV Airolo – Rotondo
4	N-1 sur 220 kV Airolo – Lavorgo
5	N-1 sur 220 kV Altgass – Samstagern
6	N-1 sur 220 kV Samstagern – Siebnen
7	N-1 sur 220 kV Samstagern – Thalwil
8	N-1 sur 220 kV Mettlen – Sursee
9	N-1 sur 220 kV Gösgen – Laufenburg

10	N-1 sur 220 kV Gösgen – Ormalingen
11	N-1 sur 220 kV Altgass – Mettlen
12	N-2 sur 220 kV Airolo – Rotondo et Airolo – Lavorgo
13	N-2 sur 220 kV Obfelden – Waldegg
14	N-2 sur 220 kV Birr – Niederwil et Mettlen – Obfelden
15	N-2 sur 220 kV Mettlen – Obfelden et Breite – Fällanden

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-14 et Tableau 4-15 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.349	1.104	0.341	0.695	0.347	0.483	0.333	0.575	0.356	0.849	0.359	0.845	0.349	1.100	0.322	1.177
220 kV Obfelden	0.976	0.409	0.979	0.370	0.975	0.407	0.982	0.359	0.880	0.143	0.985	0.620	0.998	0.470	0.961	0.471
220 kV Waldegg	1.054	0.368	1.058	0.441	1.054	0.526	1.060	0.464	0.916	0.276	1.093	0.914	1.089	0.438	1.042	0.402
220 kV Thalwil	1.047	0.331	1.050	0.449	1.046	0.543	1.051	0.483	0.890	0.333	1.103	0.985	1.109	0.441	1.036	0.340
220 kV Samstagern	0.992	0.357	0.995	0.496	0.992	0.585	0.994	0.539	0.802	0.450	1.082	1.070	0.981	0.359	0.985	0.316
220 kV Altgass	1.008	0.656	1.009	0.737	1.008	0.786	1.009	0.764	1.009	1.023	1.053	1.062	1.002	0.669	1.004	0.622
220 kV Niederwil	0.750	1.497	0.755	1.155	0.750	0.987	0.765	1.028	0.683	0.519	0.698	0.327	0.760	1.490	0.724	1.619
220 kV Regensdorf	0.785	2.426	0.796	1.961	0.784	1.707	0.799	1.769	0.715	0.761	0.685	0.818	0.790	2.359	0.762	2.622
220 kV Seebach	0.789	2.553	0.802	2.080	0.789	1.817	0.802	1.880	0.720	0.796	0.680	0.902	0.794	2.477	0.767	2.759
220 kV Auwiesen	0.786	2.570	0.800	2.097	0.786	1.834	0.799	1.897	0.717	0.799	0.675	0.919	0.790	2.492	0.764	2.777
220 kV Fällanden	0.770	2.611	0.785	2.146	0.770	1.885	0.782	1.946	0.704	0.803	0.651	0.981	0.773	2.527	0.750	2.820
220 kV Aathal	0.683	1.747	0.708	1.522	0.682	1.400	0.688	1.419	0.675	0.332	0.685	0.462	0.683	1.683	0.661	1.830
220 kV Grynau	0.743	1.616	0.771	1.374	0.743	1.244	0.746	1.267	0.739	0.300	0.752	0.425	0.744	1.556	0.724	1.709
220 kV Benken	0.636	2.276	0.645	1.832	0.636	1.588	0.645	1.637	0.548	0.767	0.437	1.062	0.635	2.191	0.628	2.489
220 kV Siebnen	0.739	1.553	0.745	1.223	0.739	1.040	0.745	1.072	0.621	0.671	0.433	1.059	0.735	1.478	0.731	1.722
220 kV Giswil	0.643	1.231	0.736	0.770	0.654	0.497	0.791	0.454	0.645	0.862	0.646	0.867	0.643	1.179	0.644	1.008
220 kV Innertkirchen	0.561	1.909	0.687	1.399	0.585	1.060	0.713	1.012	0.574	1.233	0.584	1.297	0.562	1.843	0.541	1.613
220 kV Handeck	0.497	1.979	0.630	1.502	0.524	1.183	0.643	1.125	0.514	1.279	0.527	1.345	0.497	1.913	0.473	1.684
220 kV Grimsel	0.461	1.973	0.595	1.521	0.490	1.222	0.598	1.160	0.481	1.272	0.496	1.338	0.461	1.908	0.434	1.688
220 kV Seehalten	0.436	1.954	0.568	1.523	0.466	1.244	0.562	1.178	0.457	1.256	0.474	1.322	0.436	1.890	0.405	1.679
220 kV Airolo	0.675	1.406	0.711	0.885	0.636	1.296	0.446	1.786	0.701	0.955	0.733	0.992	0.674	1.367	0.559	1.264
220 kV Sils	1.406	0.653	1.423	0.477	1.405	0.425	1.416	0.400	1.378	0.274	1.380	0.341	1.409	0.630	1.335	0.794

	Cas 9		Cas 10		Cas 11		Cas 12		Cas 13		Cas 14		Cas 15	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.352	1.103	0.339	1.197	0.356	0.833	0.309	0.559	0.350	1.110	0.298	0.926	0.348	0.842
220 kV Obfelden	0.973	0.379	0.973	0.454	0.946	0.141	0.977	0.360	0.832	0.600	1.288	0.591	1.120	0.465
220 kV Waldegg	1.052	0.346	1.052	0.348	1.013	0.286	1.053	0.468	1.257	0.811	1.315	0.313	1.188	0.203
220 kV Thalwil	1.045	0.319	1.044	0.268	1.000	0.348	1.044	0.487	1.206	0.752	1.261	0.120	1.167	0.040
220 kV Samstagern	0.991	0.369	0.990	0.231	0.935	0.478	0.987	0.545	1.061	0.565	1.113	0.343	1.082	0.362
220 kV Altgass	1.007	0.667	1.007	0.593	0.943	0.487	1.005	0.767	1.043	0.785	1.068	0.685	1.053	0.698
220 kV Niederwil	0.744	1.452	0.746	1.648	0.729	0.469	0.761	1.023	0.686	1.585	1.179	1.109	0.931	0.958
220 kV Regensdorf	0.781	2.343	0.781	2.687	0.760	0.674	0.776	1.762	0.747	2.438	1.099	1.346	1.050	1.364
220 kV Seebach	0.787	2.464	0.786	2.830	0.764	0.703	0.772	1.873	0.760	2.552	1.063	1.363	1.074	1.409
220 kV Auwiesen	0.784	2.480	0.783	2.850	0.761	0.706	0.768	1.890	0.759	2.565	1.048	1.356	1.075	1.410
220 kV Fällanden	0.769	2.518	0.768	2.896	0.745	0.707	0.743	1.940	0.753	2.590	0.977	1.314	1.074	1.403
220 kV Aathal	0.686	1.701	0.680	1.862	0.674	0.258	0.581	1.427	0.676	1.741	0.661	0.738	0.665	0.534
220 kV Grynau	0.749	1.568	0.742	1.744	0.736	0.230	0.617	1.273	0.738	1.606	0.717	0.678	0.771	0.568
220 kV Benken	0.635	2.180	0.635	2.572	0.605	0.686	0.639	1.631	0.640	2.189	0.821	1.071	0.884	1.179
220 kV Siebnen	0.738	1.478	0.738	1.783	0.700	0.622	0.739	1.066	0.761	1.422	0.904	0.655	0.940	0.725
220 kV Littau	0.862	0.404	0.861	0.665	0.864	0.691	0.883	0.550	0.862	0.413	0.884	0.586	0.867	0.696
220 kV Giswil	0.640	1.254	0.636	0.990	0.648	0.887	0.671	0.478	0.641	1.226	0.688	0.851	0.652	0.865
220 kV Innertkirchen	0.562	1.936	0.552	1.399	0.571	1.245	0.538	1.042	0.562	1.899	0.574	1.339	0.566	1.210
220 kV Handeck	0.498	2.006	0.486	1.462	0.508	1.289	0.450	1.157	0.499	1.970	0.501	1.393	0.499	1.254
220 kV Grimsel	0.464	2.000	0.450	1.460	0.473	1.280	0.398	1.193	0.464	1.964	0.458	1.391	0.462	1.246
220 kV Seehalten	0.439	1.979	0.424	1.447	0.448	1.263	0.358	1.213	0.440	1.945	0.423	1.378	0.435	1.229
220 kV Airolo	0.689	1.427	0.650	1.082	0.681	0.957	6.143	1.912	0.679	1.406	0.469	1.045	0.641	0.924
220 kV Sils	1.405	0.603	1.396	0.866	1.396	0.255	1.303	0.392	1.383	0.626	1.404	0.319	1.350	0.440

Tableau 4-14: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen – faible SCL (scénario 3)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.408	1.357	0.413	0.980	0.414	0.752	0.388	0.907	0.448	0.828	0.458	0.883	0.409	1.369	0.423	1.398
220 kV Obfelden	0.691	1.176	0.688	1.012	0.690	0.988	0.700	1.026	0.398	0.327	0.735	0.705	0.692	1.263	0.692	1.197
220 kV Waldegg	0.778	1.296	0.775	1.063	0.776	1.067	0.786	1.074	0.342	0.527	0.886	0.978	0.779	1.437	0.780	1.312
220 kV Thalwil	0.791	1.233	0.788	0.987	0.790	1.007	0.799	0.997	0.289	0.606	0.934	1.032	0.792	1.475	0.794	1.245
220 kV Samstagern	0.786	1.032	0.784	0.788	0.785	0.831	0.793	0.790	0.185	0.730	0.992	1.092	0.784	0.981	0.790	1.035
220 kV Altgass	0.900	0.930	0.899	0.763	0.900	0.814	0.904	0.759	0.185	0.740	1.004	1.070	0.900	0.909	0.903	0.920
220 kV Niederwil	0.285	1.693	0.278	1.882	0.282	1.680	0.299	1.902	0.119	0.550	0.222	0.487	0.286	1.729	0.283	1.769
220 kV Regensdorf	0.144	2.584	0.132	2.956	0.141	2.664	0.159	3.013	0.128	0.817	0.098	0.984	0.145	2.584	0.146	2.716
220 kV Seebach	0.107	2.739	0.095	3.130	0.105	2.829	0.120	3.192	0.158	0.866	0.139	1.091	0.108	2.732	0.108	2.880
220 kV Auwiesen	0.100	2.759	0.087	3.153	0.097	2.851	0.111	3.217	0.167	0.872	0.154	1.112	0.101	2.750	0.099	2.901
220 kV Fällanden	0.079	2.815	0.073	3.221	0.080	2.920	0.078	3.289	0.210	0.891	0.224	1.192	0.080	2.799	0.072	2.962
220 kV Aathal	0.305	1.579	0.320	1.929	0.311	1.748	0.276	1.978	0.343	0.377	0.334	0.558	0.305	1.568	0.288	1.666
220 kV Grynau	0.304	1.480	0.321	1.791	0.311	1.617	0.274	1.837	0.344	0.323	0.337	0.504	0.305	1.469	0.285	1.564
220 kV Benken	0.267	0.451	0.273	0.129	0.143	2.660	0.154	2.992	0.200	0.896	0.287	1.317	0.144	2.554	0.150	2.715
220 kV Siebnen	0.296	1.994	0.287	2.164	0.293	1.985	0.311	2.220	0.121	0.839	0.284	1.304	0.295	1.954	0.307	2.090
220 kV Littau	0.913	1.196	0.948	0.759	0.908	0.840	0.924	0.698	0.924	0.883	0.927	0.946	0.913	1.185	0.909	1.200
220 kV Giswil	0.860	2.376	0.988	2.379	0.840	1.668	0.898	1.726	0.898	1.230	0.907	1.491	0.860	2.358	0.846	2.393
220 kV Innertkirchen	0.779	2.779	0.955	3.169	0.751	2.120	0.828	2.332	0.829	1.415	0.843	1.727	0.779	2.765	0.760	2.801
220 kV Handeck	0.731	2.753	0.926	3.260	0.701	2.182	0.785	2.415	0.785	1.406	0.799	1.712	0.731	2.740	0.714	2.779
220 kV Grimsel	0.679	2.674	0.900	3.237	0.667	2.167	0.754	2.412	0.753	1.369	0.767	1.665	0.698	2.662	0.682	2.702
220 kV Seehalten	0.676	2.605	0.887	3.212	0.644	2.151	0.734	2.423	0.733	1.337	0.747	1.627	0.676	2.594	0.662	2.635
220 kV Airolo	0.570	1.500	0.672	1.624	0.699	0.909	0.757	3.029	0.656	0.719	0.673	0.888	0.570	1.495	0.568	1.509
220 kV Sils	0.898	0.972	1.250	0.306	1.243	0.344	1.235	0.279	0.999	0.204	0.792	0.262	1.241	0.487	1.208	0.478

	Cas 9		Cas 10		Cas 11		Cas 12		Cas 13		Cas 14		Cas 15	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.429	0.975	0.410	0.968	0.452	0.972	0.365	0.332	0.414	0.972	0.424	1.062	0.411	0.923
220 kV Obfelden	0.683	0.986	0.688	1.045	0.390	0.316	0.709	0.702	0.539	0.979	0.482	1.064	0.529	0.816
220 kV Waldeggen	0.770	1.035	0.775	1.093	0.330	0.571	0.796	0.751	1.048	1.386	0.610	0.786	0.654	0.614
220 kV Thalwil	0.784	0.962	0.788	1.012	0.276	0.665	0.808	0.709	1.003	1.274	0.657	0.550	0.698	0.454
220 kV Samstagern	0.781	0.771	0.784	0.798	0.169	0.823	0.800	0.615	0.879	0.926	0.723	0.287	0.756	0.357
220 kV Altgass	0.898	0.760	0.900	0.750	0.170	0.834	0.908	0.730	0.947	0.876	0.869	0.609	0.885	0.648
220 kV Niederwil	0.269	1.852	0.278	1.957	0.108	0.640	0.316	1.503	0.221	1.917	0.205	1.586	0.268	1.240
220 kV Regensdorf	0.122	2.904	0.132	3.089	0.131	0.937	0.182	2.460	0.111	2.972	0.075	1.828	0.197	1.814
220 kV Seebach	0.087	3.073	0.094	3.273	0.165	0.985	0.142	2.615	0.086	3.141	0.054	1.845	0.174	1.893
220 kV Auwiesen	0.080	3.096	0.086	3.297	0.176	0.991	0.132	2.637	0.083	3.163	0.054	1.833	0.167	1.900
220 kV Fällanden	0.073	3.161	0.071	3.370	0.221	1.005	0.091	2.708	0.081	3.225	0.075	1.776	0.140	1.916
220 kV Aathal	0.331	1.904	0.318	1.991	0.360	0.396	0.239	1.722	0.328	1.934	0.323	0.919	0.313	0.780
220 kV Grynau	0.332	1.763	0.319	1.857	0.362	0.361	0.235	1.567	0.328	1.793	0.324	0.857	0.291	0.790
220 kV Benken	0.128	2.858	0.132	3.070	0.208	1.013	0.171	1.427	0.147	2.884	0.099	1.523	0.208	1.678
220 kV Siebnen	0.281	2.113	0.287	2.280	0.123	0.952	0.330	1.739	0.324	2.114	0.242	1.035	0.340	1.133
220 kV Littau	0.950	0.755	0.947	0.754	0.961	0.609	0.931	0.516	0.948	0.765	0.949	0.561	0.914	0.857
220 kV Giswil	0.994	2.361	0.986	2.164	1.033	1.196	0.923	1.066	0.988	2.375	0.993	1.549	0.862	1.238
220 kV Innertkirchen	0.965	3.146	0.953	2.883	1.015	1.719	0.864	1.650	0.956	3.158	0.962	2.207	0.782	1.474
220 kV Handeck	0.935	3.237	0.923	2.978	0.990	1.772	0.827	1.773	0.927	3.250	0.934	2.268	0.735	1.468
220 kV Grimsel	0.910	3.213	0.898	2.965	0.967	1.761	0.798	1.801	0.901	3.227	0.910	2.254	0.702	1.435
220 kV Seehalten	0.897	3.188	0.885	2.950	0.955	1.748	0.781	1.821	0.888	3.202	0.897	2.237	0.174	1.893
220 kV Airolo	0.684	1.605	0.671	1.593	0.765	0.813	4.198	2.063	0.675	1.623	0.694	1.038	0.578	1.729
220 kV Sils	1.250	0.304	1.247	0.291	1.004	0.051	1.222	0.401	1.234	0.303	1.187	0.114	1.207	0.255

Tableau 4-15: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen – SCL optimal (scénario 3)

4.4.4.1.6 Injection d'harmoniques à 220 kV Gerlafingen

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Gerlafingen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Froloo – Lachmatt
3	N-1 sur 220 kV Froloo – Ormalingen
4	N-1 sur 220 kV Lachmatt – Münchwilen
5	N-1 sur 220 kV Laufenburg – Münchwilen

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Gerlafingen dans des conditions de faible SCL sont présentés dans le Tableau 4-16.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Flumenthal	0.699	0.903	0.829	1.415	0.710	0.958	0.752	1.053	1.053	0.624
220 kV Froloo	0.618	1.028	0.895	1.950	0.657	1.152	0.737	1.279	1.419	1.529
220 kV Lachmatt	0.518	0.888	0.155	0.221	0.545	0.989	0.679	1.165	1.572	1.956
380 kV Lachmatt	0.131	0.347	0.093	0.283	0.127	0.327	0.116	0.317	0.247	0.272
380 kV Asphard	0.125	0.356	0.091	0.286	0.121	0.336	0.109	0.328	0.230	0.278
220 kV Münchwilen	0.328	0.527	0.145	0.142	0.333	0.569	0.122	0.059	1.772	2.346
220 kV Ormalingen	0.447	0.655	0.575	1.169	0.274	0.263	0.488	0.770	0.892	0.874
220 kV Bickigen	0.293	0.139	0.333	0.240	0.292	0.148	0.299	0.176	0.411	0.125
380 kV Bickigen	0.168	0.313	0.161	0.205	0.164	0.300	0.161	0.254	0.248	0.307
220 kV Mühleberg	0.151	0.351	0.140	0.349	0.150	0.327	0.134	0.393	0.203	0.377
380 kV Mühleberg	0.136	0.223	0.114	0.224	0.133	0.222	0.121	0.216	0.203	0.207
220 kV Gösgen	0.331	0.387	0.357	0.594	0.275	0.262	0.319	0.402	0.529	0.391
380 kV Gösgen	0.141	0.337	0.124	0.202	0.132	0.341	0.128	0.310	0.238	0.295
220 kV Sursee	0.265	0.217	0.288	0.329	0.232	0.154	0.254	0.238	0.408	0.230
220 kV Laufenburg	0.242	0.328	0.135	0.100	0.240	0.343	0.122	0.059	0.204	0.061
380 kV Laufenburg	0.102	0.332	0.077	0.257	0.098	0.314	0.085	0.314	0.174	0.271
220 kV Lindenholz	0.230	0.193	0.159	0.168	0.227	0.190	0.148	0.208	0.236	0.194
220 kV Oftringen	0.257	0.207	0.221	0.069	0.250	0.232	0.200	0.067	0.303	0.030
220 kV Innertkirchen	0.259	0.877	0.264	1.063	0.244	0.828	0.258	0.918	0.378	0.568
220 kV Handeck	0.256	0.875	0.251	1.079	0.241	0.824	0.254	0.920	0.384	0.561

220 kV Grimsel	0.254	0.848	0.244	1.055	0.240	0.797	0.251	0.894	0.386	0.547
220 kV Seehalten	0.254	0.817	0.240	1.024	0.240	0.768	0.250	0.863	0.390	0.531

Tableau 4-16: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Gerlafingen – SCL faible (scénario 3)

4.4.4.1.7 Injection d'harmoniques à 220 kV Mühleberg

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mühleberg :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Hauterive – St. Triphon
3	N-1 sur 220 kV Botterens – St. Triphon
4	N-1 sur 220 kV Chamoson – Gstaad
5	N-1 sur 220 kV Chamoson – Riddes
6	N-2 sur 220 kV Chamoson – Riddes
7	N-2 sur 220 kV Chamoson – Mühleberg et Chamoson – Gstaad
8	N-2 sur 220 kV Botterens – St Triphon et Hauterive – St. Triphon

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mühleberg dans des conditions de faible SCL sont présentés dans le Tableau 4-17.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mühleberg	0.456	0.617	0.457	0.553	0.457	0.553	0.458	0.569	0.456	0.617	0.456	0.616	0.460	0.525	0.457	0.497
220 kV Bickigen	0.216	0.183	0.216	0.116	0.216	0.118	0.214	0.128	0.216	0.182	0.216	0.181	0.211	0.090	0.217	0.072
380 kV Bickigen	0.148	1.263	0.157	0.798	0.158	0.801	0.144	0.882	0.148	1.259	0.148	1.254	0.139	0.607	0.168	0.459
220 kV Lindenholz	0.614	0.514	0.610	0.452	0.610	0.454	0.617	0.449	0.614	0.512	0.614	0.510	0.620	0.458	0.607	0.477
220 kV Flumenthal	0.255	1.188	0.254	0.832	0.254	0.832	0.256	0.881	0.255	1.185	0.255	1.183	0.258	0.656	0.254	0.566
220 kV Gerlafingen	0.240	1.115	0.239	0.780	0.239	0.780	0.241	0.826	0.240	1.112	0.240	1.110	0.242	0.615	0.238	0.531
220 kV Froloo	0.262	1.506	0.260	1.048	0.260	1.048	0.264	1.113	0.262	1.502	0.262	1.499	0.267	0.825	0.259	0.706
220 kV Kerzers	0.982	0.984	0.982	0.984	0.982	0.984	0.982	0.984	0.982	0.984	0.982	0.984	0.982	0.984	0.982	0.984
220 kV Galmiz	0.976	0.978	0.976	0.978	0.976	0.978	0.976	0.978	0.976	0.978	0.976	0.978	0.976	0.978	0.976	0.978
220 kV Wimmis	0.229	2.240	0.231	1.399	0.231	1.408	0.207	1.491	0.229	2.232	0.228	2.223	0.185	0.958	0.234	0.793
220 kV Gstaad	0.606	2.279	0.572	1.632	0.571	1.635	1.176	1.525	0.605	2.272	0.603	2.268	1.180	1.507	0.535	1.155
220 kV Chamoson	0.280	1.989	0.237	1.266	0.236	1.272	0.181	1.257	0.279	1.982	0.277	1.976	0.081	0.746	0.190	0.741
380 kV Chamoson	0.146	1.134	0.102	0.695	0.101	0.699	0.153	0.780	0.147	1.130	0.148	1.127	0.161	0.529	0.063	0.377
220 kV Chandoline	0.187	1.774	0.161	1.121	0.161	1.126	0.114	1.135	0.186	1.767	0.185	1.762	0.048	0.687	0.134	0.647
220 kV Botterens	0.771	2.401	0.683	1.654	0.986	1.145	0.750	1.966	0.771	2.397	0.772	2.393	0.729	1.632	0.990	1.142
220 kV Hauterive	0.860	1.828	0.969	1.098	0.810	1.416	0.849	1.596	0.860	1.826	0.861	1.824	0.837	1.409	0.972	1.095
220 kV Botterens	0.771	2.401	0.683	1.654	0.986	1.145	0.750	1.966	0.771	2.397	0.772	2.393	0.729	1.632	0.990	1.142
220 kV Riddes	0.282	1.984	0.231	1.247	0.230	1.253	0.192	1.277	0.282	1.975	0.284	1.963	0.100	0.781	0.175	0.713
220 kV St Triphon	0.387	2.304	0.244	1.306	0.241	1.316	0.352	1.690	0.387	2.297	0.389	2.289	0.317	1.241	0.088	0.590
220 kV Veytaux	0.294	1.990	0.186	1.135	0.183	1.144	0.275	1.450	0.294	1.984	0.295	1.977	0.255	1.055	0.067	0.526
220 kV Romanel	0.054	0.275	0.047	0.117	0.047	0.118	0.026	0.224	0.054	0.274	0.054	0.272	0.011	0.189	0.048	0.009
380 kV Romanel	0.435	1.058	0.284	0.690	0.279	0.693	0.389	0.690	0.435	1.054	0.436	1.050	0.343	0.429	0.113	0.425

Tableau 4-17: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mühleberg – SCL faible (scénario 3)

4.4.4.1.8 Injection d'harmoniques à 220 kV Sils

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Sils :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Castasegna – Löbbia
3	N-1 sur 220 kV Bärenburg – Sils
4	N-1 sur 220 kV Sils – Tiefencastel
5	N-1 sur 220 kV Sils – Tinzen
6	N-1 sur 220 kV Benken – Siebnen
7	N-1 sur 220 kV Benken – Sils
8	N-2 sur 220 kV Bärenburg – Sils

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Sils dans des conditions de faible SCL sont présentés dans le Tableau 4-18.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Bärenburg	0.962	0.965	0.962	0.965	0.924	0.929	0.962	0.965	0.962	0.965	0.962	0.965	0.962	0.965	0.000	0.000
220 kV Ferrera	0.940	0.944	0.940	0.944	0.903	0.908	0.940	0.944	0.940	0.944	0.940	0.944	0.940	0.944	0.000	0.000
220 kV Tiefencastel	1.003	1.034	1.007	1.038	1.003	1.034	1.012	1.166	1.007	1.070	1.003	1.034	1.003	1.034	1.003	1.034
220 kV Tinzen	1.013	1.085	1.023	1.095	1.013	1.085	1.019	1.173	1.022	1.172	1.013	1.085	1.013	1.085	1.013	1.085
220 kV Löbbia	1.045	1.229	1.075	1.256	1.045	1.229	1.050	1.328	1.054	1.327	1.045	1.229	1.045	1.229	1.045	1.229
220 kV Castasegna	1.029	1.212	0.000	0.000	1.029	1.212	1.034	1.310	1.037	1.310	1.029	1.212	1.029	1.212	1.029	1.212
380 kV Sils	0.798	0.148	0.798	0.148	0.798	0.148	0.798	0.148	0.798	0.148	0.793	0.158	0.942	0.154	0.798	0.148
380 kV Soazza	0.862	0.339	0.862	0.339	0.862	0.339	0.862	0.339	0.862	0.339	0.866	0.364	1.036	0.374	0.862	0.339
220 kV Soazza	0.496	0.174	0.496	0.174	0.496	0.174	0.496	0.174	0.496	0.174	0.514	0.180	0.630	0.206	0.496	0.174
380 kV Tavanasa	0.542	0.159	0.542	0.159	0.542	0.159	0.542	0.159	0.542	0.159	0.532	0.166	0.662	0.153	0.542	0.159
220 kV Tavanasa	0.152	0.029	0.152	0.029	0.152	0.029	0.152	0.029	0.152	0.029	0.144	0.017	0.201	0.058	0.152	0.029
220 kV Benken	0.208	0.173	0.208	0.173	0.208	0.173	0.208	0.173	0.208	0.173	0.176	0.221	0.424	0.081	0.208	0.173
220 kV Siebnen	0.232	0.141	0.232	0.141	0.232	0.141	0.232	0.141	0.232	0.141	0.328	0.120	0.417	0.068	0.232	0.141
220 kV Samstagern	0.299	0.084	0.299	0.084	0.299	0.084	0.299	0.084	0.299	0.084	0.331	0.121	0.405	0.037	0.299	0.084
220 kV Grynau	0.378	0.142	0.378	0.142	0.378	0.142	0.378	0.142	0.378	0.142	0.393	0.174	0.398	0.029	0.378	0.142
220 kV Tierfehd	0.102	0.161	0.102	0.161	0.102	0.161	0.102	0.161	0.102	0.161	0.111	0.191	0.076	0.073	0.102	0.161
380 kV Tierfehd	0.251	0.217	0.251	0.217	0.251	0.217	0.251	0.217	0.251	0.217	0.244	0.235	0.324	0.162	0.251	0.217
380 kV Limmern	0.251	0.218	0.251	0.218	0.251	0.218	0.251	0.218	0.251	0.218	0.244	0.236	0.323	0.162	0.251	0.218
380 kV Bonaduz	0.775	0.155	0.775	0.155	0.775	0.155	0.775	0.155	0.775	0.155	0.769	0.165	0.920	0.161	0.775	0.155
220 kV Rothenbrunnen	0.244	0.168	0.244	0.168	0.244	0.168	0.244	0.168	0.244	0.168	0.268	0.209	0.208	0.040	0.244	0.168
220 kV Sarelli	0.500	0.287	0.500	0.287	0.500	0.287	0.500	0.287	0.500	0.287	0.559	0.350	0.349	0.074	0.500	0.287
220 kV Ilanz	0.176	0.071	0.176	0.071	0.176	0.071	0.176	0.071	0.176	0.071	0.178	0.087	0.205	0.048	0.176	0.071
220 kV Winkeln	0.588	0.045	0.588	0.045	0.588	0.045	0.588	0.045	0.588	0.045	0.635	0.048	0.511	0.066	0.588	0.045

Tableau 4-18: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Sils – faible SCL (scénario 3)

4.4.4.1.9 Injection d'harmoniques à 220 kV St. Triphon

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV St. Triphon :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Romanel – Vaux
3	N-1 sur 220 kV Vaux – Verbois
4	N-1 sur 220 kV Crans – Foretaille
5	N-1 sur 220 kV Banlieue Ouest – Foretaille
6	N-1 sur 220 kV Cornier – Riddes
7	N-1 sur 220 kV Botterens – Mühleberg
8	N-1 sur 220 kV Hauterive – Mühleberg
9	N-1 sur 220 kV Chamoson – Mühleberg
10	N-1 sur 220 kV Gstaad – Mühleberg
11	N-2 sur 220 kV Riddes – St. Triphon

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV St. Triphon dans des conditions de faible SCL sont présentés dans le Tableau 4-19.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8		Cas 9		Cas 10		Cas 11	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Botterens	0.839	1.438	0.838	1.438	0.839	1.437	0.839	1.455	0.837	1.506	0.837	1.428	1.133	1.577	0.770	1.278	0.832	1.313	0.834	1.351	0.786	1.398
220 kV Hauterive	0.654	1.276	0.653	1.275	0.654	1.274	0.654	1.298	0.652	1.362	0.652	1.263	0.547	1.028	0.947	1.329	0.645	1.116	0.648	1.165	0.581	1.229
220 kV Chamoson	0.367	1.062	0.365	1.064	0.367	1.058	0.356	1.119	0.346	1.305	0.354	1.020	0.344	0.965	0.347	0.981	0.326	0.772	0.358	1.023	0.090	1.033
380 kV Chamoson	0.364	0.587	0.373	0.595	0.364	0.581	0.398	0.689	0.433	1.048	0.366	0.575	0.362	0.549	0.362	0.556	0.372	0.495	0.365	0.571	0.465	0.556
220 kV Gstaad	0.453	1.477	0.451	1.478	0.453	1.473	0.444	1.542	0.435	1.750	0.442	1.430	0.378	1.243	0.387	1.283	0.417	1.097	0.405	1.386	0.061	1.412
220 kV Romanel	0.126	0.146	0.124	0.137	0.124	0.112	0.112	0.258	0.124	0.978	0.125	0.152	0.131	0.164	0.131	0.161	0.122	0.191	0.125	0.153	0.132	0.194
380 kV Romanel	1.085	0.578	1.102	0.576	1.084	0.576	1.157	0.612	1.226	0.728	1.084	0.555	1.083	0.511	1.083	0.522	1.081	0.414	1.084	0.548	1.048	0.588
220 kV Mühleberg	0.432	0.959	0.431	0.958	0.431	0.957	0.431	0.984	0.428	1.058	0.429	0.943	0.285	0.664	0.301	0.714	0.418	0.766	0.423	0.826	0.331	0.917
380 kV Mühleberg	0.190	0.547	0.190	0.547	0.190	0.545	0.191	0.580	0.188	0.675	0.189	0.537	0.123	0.413	0.131	0.436	0.185	0.439	0.187	0.486	0.155	0.520
220 kV Riddes	0.418	1.035	0.416	1.036	0.418	1.032	0.408	1.086	0.399	1.252	0.403	0.992	0.397	0.949	0.400	0.964	0.382	0.780	0.409	1.000	0.081	1.009
380 kV Bâtiâz	0.653	0.317	0.666	0.329	0.653	0.310	0.706	0.421	0.757	0.832	0.655	0.316	0.650	0.312	0.651	0.313	0.658	0.306	0.654	0.315	0.730	0.302
380 kV Nant de Drance	0.663	0.333	0.676	0.346	0.663	0.326	0.716	0.444	0.769	0.874	0.664	0.332	0.660	0.328	0.660	0.329	0.668	0.322	0.664	0.332	0.741	0.317
380 kV Châtelard	0.662	0.332	0.675	0.344	0.662	0.325	0.716	0.442	0.768	0.871	0.664	0.330	0.659	0.326	0.660	0.327	0.667	0.320	0.663	0.330	0.740	0.315
220 kV Châtelard	0.521	0.273	0.531	0.283	0.522	0.268	0.564	0.363	0.606	0.714	0.523	0.272	0.519	0.269	0.520	0.270	0.526	0.264	0.522	0.272	0.582	0.261
220 kV Veytaux	0.771	0.851	0.783	0.852	0.780	0.864	0.773	0.820	0.773	0.643	0.772	0.849	0.772	0.844	0.771	0.846	0.774	0.834	0.772	0.849	0.827	0.843

Tableau 4-19: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV St. Triphon – SCL bas (scénario 3)

4.4.4.1.10 Injection d'harmoniques à 220 kV Wimmis

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Wimmis :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Bickigen – Mühleberg
3	N-1 sur 220 kV Bickigen – Oftringen
4	N-1 sur 220 kV Bickigen – Flumenthal
5	N-1 sur 220 kV Bickigen – Mettlen
6	N-1 sur 220 kV Bickigen – Innertkirchen
7	N-2 sur 220 kV Airolo – Lavorgo et Airolo – Rotondo
8	N-2 sur 220 kV Ernen – Seehalten et Rotondo – Seehalten

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Wimmis dans des conditions de faible SCL sont présentés dans le Tableau 4-20.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Airolo	0.197	0.152	0.203	0.183	0.201	0.154	0.141	0.163	0.200	0.156	0.200	0.176	0.805	0.052	0.060	0.210
220 kV Bickigen	0.171	0.040	0.185	0.061	0.180	0.041	0.189	0.056	0.184	0.045	0.187	0.064	0.126	0.095	0.128	0.117
380 kV Bickigen	0.090	0.085	0.092	0.015	0.092	0.085	0.077	0.131	0.095	0.084	0.100	0.086	0.064	0.094	0.077	0.088
220 kV Chamoson	0.070	0.230	0.058	0.114	0.071	0.231	0.077	0.220	0.073	0.232	0.073	0.238	0.068	0.254	0.070	0.321
380 kV Chamoson	0.046	0.093	0.049	0.025	0.049	0.093	0.065	0.094	0.050	0.093	0.046	0.094	0.050	0.107	0.069	0.120
220 kV Chippis	0.180	0.100	0.176	0.117	0.180	0.100	0.205	0.058	0.182	0.099	0.180	0.089	0.193	0.101	0.225	0.119
380 kV Chippis	0.056	0.095	0.058	0.021	0.059	0.095	0.077	0.098	0.060	0.094	0.057	0.094	0.059	0.110	0.081	0.112
220 kV Giswil	0.142	0.213	0.151	0.243	0.145	0.213	0.125	0.261	0.138	0.221	0.130	0.259	0.136	0.164	0.383	0.119
220 kV Grimsel	0.127	0.240	0.134	0.270	0.131	0.241	0.127	0.298	0.126	0.247	0.120	0.293	0.112	0.218	0.444	0.176
220 kV Gstaad	0.084	0.346	0.058	0.214	0.085	0.347	0.084	0.336	0.089	0.348	0.091	0.358	0.072	0.376	0.067	0.483
220 kV Handeck	0.133	0.245	0.140	0.276	0.137	0.246	0.131	0.304	0.131	0.252	0.124	0.299	0.117	0.218	0.441	0.173
220 kV Innertkirchen	0.141	0.242	0.149	0.273	0.144	0.243	0.138	0.302	0.138	0.250	0.128	0.297	0.123	0.206	0.427	0.160
220 kV Lavorgo	0.222	0.019	0.230	0.021	0.227	0.020	0.152	0.019	0.224	0.018	0.223	0.016	0.117	0.070	0.061	0.038
380 kV Lavorgo	0.264	0.157	0.274	0.179	0.271	0.158	0.193	0.191	0.266	0.163	0.256	0.190	0.149	0.144	0.033	0.193
220 kV Littau	0.123	0.095	0.131	0.114	0.123	0.095	0.088	0.109	0.117	0.102	0.117	0.113	0.145	0.047	0.250	0.026
220 kV Magadino	0.234	0.062	0.242	0.079	0.237	0.064	0.149	0.052	0.234	0.060	0.240	0.063	0.101	0.089	0.091	0.122
220 kV Mettlen	0.117	0.042	0.124	0.055	0.115	0.042	0.077	0.040	0.110	0.047	0.114	0.047	0.153	0.027	0.198	0.043
380 kV Mettlen	0.126	0.057	0.131	0.039	0.128	0.056	0.118	0.021	0.126	0.058	0.116	0.067	0.125	0.075	0.123	0.172
220 kV Mörel	0.079	0.042	0.078	0.011	0.081	0.043	0.114	0.063	0.081	0.043	0.070	0.050	0.089	0.038	0.145	0.071
380 kV Mörel	0.083	0.053	0.086	0.059	0.087	0.053	0.082	0.014	0.085	0.053	0.076	0.051	0.048	0.066	0.068	0.013
220 kV Plattischaen	0.115	0.044	0.122	0.058	0.113	0.043	0.075	0.042	0.108	0.049	0.112	0.049	0.150	0.027	0.192	0.045
220 kV Rotondo	0.183	0.193	0.190	0.230	0.188	0.196	0.132	0.214	0.186	0.198	0.189	0.227	0.103	0.267	0.074	0.260
220 kV Seehalten	0.123	0.234	0.129	0.264	0.127	0.235	0.123	0.290	0.122	0.241	0.118	0.285	0.109	0.217	0.446	0.177
220 kV Stalden	0.131	0.065	0.128	0.069	0.133	0.064	0.163	0.033	0.134	0.063	0.129	0.053	0.146	0.065	0.191	0.101

Tableau 4-20: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Wimmis – SCL bas (scénario 3)

4.4.4.1.11 Injection d'harmoniques à 380 kV Musignano

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Musignano :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Magadino
3	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Mettlen
4	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Mörel
5	N-2 sur 380 kV Lavorgo – Mörel et Lavorgo – Mettlen

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Musignano dans des conditions de faible SCL sont présentés dans le Tableau 4-21.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Lavorgo	0.786	2.043	0.227	0.378	0.795	0.815	1.079	2.127	0.997	0.977
220 kV Lavorgo	0.641	1.373	0.312	0.051	0.692	0.576	0.806	1.392	0.818	0.644
380 kV Magadino	1.018	1.078	1.067	1.189	1.034	1.131	1.081	0.939	1.081	1.165
220 kV Magadino	0.729	1.074	0.605	0.517	0.797	0.729	0.822	1.001	0.874	0.759
220 kV Manno	0.712	1.094	0.590	0.527	0.778	0.743	0.802	1.019	0.854	0.773
220 kV Avegno	0.708	1.559	0.557	0.474	0.797	0.819	0.796	1.551	0.875	0.860
220 kV Bavona	0.625	2.008	0.451	0.385	0.736	0.876	0.699	2.062	0.812	0.936
220 kV Verbanò	0.701	1.546	0.552	0.471	0.790	0.812	0.789	1.539	0.867	0.853
220 kV Robiei	0.583	1.872	0.408	0.325	0.689	0.791	0.649	1.935	0.760	0.849
220 kV Cavigno	0.681	2.063	0.503	0.439	0.790	0.937	0.762	2.107	0.869	0.995
220 kV Rotondo	0.516	1.650	0.338	0.234	0.614	0.653	0.570	1.726	0.674	0.710
220 kV Peccia	0.655	2.055	0.478	0.414	0.766	0.915	0.733	2.105	0.844	0.975
220 kV Airolo	0.525	1.580	0.309	0.173	0.611	0.612	0.609	1.646	0.693	0.668
220 kV Seehalten	0.352	1.264	0.133	0.325	0.369	0.624	0.321	1.343	0.345	0.720
380 kV Soazza	0.510	0.785	0.411	0.109	0.498	0.346	0.625	0.740	0.593	0.330
220 kV Soazza	0.596	0.257	0.447	0.129	0.622	0.195	0.708	0.244	0.707	0.224
220 kV Gnosca	0.650	0.754	0.476	0.245	0.695	0.461	0.763	0.721	0.783	0.497
220 kV Biasca	0.629	0.984	0.395	0.130	0.676	0.496	0.760	0.970	0.776	0.544

Tableau 4-21: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Musignano – faible SCL (scénario 3)

4.4.4.1.12 Injection d'harmoniques à 380 kV Mettlen

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Mettlen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Mörel
3	N-1 sur 380 kV Lavorgo – Magadino
4	N-1 sur 380 kV Gösgen – Laufenburg
5	N-1 sur 380 kV Gösgen – Lachmatt
6	N-1 sur 380 kV Benken – Sils
7	N-2 sur 380 kV Lavorgo – Mörel et Lavorgo – Magadino

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Mettlen dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-22 et Tableau 4-23 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Mettlen	0.745	0.459	0.885	0.350	0.924	0.653	0.741	0.427	0.718	0.433	1.297	0.441	0.931	0.333
380 kV Lavorgo	1.729	0.852	1.909	0.697	1.223	3.736	1.688	0.530	1.672	0.670	1.589	0.972	1.678	1.532
220 kV Lavorgo	1.823	0.275	1.822	0.144	1.526	1.484	1.777	0.280	1.765	0.277	1.701	0.271	1.815	0.439
380 kV Mörel	1.214	0.163	0.722	0.232	1.039	1.227	1.200	0.113	1.185	0.128	1.228	0.195	0.825	0.232
220 kV Mörel	1.162	0.374	0.911	0.399	1.136	0.340	1.145	0.264	1.134	0.299	1.268	0.399	1.064	0.399
220 kV Gösgen	0.697	0.399	0.903	0.492	0.888	0.436	0.693	0.234	0.667	0.227	1.128	0.428	0.889	0.503
380 kV Breite	0.136	0.542	0.208	0.364	0.150	1.035	0.065	0.645	0.099	0.538	0.156	0.515	0.139	0.341
380 kV Sils	0.663	0.125	0.960	0.097	0.846	0.272	0.726	0.138	0.658	0.118	2.124	0.185	0.941	0.098
380 kV Bonaduz	0.649	0.107	0.941	0.080	0.832	0.243	0.712	0.120	0.645	0.103	2.076	0.172	0.922	0.082
380 kV Maprugg	0.525	0.034	0.762	0.057	0.677	0.044	0.591	0.026	0.527	0.028	1.769	0.058	0.755	0.065
380 kV Benken	0.519	0.577	0.532	0.556	0.524	0.616	0.521	0.632	0.522	0.595	0.861	0.699	0.514	0.553
380 kV Tavanasa	0.536	0.050	0.752	0.067	0.685	0.059	0.582	0.044	0.532	0.045	1.572	0.047	0.746	0.074
380 kV Pradella	0.427	0.143	0.623	0.113	0.547	0.311	0.468	0.158	0.424	0.135	1.380	0.212	0.610	0.113
380 kV Filisur	0.630	0.127	0.914	0.099	0.804	0.276	0.690	0.140	0.625	0.120	2.021	0.188	0.895	0.100
220 kV Tinzen	0.541	0.313	0.746	0.355	0.671	0.436	0.588	0.200	0.536	0.238	1.649	0.323	0.752	0.364
220 kV Obfelden	0.652	0.163	0.842	0.144	0.839	0.290	0.650	0.134	0.627	0.127	1.315	0.178	0.846	0.143
220 kV Waldegg	0.709	0.198	0.909	0.138	0.907	0.379	0.707	0.195	0.682	0.167	1.420	0.190	0.916	0.132
220 kV Giswil	1.640	1.155	1.534	1.000	1.767	1.463	1.605	0.660	1.590	0.891	2.033	1.244	1.789	1.000
220 kV Innertkirchen	1.913	1.206	1.741	1.070	2.008	1.491	1.876	0.612	1.859	0.893	2.241	1.324	2.045	1.079
220 kV Handeck	1.944	1.182	1.738	1.069	2.013	1.422	1.904	0.579	1.889	0.864	2.213	1.303	2.054	1.080

220 kV Grimsel	1.934	1.138	1.715	1.039	1.989	1.350	1.894	0.547	1.879	0.826	2.168	1.257	2.033	1.051
220 kV Seehalten	1.926	1.092	1.697	1.005	1.967	1.280	1.885	0.516	1.871	0.788	2.131	1.209	2.015	1.018
220 kV Rotondo	2.167	0.476	1.981	0.576	2.114	0.364	2.114	0.055	2.102	0.245	2.152	0.576	2.295	0.605
220 kV Ernen	1.376	0.572	1.130	0.571	1.368	0.542	1.352	0.326	1.340	0.430	1.509	0.623	1.331	0.574
220 kV Wimmis	1.453	0.592	1.402	0.330	1.625	1.447	1.443	0.493	1.425	0.531	1.871	0.622	1.550	0.319
220 kV Ingenbohl	0.744	0.476	0.884	0.364	0.922	0.676	0.740	0.442	0.717	0.449	1.293	0.457	0.933	0.345
220 kV Plattischachen	0.739	0.474	0.876	0.363	0.912	0.674	0.735	0.441	0.713	0.448	1.277	0.455	0.929	0.344

Tableau 4-22: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Mettlen – faible SCL (scénario 3)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Mettlen	0.485	0.615	0.478	0.712	0.521	0.472	0.521	0.489	0.491	0.549	0.705	0.720	0.562	0.308
380 kV Lavorgo	0.819	1.780	1.253	1.870	1.416	3.229	0.833	1.489	0.822	1.626	0.824	1.946	4.053	1.708
220 kV Lavorgo	0.557	0.371	0.819	0.332	0.804	0.833	0.573	0.336	0.561	0.365	0.548	0.397	2.227	0.402
380 kV Mörel	0.444	0.566	0.191	0.361	0.694	1.473	0.448	0.468	0.442	0.516	0.477	0.649	0.259	0.247
220 kV Mörel	0.325	0.463	0.257	0.775	0.426	0.544	0.333	0.435	0.323	0.429	0.382	0.473	0.380	0.319
220 kV Gösgen	0.459	0.072	0.442	0.423	0.486	0.424	0.516	0.190	0.466	0.122	0.576	0.099	0.480	0.283
380 kV Breite	0.222	1.124	0.234	1.320	0.234	0.900	0.263	0.911	0.238	1.004	0.238	1.215	0.300	0.585
380 kV Sils	0.775	0.463	0.767	0.398	0.811	0.291	0.775	0.372	0.765	0.414	1.231	0.476	0.838	0.201
380 kV Bonaduz	0.785	0.426	0.778	0.358	0.821	0.265	0.786	0.343	0.775	0.381	1.228	0.436	0.852	0.188
380 kV Mapragg	0.683	0.185	0.680	0.110	0.715	0.161	0.692	0.155	0.678	0.167	1.054	0.160	0.754	0.166
380 kV Benken	0.374	0.514	0.371	0.531	0.363	0.422	0.383	0.531	0.381	0.521	0.819	0.751	0.333	0.494

380 kV Tavanasa	0.748	0.189	0.748	0.125	0.781	0.165	0.747	0.159	0.738	0.172	1.046	0.167	0.836	0.156
380 kV Pradella	0.334	0.269	0.331	0.231	0.350	0.169	0.335	0.216	0.330	0.240	0.533	0.277	0.362	0.117
380 kV Filisur	0.713	0.449	0.706	0.386	0.746	0.282	0.713	0.361	0.704	0.401	1.134	0.462	0.772	0.195
220 kV Tinzen	0.612	0.492	0.614	0.442	0.639	0.502	0.602	0.413	0.600	0.446	0.849	0.485	0.685	0.391
220 kV Obfelden	0.332	0.414	0.318	0.440	0.357	0.347	0.349	0.348	0.331	0.374	0.550	0.525	0.355	0.269
220 kV Waldegg	0.360	0.497	0.345	0.538	0.388	0.351	0.383	0.408	0.361	0.442	0.608	0.622	0.385	0.270
220 kV Giswil	0.575	1.768	0.539	2.044	0.643	1.524	0.604	1.452	0.576	1.589	0.754	1.962	0.843	0.872
220 kV Innertkirchen	0.586	1.948	0.615	2.249	0.663	1.702	0.612	1.614	0.586	1.756	0.742	2.142	0.921	0.959
220 kV Handeck	0.573	1.883	0.608	2.212	0.653	1.664	0.598	1.563	0.573	1.697	0.714	2.070	0.936	0.963
220 kV Grimsel	0.561	1.802	0.598	2.134	0.641	1.604	0.584	1.498	0.561	1.624	0.692	1.980	0.935	0.942
220 kV Seehalten	0.555	1.732	0.595	2.076	0.636	1.553	0.578	1.442	0.555	1.562	0.679	1.902	0.943	0.923
220 kV Rotondo	0.544	0.963	0.683	1.367	0.618	1.135	0.564	0.818	0.546	0.874	0.600	1.056	1.272	0.805
220 kV Ernen	0.387	0.811	0.350	1.140	0.480	0.682	0.399	0.707	0.386	0.739	0.462	0.867	0.535	0.471
220 kV Wimmis	0.496	1.629	0.442	1.218	0.581	1.433	0.508	1.437	0.488	1.484	0.633	1.645	0.559	0.761
220 kV Ingenbohl	0.458	0.605	0.451	0.700	0.493	0.466	0.492	0.481	0.464	0.540	0.667	0.707	0.536	0.302
220 kV Plattischnen	0.434	0.584	0.428	0.675	0.469	0.449	0.466	0.464	0.440	0.520	0.632	0.681	0.518	0.291
220 kV Airolo	0.588	0.679	0.761	1.052	0.717	0.678	0.611	0.579	0.591	0.618	0.647	0.753	1.604	0.568

Tableau 4-23: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Mettlen – SCL optimal (scénario 3)

4.4.4.2 Scénario 2

4.4.4.2.1 Injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Regensdorf – Seebach
3	N-1 sur 220 kV Auwiesen – Seebach
4	N-1 sur 220 kV Benken – Siebnen
5	N-1 sur 220 kV Benken – Sils
6	N-1 sur 220 kV Grynav – Mettlen
7	N-2 sur 220 kV Benken – Sils et Benken – Siebnen
8	N-2 sur 220 kV Grynav – Tierfehnd
9	N-2 sur 220 kV Grynav – Winkeln
10	N-2 sur 220 kV Niederwil – Regensdorf

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-24 et Tableau 4-25 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8		Cas 9		Cas 10	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0.929	0.837	0.931	0.855	0.931	0.856	0.906	0.815	0.930	0.840	0.917	0.834	0.904	0.819	0.928	0.840	0.930	0.838	0.984	0.989
220 kV Seebach	0.919	0.805	0.931	0.855	0.861	0.596	0.893	0.778	0.919	0.809	0.904	0.802	0.890	0.783	0.918	0.808	0.920	0.806	0.982	0.988
220 kV Regensdorf	0.887	0.682	0.857	0.590	0.860	0.593	0.852	0.638	0.887	0.689	0.864	0.677	0.846	0.646	0.884	0.688	0.889	0.684	0.974	0.980
220 kV Aathal	0.729	0.497	0.714	0.497	0.715	0.497	0.682	0.524	0.719	0.471	0.642	0.569	0.667	0.491	0.718	0.454	0.753	0.495	0.597	0.506
220 kV Grynau	0.777	0.553	0.761	0.554	0.761	0.553	0.727	0.582	0.765	0.522	0.662	0.645	0.710	0.543	0.764	0.502	0.824	0.559	0.635	0.564
220 kV Benken	0.927	0.628	0.909	0.622	0.910	0.622	0.842	0.767	0.935	0.632	0.892	0.631	0.863	0.767	0.919	0.613	0.930	0.630	0.771	0.579
380 kV Benken	0.935	0.412	0.915	0.407	0.916	0.407	0.841	0.459	0.916	0.375	0.889	0.442	0.815	0.407	0.920	0.383	0.939	0.406	0.744	0.386
220 kV Benken	0.927	0.628	0.909	0.622	0.910	0.622	0.842	0.767	0.935	0.632	0.892	0.631	0.863	0.767	0.919	0.613	0.930	0.630	0.771	0.579
380 kV Benken	0.935	0.412	0.915	0.407	0.916	0.407	0.841	0.459	0.916	0.375	0.889	0.442	0.815	0.407	0.920	0.383	0.939	0.406	0.744	0.386
220 kV Siebnen	0.962	0.568	0.943	0.555	0.944	0.556	1.192	0.207	0.965	0.572	0.926	0.560	1.161	0.216	0.954	0.557	0.967	0.570	0.783	0.477
220 kV Samstagern	1.086	0.430	1.065	0.406	1.066	0.407	1.206	0.209	1.077	0.436	1.052	0.397	1.175	0.218	1.073	0.429	1.093	0.435	0.884	0.252
220 kV Altgass	1.095	0.244	1.074	0.229	1.075	0.230	1.163	0.159	1.081	0.246	1.073	0.201	1.132	0.155	1.079	0.242	1.104	0.249	0.894	0.139
220 kV Thalwil	1.150	0.467	1.130	0.433	1.132	0.434	1.229	0.248	1.141	0.475	1.115	0.428	1.199	0.263	1.137	0.469	1.158	0.472	0.953	0.227
220 kV Waldegg	1.161	0.468	1.141	0.432	1.143	0.433	1.222	0.258	1.151	0.478	1.126	0.427	1.192	0.274	1.147	0.471	1.169	0.474	0.966	0.217
220 kV Obfelden	1.079	0.390	1.063	0.354	1.064	0.356	1.101	0.237	1.070	0.400	1.047	0.353	1.075	0.252	1.067	0.395	1.087	0.396	0.913	0.169
220 kV Niederwil	0.863	0.454	0.847	0.397	0.849	0.399	0.830	0.378	0.859	0.463	0.830	0.443	0.817	0.391	0.856	0.461	0.866	0.457	0.748	0.148
220 kV Mettlen	1.148	0.155	1.127	0.151	1.128	0.151	1.141	0.173	1.130	0.140	1.145	0.155	1.109	0.156	1.129	0.129	1.159	0.154	0.940	0.135
380 kV Mettlen	0.940	0.252	0.921	0.241	0.922	0.241	0.895	0.230	0.923	0.242	0.910	0.247	0.869	0.217	0.924	0.241	0.946	0.249	0.758	0.172
220 kV Breite	0.695	0.437	0.681	0.437	0.681	0.437	0.650	0.462	0.686	0.416	0.638	0.486	0.636	0.435	0.685	0.404	0.690	0.426	0.570	0.443
380 kV Breite	0.738	0.411	0.722	0.405	0.722	0.405	0.686	0.437	0.722	0.386	0.679	0.458	0.665	0.398	0.723	0.394	0.739	0.400	0.586	0.386

Tableau 4-24: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden – faible SCL (scénario 2)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8		Cas 9		Cas 10	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0.866	0.883	0.881	0.893	0.881	0.894	0.857	0.868	0.867	0.884	0.864	0.880	0.857	0.869	0.866	0.883	0.867	0.883	0.965	0.969
220 kV Seebach	0.841	0.862	0.881	0.893	0.681	0.724	0.831	0.845	0.843	0.864	0.839	0.859	0.830	0.845	0.842	0.862	0.842	0.863	0.960	0.965
220 kV Regensdorf	0.747	0.781	0.678	0.717	0.680	0.721	0.729	0.753	0.749	0.784	0.743	0.776	0.728	0.754	0.747	0.781	0.748	0.782	0.943	0.949
220 kV Aathal	0.411	0.489	0.408	0.484	0.408	0.484	0.406	0.484	0.408	0.480	0.408	0.495	0.402	0.473	0.431	0.489	0.443	0.517	0.384	0.452
220 kV Grynau	0.436	0.520	0.432	0.515	0.432	0.515	0.430	0.514	0.432	0.510	0.433	0.529	0.425	0.502	0.469	0.526	0.495	0.574	0.409	0.484
220 kV Benken	0.683	0.723	0.675	0.713	0.675	0.714	0.749	0.783	0.720	0.747	0.677	0.716	0.804	0.817	0.681	0.718	0.685	0.724	0.626	0.649
380 kV Benken	0.377	0.442	0.370	0.434	0.370	0.434	0.390	0.447	0.378	0.430	0.369	0.436	0.394	0.435	0.371	0.428	0.380	0.444	0.328	0.380
220 kV Benken	0.683	0.723	0.675	0.713	0.675	0.714	0.749	0.783	0.720	0.747	0.677	0.716	0.804	0.817	0.681	0.718	0.685	0.724	0.626	0.649
380 kV Benken	0.377	0.442	0.370	0.434	0.370	0.434	0.390	0.447	0.378	0.430	0.369	0.436	0.394	0.435	0.371	0.428	0.380	0.444	0.328	0.380
220 kV Siebnen	0.644	0.691	0.633	0.678	0.633	0.679	0.425	0.512	0.675	0.713	0.636	0.680	0.423	0.514	0.643	0.688	0.647	0.694	0.563	0.585
220 kV Samstagern	0.567	0.637	0.548	0.614	0.548	0.616	0.436	0.524	0.585	0.651	0.554	0.614	0.434	0.526	0.567	0.635	0.573	0.641	0.427	0.457
220 kV Altgass	0.446	0.439	0.430	0.423	0.431	0.424	0.361	0.377	0.457	0.448	0.430	0.413	0.359	0.379	0.447	0.438	0.452	0.443	0.332	0.313
220 kV Thalwil	0.591	0.716	0.566	0.686	0.567	0.688	0.481	0.606	0.606	0.730	0.577	0.690	0.479	0.609	0.592	0.715	0.597	0.721	0.407	0.477
220 kV Waldegg	0.593	0.730	0.565	0.698	0.565	0.700	0.495	0.624	0.605	0.743	0.578	0.703	0.493	0.626	0.593	0.729	0.599	0.735	0.389	0.475
220 kV Obfelden	0.544	0.628	0.514	0.598	0.515	0.599	0.474	0.549	0.552	0.638	0.531	0.604	0.473	0.552	0.545	0.627	0.549	0.633	0.327	0.387
220 kV Niederwil	0.582	0.644	0.536	0.601	0.537	0.603	0.551	0.599	0.585	0.648	0.575	0.633	0.549	0.600	0.582	0.643	0.584	0.646	0.251	0.320
220 kV Mettlen	0.326	0.256	0.314	0.247	0.314	0.248	0.291	0.237	0.329	0.258	0.307	0.230	0.289	0.236	0.328	0.254	0.334	0.261	0.238	0.185
380 kV Mettlen	0.248	0.280	0.241	0.272	0.241	0.272	0.238	0.264	0.249	0.276	0.239	0.266	0.236	0.258	0.247	0.273	0.253	0.282	0.197	0.216
220 kV Breite	0.415	0.483	0.411	0.477	0.411	0.477	0.411	0.478	0.411	0.474	0.412	0.486	0.406	0.468	0.419	0.476	0.416	0.481	0.385	0.442
380 kV Breite	0.262	0.388	0.258	0.381	0.258	0.382	0.259	0.382	0.254	0.370	0.259	0.386	0.250	0.362	0.251	0.365	0.266	0.390	0.232	0.337

Tableau 4-25: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden – SCL optimal (scénario 2)

4.4.4.2.2 Injection d'harmoniques à 220 kV Verbois

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Romanel – Veytaux
3	N-1 sur 220 kV Romanel – Vaux
4	N-1 sur 220 kV Vaux – Verbois
5	N-2 sur 220 kV Romanel – Vaux et Vaux – Verbois

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-26 et Tableau 4-27 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.606	0.767	0.616	0.774	0.593	0.751	0.589	0.741	0.593	0.748
220 kV Foretaille	0.960	1.013	0.967	1.019	0.951	1.006	0.949	1.003	0.951	1.006
220 kV Crans	0.839	0.934	0.859	0.952	0.812	0.914	0.806	0.904	0.812	0.913
220 kV Banlieue Ouest	0.608	0.779	0.657	0.821	0.541	0.731	0.525	0.706	0.540	0.728
220 kV Romanel	0.576	0.758	0.630	0.805	0.502	0.705	0.484	0.678	0.501	0.703
380 kV Romanel	0.484	0.801	0.505	0.816	0.449	0.764	0.439	0.741	0.447	0.757
220 kV Vaux	0.642	0.794	0.685	0.832	0.900	0.932	0.470	0.658	0.000	0.000
220 kV Veytaux	0.319	0.497	0.164	0.315	0.279	0.464	0.269	0.447	0.278	0.462
220 kV St Triphon	0.239	0.419	0.177	0.337	0.209	0.392	0.202	0.377	0.208	0.390
220 kV Riddes	0.138	0.325	0.114	0.285	0.123	0.306	0.119	0.296	0.122	0.304
380 kV Bâtiaz	0.232	0.682	0.234	0.674	0.214	0.648	0.209	0.629	0.213	0.643
380 kV Nant de Drance	0.235	0.722	0.238	0.713	0.217	0.687	0.212	0.666	0.216	0.681
380 kV Châtelard	0.235	0.717	0.237	0.709	0.217	0.682	0.212	0.661	0.216	0.677
220 kV Châtelard	0.186	0.590	0.187	0.583	0.171	0.561	0.167	0.544	0.170	0.556
220 kV Vallorcine	0.184	0.584	0.185	0.577	0.169	0.555	0.165	0.538	0.168	0.551

Tableau 4-26: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois – SCL bas (Scénario 2)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.481	0.525	0.488	0.533	0.473	0.515	0.469	0.509	0.473	0.514
220 kV Foretaille	0.934	0.971	0.940	0.977	0.926	0.963	0.923	0.959	0.926	0.963
220 kV Crans	0.775	0.824	0.792	0.842	0.752	0.801	0.743	0.790	0.751	0.800
220 kV Banlieue Ouest	0.512	0.574	0.554	0.619	0.452	0.517	0.430	0.490	0.451	0.515
220 kV Romanel	0.479	0.543	0.527	0.594	0.412	0.479	0.387	0.448	0.411	0.477
380 kV Romanel	0.377	0.471	0.394	0.491	0.348	0.438	0.334	0.418	0.345	0.432
220 kV Vaux	0.547	0.604	0.584	0.643	0.782	0.806	0.361	0.420	0.000	0.000
220 kV Veytaux	0.240	0.285	0.112	0.139	0.207	0.251	0.194	0.236	0.206	0.250
220 kV St Triphon	0.176	0.215	0.129	0.159	0.152	0.190	0.143	0.178	0.151	0.189
220 kV Riddes	0.087	0.116	0.070	0.095	0.076	0.104	0.072	0.098	0.076	0.103
380 kV Bâtiaz	0.157	0.256	0.160	0.260	0.144	0.237	0.138	0.225	0.143	0.233
380 kV Nant de Drance	0.156	0.265	0.159	0.269	0.143	0.245	0.137	0.233	0.142	0.242
380 kV Châtelard	0.157	0.264	0.160	0.269	0.144	0.244	0.138	0.233	0.142	0.241
220 kV Châtelard	0.104	0.181	0.106	0.184	0.096	0.167	0.092	0.159	0.095	0.165
220 kV Vallorcine	0.102	0.177	0.104	0.180	0.094	0.164	0.090	0.156	0.093	0.162

Tableau 4-27: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois – SCL optimal (scénario 2)

4.4.4.2.3 Injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Romanel
3	N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Chamoson
4	N-2 sur 380 kV Chamoson – Chippis

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-28 et Tableau 4-29 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.971	1.000	0.975	0.998	0.980	0.956	0.974	1.007
220 kV Foretaille	0.689	1.028	0.732	0.995	0.787	0.546	0.718	1.114

220 kV Crans	0.632	0.968	0.681	0.930	0.743	0.452	0.665	1.064
220 kV Banlieue Ouest	0.532	0.853	0.595	0.803	0.678	0.287	0.575	0.970
220 kV Romanel	0.521	0.839	0.587	0.787	0.674	0.270	0.566	0.961
380 kV Romanel	0.682	0.983	0.863	0.971	1.078	0.545	0.763	1.203
220 kV Vaux	0.553	0.864	0.607	0.816	0.678	0.330	0.591	0.970
220 kV Veytaux	0.296	0.560	0.317	0.467	0.364	0.159	0.335	0.657
220 kV St Triphon	0.227	0.477	0.228	0.361	0.264	0.127	0.264	0.568
220 kV Riddes	0.149	0.381	0.100	0.204	0.116	0.067	0.180	0.482
380 kV Bâtiaz	0.312	0.827	0.050	0.199	1.361	2.598	0.503	1.379
380 kV Nant de Drance	0.317	0.875	0.051	0.211	1.382	2.756	0.511	1.460
380 kV Châtelard	0.317	0.869	0.051	0.210	1.380	2.736	0.510	1.450
220 kV Châtelard	0.250	0.715	0.040	0.172	1.089	2.248	0.402	1.193
220 kV Vallorcine	0.247	0.708	0.040	0.171	1.077	2.227	0.398	1.182

Tableau 4-28: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot – SCL bas (scénario 2)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.957	0.970	0.960	0.972	0.960	0.980	0.958	0.971
220 kV Foretaille	0.534	0.675	0.563	0.701	0.560	0.820	0.537	0.687
220 kV Crans	0.476	0.608	0.510	0.636	0.507	0.780	0.479	0.621
220 kV Banlieue Ouest	0.398	0.511	0.448	0.547	0.443	0.755	0.404	0.528
220 kV Romanel	0.396	0.505	0.449	0.544	0.443	0.767	0.401	0.524
380 kV Romanel	0.631	0.738	0.807	0.871	0.791	1.512	0.648	0.783
220 kV Vaux	0.414	0.525	0.455	0.555	0.450	0.735	0.418	0.540
220 kV Veytaux	0.204	0.272	0.218	0.274	0.215	0.388	0.206	0.285
220 kV St Triphon	0.154	0.212	0.154	0.198	0.152	0.278	0.155	0.222
220 kV Riddes	0.091	0.132	0.060	0.081	0.060	0.113	0.091	0.143
380 kV Bâtiaz	0.250	0.387	0.019	0.033	0.693	2.634	0.297	0.503
380 kV Nant de Drance	0.249	0.401	0.019	0.034	0.688	2.726	0.295	0.521
380 kV Châtelard	0.249	0.399	0.019	0.034	0.690	2.718	0.296	0.519
220 kV Châtelard	0.166	0.274	0.013	0.023	0.459	1.866	0.197	0.356
220 kV Vallorcine	0.162	0.268	0.013	0.023	0.449	1.831	0.193	0.349

Tableau 4-29: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot – SCL optimal (scénario 2)

4.4.4.2.4 Injection d'harmoniques à 380 kV Romanel

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Romanel :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Chamoson
3	N-1 sur 380 kV Bois Tollot – Romanel
4	N-2 sur 380 kV Chamoson – Chipps

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Romanel dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-30 et Tableau 4-31 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.684	0.810	0.681	0.793	0.227	0.383	0.688	0.813
220 kV Foretaille	0.616	0.911	0.607	0.865	0.364	0.609	0.625	0.917
220 kV Crans	0.597	0.870	0.587	0.821	0.388	0.614	0.607	0.876
220 kV Banlieue Ouest	0.580	0.793	0.567	0.739	0.456	0.635	0.592	0.800
220 kV Romanel	0.583	0.786	0.569	0.731	0.472	0.643	0.596	0.793
380 kV Chippis	0.268	0.534	0.048	0.077	0.262	0.520	0.082	0.122
220 kV Vaux	0.565	0.792	0.553	0.739	0.440	0.627	0.577	0.799
220 kV Veytaux	0.339	0.531	0.308	0.427	0.280	0.449	0.360	0.544
220 kV St Triphon	0.267	0.456	0.223	0.322	0.225	0.393	0.289	0.470
220 kV Riddes	0.192	0.371	0.098	0.167	0.174	0.339	0.211	0.398
380 kV Bâtiaz	0.452	0.831	1.262	4.542	0.448	0.817	0.653	1.139
380 kV Nant de Drance	0.459	0.880	1.282	4.809	0.455	0.865	0.664	1.206
380 kV Châtélard	0.458	0.874	1.280	4.777	0.455	0.860	0.663	1.197
220 kV Châtélard	0.362	0.719	1.011	3.931	0.359	0.707	0.523	0.985
220 kV Vallorcine	0.358	0.712	0.999	3.894	0.355	0.700	0.518	0.976

Tableau 4-30: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Romanel – SCL bas (Scénario 2)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.506	0.554	0.504	0.551	0.104	0.137	0.506	0.554
220 kV Foretaille	0.406	0.522	0.399	0.512	0.225	0.296	0.405	0.523
220 kV Crans	0.400	0.503	0.393	0.492	0.256	0.321	0.399	0.504
220 kV Banlieue Ouest	0.427	0.501	0.417	0.487	0.349	0.399	0.427	0.502

220 kV Romanel	0.444	0.512	0.432	0.497	0.374	0.421	0.443	0.513
380 kV Chippis	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
220 kV Vaux	0.399	0.478	0.389	0.464	0.327	0.379	0.398	0.480
220 kV Veytaux	0.235	0.282	0.210	0.249	0.201	0.237	0.233	0.285
220 kV St Triphon	0.183	0.225	0.149	0.179	0.159	0.192	0.180	0.228
220 kV Riddes	0.121	0.154	0.059	0.072	0.112	0.141	0.118	0.160
380 kV Bâtiaz	0.394	0.519	0.877	1.728	0.392	0.516	0.456	0.637
380 kV Nant de Drance	0.391	0.537	0.871	1.789	0.389	0.534	0.453	0.659
380 kV Châtelard	0.392	0.536	0.874	1.784	0.390	0.533	0.455	0.657
220 kV Châtelard	0.261	0.367	0.582	1.223	0.260	0.365	0.303	0.450
220 kV Vallorcine	0.256	0.360	0.570	1.200	0.254	0.358	0.296	0.442

Tableau 4-31: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Romanel – SCL optimal (scénario 2)

4.4.4.2.5 Injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Ernen – Seehalten
3	N-1 sur 220 kV Airolo – Rotondo
4	N-1 sur 220 kV Airolo – Lavorgo
5	N-1 sur 220 kV Altgass – Samstagern
6	N-1 sur 220 kV Samstagern – Siebnen
7	N-1 sur 220 kV Samstagern – Thalwil
8	N-1 sur 220 kV Mettlen – Sursee
9	N-1 sur 220 kV Gösgen – Laufenburg
10	N-1 sur 220 kV Gösgen – Ormalingen
11	N-1 sur 220 kV Altgass – Mettlen
12	N-2 sur 220 kV Airolo – Rotondo et Airolo – Lavorgo
13	N-2 sur 220 kV Obfelden – Waldegg

Cas	Description
14	N-2 sur 220 kV Birr – Niederwil et Mettlen – Obfelden
15	N-2 sur 220 kV Mettlen – Obfelden et Breite – Fällanden

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-32 et Tableau 4-33 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.811	0.617	0.846	0.527	0.807	0.638	0.877	0.336	0.889	0.297	0.867	0.314	0.884	0.354	0.872	0.244
220 kV Obfelden	1.000	0.988	1.011	0.942	1.001	0.915	1.041	0.661	1.067	0.454	1.072	0.910	1.061	0.702	1.035	0.737
220 kV Waldegg	1.080	1.134	1.091	1.077	1.079	1.049	1.120	0.744	1.159	0.485	1.178	1.148	1.152	0.812	1.115	0.838
220 kV Thalwil	1.071	1.108	1.083	1.050	1.070	1.025	1.110	0.718	1.154	0.471	1.182	1.169	1.172	0.839	1.104	0.813
220 kV Samstagern	1.013	0.970	1.026	0.915	1.012	0.898	1.049	0.611	1.103	0.412	1.144	1.139	1.023	0.571	1.044	0.703
220 kV Altgass	0.997	0.909	1.003	0.897	0.996	0.861	1.015	0.769	0.978	0.982	1.067	1.067	1.002	0.743	1.013	0.825
220 kV Niederwil	0.794	0.804	0.806	0.709	0.793	0.755	0.855	0.351	0.875	0.344	0.851	0.354	0.865	0.381	0.847	0.354
220 kV Regensdorf	0.776	0.841	0.792	0.726	0.774	0.808	0.836	0.338	0.856	0.377	0.814	0.287	0.842	0.368	0.828	0.314
220 kV Seebach	0.768	0.863	0.785	0.739	0.766	0.838	0.827	0.343	0.847	0.403	0.797	0.306	0.831	0.374	0.819	0.299
220 kV Auwiesen	0.765	0.869	0.784	0.742	0.764	0.847	0.825	0.346	0.845	0.411	0.792	0.317	0.828	0.377	0.816	0.296
220 kV Fällanden	0.758	0.910	0.779	0.772	0.756	0.901	0.817	0.374	0.838	0.455	0.774	0.403	0.818	0.407	0.809	0.293
220 kV Aathal	0.660	1.023	0.685	0.865	0.659	1.048	0.720	0.532	0.731	0.565	0.696	0.593	0.721	0.569	0.711	0.373
220 kV Grynau	0.697	1.064	0.723	0.900	0.696	1.087	0.752	0.515	0.764	0.549	0.728	0.524	0.753	0.552	0.745	0.355
220 kV Benken	0.866	0.936	0.894	0.802	0.864	0.920	0.920	0.335	0.952	0.463	0.817	0.569	0.913	0.360	0.913	0.310
220 kV Siebnen	0.906	0.899	0.929	0.787	0.904	0.859	0.954	0.331	0.993	0.412	0.812	0.565	0.941	0.335	0.948	0.384
220 kV Littau	1.169	0.888	1.384	0.915	1.179	0.918	1.238	0.919	1.181	0.940	1.178	0.944	0.181	0.946	1.179	0.907
220 kV Giswil	1.628	0.695	2.407	0.725	1.674	0.806	1.881	0.693	1.675	0.761	1.663	0.774	1.674	0.780	1.666	0.654
220 kV Innertkirchen	1.759	0.569	2.814	0.519	1.826	0.696	2.104	0.391	1.842	0.474	1.809	0.491	1.822	0.504	1.812	0.344
220 kV Handeck	1.767	0.520	2.886	0.444	1.838	0.640	2.132	0.296	1.836	0.381	1.819	0.397	1.834	0.409	1.823	0.249
220 kV Grimsel	1.747	0.485	2.887	0.395	1.820	0.596	2.119	0.235	1.818	0.318	1.801	0.334	1.815	0.346	1.804	1.190
220 kV Seehalten	1.730	0.457	2.885	0.355	1.803	0.559	2.107	0.184	1.801	0.265	1.784	0.280	1.799	0.291	1.788	0.141
220 kV Airolo	1.734	0.703	2.480	0.731	1.541	0.653	2.440	0.232	1.815	0.325	1.793	0.314	1.811	0.291	1.799	0.395
220 kV Sils	0.764	1.766	0.848	1.560	0.762	1.882	0.834	1.143	0.845	1.170	0.803	1.193	0.832	1.167	0.823	0.825

	Cas 9		Cas 10		Cas 11		Cas 12		Cas 13		Cas 14		Cas 15	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.892	0.347	0.891	0.255	0.886	0.297	0.837	0.351	0.895	0.377	0.906	0.208	0.889	0.236
220 kV Obfelden	1.036	0.629	1.047	0.916	1.053	0.500	1.026	0.643	0.903	0.491	1.471	0.741	1.138	0.548
220 kV Waldegg	1.116	0.707	1.126	1.053	1.138	0.478	1.103	0.724	1.554	1.823	1.520	0.712	1.214	0.551
220 kV Thalwil	1.106	0.683	1.116	1.030	1.130	0.463	1.093	0.699	1.490	1.678	1.471	0.621	1.197	0.497
220 kV Samstagern	1.047	0.582	1.055	0.903	1.075	0.403	1.032	0.595	1.307	1.263	1.315	0.403	1.167	0.377
220 kV Altgass	1.014	0.754	1.019	0.932	1.055	0.396	1.007	0.758	1.153	1.060	1.154	0.381	1.049	0.519
220 kV Niederwil	0.846	0.325	0.864	0.519	0.865	0.341	0.835	0.350	0.803	0.351	1.302	0.731	0.930	0.509
220 kV Regensdorf	0.828	0.322	0.845	0.490	0.846	0.375	0.813	0.347	0.815	0.413	1.185	0.695	0.919	0.503
220 kV Seebach	0.820	0.333	0.836	0.474	0.837	0.400	0.803	0.357	0.822	0.448	1.125	0.671	0.915	0.496
220 kV Auwiesen	0.818	0.337	0.833	0.470	0.835	0.408	0.800	0.361	0.824	0.457	1.109	0.664	0.913	0.494
220 kV Fällanden	0.812	0.371	0.826	0.455	0.828	0.453	0.790	0.393	0.837	0.509	1.037	0.636	0.912	0.489
220 kV Aathal	0.714	0.543	0.728	0.470	0.725	0.563	0.691	0.559	0.731	0.651	0.799	0.594	0.713	0.574
220 kV Grynau	0.748	0.522	0.760	0.440	0.758	0.547	0.724	0.541	0.765	0.642	0.839	0.584	0.760	0.546
220 kV Benken	0.919	0.319	0.928	0.544	0.937	0.460	0.890	0.346	1.022	0.619	1.119	0.581	0.988	0.456
220 kV Siebnen	0.952	0.303	0.962	0.632	0.974	0.407	0.928	0.329	1.102	0.747	1.173	0.515	1.022	0.399
220 kV Littau	1.182	0.948	1.182	0.852	1.181	0.940	1.160	0.982	1.182	0.953	1.183	0.927	1.180	0.930
220 kV Giswil	1.677	0.786	1.680	0.478	1.673	0.760	1.609	0.895	1.678	0.806	1.681	0.721	1.673	0.731
220 kV Innertkirchen	1.826	0.508	1.831	0.134	1.822	0.473	1.741	0.641	1.829	0.537	1.833	0.423	1.822	0.435
220 kV Handeck	1.838	0.413	1.843	0.037	1.834	0.379	1.748	0.548	1.841	0.442	1.846	0.334	1.834	0.344
220 kV Grimsel	1.820	0.350	1.824	0.026	1.815	0.317	1.728	0.482	1.822	0.378	1.828	0.277	1.815	0.285
220 kV Seehalten	1.804	0.295	1.808	0.068	1.799	0.264	1.711	0.422	1.806	0.322	1.812	0.229	1.799	0.235
220 kV Airolo	1.816	0.270	1.821	0.567	1.812	0.326	11.32	1.306	1.821	0.278	1.832	0.392	1.813	0.366
220 kV Sils	0.832	1.132	0.842	0.695	0.839	1.167	0.771	1.163	0.855	1.291	0.898	1.163	0.842	1.130

Tableau 4-32: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen – faible SCL (scénario 2)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.532	0.658	0.533	0.785	0.534	0.767	0.524	0.786	0.525	0.676	0.513	0.619	0.531	0.660	0.517	0.631
220 kV Obfelden	0.814	1.178	0.814	1.263	0.814	1.228	0.813	1.260	0.764	1.289	0.881	1.308	0.829	1.260	0.808	1.144
220 kV Waldegg	0.874	1.351	0.874	1.453	0.874	1.413	0.872	1.450	0.799	1.525	0.990	1.572	0.899	1.478	0.868	1.313
220 kV Thalwil	0.864	1.317	0.865	1.418	0.865	1.379	0.863	1.416	0.778	1.515	1.006	1.567	0.914	1.526	0.859	1.280
220 kV Samstagern	0.814	1.152	0.815	1.243	0.814	1.209	0.812	1.243	0.709	1.378	0.999	1.451	0.792	1.102	0.809	1.119
220 kV Altgass	0.881	1.053	0.882	1.101	0.882	1.082	0.881	1.101	0.953	0.957	0.979	1.218	0.870	1.026	0.879	1.034
220 kV Niederwil	0.538	0.871	0.538	0.974	0.538	0.934	0.536	0.968	0.507	0.956	0.545	0.885	0.544	0.912	0.530	0.834
220 kV Regensdorf	0.489	0.804	0.490	0.910	0.490	0.871	0.488	0.905	0.461	0.889	0.468	0.771	0.493	0.832	0.482	0.769
220 kV Seebach	0.470	0.770	0.471	0.877	0.471	0.840	0.469	0.873	0.442	0.855	0.433	0.715	0.472	0.791	0.463	0.736
220 kV Auwiesen	0.465	0.761	0.465	0.868	0.466	0.831	0.463	0.864	0.437	0.846	0.423	0.700	0.466	0.780	0.458	0.727
220 kV Fällanden	0.446	0.727	0.446	0.836	0.446	0.801	0.444	0.833	0.418	0.812	0.383	0.639	0.445	0.737	0.438	0.694
220 kV Aathal	0.321	0.555	0.322	0.655	0.322	0.626	0.319	0.652	0.310	0.598	0.297	0.506	0.321	0.560	0.315	0.528
220 kV Grynau	0.360	0.581	0.361	0.683	0.361	0.655	0.358	0.681	0.349	0.623	0.335	0.529	0.360	0.587	0.354	0.554
220 kV Benken	0.562	0.843	0.534	0.966	0.563	0.930	0.559	0.966	0.513	0.980	0.382	0.630	0.554	0.831	0.555	0.807
220 kV Siebnen	0.631	0.922	0.632	1.036	0.632	1.000	0.628	1.036	0.566	1.087	0.377	0.623	0.619	0.899	0.624	0.886
220 kV Littau	0.919	0.467	0.966	0.458	0.911	0.437	0.932	0.523	0.918	0.459	0.918	0.478	0.919	0.466	0.918	0.474
220 kV Giswil	0.867	1.015	1.037	0.772	0.839	0.998	0.913	0.596	0.866	0.996	0.865	0.972	0.867	1.015	0.865	0.958
220 kV Innertkirchen	0.775	1.638	1.007	1.395	0.737	1.644	0.838	1.151	0.774	1.625	0.772	1.851	0.775	1.639	0.772	1.570
220 kV Handeck	0.742	1.778	0.991	1.529	0.701	1.786	0.809	1.279	0.741	1.764	0.738	1.718	0.742	1.778	0.739	1.708
220 kV Grimsel	0.717	1.810	0.973	1.566	0.675	1.819	0.786	1.319	0.716	1.798	0.713	1.752	0.717	1.811	0.714	1.741
220 kV Seehalten	0.702	1.833	0.966	1.593	0.659	1.843	0.773	1.348	0.701	1.821	0.698	1.775	0.702	1.833	0.699	1.765
220 kV Airolo	0.678	2.340	0.804	1.613	0.830	1.043	0.891	2.259	0.675	2.336	0.671	2.282	0.678	2.341	0.674	2.269
220 kV Sils	0.289	0.600	0.296	0.689	0.291	0.701	0.284	0.691	0.279	0.670	0.258	0.562	0.288	0.602	0.282	0.587

	Cas 9		Cas 10		Cas 11		Cas 12		Cas 13		Cas 14		Cas 15	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.525	0.682	0.517	0.448	0.523	0.665	0.515	0.764	0.537	0.769	0.527	0.793	0.522	0.695
220 kV Obfelden	0.806	1.130	0.809	0.923	0.746	1.231	0.810	1.236	0.710	0.934	0.818	3.903	0.638	1.803
220 kV Waldegg	0.866	1.298	0.868	1.061	0.772	1.441	0.869	1.421	1.186	4.090	0.881	4.092	0.717	1.978
220 kV Thalwil	0.857	1.266	0.859	1.035	0.747	1.425	0.860	1.387	1.137	3.767	0.873	3.782	0.728	1.878
220 kV Samstagern	0.808	1.108	0.809	0.907	0.671	1.280	0.809	1.217	0.997	2.835	0.824	2.890	0.722	1.550
220 kV Altgass	0.878	1.025	0.879	0.920	0.644	1.231	0.879	1.086	0.978	1.915	0.886	1.787	0.833	1.211
220 kV Niederwil	0.526	0.829	0.530	0.585	0.496	0.917	0.533	0.941	0.498	0.874	0.670	3.190	0.460	1.291
220 kV Regensdorf	0.479	0.766	0.483	0.534	0.450	0.852	0.485	0.879	0.472	0.932	0.582	2.660	0.446	1.212
220 kV Seebach	0.460	0.735	0.463	0.508	0.432	0.819	0.465	0.847	0.463	0.964	0.543	2.386	0.444	1.157
220 kV Auwiesen	0.455	0.727	0.458	0.501	0.426	0.810	0.460	0.838	0.461	0.972	0.532	2.312	0.443	1.144
220 kV Fällanden	0.436	0.696	0.439	0.474	0.408	0.777	0.443	0.808	0.456	1.025	0.488	1.980	0.445	1.098
220 kV Aathal	0.313	0.537	0.315	0.360	0.306	0.580	0.316	0.630	0.325	0.713	0.323	1.061	0.282	0.625
220 kV Grynau	0.353	0.559	0.355	0.372	0.345	0.604	0.355	0.660	0.365	0.745	0.366	1.101	0.334	0.676
220 kV Benken	0.555	0.809	0.555	0.568	0.495	0.927	0.554	0.937	0.630	1.602	0.583	2.110	0.528	1.180
220 kV Siebnen	0.624	0.883	0.625	0.650	0.542	1.021	0.624	1.007	0.732	1.948	0.649	2.321	0.580	1.277
220 kV Littau	0.919	0.459	0.918	0.543	0.919	0.463	0.903	0.500	0.919	0.429	0.919	0.430	0.919	0.452
220 kV Giswil	0.866	0.934	0.865	0.609	0.866	0.990	0.813	0.878	0.868	1.068	0.866	0.879	0.865	0.960
220 kV Innertkirchen	0.774	1.558	0.773	1.137	0.773	1.615	0.701	1.459	0.776	1.727	0.774	1.527	0.773	1.592
220 kV Handeck	0.741	1.696	0.739	1.262	0.740	1.754	0.663	1.593	0.743	1.870	0.741	1.665	0.740	1.731
220 kV Grimsel	0.715	1.731	0.714	1.301	0.715	1.787	0.635	1.627	0.718	1.903	0.715	1.701	0.715	1.765
220 kV Seehalten	0.700	1.755	0.699	1.329	0.700	1.810	0.618	1.652	0.703	1.925	0.700	1.726	0.699	1.789
220 kV Airolo	0.675	2.270	0.674	1.793	0.675	2.324	7.322	1.387	0.670	2.448	0.676	2.289	0.674	2.315
220 kV Sils	0.283	0.629	0.699	1.330	0.275	0.650	0.271	0.694	0.299	0.828	0.289	1.180	0.272	0.746

Tableau 4-33: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen – SCL optimal (scénario 2)

4.4.4.3 Scénario 1

4.4.4.3.1 Injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Regensdorf – Seebach
3	N-1 sur 220 kV Auwiesen – Seebach
4	N-1 sur 220 kV Benken – Siebnen
5	N-1 sur 220 kV Benken – Sils
6	N-1 sur 220 kV Grynav – Mettlen
7	N-2 sur 220 kV Benken – Sils et Benken – Siebnen
8	N-2 sur 220 kV Grynav – Tierfehnd
9	N-2 sur 220 kV Grynav – Winkeln
10	N-2 sur 220 kV Niederwil – Regensdorf

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-34 et Tableau 4-35 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8		Cas 9		Cas 10	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0.894	0.823	0.906	0.844	0.906	0.845	0.886	0.811	0.894	0.825	0.891	0.822	0.885	0.814	0.894	0.825	0.895	0.823	0.984	0.989
220 kV Seebach	0.874	0.788	0.906	0.844	0.740	0.560	0.865	0.773	0.874	0.791	0.871	0.787	0.863	0.777	0.873	0.791	0.874	0.788	0.982	0.988
220 kV Regensdorf	0.796	0.653	0.737	0.555	0.739	0.558	0.781	0.629	0.796	0.658	0.790	0.651	0.778	0.635	0.795	0.658	0.797	0.654	0.974	0.980
220 kV Aathal	0.591	0.448	0.585	0.450	0.585	0.450	0.583	0.477	0.582	0.428	0.585	0.538	0.572	0.452	0.593	0.426	0.609	0.448	0.545	0.467
220 kV Grynau	0.619	0.491	0.613	0.494	0.613	0.494	0.611	0.523	0.609	0.468	0.613	0.608	0.599	0.494	0.626	0.468	0.658	0.500	0.574	0.517
220 kV Benken	0.748	0.548	0.742	0.547	0.742	0.547	0.824	0.741	0.765	0.559	0.738	0.555	0.853	0.755	0.743	0.539	0.749	0.549	0.696	0.541
380 kV Benken	0.536	0.282	0.528	0.282	0.529	0.282	0.550	0.353	0.526	0.256	0.521	0.314	0.541	0.314	0.525	0.260	0.536	0.277	0.474	0.292
220 kV Benken	0.748	0.548	0.742	0.547	0.742	0.547	0.824	0.741	0.765	0.559	0.738	0.555	0.853	0.755	0.743	0.539	0.749	0.549	0.696	0.541
380 kV Benken	0.536	0.282	0.528	0.282	0.529	0.282	0.550	0.353	0.526	0.256	0.521	0.314	0.541	0.314	0.525	0.260	0.536	0.277	0.474	0.292
220 kV Siebnen	0.704	0.457	0.696	0.453	0.696	0.453	0.460	0.089	0.718	0.467	0.691	0.456	0.453	0.076	0.700	0.452	0.705	0.458	0.635	0.430
220 kV Samstagern	0.606	0.243	0.592	0.233	0.592	0.233	0.465	0.089	0.611	0.252	0.585	0.221	0.459	0.077	0.601	0.247	0.608	0.246	0.494	0.169
220 kV Altgass	0.526	0.107	0.513	0.102	0.514	0.102	0.434	0.141	0.527	0.106	0.500	0.078	0.427	0.122	0.522	0.106	0.529	0.110	0.425	0.069
220 kV Thalwil	0.596	0.223	0.578	0.207	0.579	0.208	0.482	0.071	0.599	0.232	0.575	0.199	0.476	0.066	0.591	0.228	0.598	0.226	0.458	0.114
220 kV Waldegg	0.584	0.204	0.564	0.184	0.565	0.185	0.493	0.067	0.585	0.213	0.563	0.178	0.487	0.071	0.580	0.211	0.586	0.207	0.425	0.077
220 kV Obfelden	0.568	0.181	0.545	0.158	0.546	0.159	0.502	0.078	0.568	0.191	0.547	0.154	0.496	0.087	0.564	0.189	0.570	0.185	0.389	0.068
220 kV Niederwil	0.649	0.392	0.609	0.332	0.610	0.334	0.622	0.351	0.648	0.400	0.639	0.389	0.618	0.361	0.647	0.400	0.650	0.394	0.333	0.080
220 kV Mettlen	0.444	0.178	0.433	0.175	0.433	0.175	0.406	0.212	0.441	0.160	0.411	0.210	0.398	0.191	0.440	0.153	0.449	0.174	0.353	0.158
380 kV Mettlen	0.401	0.193	0.393	0.185	0.393	0.185	0.388	0.175	0.395	0.184	0.383	0.185	0.379	0.162	0.394	0.183	0.403	0.191	0.334	0.136
220 kV Breite	0.575	0.402	0.569	0.403	0.569	0.403	0.569	0.429	0.567	0.387	0.569	0.462	0.559	0.409	0.571	0.382	0.569	0.391	0.528	0.414
380 kV Breite	0.465	0.292	0.458	0.293	0.459	0.293	0.459	0.332	0.451	0.271	0.455	0.349	0.442	0.298	0.448	0.271	0.464	0.284	0.411	0.303

Tableau 4-34: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden – faible SCL (scénario 1)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8		Cas 9		Cas 10	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
220 kV Auwiesen	0.848	0.878	0.866	0.890	0.866	0.890	0.840	0.868	0.848	0.879	0.846	0.875	0.840	0.867	0.848	0.878	0.848	0.880	0.965	0.969
220 kV Seebach	0.820	0.857	0.866	0.890	0.636	0.719	0.810	0.844	0.820	0.857	0.818	0.853	0.810	0.843	0.820	0.856	0.820	0.858	0.960	0.965
220 kV Regensdorf	0.711	0.775	0.634	0.713	0.635	0.717	0.695	0.755	0.712	0.775	0.708	0.768	0.694	0.753	0.711	0.774	0.712	0.778	0.943	0.949
220 kV Aathal	0.391	0.592	0.387	0.584	0.387	0.584	0.387	0.580	0.387	0.581	0.396	0.554	0.382	0.565	0.410	0.580	0.420	0.628	0.368	0.529
220 kV Grynau	0.412	0.641	0.409	0.632	0.409	0.633	0.407	0.627	0.409	0.628	0.422	0.589	0.402	0.610	0.445	0.628	0.468	0.709	0.390	0.574
220 kV Benken	0.629	0.776	0.623	0.767	0.623	0.767	0.735	0.852	0.663	0.783	0.623	0.761	0.790	0.871	0.627	0.768	0.631	0.781	0.589	0.703
380 kV Benken	0.322	0.679	0.317	0.665	0.317	0.665	0.349	0.672	0.323	0.655	0.315	0.647	0.354	0.645	0.317	0.658	0.324	0.687	0.288	0.571
220 kV Benken	0.629	0.776	0.623	0.767	0.623	0.767	0.735	0.852	0.663	0.783	0.623	0.761	0.790	0.871	0.627	0.768	0.631	0.781	0.589	0.703
380 kV Benken	0.322	0.679	0.317	0.665	0.317	0.665	0.349	0.672	0.323	0.655	0.315	0.647	0.354	0.645	0.317	0.658	0.324	0.687	0.288	0.571
220 kV Siebnen	0.568	0.734	0.560	0.722	0.560	0.723	0.257	0.539	0.597	0.738	0.560	0.715	0.256	0.526	0.567	0.726	0.571	0.740	0.512	0.641
220 kV Samstagern	0.437	0.659	0.423	0.642	0.424	0.643	0.264	0.552	0.453	0.655	0.424	0.631	0.263	0.539	0.437	0.649	0.441	0.668	0.339	0.525
220 kV Altgass	0.335	0.605	0.323	0.589	0.324	0.590	0.227	0.539	0.344	0.597	0.317	0.573	0.226	0.525	0.336	0.594	0.340	0.616	0.254	0.479
220 kV Thalwil	0.424	0.650	0.406	0.631	0.406	0.632	0.286	0.559	0.436	0.646	0.411	0.622	0.285	0.546	0.424	0.641	0.428	0.659	0.296	0.498
220 kV Waldegg	0.411	0.636	0.389	0.615	0.390	0.616	0.303	0.559	0.420	0.631	0.397	0.608	0.302	0.547	0.411	0.627	0.415	0.645	0.258	0.473
220 kV Obfelden	0.394	0.614	0.369	0.591	0.370	0.593	0.320	0.554	0.401	0.609	0.381	0.586	0.319	0.543	0.395	0.605	0.398	0.623	0.217	0.443
220 kV Niederwil	0.518	0.642	0.468	0.603	0.469	0.606	0.490	0.609	0.520	0.640	0.512	0.628	0.489	0.604	0.518	0.638	0.520	0.647	0.166	0.374
220 kV Mettlen	0.231	0.585	0.222	0.569	0.223	0.570	0.194	0.548	0.234	0.573	0.208	0.548	0.193	0.532	0.233	0.570	0.238	0.599	0.168	0.462
380 kV Mettlen	0.186	0.538	0.180	0.525	0.181	0.525	0.179	0.512	0.186	0.523	0.176	0.507	0.178	0.494	0.184	0.522	0.189	0.547	0.149	0.433
220 kV Breite	0.396	0.571	0.392	0.563	0.392	0.563	0.393	0.560	0.393	0.561	0.398	0.548	0.389	0.546	0.401	0.558	0.397	0.571	0.370	0.508
380 kV Breite	0.235	0.571	0.231	0.559	0.231	0.559	0.234	0.554	0.227	0.549	0.234	0.537	0.225	0.527	0.224	0.544	0.238	0.577	0.210	0.481

Tableau 4-35: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Fällanden – SCL optimal (scénario 1)

4.4.4.3.2 Injection d'harmoniques à 220 kV Verbois

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Romanel – Veytaux
3	N-1 sur 220 kV Romanel – Vaux
4	N-1 sur 220 kV Vaux – Verbois
5	N-2 sur 220 kV Romanel – Vaux et Vaux – Verbois

Les facteurs d'amplification sur les harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-36 et Tableau 4-37 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.628	0.754	0.636	0.763	0.614	0.737	0.609	0.727	0.613	0.734
220 kV Foretaille	0.924	0.951	0.931	0.959	0.912	0.941	0.909	0.936	0.912	0.940
220 kV Crans	0.819	0.881	0.837	0.900	0.790	0.855	0.782	0.845	0.789	0.854
220 kV Banlieue Ouest	0.621	0.743	0.664	0.786	0.554	0.686	0.537	0.662	0.553	0.684
220 kV Romanel	0.595	0.725	0.642	0.773	0.521	0.663	0.501	0.637	0.519	0.660
380 kV Romanel	0.531	0.775	0.546	0.791	0.492	0.732	0.481	0.710	0.490	0.725
220 kV Vaux	0.657	0.767	0.695	0.806	0.899	0.934	0.485	0.618	0.000	0.000
220 kV Veytaux	0.358	0.470	0.207	0.293	0.315	0.431	0.303	0.415	0.314	0.429
220 kV St Triphon	0.286	0.392	0.223	0.314	0.252	0.361	0.243	0.347	0.252	0.359
220 kV Riddes	0.189	0.303	0.160	0.266	0.169	0.281	0.164	0.272	0.168	0.280
380 kV Bâtiatz	0.312	0.654	0.310	0.649	0.287	0.616	0.280	0.597	0.286	0.611
380 kV Nant de Drance	0.317	0.693	0.314	0.688	0.292	0.652	0.284	0.632	0.290	0.647
380 kV Châtelard	0.316	0.688	0.314	0.683	0.291	0.648	0.284	0.628	0.290	0.642
220 kV Châtelard	0.250	0.566	0.248	0.562	0.230	0.532	0.224	0.516	0.229	0.528
220 kV Vallorcine	0.247	0.561	0.245	0.556	0.227	0.527	0.221	0.511	0.226	0.523

Tableau 4-36: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois – SCL bas (scénario 1)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.479	0.521	0.485	0.529	0.469	0.509	0.466	0.503	0.469	0.508
220 kV Foretaille	0.885	0.900	0.892	0.908	0.875	0.889	0.871	0.885	0.875	0.889
220 kV Crans	0.737	0.768	0.755	0.787	0.711	0.741	0.702	0.730	0.710	0.740
220 kV Banlieue Ouest	0.493	0.546	0.535	0.589	0.430	0.483	0.408	0.456	0.429	0.481
220 kV Romanel	0.464	0.519	0.511	0.568	0.393	0.448	0.368	0.419	0.391	0.446
380 kV Romanel	0.370	0.461	0.387	0.481	0.339	0.425	0.326	0.405	0.335	0.418
220 kV Vaux	0.535	0.584	0.572	0.623	0.782	0.807	0.344	0.393	0.000	0.000
220 kV Veytaux	0.232	0.272	0.108	0.134	0.196	0.236	0.184	0.220	0.196	0.234
220 kV St Triphon	0.169	0.206	0.124	0.153	0.144	0.179	0.135	0.168	0.143	0.178
220 kV Riddes	0.083	0.117	0.066	0.097	0.071	0.103	0.067	0.097	0.071	0.102
380 kV Bâtiaz	0.152	0.261	0.155	0.264	0.138	0.238	0.132	0.227	0.137	0.235
380 kV Nant de Drance	0.151	0.270	0.154	0.274	0.137	0.247	0.132	0.235	0.136	0.243
380 kV Châtelard	0.151	0.269	0.154	0.273	0.138	0.246	0.132	0.234	0.136	0.242
220 kV Châtelard	0.101	0.184	0.103	0.187	0.092	0.169	0.088	0.161	0.091	0.166
220 kV Vallorcine	0.099	0.181	0.101	0.183	0.090	0.165	0.086	0.157	0.089	0.163

Tableau 4-37: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Verbois – SCL optimal (scénario 1)

4.4.4.3.3 Injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Romanel
3	N-1 sur 380 kV Bâtiaz – Chamoson
4	N-2 sur 380 kV Chamoson – Chippis

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-38 et Tableau 4-39 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.967	0.979	0.969	0.978	0.973	0.947	0.968	0.985
220 kV Foretaille	0.629	0.764	0.649	0.743	0.698	0.411	0.638	0.829

220 kV Crans	0.590	0.739	0.613	0.714	0.671	0.340	0.601	0.815
220 kV Banlieue Ouest	0.529	0.695	0.560	0.659	0.639	0.230	0.543	0.798
220 kV Romanel	0.525	0.693	0.557	0.655	0.640	0.223	0.539	0.801
380 kV Chippis	0.717	0.916	0.850	0.916	1.061	0.528	0.757	1.121
220 kV Vaux	0.546	0.706	0.571	0.672	0.638	0.268	0.558	0.798
220 kV Veytaux	0.328	0.463	0.314	0.385	0.360	0.131	0.334	0.553
220 kV St Triphon	0.270	0.394	0.236	0.296	0.271	0.105	0.273	0.482
220 kV Riddes	0.198	0.324	0.121	0.163	0.138	0.055	0.201	0.419
380 kV Bâtiaz	0.401	0.757	0.071	0.153	1.339	2.520	0.508	1.270
380 kV Nant de Drance	0.407	0.802	0.072	0.162	1.360	2.674	0.516	1.345
380 kV Châtelard	0.406	0.796	0.072	0.161	1.358	2.655	0.515	1.336
220 kV Châtelard	0.321	0.654	0.057	0.133	1.072	2.181	0.406	1.099
220 kV Vallorcine	0.317	0.648	0.056	0.131	1.060	2.161	0.402	1.088

Tableau 4-38: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot – SCL bas (Scénario 1)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Verbois	0.782	0.936	0.956	0.962	0.956	0.968	0.954	0.960
220 kV Foretaille	2.016	0.301	0.503	0.556	0.501	0.653	0.479	0.544
220 kV Crans	2.254	0.238	0.463	0.518	0.459	0.641	0.433	0.505
220 kV Banlieue Ouest	2.318	0.126	0.421	0.477	0.416	0.668	0.378	0.459
220 kV Romanel	2.272	0.154	0.425	0.480	0.419	0.688	0.378	0.461
380 kV Chippis	1.219	0.390	0.797	0.844	0.781	1.462	0.640	0.758
220 kV Vaux	2.088	0.091	0.429	0.485	0.425	0.649	0.394	0.471
220 kV Veytaux	1.937	0.605	0.206	0.241	0.203	0.347	0.194	0.251
220 kV St Triphon	1.639	0.668	0.145	0.174	0.144	0.249	0.147	0.197
220 kV Riddes	0.878	0.514	0.056	0.071	0.056	0.102	0.087	0.131
380 kV Bâtiaz	0.879	0.671	0.017	0.038	0.684	2.546	0.293	0.484
380 kV Nant de Drance	0.873	0.696	0.017	0.039	0.679	2.635	0.291	0.501
380 kV Châtelard	0.876	0.693	0.017	0.039	0.681	2.627	0.292	0.500
220 kV Châtelard	0.583	0.475	0.011	0.027	0.453	1.804	0.194	0.342
220 kV Vallorcine	0.571	0.466	0.011	0.026	0.444	1.769	0.190	0.336

Tableau 4-39: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 380 kV Bois Tollot – SCL optimal (scénario 1)

4.4.4.3.4 Injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen

Les cas suivants ont été considérés pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen :

Cas	Description
1	Condition N
2	N-1 sur 220 kV Ernen – Seehalten
3	N-1 sur 220 kV Airolo – Rotondo
4	N-1 sur 220 kV Airolo – Lavorgo
5	N-1 sur 220 kV Altgass – Samstagern
6	N-1 sur 220 kV Samstagern – Siebnen
7	N-1 sur 220 kV Samstagern – Thalwil
8	N-1 sur 220 kV Mettlen – Sursee
9	N-1 sur 220 kV Gösgen – Laufenburg
10	N-1 sur 220 kV Gösgen – Ormalingen
11	N-1 sur 220 kV Altgass – Mettlen
12	N-2 sur 220 kV Airolo – Rotondo et Airolo – Lavorgo
13	N-2 sur 220 kV Obfelden – Waldegg
14	N-2 sur 220 kV Birr – Niederwil et Mettlen – Obfelden
15	N-2 sur 220 kV Mettlen – Obfelden et Breite – Fällanden

Les facteurs d'amplification des harmoniques 5 et 7 pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen dans des conditions SCL faibles et optimales sont présentés dans le Tableau 4-40 et Tableau 4-41 respectivement.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.668	0.304	0.665	0.291	0.670	0.304	0.664	0.298	0.658	0.274	0.651	0.268	0.667	0.303	0.651	0.205
220 kV Obfelden	0.811	0.435	0.810	0.464	0.811	0.434	0.810	0.437	0.766	0.290	0.833	0.544	0.808	0.440	0.804	0.489
220 kV Waldegg	0.820	0.424	0.818	0.455	0.820	0.423	0.818	0.426	0.753	0.222	0.864	0.618	0.816	0.432	0.813	0.487
220 kV Thalwil	0.824	0.410	0.822	0.444	0.824	0.409	0.822	0.411	0.738	0.185	0.888	0.682	0.818	0.435	0.817	0.480
220 kV Samstagern	0.823	0.387	0.822	0.424	0.823	0.387	0.821	0.388	0.714	0.198	0.911	0.750	0.818	0.373	0.816	0.465
220 kV Altgass	0.897	0.657	0.896	0.675	0.897	0.657	0.896	0.658	0.978	0.981	0.944	0.861	0.895	0.649	0.893	0.704
220 kV Niederwil	0.634	0.259	0.632	0.261	0.634	0.259	0.632	0.248	0.603	0.285	0.622	0.209	0.632	0.257	0.621	0.186
220 kV Regensdorf	0.623	0.307	0.621	0.300	0.624	0.307	0.621	0.293	0.592	0.350	0.596	0.301	0.622	0.305	0.611	0.202
220 kV Seebach	0.619	0.335	0.617	0.324	0.620	0.336	0.617	0.321	0.587	0.386	0.584	0.363	0.617	0.334	0.606	0.214
220 kV Auwiesen	0.618	0.343	0.615	0.331	0.618	0.344	0.616	0.329	0.586	0.396	0.581	0.380	0.614	0.342	0.605	0.218
220 kV Fällanden	0.615	0.386	0.613	0.368	0.616	0.387	0.612	0.372	0.583	0.447	0.568	0.471	0.613	0.386	0.602	0.240
220 kV Aathal	0.551	0.554	0.549	0.518	0.552	0.556	0.548	0.540	0.532	0.565	0.525	0.570	0.549	0.554	0.538	0.354
220 kV Grynau	0.586	0.531	0.584	0.496	0.587	0.532	0.583	0.516	0.568	0.544	0.560	0.553	0.585	0.530	0.574	0.324
220 kV Benken	0.694	0.299	0.692	0.299	0.695	0.300	0.691	0.287	0.640	0.432	0.586	0.609	0.691	0.301	0.682	0.200
220 kV Siebnen	0.730	0.213	0.728	0.244	0.730	0.214	0.727	0.203	0.659	0.349	0.583	0.606	0.726	0.212	0.719	0.219
220 kV Littau	0.896	0.852	0.902	0.888	0.891	0.850	0.897	0.861	0.896	0.856	0.896	0.856	0.896	0.852	0.895	0.863
220 kV Giswil	0.699	0.504	0.725	0.646	0.680	0.494	0.703	0.537	0.697	0.517	0.697	0.521	0.699	0.504	0.696	0.547
220 kV Innertkirchen	0.594	0.310	0.630	0.500	0.568	0.297	0.600	0.353	0.592	0.328	0.592	0.334	0.594	0.310	0.591	0.365
220 kV Handeck	0.523	0.218	0.569	0.393	0.491	0.151	0.351	0.215	0.521	0.188	0.520	0.195	0.523	0.168	0.519	0.226
220 kV Grimsel	0.491	0.112	0.541	0.340	0.454	0.097	0.499	0.149	0.488	0.127	0.487	0.135	0.490	0.113	0.486	0.155
220 kV Seehalten	0.476	0.104	0.532	0.304	0.435	0.098	0.484	0.110	0.473	0.104	0.472	0.111	0.475	0.104	0.471	0.105
220 kV Airolo	0.498	0.134	0.518	0.128	0.625	0.142	0.532	0.181	0.495	0.115	0.492	0.112	0.498	0.135	0.453	0.100
220 kV Sils	0.540	1.098	0.539	1.016	0.543	1.099	0.535	1.094	0.522	1.111	0.509	1.156	0.539	1.098	0.527	0.723

	Cas 9		Cas 10		Cas 11		Cas 12		Cas 13		Cas 14		Cas 15	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.674	0.296	0.670	0.289	0.656	0.274	0.658	0.291	0.667	0.303	0.653	0.255	0.653	0.255
220 kV Obfelden	0.806	0.426	0.813	0.618	0.759	0.289	0.808	0.445	0.792	0.448	0.703	0.168	0.703	0.168
220 kV Waldegg	0.815	0.415	0.822	0.632	0.744	0.221	0.816	0.433	0.848	0.362	0.730	0.156	0.730	0.256
220 kV Thalwil	0.820	0.401	0.825	0.639	0.725	0.183	0.820	0.418	0.846	0.360	0.751	0.166	0.751	0.166
220 kV Samstagern	0.819	0.378	0.824	0.639	0.697	0.195	0.819	0.395	0.838	0.353	0.771	0.199	0.771	0.199
220 kV Altgass	0.895	0.655	0.897	0.794	0.684	0.191	0.895	0.662	0.904	0.636	0.869	0.544	0.869	0.544
220 kV Niederwil	0.623	0.233	0.638	0.304	0.599	0.284	0.629	0.243	0.626	0.252	0.650	0.272	0.650	0.272
220 kV Regensdorf	0.614	0.281	0.627	0.336	0.587	0.350	0.618	0.284	0.619	0.302	0.628	0.329	0.628	0.329
220 kV Seebach	0.610	0.309	0.623	0.352	0.582	0.386	0.613	0.310	0.615	0.333	0.616	0.358	0.616	0.358
220 kV Auwiesen	0.609	0.317	0.621	0.356	0.581	0.395	0.612	0.318	0.614	0.341	0.613	0.365	0.613	0.365
220 kV Fällanden	0.607	0.361	0.618	0.380	0.577	0.477	0.609	0.359	0.614	0.387	0.602	0.404	0.602	0.533
220 kV Aathal	0.543	0.531	0.554	0.410	0.530	0.565	0.544	0.523	0.550	0.554	0.529	0.533	0.529	0.404
220 kV Grynau	0.580	0.504	0.589	0.453	0.565	0.543	0.579	0.500	0.585	0.531	0.568	0.504	0.568	0.504
220 kV Benken	0.675	0.535	0.697	0.459	0.631	0.431	0.687	0.278	0.698	0.310	0.667	0.328	0.667	0.328
220 kV Siebnen	0.725	0.179	0.732	0.493	0.649	0.348	0.723	0.201	0.737	0.219	0.695	0.226	0.695	0.226
220 kV Littau	0.851	0.851	0.896	0.881	0.895	0.856	0.889	0.846	0.896	0.852	0.895	0.857	0.895	0.857
220 kV Giswil	0.699	0.499	0.700	0.618	0.697	0.517	0.673	0.479	0.699	0.504	0.696	0.524	0.696	0.524
220 kV Innertkirchen	0.595	0.303	0.596	0.462	0.592	0.328	0.558	0.275	0.594	0.311	0.591	0.337	0.591	0.337
220 kV Handeck	0.524	0.156	0.525	0.345	0.521	0.188	0.478	0.124	0.523	0.169	0.520	0.196	0.520	0.196
220 kV Grimsel	0.492	0.098	0.493	0.286	0.488	0.127	0.440	0.077	0.490	0.113	0.486	0.133	0.486	0.133
220 kV Seehalten	0.477	0.092	0.478	0.245	0.473	0.104	0.419	0.101	0.476	0.104	0.471	0.103	0.471	0.103
220 kV Airolo	0.500	0.121	0.501	0.281	0.454	0.115	1.058	1.191	0.498	0.134	0.493	0.104	0.493	0.104
220 kV Sils	0.538	1.064	0.544	0.709	0.519	1.111	0.499	0.855	0.511	0.880	0.491	0.833	0.491	0.833

Tableau 4-40: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen – faible SCL (scénario 1)

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4		Cas 5		Cas 6		Cas 7		Cas 8	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.476	0.836	0.476	0.833	0.480	0.844	0.473	0.834	0.467	0.817	0.461	0.819	0.476	0.835	0.463	0.816
220 kV Obfelden	0.686	0.854	0.686	0.852	0.686	0.855	0.686	0.853	0.620	0.829	0.729	0.862	0.685	0.848	0.210	0.838
220 kV Waldegg	0.691	0.874	0.691	0.873	0.691	0.876	0.690	0.873	0.589	0.841	0.769	0.895	0.690	0.866	0.687	0.858
220 kV Thalwil	0.692	0.884	0.692	0.883	0.692	0.886	0.691	0.883	0.557	0.845	0.803	0.918	0.692	0.870	0.688	0.868
220 kV Samstagern	0.688	0.885	0.688	0.884	0.689	0.887	0.688	0.884	0.515	0.840	0.839	0.934	0.684	0.878	0.684	0.869
220 kV Altgass	0.815	0.917	0.815	0.916	0.816	0.918	0.815	0.916	0.953	0.957	0.894	0.947	0.813	0.913	0.813	0.907
220 kV Niederwil	0.425	0.731	0.425	0.729	0.426	0.734	0.425	0.729	0.386	0.718	0.419	0.715	0.425	0.727	0.471	0.712
220 kV Regensdorf	0.396	0.725	0.395	0.722	0.396	0.728	0.395	0.723	0.356	0.712	0.368	0.703	0.395	0.722	0.388	0.706
220 kV Seebach	0.384	0.723	0.384	0.721	0.385	0.727	0.384	0.721	0.344	0.711	0.345	0.699	0.384	0.720	0.377	0.704
220 kV Auwiesen	0.381	0.722	0.381	0.720	0.382	0.725	0.380	0.720	0.341	0.710	0.339	0.697	0.381	0.719	0.374	0.703
220 kV Fällanden	0.372	0.727	0.372	0.725	0.373	0.731	0.371	0.726	0.331	0.715	0.314	0.701	0.371	0.725	0.365	0.708
220 kV Aathal	0.282	0.654	0.282	0.652	0.283	0.658	0.281	0.652	0.266	0.644	0.260	0.635	0.282	0.652	0.276	0.636
220 kV Grynau	0.322	0.690	0.322	0.687	0.323	0.694	0.321	0.688	0.306	0.679	0.299	0.669	0.322	0.688	0.317	0.670
220 kV Benken	0.475	0.831	0.474	0.829	0.476	0.836	0.473	0.829	0.396	0.813	0.319	0.781	0.473	0.827	0.468	0.809
220 kV Siebnen	0.533	0.838	0.533	0.836	0.534	0.842	0.532	0.836	0.428	0.815	0.315	0.772	0.531	0.833	0.527	0.817
220 kV Littau	0.831	0.852	0.830	0.854	0.828	0.847	0.832	0.852	0.831	0.851	0.831	0.851	0.831	0.852	0.831	0.850
220 kV Giswil	0.557	0.627	0.579	0.625	0.543	0.606	0.562	0.626	0.557	0.625	0.556	0.625	0.557	0.627	0.556	0.621
220 kV Innertkirchen	0.427	0.509	0.459	0.518	0.407	0.480	0.434	0.508	0.427	0.507	0.426	0.506	0.427	0.509	0.426	0.509
220 kV Handeck	0.340	0.439	0.380	0.448	0.313	0.401	0.349	0.437	0.339	0.437	0.338	0.435	0.340	0.439	0.338	0.430
220 kV Grimsel	0.300	0.412	0.347	0.420	0.269	0.369	0.310	0.408	0.299	0.409	0.298	0.408	0.300	0.412	0.298	0.402
220 kV Seehalten	0.282	0.410	0.336	0.417	0.246	0.361	0.294	0.405	0.281	0.407	0.280	0.405	0.282	0.410	0.280	0.400
220 kV Airolo	0.310	0.476	0.328	0.477	0.460	0.686	0.361	0.462	0.308	0.472	0.307	0.469	0.310	0.476	0.308	0.464
220 kV Sils	0.219	0.676	0.219	0.674	0.221	0.683	0.217	0.675	0.197	0.668	0.178	0.655	0.219	0.675	0.214	0.659

	Cas 9		Cas 10		Cas 11		Cas 12		Cas 13		Cas 14		Cas 15	
	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
380 kV Mettlen	0.484	0.890	0.476	0.647	0.466	0.823	0.471	0.828	0.476	0.837	0.466	0.817	0.465	0.815
220 kV Obfelden	0.683	0.856	0.686	0.704	0.610	0.813	0.685	0.851	0.675	0.813	0.474	0.784	0.420	0.741
220 kV Waldegg	0.689	0.877	0.691	0.719	0.574	0.818	0.690	0.871	0.704	0.947	0.514	0.813	0.470	0.776
220 kV Thalwil	0.690	0.888	0.692	0.726	0.538	0.814	0.691	0.881	0.702	0.943	0.550	0.832	0.515	0.802
220 kV Samstagern	0.687	0.890	0.688	0.724	0.490	0.801	0.687	0.881	0.695	0.924	0.590	0.845	0.566	0.824
220 kV Altgass	0.815	0.918	0.815	0.822	0.470	0.770	0.815	0.915	0.819	0.936	0.763	0.891	0.0751	0.879
220 kV Niederwil	0.419	0.739	0.425	0.575	0.380	0.707	0.424	0.726	0.421	0.715	0.395	0.746	0.314	0.689
220 kV Regensdorf	0.391	0.735	0.396	0.565	0.350	0.701	0.394	0.720	0.393	0.716	0.365	0.730	0.319	0.696
220 kV Seebach	0.380	0.735	0.384	0.561	0.339	0.699	0.383	0.718	0.383	0.718	0.353	0.723	0.325	0.701
220 kV Auwiesen	0.377	0.734	0.381	0.560	0.335	0.698	0.380	0.716	0.380	0.717	0.350	0.721	0.327	0.701
220 kV Fällanden	0.368	0.742	0.372	0.560	0.325	0.704	0.370	0.722	0.371	0.727	0.340	0.719	0.339	0.716
220 kV Aathal	0.279	0.670	0.282	0.510	0.264	0.938	0.281	0.648	0.282	0.654	0.262	0.636	0.243	0.614
220 kV Grynau	0.320	0.704	0.322	0.522	0.303	0.673	0.321	0.684	0.322	0.690	0.304	0.673	0.292	0.656
220 kV Benken	0.473	0.849	0.475	0.627	0.384	0.793	0.472	0.824	0.477	0.845	0.425	0.811	0.415	0.801
220 kV Siebnen	0.532	0.852	0.533	0.638	0.412	0.790	0.531	0.833	0.537	0.860	0.469	0.814	0.456	0.801
220 kV Littau	0.831	0.852	0.831	0.837	0.831	0.851	0.827	0.846	0.831	0.852	0.831	0.851	0.831	0.851
220 kV Giswil	0.557	0.629	0.557	0.570	0.557	0.625	0.539	0.601	0.557	0.627	0.556	0.624	0.556	0.624
220 kV Innertkirchen	0.428	0.513	0.427	0.435	0.427	0.506	0.402	0.473	0.427	0.509	0.426	0.505	0.426	0.505
220 kV Handeck	0.340	0.446	0.340	0.352	0.339	0.436	0.306	0.392	0.340	0.439	0.338	0.434	0.338	0.434
220 kV Grimsel	0.300	0.420	0.300	0.320	0.299	0.408	0.261	0.358	0.300	0.412	0.298	0.407	0.298	0.407
220 kV Seehalten	0.283	0.421	0.282	0.312	0.281	0.406	0.237	0.349	0.282	0.410	0.280	0.404	0.280	0.404
220 kV Airolo	0.311	0.489	0.310	0.359	0.308	0.471	0.999	1.118	0.310	0.477	0.308	0.469	0.307	0.468
220 kV Sils	0.219	0.703	0.219	0.527	0.194	0.659	0.215	0.668	0.220	0.681	0.202	0.659	0.197	0.649

Tableau 4-41: Facteurs d'amplification pour l'injection d'harmoniques à 220 kV Mettlen – SCL optimal (scénario 1)