



Limites d'émission des installations de client raccordées au réseau de transport d'Hydro-Québec

Études de réseaux
Direction Planification des Actifs
Hydro-Québec - TransÉnergie
Le 3 décembre 2008

[Page blanche]

Table des matières

1	Généralités	1
1.1	OBJET	1
1.2	DOMAINE D'APPLICATION	1
1.3	DÉFINITIONS	2
2	Limites d'émission	6
2.1	HARMONIQUES	6
2.1.1	Évaluation simplifiée	6
2.1.2	Évaluation détaillée	6
2.1.2.1	Limites d'émission de courants harmoniques	7
2.1.2.2	Limites d'influence téléphonique	9
2.2	DÉSÉQUILIBRE DE CHARGE (OU DE COURANT)	12
2.2.1	Évaluation simplifiée	12
2.2.2	Évaluation détaillée	12
2.2.2.1	Limites d'émission de déséquilibre de charge (ou de courant)	12
2.2.2.2	Limites d'émission de déséquilibre de systèmes de trains électriques	14
2.3	VARIATIONS RAPIDES DE TENSION	15
2.3.1	Évaluation détaillée	15
2.3.1.1	Limites d'émission de variations rapides de tension	15
2.4	PAPILLOTEMENT	16
2.4.1	Évaluation simplifiée	16
2.4.2	Évaluation détaillée	17
2.4.2.1	Détermination des limites	17
3	Méthodes d'évaluation des niveaux d'émission	19
3.1	ÉTUDE D'ÉMISSION	19
3.1.1	Besoin d'une étude d'émission	19
3.1.2	Exigences générales de l'étude d'émission	19
3.1.3	Vérification de l'étude d'émission	20
3.2	POINT D'ÉVALUATION	20
3.3	PUISSANCE DE COURT-CIRCUIT DU RÉSEAU (S_{cc})	21
3.4	PUISSANCE DE RÉFÉRENCE (S_r) / COURANT DE RÉFÉRENCE (I_r)	21
3.5	CONDITIONS D'EXPLOITATION OU DE FONCTIONNEMENT À CONSIDÉRER	22
3.6	NIVEAUX D'ÉMISSION D'HARMONIQUES	23
3.6.1	Évaluation des niveaux d'émission d'harmoniques et lieux d'impédance	23
3.6.2	Émission d'harmoniques non caractéristiques	25
3.6.3	Mesure des niveaux d'émission d'harmoniques	27
3.6.4	Niveaux d'influence téléphonique	28
3.7	NIVEAUX D'ÉMISSION DE DÉSÉQUILIBRE DE CHARGE	29
3.7.1	Évaluation du courant de déséquilibre de charge	29
3.7.2	Mesure des niveaux d'émission de déséquilibre de charge	30

3.8	NIVEAUX D'ÉMISSION DE VARIATIONS RAPIDES DE TENSION	31
3.8.1	Évaluation des variations rapides de tension.....	31
3.8.2	Mesure des niveaux d'émission de variations rapides de tension.	32
3.9	NIVEAUX D'ÉMISSION DE PAPILLOTEMENT	33
3.9.1	Évaluation du papillotement.....	33
3.9.2	Mesure des niveaux d'émission de papillotement	33
4	Résultats à fournir dans l'étude d'émission.....	35
4.1	HARMONIQUES	35
4.2	DÉSÉQUILIBRE DE CHARGE	36
4.3	VARIATIONS RAPIDES DE TENSION.....	37
4.4	PAPILLOTEMENT	37
5	Étapes générales de mise en application.....	38
	Références :	40
	Annexe A Évaluation des niveaux maxima d'émission d'harmoniques en fonction des lieux d'impédance	A - 1

1 Généralités

1.1 OBJET

Ce document donne les limites et les méthodes d'évaluation des perturbations électriques émises par les équipements perturbateurs d'une installation de client raccordée ou à être raccordée au réseau de transport d'Hydro-Québec. Ces limites s'appliquent aux émissions d'harmoniques, de déséquilibre de charge ou de courant, de variations rapides de tension et de papillotement à l'interface entre une installation de client et le réseau. Elles visent notamment à s'assurer que les niveaux de perturbations dans le réseau de transport causées par l'ensemble des installations respectent les cibles de qualité de tension définies à la référence [1]. Même si les présentes limites d'émission sont respectées du côté du réseau de transport, il est possible que le niveau de perturbation présent dans l'installation du client soit trop élevé pour assurer le fonctionnement adéquat de certains de ses équipements. Une limitation supplémentaire des émissions pourrait alors être requise du côté de l'installation du client selon les besoins propres à ses équipements.

Ce document traite des perturbations les plus usuelles. Certains équipements peuvent produire d'autres types de perturbations, par exemple, des interharmoniques, des sous-harmoniques, des harmoniques supérieures à 3 kHz, ou des salves répétitives de courants harmoniques. Selon l'ampleur et l'impact que ces perturbations pourraient avoir dans le réseau ou dans les installations de tiers, d'autres limites d'émission spécifiques pourront être spécifiées lors des études de planification, de raccordement ou de modification d'une installation de client.

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

Les limites d'émission et méthodes d'évaluation contenues dans ce document concernent les installations de clients (clients de charge ou producteurs) raccordées ou à être raccordées au réseau de transport d'Hydro-Québec à des tensions de 44kV à 345kV. Plus spécifiquement, elles s'appliquent lors de projets :

- de raccordement au réseau de nouvelles installations de clients ou de remise en service d'une installation de client désaffectée ou fermée ;
- d'addition d'équipements perturbateurs;
- de modification des caractéristiques des équipements d'installations existantes ou de leur mode d'exploitation ou de fonctionnement pouvant faire augmenter les niveaux d'émission (amplitude ou taux de répétition) de perturbations au-delà des limites permises.

Les limites d'émission applicables à une installation de client existante dont les caractéristiques relatives aux émissions n'ont pas été modifiées depuis son raccordement au réseau sont celles spécifiées initialement lors de la conception de cette installation. Cependant, si les limites d'émission et méthodes d'évaluation présentées dans ce document sont plus permissives, le client peut choisir d'appliquer ces dernières.

Ces limites d'émission ne s'appliquent pas aux installations de clients raccordées aux réseaux de distribution d'Hydro-Québec.

1.3 DÉFINITIONS

Dans le présent document, on entend par:

Conditions générales

Toutes les conditions d'exploitation ou de fonctionnement qui, dans leur ensemble, sont susceptibles statistiquement de se produire plus de 5% du temps annuellement. Elles comprennent notamment les variations journalières ou saisonnières du niveau de charge et de production d'électricité et les manœuvres d'équipements que cela implique, ainsi que les indisponibilités ou les retraits fréquents ou prolongés d'équipements dans le réseau ou dans les installations de clients.

Note : Il faut les évaluer en tenant compte des réseaux actuels et futurs prévisibles.

Conditions occasionnelles

Ensemble des conditions d'exploitation ou de fonctionnement susceptibles de produire des niveaux d'émission plus élevés que ceux en conditions générales et ce, jusqu'à 5% du temps annuellement. Elles correspondent généralement à des régimes anormaux d'exploitation dus à des indisponibilités ou des retraits brefs ou peu fréquents d'équipements dans le réseau ou dans les installations de clients.

Note : Il faut les évaluer en tenant compte des réseaux actuels et futurs prévisibles. Les limites d'émission ne visent pas les conditions extrêmes exceptionnelles.

Cycle

Durée d'une période de l'onde fondamentale de la tension alternative du réseau. Pour une fréquence de 60 Hz, cette durée est de $1/60^e$ de seconde, soit 16,67 millisecondes.

Déséquilibre de charge

Caractéristique de conception ou d'opération d'installations dont les déséquilibres de courant ou de puissance consommée ou produite peuvent causer du déséquilibre de tension dans le réseau (voir aussi installations déséquilibrées).

Déséquilibre de courant

Situation où les trois courants du système triphasé ne sont pas égaux en amplitude ou ne sont pas déphasés de 120° les uns par rapport aux autres.

Déséquilibre de tension

Situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

Équipements perturbateurs

Désigne les équipements, appareillages, systèmes, dispositifs ou procédés pouvant générer ou amplifier des harmoniques, ou du déséquilibre, ou des variations rapides de tension, ou du papillotement, ou toute combinaison de ces perturbations.

Harmoniques

Tensions ou courants sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale du réseau (60 Hz). Une onde déformée peut être analysée à l'aide de sinusoïdales à fréquence fondamentale et de multiples de la fondamentale : les harmoniques. En plus des distorsions ou déformations de l'onde électrique, les harmoniques peuvent causer de l'interférence avec les circuits de communication analogiques à fréquence vocale situés au voisinage.

Harmoniques caractéristiques et non caractéristiques

Les harmoniques caractéristiques correspondent aux valeurs théoriques des harmoniques produites par différents types d'équipements dans des conditions idéales de fonctionnement. En pratique, il existe inévitablement un certain degré de dissymétrie dans le réseau et dans les installations de client ainsi que d'autres conditions non-idéales de fonctionnement pouvant causer la production d'harmoniques dites non caractéristiques (voir 3.6.2). Ces dernières peuvent faire augmenter de façon appréciable les niveaux d'émission surtout si elles sont amplifiées par des résonances parallèles des filtres ou si elles produisent des interactions nuisibles avec les systèmes de commande des convertisseurs.

Haute tension (HT)

Aux fins de ce document, il s'agit des parties du réseau de transport dont la tension nominale entre phases se situe entre 44 kV et 345 kV.

Installation de client

Ensemble des supports, des structures, de l'appareillage électrique et des équipements d'utilisation ou de production d'électricité d'un client qui sont situés du côté client du point de raccordement. Il s'agit ici d'installations électriques raccordées ou à raccorder au réseau de transport d'Hydro-Québec.

Installations déséquilibrées

Désigne, au sens large, les équipements ou installations consommant ou produisant de la puissance, dont les déséquilibres de courant peuvent causer des déséquilibres de tension dans le réseau (ex. : fours à arc, fours à induction, charges ou génératrices monophasées ou biphasées, systèmes d'alimentation de trains électriques en alternatif, etc.).

Installations fluctuantes

Désigne, au sens large, les équipements ou installations consommant ou produisant de la puissance, dont les fluctuations de puissance ou les appels de puissance au démarrage, ou lors de manœuvres, peuvent causer du papillotement, ou des variations rapides de tension (ex. : fours à arc, fours à induction, procédés de soudure, moteurs fonctionnant par à-coups – presses, treuils, laminoirs – démarrages de moteurs, manœuvres de batteries de condensateurs, variations rapides de puissance produite par des génératrices ou par des éoliennes, etc.).

Interharmoniques

Tensions ou courants dont les fréquences ne sont pas des multiples entiers de la fréquence fondamentale du réseau (60 Hz).

Lieux d'impédance harmonique du réseau

Paramètres définissant la plage des valeurs possibles de l'impédance du réseau de transport pour les rangs harmoniques visés par les limites d'émission. Les lieux d'impédance du réseau n'incluent pas l'effet de l'installation du client considérée. Les lieux d'impédance sont généralement définis dans le plan $R \pm jX$ et délimités sous forme de cercles, de secteurs ou de polygones.

Limites d'émission

Aux fins de ce document, il s'agit de valeurs maximales autorisées des niveaux d'émission d'harmoniques, de déséquilibre, de papillotement ou de variations rapides de tension pouvant être produites ou amplifiées par l'ensemble des équipements perturbateurs d'une installation de client.

Niveaux d'émission

Contribution d'une installation de client au niveau des perturbations susceptibles d'être transmises dans le réseau par l'ensemble des équipements perturbateurs de l'installation considérée. L'évaluation des niveaux d'émission s'effectue selon les méthodes définies dans ce document, notamment au chapitre 3.

Papillotement

Impression d'instabilité de la sensation visuelle due à un stimulus lumineux dont la luminance ou la répartition spectrale fluctuent dans le temps. Le papillotement est l'effet sur l'éclairage résultant de variations répétitives de tension auxquelles l'œil humain est particulièrement sensible à certaines fréquences, notamment celles comprises entre 0,1Hz et 25 Hz.

Point d'évaluation

Point situé du côté du réseau de transport à haute tension où doivent être évalués les niveaux d'émission d'une installation de client donnée par rapport aux limites d'émission autorisées. Lorsque d'autres installations de clients peuvent être raccordées à proximité de celle considérée, le point d'évaluation sera généralement le point de raccordement, ou le côté haute tension des transformateurs si le point de raccordement se situe du côté basse tension des transformateurs. Selon les caractéristiques spécifiques du réseau et la possibilité qu'il y ait d'autres installations de clients raccordées à proximité, un autre point d'évaluation peut être spécifié par le Transporteur.

Puissance de référence (S_r)

Puissance prévue de l'installation de client en MVA utilisée pour déterminer les limites d'émission applicables à cette installation. Cette valeur sert aussi de base pour définir les niveaux d'émission par rapport aux limites (voir 3.1 et 3.4).

Puissance de court-circuit (S_{cc})

Valeur théorique de la puissance de court-circuit du réseau de transport en MVA correspondant au courant de court-circuit pour un défaut triphasé au point d'évaluation d'une installation de client. Aux fins de l'application des présentes limites d'émission, cette valeur est fournie par Hydro-Québec pour les conditions générales d'exploitation et, lorsque requis, pour les conditions occasionnelles d'exploitation.

Note : En pratique, on définit souvent le niveau de court-circuit par le biais du courant de court-circuit symétrique (I_{cc}). La puissance de court-circuit triphasée (S_{cc}) peut être calculée en faisant le produit du courant de court-circuit triphasé (I_{cc}) et de la tension nominale (V_{nom}) au point d'évaluation fois $\sqrt{3}$ (c-à-d : $S_{cc} = \sqrt{3} \cdot I_{cc} \cdot V_{nom}$).

Tension nominale d'un réseau (niveau de tension)

Tension efficace entre phases servant à désigner un réseau. Les tensions nominales (V_{nom}) s'établissent généralement comme suit : 44 kV , 49 kV , 69 kV , 120 kV , 161 kV , 230 kV , 315 kV et 345 kV.

Valeur journalières à 95% ou à 99%

Une valeur statistique à 95% du temps sur une base journalière représente le niveau de perturbation ayant une probabilité de 95% de ne pas être dépassé dans une journée. De même, une valeur statistique à 99% du temps sur une base journalière, représente le niveau de perturbation ayant une probabilité de 99% de ne pas être dépassé dans une journée. Les valeurs journalières à 95% ou à 99% correspondent donc aux valeurs maximales obtenues en écartant 5% ou 1% respectivement des valeurs de la journée en commençant par les valeurs les plus élevées. L'évaluation doit durer aussi longtemps que nécessaire pour refléter l'ensemble des conditions d'exploitation ou de fonctionnement possibles.

Variations rapides de tension

Variations soudaines aléatoires ou cycliques de la valeur efficace de la tension entre deux niveaux consécutifs, attribuables à des variations de charges fluctuantes des installations de clients. Une variation de tension est considérée rapide lorsque la variation entre deux niveaux consécutifs s'effectue en une minute ou moins.

2 Limites d'émission

2.1 HARMONIQUES

Les limites suivantes s'appliquent aux harmoniques causées par l'ensemble des équipements perturbateurs d'une installation de client.

2.1.1 Évaluation simplifiée

Le client ayant une installation visée à l'article 1.2 n'est pas tenu de produire d'évaluation détaillée des émissions harmoniques transmises dans le réseau de transport si la puissance totale des équipements générateurs d'harmoniques de son installation ne dépasse pas la valeur du tableau 1, et ce, à la condition que cette valeur soit inférieure à 0,25% de la puissance de court-circuit (S_{cc}) au point d'évaluation dans les conditions générales d'exploitation. Le client doit cependant confirmer par écrit à Hydro-Québec la valeur de la puissance totale de ses équipements générateurs d'harmoniques pour démontrer que son installation respecte les critères d'évaluation simplifiée.

Tableau 1

Niveau de tension (kV)	Puissance triphasée totale* des équipements générateurs d'harmoniques (MVA)
44, 49	1
69	1,5
120	2,7
161	3,6
230	5
315, 345	7

Remarque* : À la condition que cette puissance ne dépasse pas 0,25% de la puissance de court-circuit du réseau dans les conditions générales d'exploitation.

2.1.2 Évaluation détaillée

Si une installation visée à l'article 1.2 comprend des équipements perturbateurs (ex.: fours à arc ou à induction, redresseurs pour l'électrolyse, entraînements de moteurs, convertisseurs de fréquence, contrôleurs de charge c.a., etc.) qui dépassent les critères énoncés en 2.1.1, le client doit alors fournir à Hydro-Québec une étude détaillée des émissions d'harmoniques causées par son installation selon la méthode décrite au chapitre 3. Le client doit ainsi démontrer que son installation est conçue pour respecter les limites données en 2.1.2.1 et en 2.1.2.2

2.1.2.1 Limites d'émission de courants harmoniques

Conditions générales : Les limites d'émission d'harmoniques à respecter au point d'évaluation dans les conditions générales d'exploitation ou de fonctionnement sont données aux tableaux 2, 3, et 4. Ces limites s'appliquent aux harmoniques de rangs n de 2 à 50 inclusivement. Il s'agit des taux de courants harmoniques (I_n/I_r) exprimés en pourcentage du courant de ligne (I_r) correspondant à la puissance de référence de l'installation de client. Les limites sont fonction du rapport entre la puissance de court-circuit du réseau (S_{cc}) en conditions générales et la puissance de référence de l'installation du client (S_r). L'interpolation linéaire par segment entre deux valeurs consécutives S_{cc}/S_r des tableaux suivants est permise, de même que la projection des limites pour les valeurs supérieures à 200 (voir note 2 - page suivante). Les cas où le rapport S_{cc}/S_r est inférieur à 5 nécessitent des analyses préalables de la part d'Hydro-Québec pour déterminer les limites d'émission spécifiques et les conditions techniques applicables. Les indications de la référence [4] pourront être utilisées à cet effet. À noter que les courants admissibles pour certains rangs harmoniques peuvent être limités davantage par les indices d'influence téléphonique spécifiés à la section suivante.

Tableau 2 - Limites d'émission de courants harmoniques impairs (I_n/I_r %)

S_{cc}/S_r	n=3	n=5	n=7	n=9	n=11, 13	$15 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$
5	1	1,2	0,8	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2
20	1,5	2	1,5	0,75	1	0,65	0,45	0,3
50	2	3	2	1	1,5	1	0,7	0,5
200	3	4	3	1,25	2	1,5	1	0,7

Tableau 3 - Limites d'émission de courants harmoniques pairs (I_n/I_r %)

S_{cc}/S_r	n=2	n=4	n=6	n=8	$n \geq 10$
5	0,75	0,5	0,3	0,2	0,15
20	1,1	0,75	0,45	0,3	0,25
50	1,5	1	0,6	0,4	0,3
200	2,2	1,5	1	0,6	0,4

Tableau 4 - Limites d'émission de distorsion totale des courants harmoniques jusqu'au rang n=50.

S_{cc}/S_r	TDD _c
5	1,7
20	3
50	4,5
200	6

NOTES :

1) Définition des indices précédents des tableaux 2, 3 et 4 :

Taux de courants harmoniques individuels : $\frac{I_n}{I_r} \cdot 100\%$ (n : rang harmonique) (éq. 1)

Taux de distorsion totale du courant : $TDD_c = \frac{1}{I_r} \sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2} \cdot 100\%$ (éq. 2)

où :

I_n : valeurs efficaces des niveaux d'émission de courants harmoniques (courants des phases les plus élevés) de rangs n de 2 à 50 au point d'évaluation (A eff.) (voir 3.6).

I_r : valeur efficace du courant de ligne correspondant à la puissance de référence (S_r) de l'installation du client évaluée à la tension nominale du réseau haute tension au point d'évaluation (A eff.) (voir 3.4).

2) Pour les installations dont le rapport S_{cc}/S_r au point d'évaluation se situe entre deux valeurs consécutives définies aux tableaux 2, 3 ou 4, l'interpolation linéaire par segment est permise selon l'équation 3 pour déterminer les limites d'émission applicables à l'installation considérée.

$$\left(\frac{I_n}{I_r}\right)_i = \left[\frac{\left(\frac{I_n}{I_r}\right)_B - \left(\frac{I_n}{I_r}\right)_A}{\left(\frac{S_{cc}}{S_r}\right)_B - \left(\frac{S_{cc}}{S_r}\right)_A} \right] \cdot \left[\left(\frac{S_{cc}}{S_r}\right)_i - \left(\frac{S_{cc}}{S_r}\right)_A \right] + \left(\frac{I_n}{I_r}\right)_A \quad (\text{éq. 3})$$

Où : i = désigne l'installation considérée.

A= rangée des tableaux 2, 3 ou 4 dont le rapport S_{cc}/S_r est immédiatement inférieur à celui de l'installation considérée.

B= rangée des tableaux 2, 3 ou 4 dont le rapport S_{cc}/S_r est immédiatement supérieur à celui de l'installation considérée.

Pour les valeurs S_{cc}/S_r supérieures à 200, la projection des limites de courants harmoniques est permise proportionnellement au rapport S_{cc}/S_r de l'installation considérée comme l'indique l'équation 4:

$$\left(\frac{I_n}{I_r}\right)_i = \left[\left(\frac{S_{cc}}{S_r}\right)_i \div 200\right] \cdot \left(\frac{I_n}{I_r}\right)_{200} \quad (\text{éq. 4})$$

Les équations 3 et 4 s'appliquent aussi à l'indice TDD_c en remplaçant les termes (I_n/I_r) par TDD_c dans ces équations.

- 3) Les limites s'appliquent aux niveaux d'émission d'harmoniques évalués sur des intervalles d'agrégation de 10 minutes (voir note suivante) conformément à la norme CEI 61000-4-7 [2] et aux prescriptions de la classe A de la norme CEI 61000-4-30 [3]. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 95% du temps sur une base journalière doivent être inférieurs aux limites d'émission autorisées. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 99% du temps sur une base journalière ne doivent pas dépasser 1,5 fois les limites d'émission autorisées (voir 3.6).
- 4) Les salves répétitives de courants harmoniques élevés assujetties à des limites spécifiques (voir 1.1) pourraient faire l'objet d'une évaluation sur des intervalles d'agrégation plus courts, par exemple, de 3 secondes au lieu de 10 minutes.

Conditions occasionnelles : De plus, les clients pour lesquels le rapport entre la puissance de court-circuit du réseau en conditions générales d'exploitation et la puissance de référence de l'installation (S_{cc}/S_r) est inférieur à 30, doivent fournir l'évaluation des niveaux d'émission pour les conditions occasionnelles d'exploitation pour s'assurer qu'ils ne dépasseront alors pas 1,5 fois les limites admissibles dans les conditions générales d'exploitation.

2.1.2.2 Limites d'influence téléphonique

En circulant dans les lignes de transport, les harmoniques émises par une installation de client peuvent produire de l'interférence dans les circuits téléphoniques analogiques à fréquence vocale situés au voisinage des lignes électriques. En plus des limites précédentes visant à contrôler les effets de déformation de l'onde de tension, il faut aussi limiter les émissions pour réduire les risques d'interférence téléphonique par induction entre les réseaux.

Pour les installations respectant les conditions d'évaluation simplifiée décrites à la section 2.1.1, aucune évaluation détaillée des niveaux d'influence téléphonique n'est exigée. Pour les autres cas, les limites suivantes s'appliquent.

Conditions générales : Le tableau 5 donne les limites d'émission d'influence téléphonique applicables aux conditions générales d'exploitation ou de fonctionnement. Le tableau présente deux limites : une limite générale et une limite plus élevée, dite limite spécifique, admissible si le client fournit une étude détaillée démontrant qu'au moins un

des critères du tableau 5 est respecté (voir aussi section 3.6.4). Ces critères sont basés sur la longueur équivalente de parallélisme, la résistivité équivalente du sol à 1000 Hz, la séparation minimale et l'impédance mutuelle à 1000 Hz entre les circuits téléphoniques et les lignes électriques pouvant produire de l'interférence due aux courants d'harmoniques émis par l'installation de client considérée. Dans le cas où il n'y a aucun circuit téléphonique analogique à fréquence vocale existant ou prévu à moins de 10 km des lignes de transport touchées, l'application des limites suivantes n'est alors pas exigée.

Tableau 5 - Limites d'émission d'influence téléphonique (réseaux téléphoniques analogiques à fréquence vocale)

Critères d'applicabilité				Limite de l'indice $I \cdot T_{\text{équilibré}}$ ($A_{\text{pondérés}}$)
Limite générale :				15000
Limite spécifique si au moins un des critères suivants est respecté : (voir remarque suivante)				30000
$L_{\text{eq}} \leq 1 \text{ km}$	Ou : $\rho_{\text{eq}} \leq 300 \Omega \cdot \text{m}$	Ou : $S_{\text{min}} \geq 5 \text{ km}$	Ou : $Z_m \leq 2 \Omega$	

Remarque : Le Transporteur déterminera les lignes de transport *touchées*, c'est-à-dire celles à être analysées par le client pour faire la démonstration d'applicabilité de la limite spécifique du tableau 5. Les lignes à analyser peuvent inclure des lignes ou des sections de lignes qui ont un lien électrique avec la(les) ligne(s) desservant l'installation de client et par où peuvent circuler plus de 50% des harmoniques de haute fréquence émises par l'installation considérée.

où : (voir aussi section 3.6.4)

L_{eq} : Longueur équivalente totale de parallélisme des circuits téléphoniques individuels avec les lignes électriques touchées par les harmoniques émises par une installation de client (km);

ρ_{eq} : Résistivité équivalente du sol à 1000 Hz le long des lignes électriques touchées ($\Omega \cdot \text{m}$) ;

S_{min} : Distance minimale de séparation équivalente entre les lignes électriques touchées et les circuits téléphoniques (km) ;

Z_m : Impédance mutuelle en mode terre (à 1000 Hz) entre les circuits téléphoniques individuels et les lignes électriques touchées (ohms).

NOTES :

5) L'indice d'influence téléphonique $I \cdot T_{\text{équilibré}}$ du tableau 5 est défini de la façon suivante :

$$I \cdot T_{\text{équilibré}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} (I_n \cdot W_n)^2} \quad (A \text{ pondérés}) \quad (\text{éq. 5})$$

où :

W_n : est le facteur de pondération selon le tableau 6

I_n : valeurs efficaces des niveaux d'émission de courants harmoniques (courants des phases les plus élevés) de rangs n de 2 à 50 au point d'évaluation d'une installation de client au réseau de transport (A eff.).

- 6) Les valeurs de courants harmoniques à utiliser pour calculer l'indice d'influence téléphonique s'évaluent selon les principes mentionnés à la section précédente et les méthodes décrites à 3.6, notamment à 3.6.1 et 3.6.4.

Tableau 6 – Facteurs de pondération W_n pour l'indice d'influence I-T

n	F(Hz)	W_n	n	F(Hz)	W_n
-	-	-	26	1560	6790
2	120	10	27	1620	6970
3	180	30	28	1680	7060
4	240	105	29	1740	7320
5	300	225	30	1800	7570
6	360	400	31	1860	7820
7	420	650	32	1920	8070
8	480	950	33	1980	8330
9	540	1320	34	2040	8580
10	600	1790	35	2100	8830
11	660	2260	36	2160	9080
12	720	2760	37	2220	9330
13	780	3360	38	2280	9590
14	840	3830	39	2340	9840
15	900	4350	40	2400	10090
16	960	4690	41	2460	10340
17	1020	5100	42	2520	10480
18	1080	5400	43	2580	10600
19	1140	5630	44	2640	10610
20	1200	5860	45	2700	10480
21	1260	6050	46	2760	10350
22	1320	6230	47	2820	10210
23	1380	6370	48	2880	9960
24	1440	6650	49	2940	9820
25	1500	6680	50	3000	9670

Conditions occasionnelles : De plus, les clients pour lesquels le rapport entre la puissance de court-circuit du réseau en conditions générales d'exploitation et la puissance de référence de l'installation (S_{cc}/S_r) est inférieur à 30, doivent aussi fournir l'évaluation des niveaux d'émission pour les conditions occasionnelles d'exploitation pour s'assurer qu'ils ne dépasseront alors pas 1,5 fois les limites admissibles dans les conditions générales d'exploitation.

2.2 DÉSÉQUILIBRE DE CHARGE (OU DE COURANT)

Les limites suivantes s'appliquent aux déséquilibres de charge ou de courant des installations de clients pouvant causer du déséquilibre de tension dans le réseau. Le déséquilibre dont il est question ici concerne la composante inverse des courants ou des tensions calculée par la méthode des composantes symétriques.

2.2.1 Évaluation simplifiée

Le client ayant une installation visée à l'article 1.2 n'est pas tenu de produire d'évaluation détaillée d'émission de déséquilibre dans le réseau de transport si le déséquilibre de son installation équivaut à une charge monophasée de 0,2% ou moins par rapport à la puissance de court-circuit triphasée du réseau en conditions générales d'exploitation. Un calcul alternatif pour vérifier ce critère consiste à évaluer le rapport (I_{inv}/I_{cc} en %) entre le courant de composante inverse de l'installation (I_{inv}) et le courant de court-circuit du réseau (I_{cc}) au point d'évaluation. Le client doit confirmer par écrit à Hydro-Québec la valeur de puissance monophasée équivalente au déséquilibre de charge de son installation pour démontrer qu'il respecte le critère d'évaluation simplifiée (voir aussi 3.7).

2.2.2 Évaluation détaillée

Si une installation visée à l'article 1.2 comprend des charges déséquilibrées dépassant les critères énoncés en 2.2.1 (ex. : fours à arc, fours à induction, charges monophasées ou biphasées, systèmes distribués d'alimentation de trains électriques, etc.), le client doit fournir à Hydro-Québec une étude détaillée des émissions de déséquilibre de charge causées par son installation selon la méthode décrite au chapitre 3. Le client doit ainsi démontrer que son installation est conçue pour respecter les limites suivantes.

2.2.2.1 Limites d'émission de déséquilibre de charge (ou de courant)

Conditions générales : Les limites d'émission de déséquilibre de charge ou de courant à respecter dans les conditions générales d'exploitation ou de fonctionnement sont données au tableau 7. Il s'agit de taux de déséquilibre de courant (I_{inv}/I_r) défini par le rapport entre la composante inverse du courant de charge (I_{inv}) et le courant (I_r) correspondant à la puissance de référence (voir 3.4 et 3.7.1). Les limites sont aussi fonction de la puissance de court-circuit du réseau (S_{cc}) par rapport à la puissance de référence de l'installation du client (S_r). L'interpolation linéaire entre deux valeurs S_{cc}/S_r du tableau suivant, de même qu'une projection des limites pour les valeurs au-delà de 200, sont permises de manière semblable à celle décrite en 2.1.2.1 en remplaçant les

termes (I_n/I_r) par (I_{inv}/I_r) dans l'équation 3. Les cas où le rapport S_{cc}/S_r est inférieur à 5 nécessitent des analyses préalables de la part d'Hydro-Québec pour déterminer les limites d'émission spécifiques et les conditions techniques applicables. Les indications de la référence [6] pourront être utilisées à cet effet.

Hydro-Québec pourra déterminer sur quelle(s) phase(s) le client doit répartir ses charges déséquilibrées de façon à réduire le niveau de déséquilibre résultant de tension dans le réseau.

**Tableau 7 – Limites d'émission de déséquilibre de charge
(taux de composante inverse de courant : I_{inv} / I_r - %).**

S_{cc}/S_r	I_{inv} / I_r (%)
5	4
20	7
50	13
100	20
200	30

NOTES :

7) Définition des indices et symboles du tableau 7 :

Taux de déséquilibre de courant de charge :
$$\frac{I_{inv}}{I_r} \times 100\% \quad (\text{éq. 6})$$

où :

I_{inv} : valeur efficace de la composante inverse du courant à 60Hz dû au déséquilibre de charge de l'installation du client au point d'évaluation (A eff.) (voir 3.7) ;

I_r : valeur efficace du courant de ligne correspondant à la puissance de référence (S_r) de l'installation du client évaluée à la tension nominale au point d'évaluation au réseau haute tension (A eff.) (voir 3.4).

8) Les limites précédentes s'appliquent aux niveaux d'émission de déséquilibre de courant (taux de composante inverse I_{inv}/I_r - voir éq. 6) évalué sur des intervalles d'agrégation de 10 minutes, conformément aux prescriptions de la classe A de la norme CEI 61000-4-30 [3] et aux indications données à la section 3.7.2. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 95% du temps sur une base journalière doivent être inférieurs aux limites d'émission autorisées. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 99% du temps sur une base journalière ne doivent pas dépasser 1,5 fois les limites d'émission autorisées (voir 3.7).

Conditions occasionnelles : De plus, les clients pour lesquels le rapport entre la puissance de court-circuit du réseau en conditions générales d'exploitation et la puissance de référence de l'installation (S_{cc}/S_r) est inférieur à 30, doivent aussi fournir l'évaluation des niveaux d'émission pour les conditions occasionnelles d'exploitation pour s'assurer qu'ils ne dépasseront alors pas 1,5 fois les limites admissibles dans les conditions générales d'exploitation.

2.2.2.2 Limites d'émission de déséquilibre de systèmes de trains électriques

Les limites d'émission de déséquilibre de charge pour le raccordement au réseau de transport de systèmes d'alimentation de trains électriques monophasés ou biphasés en courant alternatif seront définies après une étude préalable de la part d'Hydro-Québec pour déterminer les conditions d'acceptabilité du raccordement compte tenu des conditions du réseau considéré et des autres sources de déséquilibre de tension susceptibles d'être présentes en réseau.

En conditions générales d'exploitation, la contribution au déséquilibre de tension ($G_{U_{inv}}$) due à l'ensemble des charges raccordées à un réseau donné ne doit toutefois pas dépasser 0,4% de taux de tension de composante inverse (V_{inv} / V_1) dans le cas des réseaux à 230 kV et plus, et 0,7% (V_{inv} / V_1) dans le cas des réseaux de 44kV à 161kV inclusivement (ces valeurs tiennent compte d'autres asymétries inhérentes au réseau de transport).

Seulement une portion des contributions globales précédentes ($G_{U_{inv}}$) peut être allouée comme limite d'émission de déséquilibre pour l'alimentation d'un système de traction de train électrique en fonction des caractéristiques du réseau et celles des autres charges selon l'équation suivante (la racine carrée tient compte du fait que les charges déséquilibrées de ce type sont fluctuantes et ne sont généralement pas en phase avec les autres) :

$$E_{U_{inv}} = G_{U_{inv}} \cdot \sqrt{\frac{S_r}{S_t}} \quad (\text{éq. 7})$$

où :

- $E_{U_{inv}}$: Limite d'émission de déséquilibre (tension de composante inverse) admissible de l'installation de trains électriques considérée ;
- $G_{U_{inv}}$: Contribution globale du déséquilibre de charge (tension de composante inverse) admissible dans le réseau considéré (0,4% ou 0,7% selon le niveau de tension);
- S_r : Puissance de référence de l'installation considérée évaluée selon la section 3.4;
- S_t : Puissance totale des installations potentiellement déséquilibrées pouvant être alimentées du réseau HT considéré (MVA) en tenant compte de la charge future.

Si le résultat de l'application de l'équation 7 donne une valeur inférieure à 0,2%, une limite minimale d'émission de déséquilibre $E_{Uinv} = 0,2\%$ sera autorisée. La référence [6] donne des indications supplémentaires à considérer au besoin.

Hydro-Québec pourra déterminer sur quelle(s) phase(s) le client doit répartir ses charges déséquilibrées de façon à réduire le niveau de déséquilibre résultant de tension dans le réseau.

Une fois les limites d'émission déterminées, l'étude des niveaux d'émission à être effectuée par le client suivra les autres principes généraux énoncés à la section 2.2.2.1 et les méthodes décrites au chapitre 3, dont la section 3.7

2.3 VARIATIONS RAPIDES DE TENSION

Les limites suivantes s'appliquent aux variations rapides de la tension efficace pouvant se répéter 10 fois par heure ou moins causées par l'ensemble des charges fluctuantes d'une installation de client. Les variations de tension plus fréquentes sont soumises aux limites d'émission de papillotement traitées à la section 2.4.

Étant donné que ce type de perturbation est généralement simple à évaluer, il n'est pas requis ici de prévoir d'évaluation simplifiée.

2.3.1 Évaluation détaillée

2.3.1.1 Limites d'émission de variations rapides de tension

Conditions générales d'exploitation du réseau: Si une installation visée à l'article 1.2 comprend des charges fluctuantes, le client doit fournir à Hydro-Québec une étude détaillée des émissions de variations rapides de tension causées par son installation selon la méthode décrite au chapitre 3. Le client doit ainsi démontrer que son installation est conçue pour respecter, au point d'évaluation, les limites de variations de tension ($\Delta V/V$) du tableau 8 dans les conditions générales d'exploitation du réseau (voir 3.8.1). Si une installation de client comporte des charges fluctuantes pouvant produire des variations rapides de tension simultanément à plus d'une catégorie de taux de répétition du tableau 8, alors les limites de variations de tension de ces catégories doivent être divisées par $\sqrt[3]{x}$, où x est le nombre de charges fluctuantes en question.

Tableau 8 – Limites d'émission de variations rapides de tension.

Taux de répétition (variations par heure)	Variation de tension $\Delta V / V$ (%)
≤ 2	3
> 2 et ≤ 10	2,5

Note : Une baisse de tension suivie d'une montée, ou vice-versa, constitue deux variations de tension.

NOTES :

- 9) Les transitoires non répétitifs de durée inférieure à 2 cycles ne sont pas visés par ces limites.
- 10) Différemment des autres types de perturbations, les variations rapides de tension sont des perturbations ponctuelles qui doivent être évaluées en considérant les valeurs maximales prévisibles et non les niveaux statistiques en fonction du temps.
- 11) Ces limites doivent être comparées à la différence entre le minimum et le maximum des valeurs efficaces de la tension sur des périodes d'analyse successives de 3 secondes. Les valeurs efficaces de la tension à l'intérieur de chaque période de 3 secondes s'évaluent par sauts de 12 cycles (voir 3.8).

Conditions occasionnelles d'exploitation du réseau: En conditions occasionnelles d'exploitation du réseau, la limite de variations rapides de tension au point d'évaluation de l'installation de client ne doit pas dépasser 2 fois les limites admissibles dans les conditions générales d'exploitation.

2.4 PAPILLOTEMENT

Les limites suivantes s'appliquent aux variations cycliques ou répétitives de tension pouvant causer des changements répétitifs de luminosité de l'éclairage. Elles sont attribuables à des charges fluctuantes comme les fours à arc ou à induction, les soudeuses électriques, les procédés à puissance variable – presses, treuils, laminoirs – les démarrages fréquents de moteurs, ou à des variations rapides de puissance produite de génératrices ou d'éoliennes, etc.

2.4.1 Évaluation simplifiée

Le client ayant une installation visée à l'article 1.2 n'est pas tenu de produire d'évaluation détaillée des émissions de papillotement transmises dans le réseau de transport si les variations de tension causées par son installation sont inférieures aux limites du tableau 9 dans les conditions générales d'exploitation. Le client doit cependant confirmer

par écrit à Hydro-Québec les variations de tension produites par son installation en fonction de leur taux de répétition pour démontrer qu'il respecte les limites suivantes. Ces limites concernent les variations de tension ($\Delta V/V$) résultant de l'ensemble des charges fluctuantes de l'installation d'un client. Les limites sont fonction du nombre de variations par minute au point d'évaluation (les variations moins fréquentes que 0,17 fois/minute sont soumises aux limites du tableau 8 section 2.3.1.1). Si une installation de client comporte des charges fluctuantes pouvant produire des variations de tension simultanément dans plusieurs catégories de taux de répétition du tableau 9, alors les limites de variations de tension correspondantes doivent alors être divisées par un facteur $\sqrt[3]{x}$, où x est le nombre total de charges fluctuantes en question.

Tableau 9 – Limites de papillotement – évaluation simplifiée

Taux de répétition (Variations par minute)	Variation de tension $\Delta V/V$ (%)
> 0,17 et \leq 0,5	1,5
> 0,5 et \leq 1	0,8
>1 et \leq 10	0,4
>10 et \leq 200	0,2
> 200	0,1

Remarques : Une baisse de tension suivie d'une montée, ou vice-versa, constitue deux variations de tension.

2.4.2 Évaluation détaillée

2.4.2.1 Détermination des limites

Conditions générales : Si une installation visée à l'article 1.2 comprend des charges fluctuantes (ex. : fours à arc ou à induction, procédés de soudure électrique, treuils, laminoirs, génératrices variables ou éoliennes, etc.) dépassant les critères énoncés en 2.4.1, le client doit fournir à Hydro-Québec une étude détaillée des émissions de papillotement causées par son installation selon la méthode décrite au chapitre 3. Le client doit ainsi démontrer que son installation est conçue pour respecter la limite en conditions générales d'exploitation ou de fonctionnement.

Hydro-Québec déterminera, pour chaque cas, la limite d'émission de papillotement applicable à une installation de client sur la base des caractéristiques du réseau considéré et des indications fournies à la référence [5]. Cette limite sera établie en

allouant une portion du niveau global de papillotement admissible dans le réseau en fonction du rapport entre la puissance de référence du client et la capacité d'alimentation du réseau selon l'équation suivante (si le résultat de l'application de l'équation 8 donne une valeur inférieure à 0,3 pour une installation de client, une limite minimale d'émission de papillotement $E_{Pst} = 0,3$ sera autorisée) :

$$E_{Pst} = L_{Pst} \sqrt[3]{\frac{S_r}{S_{tP}}} \quad (\text{Nombre sans unités}) \quad (\text{éq. 8})$$

où :

- E_{Pst} : Limite d'émission de papillotement pour l'indice P_{st} permise à l'installation de client considérée ;
- L_{Pst} : Niveau de papillotement global admissible en H.T. - $L_{Pst} = 0,8$ [5]
- S_r : Puissance de référence de l'installation du client (MVA) évaluée selon la section 3.4;
- S_{tP} : Puissance totale des charges fluctuantes alimentées du réseau HT considéré (MVA) pour le partage du papillotement entre clients d'un réseau en tenant compte de la charge future. La puissance S_{tP} sera évaluée par Hydro-Québec selon les caractéristiques de l'ensemble des charges fluctuantes pouvant être raccordées au réseau considéré compte tenu des indications fournies à la référence [5].

NOTES POUR L'APPLICATION DE L'ÉQUATION 8:

- 12) Les limites précédentes doivent être comparées aux valeurs de l'indice de papillotement P_{st} évalué sur des intervalles d'agrégation de 10 minutes selon la norme CEI 61000-4-15 [7] et aux prescriptions de la classe A définies dans la norme CEI 61000-4-30 [3] avec adaptation pour les lampes à 120 V. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 95% du temps sur une base journalière doivent être inférieurs aux limites d'émission autorisées. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 99% du temps sur une base journalière ne doivent pas dépasser 1,25 fois les limites d'émission autorisées (voir 3.9).
- 13) Il peut arriver que le niveau de fond de papillotement (B_{Pst}) déjà présent dans le réseau causé par l'ensemble des charges existantes (ΣS_i) soit plus élevé que la part normale (la «part normale» étant proportionnelle à $\sqrt[3]{(S_{tP} - \Sigma S_i)/S_{tP}}$) et doive être pris en compte pour éviter de dépasser les niveaux globalement admissibles dans le réseau. Dans l'équation (8), il faut alors remplacer L_{Pst} par $\sqrt[3]{\left(\frac{3}{L_{Pst} - B_{Pst}}\right)^3}$.

Conditions occasionnelles : De plus, les clients pour lesquels le rapport entre la puissance de court-circuit du réseau en conditions générales d'exploitation et la puissance de référence de l'installation (S_{cc}/S_r) est inférieur à 30, doivent aussi fournir l'évaluation des niveaux d'émission pour les conditions occasionnelles d'exploitation pour s'assurer qu'ils ne dépasseront alors pas 1,5 fois les limites admissibles dans les conditions générales d'exploitation.

3 Méthodes d'évaluation des niveaux d'émission

3.1 ÉTUDE D'ÉMISSION

3.1.1 Besoin d'une étude d'émission

Si une installation visée à l'article 1.2 ne respecte pas les critères d'évaluation simplifiée des sections 2.1.1, ou 2.2.1, ou 2.4.1, le client doit alors fournir à Hydro-Québec une étude détaillée des émissions de perturbations causées par ses installations dans le réseau de transport afin de démontrer qu'elles sont conçues pour respecter les limites d'émission autorisées selon les méthodes d'évaluation décrites dans ce document.

Un changement de la puissance de référence, la modification des caractéristiques, ou l'ajout d'équipements perturbateurs pouvant faire augmenter les niveaux d'émission au-delà des limites permises pour l'installation de client nécessitent, au préalable, une nouvelle étude d'émission de la part du client (voir 1.2). On entend par modifications des caractéristiques d'une installation, non seulement les caractéristiques de l'appareillage ou la puissance de l'installation, mais toute modification de fonctionnement pouvant augmenter les niveaux d'émission de perturbations. Cela inclut notamment des modifications à l'amplitude ou aux taux de répétition des appels de puissance active ou réactive, au mode de connexion des équipements perturbateurs, à l'indice de pulsation de groupes de convertisseurs ou aux décalages angulaires entre ceux-ci, aux caractéristiques des filtres, des condensateurs, aux caractéristiques triphasées affectant les déséquilibres de charge ou de courant, ou toute modification aux cycles de charge, aux durées de fonctionnement ou d'arrêt, aux taux de répétition des perturbations, aux fréquences de démarrage, etc., en somme, toute modification pouvant faire augmenter les niveaux d'émission de perturbations au-delà des limites permises.

3.1.2 Exigences générales de l'étude d'émission

L'étude des émissions de perturbations produites par les installations d'un client doit être une étude faite par un ingénieur (le titre et l'exercice de la profession d'ingénieur sont assujettis aux lois, codes ou règlements applicables au Québec) et elle doit tenir compte des méthodes et limites définies dans le présent document (les données et résultats que doit contenir l'étude d'émission sont décrits au chapitre 4). Cette étude devra être soumise pour acceptation par Hydro-Québec – TransÉnergie dans les délais convenus avant le raccordement de l'installation ou des équipements perturbateurs au réseau de transport (voir chapitre 5).

3.1.3 Vérification de l'étude d'émission

La vérification effectuée par Hydro-Québec des résultats de l'étude d'émission du client et l'acceptation visent uniquement à s'assurer que les installations du client sont conçues pour respecter les présentes limites d'émission admissibles dans le réseau de transport. Il est à noter que même si les limites d'émission sont respectées au point d'évaluation au réseau de transport d'Hydro-Québec, cela ne constitue pas une garantie de bon fonctionnement des équipements du client. Il est possible que le niveau de perturbation présent dans l'installation du client soit trop élevé pour assurer le fonctionnement adéquat de certains de ses équipements. Une limitation supplémentaire des émissions pourrait alors être requise du côté de l'installation du client selon les besoins propres à ses équipements.

Le choix et la conception des équipements requis pour respecter les limites d'émission sont la responsabilité du client. S'il y a lieu, les restrictions d'opération permettant au client de se conformer aux limites d'émission doivent être consignées comme conditions de raccordement et être respectées.

Hydro-Québec pourra demander au client de réaliser, lors de la mise en service de ses installations, des mesures des niveaux d'émission selon un protocole accepté par Hydro-Québec afin de vérifier la validité des données sur les installations du client ainsi que les résultats présentés dans l'étude d'émission. Les mesures n'ont pas pour but de remplacer l'étude d'émission préalable au raccordement ou à l'addition d'équipements perturbateurs.

Hydro-Québec peut aussi faire des mesures en tout temps pour vérifier qu'une installation de client respecte effectivement les limites d'émission autorisées.

3.2 POINT D'ÉVALUATION

Le point d'évaluation spécifié est un point situé du côté du réseau de transport à haute tension où doivent être évalués les niveaux d'émission d'une installation de client donnée par rapport aux limites d'émission autorisées. Lorsque d'autres installations de clients peuvent être raccordées à proximité de celle considérée, le point d'évaluation sera généralement le point de raccordement, ou le côté haute tension des transformateurs si le point de raccordement se situe du côté basse tension des transformateurs. Selon les caractéristiques spécifiques du réseau et la possibilité qu'il y ait d'autres installations de clients raccordées à proximité, un autre point d'évaluation peut être spécifié par le Transporteur.

L'évaluation se fait au niveau de tension nominale du réseau au point d'évaluation. La détermination des limites applicables et l'évaluation des niveaux d'émission peuvent toutefois nécessiter la prise en compte de paramètres ou de caractéristiques de réseau allant de part et d'autre du point d'évaluation. Si une installation de client comporte plusieurs points de raccordement au réseau de transport, l'évaluation doit être faite au(x) point(s) de d'évaluation spécifié(s) par le Transporteur et selon les caractéristiques et puissances de référence applicables à chaque point d'évaluation, le cas échéant.

3.3 PUISSANCE DE COURT-CIRCUIT DU RÉSEAU (S_{cc})

La puissance de court-circuit du réseau sert à déterminer les valeurs des limites d'émission applicables et à permettre au client d'évaluer certains niveaux d'émission comme les variations rapides de tension ou le papillotement. La puissance de court-circuit triphasée (S_{cc}) du réseau de transport sera évaluée par Hydro-Québec en tenant compte des variations possibles du niveau de production d'électricité des centrales, des manœuvres d'équipements en fonction des variations de charge ainsi que des indisponibilités ou retraits d'équipements correspondant aux définitions des conditions générales ou occasionnelles selon le cas. Il faut aussi considérer les réseaux actuels et futurs. À noter que pour l'évaluation détaillée des niveaux d'émission d'harmoniques, le client doit utiliser les lieux d'impédance harmonique conformément à la section 3.6.1.

En pratique, on définit souvent le niveau de court-circuit par le biais du courant de court-circuit symétrique (I_{cc}). Pour les fins de ce document, la puissance de court-circuit triphasée (S_{cc}) peut être calculée en faisant le produit du courant de court-circuit triphasé (I_{cc}) et de la tension nominale (V_{nom}) au point d'évaluation fois $\sqrt{3}$ ($S_{cc} = \sqrt{3} \cdot I_{cc} \cdot V_{nom}$). Quant à l'angle de l'impédance de court-circuit du réseau (θ) utilisé notamment pour calculer les variations rapides de tension, il est généralement défini par le rapport X/R fourni avec les données de courts-circuits du réseau $\{\theta = \arctan(X/R)\}$.

Pour les installations de clients où une évaluation des niveaux d'émission est aussi requise en conditions occasionnelles d'exploitation ou de fonctionnement, la valeur de la puissance de court-circuit du réseau sera évaluée par Hydro-Québec en retenant le pire cas d'indisponibilité d'équipements (ex. : lignes, transformateurs) susceptible statistiquement de se produire jusqu'à 5% du temps annuellement. Il faut considérer les réseaux actuels et futurs.

3.4 PUISSANCE DE RÉFÉRENCE (S_r) / COURANT DE RÉFÉRENCE (I_r)

La puissance de référence utilisée dans les études d'émission correspond à la puissance prévue de l'installation de client en MVA. Elle sert de base pour déterminer les limites

d'émission applicables à une installation donnée et pour évaluer les niveaux d'émission de l'installation pour en vérifier la conformité par rapport aux limites. Le courant de référence (I_r) aussi utilisé à cette fin est le courant de ligne calculé à partir de la puissance de référence triphasée (S_r) et de la tension nominale du réseau (V_{nom}) au point d'évaluation de l'installation du client $\{I_r = S_r / (\sqrt{3} \cdot V_{nom})\}$. Dans le cas de charges déséquilibrées (incluant celles biphasées ou monophasées), le courant de référence est calculé en faisant la moyenne des courants de ligne des 3 phases.

3.5 CONDITIONS D'EXPLOITATION OU DE FONCTIONNEMENT À CONSIDÉRER

Pour évaluer les niveaux d'émission de perturbations provenant de son installation dans les conditions générales d'exploitation ou de fonctionnement, le client doit tenir compte des conditions simultanées les plus défavorables ainsi que les fonctionnements fréquents ou prolongés, généralement en mode n-1, qui, dans leur ensemble, sont susceptibles statistiquement de se produire plus de 5% du temps annuellement. Par exemple, du côté de l'installation du client, on considérera l'indisponibilité d'un groupe de redresseurs faisant partie d'une installation d'indice de pulsation plus élevé. Du côté du réseau, on détermine par exemple ces conditions sur la base des taux d'indisponibilité moyens de l'appareillage majeur. Il faut considérer les réseaux actuels et futurs.

D'autres conditions d'opération spécifiques liées au réseau local ou aux particularités d'une installation de client pourront aussi être spécifiées par Hydro-Québec lors de l'étude de raccordement d'une installation de client. Celles-ci devront être prises en compte par le client dans le calcul des niveaux d'émission de son installation.

De plus, pour les harmoniques, le déséquilibre et le papillotement, les clients pour lesquels le rapport entre la puissance de court-circuit du réseau en conditions générales d'exploitation et la puissance de référence de l'installation (S_{cc}/S_r) est inférieur à 30, doivent aussi fournir une évaluation des niveaux d'émission pour les conditions occasionnelles d'exploitation ou de fonctionnement. Dans le cas des variations rapides de tension, cela s'applique à toute installation. Les conditions occasionnelles sont des conditions d'exploitation ou de fonctionnement du côté du réseau ou de l'installation de client qui peuvent produire des niveaux d'émission plus élevés jusqu'à 5% du temps annuellement. Elles correspondent souvent à des régimes anormaux d'exploitation dus à des indisponibilités ou des retraits peu fréquents d'équipements. Du côté de l'installation du client, il faudra considérer les indisponibilités d'équipements en mode dégradé pouvant se produire de façon occasionnelle et donner lieu à des niveaux d'émission

accrus, par exemple, indisponibilité de plusieurs groupes de redresseurs, indisponibilité de filtres ou de condensateurs servant au filtrage des harmoniques, etc.

3.6 NIVEAUX D'ÉMISSION D'HARMONIQUES

Les niveaux d'émission d'harmoniques doivent être évalués en considérant les harmoniques caractéristiques et non caractéristiques de rangs n de 2 à 50 causées par l'ensemble des équipements perturbateurs d'une installation de client. Les limites d'émission de courants harmoniques et d'influence téléphonique s'appliquent aux courants de ligne des trois phases, et la pire phase affectée doit respecter les limites.

3.6.1 Évaluation des niveaux d'émission d'harmoniques et lieux d'impédance

Les lieux d'impédance harmonique du réseau servent d'intrants pour évaluer les niveaux d'émission d'harmoniques. Les lieux d'impédance harmonique du réseau au point d'évaluation d'une installation sont fournis par Hydro-Québec pour différentes conditions d'exploitation du réseau correspondant aux conditions générales et, au besoin, aux conditions occasionnelles d'exploitation.

Pour déterminer les niveaux d'émission en conditions générales d'exploitation, les lieux d'impédance harmonique du réseau seront évalués en considérant toutes les manœuvres et les retraits fréquents ou prolongés d'équipements qui, dans leur ensemble, sont susceptibles statistiquement de se produire pendant plus de 5 % du temps annuellement (toutes ces conditions cumulées devraient donc représenter les conditions générales d'exploitation couvrant 95% du temps annuellement). On considérera les conditions de réseau actuelles et futures prévisibles.

Pour les installations de clients devant faire aussi l'objet d'une évaluation des niveaux d'émission en conditions occasionnelles (lorsque le rapport entre la puissance de court-circuit en conditions générales d'exploitation et la puissance de référence (S_{cc}/S_r) est inférieur à 30), les lieux d'impédance harmonique du réseau seront évalués par Hydro-Québec en tenant compte des indisponibilités d'équipements (ex. : lignes, transformateurs) qui, dans leur ensemble sont susceptibles statistiquement de se produire jusqu'à 5 % du temps annuellement. Les conditions de réseau actuelles et futures prévisibles seront considérées.

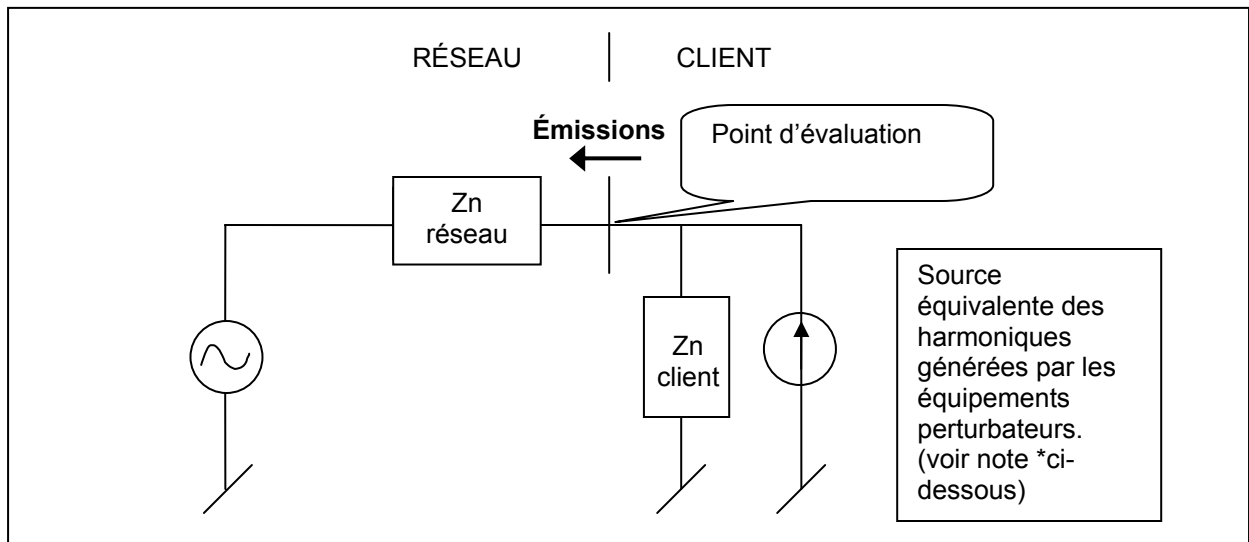
Les lieux d'impédance du réseau d'H.-Q. n'incluent pas l'effet des installations du client, mais le client doit en tenir compte dans l'évaluation de ses niveaux d'émission. L'interaction entre l'installation du client et le réseau, notamment l'interaction entre les

condensateurs ou les filtres du client et le réseau peut créer des résonances. Ces résonances peuvent causer une amplification des émissions d'harmoniques produites par l'installation du client et les limites d'émission doivent être respectées en tenant compte des résonances possibles.

Après avoir évalué les sources d'harmoniques (caractéristiques et non caractéristiques) de rangs n de 2 à 50 des équipements perturbateurs de son installation en tenant compte des indications données aux sections 3.5 et 3.6.2 notamment, le client devra calculer les niveaux maxima d'émission de courants harmoniques au point d'évaluation en choisissant, dans les lieux d'impédance, la valeur qui maximise l'indice calculé pour chaque rang harmonique. Ceci implique qu'on doit faire des itérations successives ou utiliser un algorithme d'optimisation approprié pour déterminer les combinaisons d'impédance du réseau (lieux d'impédance) et d'impédance de l'installation du client qui maximisent le courant harmonique ou l'indice calculé (pour plus de détails, voir l'annexe A).

Étant donné que le taux de distorsion totale du courant (indice TDD_c selon l'équation 2) cumule les effets de plusieurs rangs harmoniques, il peut être évalué pour différentes conditions d'exploitation ou de fonctionnement en utilisant les niveaux d'émission de courants harmoniques correspondant à des conditions ou ensembles de conditions simultanées possibles.

La figure suivante montre un équivalent simplifié dans lequel une source de courant représente les harmoniques générées par les équipements perturbateurs de l'installation d'un client. Le niveau d'émission est le courant harmonique de ligne le plus élevé des trois phases circulant au point d'évaluation et exprimé en pourcentage du courant de référence (I_n/I_r) (voir 3.4).



Note* : Cette figure représente, de façon simplifiée, les équipements perturbateurs du client par une source équivalente de courants harmoniques. Cette simplification n'a pas pour but de restreindre l'utilisation de modèles de simulation plus détaillés lorsque requis. Par exemple, on peut représenter les sources de courant avec leurs angles pour chaque groupe de redresseurs avec leurs filtres respectifs, ou on peut adapter le circuit et ses paramètres selon les résultats de modèles détaillés de convertisseurs pour évaluer les harmoniques non caractéristiques.

Figure 1: Schéma équivalent pour l'évaluation des émissions d'harmoniques

Des indications sont données à la section suivante sur les conditions de fonctionnement à considérer pour l'évaluation des harmoniques non caractéristiques générées par les équipements perturbateurs compte tenu des conditions non idéales de fonctionnement.

Tel que mentionné plus tôt, à cause de la variabilité de l'impédance harmonique du réseau et de l'installation du client, les calculs nécessitent généralement l'utilisation de programmes informatiques et d'algorithmes d'optimisation pour déterminer les valeurs d'impédance harmonique qui maximisent les niveaux d'émission calculés pour chaque rang harmonique (pour plus de détails, voir l'annexe A).

Les résultats que doit contenir l'étude d'émission sont définis au chapitre 4.

3.6.2 Émission d'harmoniques non caractéristiques

Dans la pratique, on rencontre inévitablement un certain degré de dissymétrie dans le réseau d'alimentation et dans les installations de clients pouvant causer la production d'harmoniques dites non caractéristiques.

Le client doit évaluer et inclure ces harmoniques non caractéristiques dans le calcul des émissions de ses installations et tenir compte qu'elles peuvent être amplifiées par les

résonances. Les conditions non idéales suivantes sont des conditions minimales qui doivent être prises en compte par le client afin d'évaluer toutes les sources d'harmoniques et vérifier la conformité de ses installations par rapport aux limites d'émission : (selon le cas, il peut y avoir d'autres facteurs à considérer affectant la génération d'harmoniques)

- *déséquilibre de la tension d'alimentation*: la présence d'une composante inverse dans la tension d'alimentation triphasée produira généralement des harmoniques non caractéristiques impairs multiples de trois (à noter que ces dernières n'étant pas de composante homopolaire, elles ne sont pas bloquées par le type de connexion des enroulements de transformateurs). À titre de conditions non idéales d'exploitation du réseau, il faudra tenir compte dans l'évaluation des harmoniques d'un déséquilibre de tension en régime permanent se situant entre 1% et 2% selon le niveau de tension du réseau [1], valeur à laquelle le client devra ajouter l'effet du déséquilibre produit par ses propres installations ;
- *réduction de l'indice de pulsation* : indisponibilités/déséquilibres de groupes de redresseurs faisant partie d'une installation d'indice de pulsation plus élevé, ayant comme conséquence la production d'harmoniques non caractéristiques de rangs 5, 7, 11, 13, etc. ;
- *transformateurs de convertisseurs et déséquilibre de l'impédance de commutation*: les tolérances de fabrication sur le rapport de transformation (pas tout à fait égal à $\sqrt{3}$) et sur les réactances entre deux transformateurs d'un convertisseur dodécaphasé font apparaître des harmoniques non caractéristiques. La dissymétrie de l'impédance de commutation entre phases cause des harmoniques non caractéristiques qui dépend aussi des couplages des transformateurs ;
- *dissymétries des angles d'allumage* : les écarts sur les instants d'allumage des semi-conducteurs génèrent des harmoniques de rangs quelconques. Ces écarts dépendent de la conception des circuits d'allumage ;
- *désaccord des filtres*: Lorsque des filtres harmoniques sont nécessaires pour respecter les limites d'émission, l'évaluation de la performance vis-à-vis des émissions harmoniques doit également tenir compte des variations des fréquences d'accords, particulièrement celles dues aux paramètres suivants :
 - *variation de la fréquence du réseau principal de $\pm 0,2$ Hz* pouvant survenir en régime permanent;
 - *désaccord des filtres* dû aux écarts sur la valeur des composants, qu'il s'agisse de tolérances de fabrication ou au désaccord initial, ou de

variations liées à la température ou au vieillissement des composants du filtre.

Par ailleurs, en ce qui concerne le dimensionnement des filtres, les concepteurs de filtres ont généralement besoin de tenir compte des perturbations pouvant provenir du réseau d'alimentation. À cet effet, le document *Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par le réseau de transport d'Hydro-Québec* [1] donne à titre indicatif les niveaux de perturbations susceptibles d'être présents dans le réseau de transport d'Hydro-Québec dans les conditions habituelles d'exploitation.

3.6.3 Mesure des niveaux d'émission d'harmoniques

La mesure des niveaux d'émission d'harmoniques d'une installation de client peut être requise notamment lorsque les niveaux d'émission présentent des risques de dépassement des limites ou pour s'assurer qu'une installation respecte effectivement les limites d'émission autorisées. Les mesures n'ont pas pour but de remplacer l'étude d'émission préalable au raccordement ou à l'addition d'équipements perturbateurs.

Les indications suivantes sont de nature générale et elles seront complétées au besoin par un protocole de mesure accepté par Hydro-Québec qui sera établi en tenant compte des particularités propres à chaque installation de client et au réseau qui l'alimente.

Les limites d'émission doivent être comparées aux valeurs des indices de courants harmoniques (courants de ligne des 3 phases) de rangs 2 à 50 évalués sur des intervalles d'agrégation de 10 minutes (voir aussi note 4 en 2.1.2.1) selon la norme CEI 61000-4-7 [2] et aux prescriptions de la classe A définies dans la norme CEI 61000-4-30 [3]. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 95% du temps sur une base journalière doivent être inférieurs aux limites d'émission autorisées. Cette valeur correspond à la valeur maximale obtenue en écartant 5% des valeurs sur 10 minutes enregistrées pendant la journée en commençant par les valeurs les plus élevées. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 99% du temps sur une base journalière ne doivent pas dépasser 1,5 fois les limites d'émission autorisées. Cette valeur correspond à la valeur maximale obtenue en écartant 1% des valeurs sur 10 minutes enregistrées pendant la journée en commençant par les valeurs les plus élevées. Ces évaluations sont faites en excluant les données marquées comme non-valides selon les indications de la norme CEI 61000-4-30.

Lorsque les harmoniques fluctuent rapidement et constamment, la mesure des harmoniques devrait se faire par la méthode des groupes et sous-groupes plutôt que par les composantes harmoniques tel qu'expliqué dans la norme CEI 61000-4-7.

3.6.4 Niveaux d'influence téléphonique

Pour les installations de clients respectant les conditions d'évaluation simplifiée décrites à la section 2.1.1, aucune évaluation des niveaux d'influence téléphonique n'est exigée.

Pour les autres cas, l'indice d'influence téléphonique $I \cdot T_{\text{équilibré}}$ se calcule à l'aide de l'équation 5 avec les valeurs des niveaux d'émission de courants harmoniques de rangs 2 à 50 évalués selon les méthodes décrites précédemment. Cependant, étant donné que l'indice d'influence cumule les effets de plusieurs rangs harmoniques, cet indice peut être évalué pour différentes conditions d'exploitation ou de fonctionnement en utilisant les niveaux d'émission de courants harmoniques correspondant à des conditions ou ensembles de conditions simultanées possibles. Le pire cas ainsi obtenu doit respecter les limites d'émission.

Dans le cas où un client désire se prévaloir de la limite spécifique de l'indice $I \cdot T_{\text{équilibré}}$ de $30000 A_{\text{pondérés}}$, il doit aussi fournir dans son étude d'émission l'évaluation détaillée des paramètres requis pour démontrer qu'au moins un des critères d'acceptabilité du tableau 5 est respecté. L'évaluation de ces paramètres de la part du client requiert un relevé détaillé des caractéristiques géographiques et électriques des circuits téléphoniques situés au voisinage (< 10 km) des lignes électriques touchées. Les lignes de transport touchées à être analysées par le client pour faire sa démonstration d'applicabilité des limites spécifiques seront déterminées par le Transporteur. Les lignes à analyser peuvent inclure des lignes ou des sections de lignes qui ont un lien électrique avec la(les) ligne(s) desservant l'installation considérée et par où peut circuler plus de 50% des harmoniques critiques émises par l'installation considérée.

L'évaluation des paramètres des critères d'acceptabilité est basée sur les définitions et les références suivantes :

- L_{eq} : Longueur équivalente totale de parallélisme des circuits téléphoniques individuels avec les lignes électriques touchées par les harmoniques émises par une installation de client (km). Il s'agit de la longueur totale des segments obtenus par projection sur les circuits téléphoniques des perpendiculaires aux lignes électriques touchées selon les méthodes décrites aux sections 5.128 à 5.138 à la référence [8] ;
- S_{min} : Distance minimale de séparation équivalente entre les lignes électriques touchées et les circuits téléphoniques. Il s'agit de la plus courte distance équivalente de séparation des segments déterminée selon la méthode décrite aux sections 5.128 à 5.138 à la référence [8] ;
- ρ_{eq} : Résistivité équivalente du sol à 1000 Hz le long des lignes électriques touchées. La résistivité équivalente considère un sol à deux couches et s'évalue selon les indications fournies à la référence [9], vol. II, section 4.1.11.2 pp. 171-175.

Z_m : Impédance mutuelle (mode terre à 1000 Hz) entre les circuits téléphoniques individuels et les lignes électriques touchées. Il s'agit de l'impédance mutuelle cumulative des segments de circuits téléphoniques individuels. On utilisera, pour chaque segment de circuit téléphonique, l'équation (5-40) de la référence [8] pour évaluer l'impédance mutuelle à 1000 Hz.

3.7 NIVEAUX D'ÉMISSION DE DÉSÉQUILIBRE DE CHARGE

Les limites d'émission s'appliquent aux déséquilibres de charge ou de courant des installations de clients causés par l'ensemble des charges déséquilibrées d'une installation de client et pouvant causer des déséquilibres de tension dans le réseau. Le déséquilibre dont il est question ici concerne la composante inverse du courant ou de la tension calculée par la méthode des composantes symétriques. Les limites d'émission de déséquilibre de courant s'appliquent aux courants de ligne des trois phases au point d'évaluation avec le réseau.

Pour l'évaluation simplifiée, il est fait référence à la section 2.2.1 à la valeur de la charge monophasée équivalente au déséquilibre de charge ou de courant d'une installation. Voici quelques exemples simples :

- Installation consistant en une charge monophasée totalisant 2 MVA raccordée phase-neutre ou phase-phase : la valeur de la charge monophasée équivalente est de 2 MVA.
- Installation dont les puissances sont de 10-12-10 MVA respectivement sur les 3 phases, ou encore de 12-10-12 MVA : la charge monophasée équivalente au déséquilibre est de 2 MVA dans les deux cas en supposant que les facteurs de puissance soient semblables sur les trois phases.

Dans les situations moins évidentes, il est préférable de calculer la valeur du courant de composante inverse selon l'équation 9 (voir ci-après) et d'utiliser le critère alternatif mentionné en 2.2.1 consistant à calculer le rapport (I_{inv}/I_{cc} en %).

3.7.1 Évaluation du courant de déséquilibre de charge

Un système déséquilibré s'évalue au moyen de la méthode des composantes symétriques. Le client dont l'installation consomme ou produit des puissances déséquilibrées entre les trois phases doit faire une évaluation du courant de déséquilibre à 60 Hz (composante inverse) produit par son installation compte tenu de ses caractéristiques de fonctionnement (voir aussi 3.5).

Dans le cas d'une charge monophasée simple raccordée ligne-ligne par exemple, le courant de composante inverse correspond à 0,577 fois le courant de la charge

monophasée. De façon générale, le courant de composante inverse s'évalue à partir des courants de ligne au point d'évaluation selon l'équation suivante :

$$I_{inv} = \frac{1}{3} (I_A + a^2 I_B + a I_C) \quad (\text{éq. 9})$$

où :

I_{inv} : composante inverse du courant correspondant au déséquilibre de charge (ou de courant) de l'installation de client au point d'évaluation ;

I_A, I_B, I_C : courants de ligne des trois phases A,B,C respectivement au point d'évaluation ou de raccordement de l'installation de client ;

a : opérateur vectoriel de transformation en composantes symétriques tel que : $a = 1 e^{j120^\circ}$ et $a^2 = 1 e^{j240^\circ}$.

Dans les cas complexes, l'évaluation du déséquilibre nécessiterait l'utilisation de modèles et d'outils informatiques appropriés.

À noter que ces limites d'émission ne s'appliquent pas aux courants de composante inverse résultant du déséquilibre de tension du réseau et qui ne seraient pas dus à des charges ou à des puissances déséquilibrées de l'installation du client.

3.7.2 Mesure des niveaux d'émission de déséquilibre de charge

La mesure des niveaux d'émission de déséquilibre d'une installation de client peut être requise notamment lorsque les niveaux d'émission présentent des risques de dépassement des limites ou bien pour s'assurer qu'une installation respecte effectivement les limites d'émission autorisées. Les mesures n'ont pas pour but de remplacer l'étude d'émission préalable au raccordement ou à l'addition d'équipements perturbateurs.

Les indications suivantes sont de nature générale et elles seront complétées au besoin par un protocole de mesure accepté par Hydro-Québec qui sera établi en tenant compte des particularités propres à chaque installation et au réseau qui l'alimente.

Les limites d'émission doivent être comparées au taux de déséquilibre de courant de l'installation (équation 6) évalué sur des intervalles d'agrégation de 10 minutes selon la norme CEI 61000-4-30 [3] en transposant, pour la mesure des courants de composante inverse, les indications qu'elle fournit pour la mesure du déséquilibre de tension (composante inverse). Les limites de déséquilibre concernent les valeurs à 60 Hz. Les niveaux d'émission correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 95% du temps sur une base journalière doivent être inférieurs aux limites d'émission autorisées. Cette valeur correspond à la valeur maximale obtenue en écartant 5% des

valeurs sur 10 minutes enregistrées pendant la journée en commençant par les valeurs les plus élevées. Les niveaux mesurés correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 99% du temps sur une base journalière ne doivent pas dépasser 1,5 fois les limites d'émission autorisées. Cette valeur correspond à la valeur maximale obtenue en écartant 1% des valeurs sur 10 minutes enregistrées pendant la journée en commençant par les valeurs les plus élevées. Ces évaluations sont faites en excluant les données marquées comme non-valides selon les indications de la norme CEI 61000-4-30.

3.8 NIVEAUX D'ÉMISSION DE VARIATIONS RAPIDES DE TENSION

Les limites d'émission s'appliquent aux variations rapides de la tension efficace causées par l'ensemble des charges fluctuantes d'une installation de client. Les variations rapides de tension plus fréquentes que 10 fois par heure sont soumises aux limites d'émission de papillotement traitées en 2.4. Les limites d'émission de variations rapides de tension s'appliquent aux tensions des trois phases, et la pire phase affectée doit respecter les limites. Tel que mentionné en 2.3.1.1, les variations rapides de tension sont des perturbations ponctuelles; elles doivent donc être évaluées en considérant les valeurs maximales et non les niveaux statistiques en fonction du temps.

3.8.1 Évaluation des variations rapides de tension.

Le client, dont l'installation comprend des charges fluctuantes, doit fournir une étude des niveaux d'émission de variations rapides de tension produites par l'ensemble des charges de son installation compte tenu de leurs caractéristiques (voir aussi 3.5). À cette fin, Hydro-Québec fournira au client les niveaux de courts-circuits et autres données du réseau requises au point d'évaluation (voir 3.3). Les niveaux d'émission de variations rapides de tension doivent être évalués pour les conditions générales d'exploitation ou de fonctionnement ainsi que pour les conditions occasionnelles tel que stipulé à la section 2.3.1.1.

Dans le cas simple de démarrages de moteurs ou d'équipements où les variations de puissance réactive dominant, la variation rapide de tension peut être obtenue par :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta Q_{\max}}{S_{cc}} \cdot 100\% \quad (\text{éq. 10})$$

Dans le cas de variations simultanées de puissance actives et réactives, il est généralement possible d'approximer la variation rapide de tension par :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P \cos \theta + \Delta Q \sin \theta}{S_{cc}} 100 \quad (\%) \quad (\text{éq. 11})$$

où :

- $\Delta P, \Delta Q$: variations de puissance triphasée active et réactive de l'installation du client (MW, MVAR) (on peut tenir compte des situations où les variations de puissances active et réactive auraient des effets opposés sur la tension en leur attribuant des signes différents dans l'équation 11).
- θ : Angle de l'impédance de court-circuit du réseau d'alimentation (généralement défini par le rapport X/R tel que : $\theta = \arctan (X/R)$).
- S_{cc} : Puissance de court-circuit triphasée du réseau au point d'évaluation (MVA) (voir 3.3).

Dans le cas de charges déséquilibrées, les calculs doivent être faits en utilisant des logiciels de simulation appropriés.

3.8.2 Mesure des niveaux d'émission de variations rapides de tension.

La mesure des niveaux d'émission de variations rapides de tension causées par une installation de client peut être requise notamment lorsque les niveaux d'émission présentent des risques de dépassement des limites ou bien pour s'assurer qu'une installation respecte effectivement les limites d'émission autorisées. Les mesures n'ont pas pour but de remplacer l'étude d'émission préalable au raccordement ou à l'addition d'équipements perturbateurs.

Les indications suivantes sont de nature générale et elles seront complétées au besoin par un protocole de mesure accepté par Hydro-Québec qui sera établi en tenant compte des particularités propres à chaque installation et au réseau qui l'alimente.

La méthode suivante de mesure des variations rapides de tension est basée sur le rapport IREQ 99-220 [10]. Elle consiste à évaluer la différence entre le minimum et le maximum des valeurs efficaces de la tension sur des périodes d'analyse successives de 3 secondes pourvu qu'elles se situent dans la plage de $\pm 10\%$ de la tension nominale. Les valeurs efficaces de la tension à l'intérieur de chaque période de 3 secondes s'évaluent par sauts de 12 cycles. Chaque variation de tension s'exprime en pourcentage de la moyenne des tensions efficaces enregistrées pendant les 9 secondes précédant la fin de chaque période d'analyse de 3 secondes. Les valeurs ainsi mesurées doivent respecter les limites d'émission définies en 2.3.1.1. La mesure simultanée des variations de courant de charge de l'installation de client permet de corréler les variations de charge avec les variations de tension mesurées.

3.9 NIVEAUX D'ÉMISSION DE PAPILLOTEMENT

Les limites d'émission s'appliquent au papillotement causé par l'ensemble des charges fluctuantes d'une installation donnée. Les variations de tension moins fréquentes que 10 fois par heure sont soumises aux limites d'émission de variations rapides de tension traitées précédemment. Les limites d'émission de papillotement s'appliquent aux trois phases, et la pire phase affectée doit respecter les limites.

3.9.1 Évaluation du papillotement

Le client, dont l'installation comprend des charges fluctuantes, doit fournir une étude d'émission du papillotement produit par l'ensemble des charges de son installation compte tenu de leurs caractéristiques (voir aussi 3.5). Les références [5] et [11] fournissent des indications utiles pour évaluer les niveaux de papillotement produits par des charges fluctuantes. Des indications plus spécifiques sur la méthode d'évaluation à être suivie par le client pourront être fournies au besoin dans le cadre des études d'intégration ou de raccordement au réseau. Hydro-Québec fournira aussi au client les niveaux de courts-circuits ou les impédances du réseau au point d'évaluation pour permettre cette évaluation (voir 3.3).

3.9.2 Mesure des niveaux d'émission de papillotement

La mesure des niveaux d'émission de papillotement causé par une installation peut être requise notamment lorsque les niveaux d'émission initialement évalués au moyen d'études de simulation présentent des risques de dépassement, ou bien, pour s'assurer qu'une installation respecte effectivement les limites d'émission autorisées. Les mesures n'ont pas pour but de remplacer l'étude d'émission préalable au raccordement ou à l'addition d'équipements perturbateurs.

Les indications suivantes sont de nature générale et elles seront complétées au besoin par un protocole de mesure accepté par Hydro-Québec qui sera établi en tenant compte des particularités propres à chaque installation de client et au réseau qui l'alimente.

Tel que mentionné précédemment, les limites d'émission doivent être comparées aux valeurs de l'indice de papillotement P_{st} évalué sur des intervalles d'agrégation de 10 minutes selon la norme CEI 61000-4-15 [7] et aux prescriptions de la classe A définies dans la norme CEI 61000-4-30 [3] avec adaptation pour les lampes à 120 V et en excluant l'effet des creux de tension, coupures brèves ou des interruptions pouvant survenir dans le réseau. Les niveaux mesurés correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 95% du temps sur une base journalière doivent être inférieurs aux

limites d'émission autorisées. Cette valeur correspond à la valeur maximale obtenue en écartant 5% des valeurs sur 10 minutes enregistrées pendant la journée en commençant par les plus élevées. Les niveaux mesurés correspondant à une probabilité de non dépassement pendant 99% du temps sur une base journalière ne doivent pas dépasser 1,25 fois les limites d'émission autorisées. Cette valeur correspond à la valeur maximale obtenue en écartant 1% des valeurs sur 10 minutes enregistrées pendant la journée en commençant par les plus élevées. Ces évaluations sont faites en excluant les données marquées non-valides (ex. : valeurs anormalement élevées dues à des creux de tension en réseau) selon les indications de la norme CEI 61000-4-30.

4 Résultats à fournir dans l'étude d'émission

Pour les cas où une étude d'émission de perturbations causées par une installation de client doit être fournie à Hydro-Québec, cette étude doit être réalisée par un ingénieur selon les méthodes décrites au chapitre 3. Cette étude doit aussi contenir les résultats des calculs et évaluations des niveaux d'émission des installations du client et inclure tout renseignement nécessaire pour démontrer que les installations du client sont conçues pour respecter les limites d'émission autorisées.

Les informations minimales suivantes doivent être contenues dans l'étude d'émission que le client doit produire à Hydro-Québec :

- Un schéma unifilaire des installations et les caractéristiques électriques principales de l'appareillage principal du client ;
- La puissance de référence (S_r) de l'installation de client et les puissances de courts-circuits du réseau (S_{cc}) au point d'évaluation;
- Les caractéristiques électriques générales et les modes de fonctionnement des équipements perturbateurs (ex. : puissances et types de convertisseur, indices de pulsation, impédances, puissance de court-circuit, puissances et types de moteurs, courants d'appel, cycles de charge, etc.)
- Les hypothèses ayant servi à évaluer les niveaux maxima de perturbations générées par les équipements perturbateurs doivent être identifiées et justifiées ;
- Les caractéristiques électriques générales des équipements correcteurs lorsqu'il y a lieu (ex. : filtres harmoniques, démarreurs de moteurs, inductances série de limitation, compensateurs de puissance réactive, etc.) ;
- Pour les harmoniques, le déséquilibre et le papillotement, les clients pour lesquels le rapport entre la puissance de court-circuit du réseau en conditions générales d'exploitation et la puissance de référence de l'installation (S_{cc}/S_r) est inférieur à 30 doivent fournir une étude d'émission couvrant les conditions générales ainsi que les conditions occasionnelles d'exploitation de fonctionnement. Dans le cas des variations rapides de tension, cela s'applique à toute installation visée à l'article 1.2.

4.1 HARMONIQUES

Les résultats suivants doivent être contenus dans l'étude d'émission d'harmoniques que le client doit produire à Hydro-Québec :

- Les données pertinentes de ses installations, notamment en ce qui a trait aux caractéristiques des batteries de condensateurs et des filtres ainsi que les hypothèses concernant le désaccord des filtres et les décalages angulaires entre les groupes de convertisseurs.

- Les résonances possibles entre des condensateurs, des filtres ou des câbles du client et le réseau.
- Les tableaux de résultats donnant, pour les harmoniques de rangs n de 2 à 50:
 - les courants harmoniques maxima des rangs caractéristiques et non caractéristiques générés par ses équipements perturbateurs avec les angles de décalage respectifs dans le cas de convertisseurs à indice de pulsation élevé représentés par plusieurs sources équivalentes de courants harmoniques;
 - les valeurs d'impédance harmonique de l'installation du client (amplitudes et angles), incluant notamment l'effet des condensateurs et des filtres en tenant compte du désaccord, des manœuvres possibles, etc. ;
 - les valeurs d'impédance harmonique du réseau qui maximisent chaque valeur de courants harmoniques déterminées à partir des lieux d'impédance harmonique tel qu'expliqué à la section 3.6.1 ;
 - les niveaux d'émission des indices I_n/I_r au point d'évaluation pour chaque rang harmonique (caractéristique et non caractéristique) ;
 - le niveau d'émission de l'indice TDD_c pour différentes conditions d'exploitation ou de fonctionnement ;
- Pour les indices d'influence téléphonique, les valeurs des paramètres et indices suivants:
 - tableau des calculs pour chaque rang harmonique du niveau d'émission de l'indice $I \cdot T_{\text{équilibré}}$ pour différentes conditions d'exploitation ou de fonctionnement selon 3.6.4;
 - si le client désire se prévaloir de la limite spécifique du tableau 5, l'étude doit inclure les détails de calcul des paramètres L_{eq} , ou ρ_{eq} , ou S_{min} ou Z_m servant de critères pour la limite spécifique, avec les plans montrant la situation géographique des circuits téléphoniques par rapport aux lignes électriques touchées et les détails des calculs des paramètres selon 3.6.4.

4.2 DÉSÉQUILIBRE DE CHARGE

Les résultats suivants doivent être contenus dans l'étude d'émission de déséquilibre de charge que le client doit produire à Hydro-Québec :

- Liste des puissances des charges déséquilibrées, de leurs modes de fonctionnement et de raccordement ;
- Description des moyens de mitigation, s'il y a lieu ;
- Tableau des niveaux d'émission de courants de déséquilibre de charge maxima (composante inverse) au point d'évaluation au réseau pour les différents modes de fonctionnement.

4.3 VARIATIONS RAPIDES DE TENSION

Les résultats suivants doivent être contenus dans l'étude d'émission de variations rapides de tension que le client doit produire à Hydro-Québec :

- Liste des fluctuations de puissances active et réactive et caractéristiques des charges fluctuantes associées avec leurs taux de répétition respectifs ;
- Description des moyens de mitigation et de leur effet sur les niveaux d'émission ainsi que des conditions et des restrictions d'opération prévues, s'il y a lieu ;
- Tableau des niveaux d'émission de variations rapides de tension et de leurs taux de répétition au point d'évaluation au réseau compte tenu des manœuvres planifiées des dispositifs de compensation réactive.

4.4 PAPILLOTEMENT

Les résultats suivants doivent être contenus dans l'étude d'émission de papillotement que le client doit produire à Hydro-Québec :

- Description des caractéristiques électriques et opérationnelles des charges fluctuantes (exemples : Dans le cas de fours à arc : puissances de court-circuit et impédances, type de procédé, type de matière première utilisée dans le four, cycles de fonctionnement, etc. Dans le cas de moteurs : types et puissance des moteurs, courants d'appels, fréquences de démarrage et cycles de charge, etc.)
- Liste des fluctuations de puissance des charges fluctuantes et leurs taux de répétition respectifs ;
- Tableau des variations de tension résultantes et des taux de répétition associés au point d'évaluation au réseau.
- Méthodes de sommation de l'effet combiné des charges fluctuantes produisant du papillotement avec justification selon leurs modes de fonctionnement ;
- Niveau d'émission de papillotement résultant au point d'évaluation en fonction de la limite permise (E_{Pst}).

5 Étapes générales de mise en application

Les étapes suivantes sont générales et elles peuvent varier selon la nature du projet. Les étapes détaillées et échéanciers seront précisés lors de l'étude d'intégration au cours du processus de raccordement au réseau.

- Au début du stade de planification d'un projet d'installation de client potentiellement perturbatrice, Hydro-Québec fera connaître au client les limites d'émission autorisées pour le raccordement au réseau de transport.
- Lorsque le mode de raccordement de l'installation de client sera déterminé, Hydro-Québec fournira au client les niveaux de courts-circuits (voir 3.3) et, lorsque nécessaire, les lieux d'impédance harmonique du réseau au point d'évaluation.
- Si une installation visée à l'article 1.2 respecte les conditions d'évaluation simplifiées des sections 2.1.1, ou 2.2.1, ou 2.4.1, le client devra confirmer par écrit à Hydro-Québec la valeur de la puissance totale de ses équipements perturbateurs et démontrer que son installation respecte les critères d'évaluation simplifiée.
- Si une installation visée à l'article 1.2 ne respecte pas les conditions d'évaluation simplifiées des sections 2.1.1, ou 2.2.1, ou 2.4.1, le client devra alors procéder à une étude détaillée des émissions de perturbations causées par ses installations dans le réseau de transport pour démontrer qu'elles sont conçues pour respecter les limites autorisées. Il devra s'agir d'une étude faite par un ingénieur pour évaluer les niveaux d'émission causés dans le réseau de transport par les installations du client et ce selon les méthodes et résultats décrits aux chapitres 3 et 4.
- Lorsque les niveaux de perturbations excèdent l'une ou l'autre des limites d'émission autorisées, le client doit modifier la conception de son installation ou prévoir l'installation d'équipements correcteurs requis pour respecter les limites d'émission. Les caractéristiques et les performances des moyens correcteurs envisagés doivent être décrites et analysées dans l'étude d'émission.
- Le client devra fournir à Hydro-Québec l'étude susmentionnée incluant les résultats des évaluations de ses niveaux d'émission (voir chapitre 4), ainsi que tout renseignement nécessaire pour démontrer que ses installations sont conçues pour respecter les limites permises ou que les correctifs nécessaires ont été apportés, le cas échéant. Cette étude devra être soumise pour acceptation par

Hydro-Québec - TransÉnergie dans les délais prévus avant le raccordement de l'installation ou l'addition de nouveaux équipements perturbateurs au réseau.

- À partir des renseignements contenus dans l'étude d'émission, Hydro-Québec vérifiera que les niveaux d'émission ont été évalués selon les méthodes spécifiées, et qu'ils respectent les limites permises au chapitre 2.
- S'il y a lieu, les restrictions d'opération permettant au client de se conformer aux limites doivent être consignées comme conditions de raccordement et être respectées.
- Hydro-Québec peut demander que le client réalise des mesures d'émission selon un protocole accepté par Hydro-Québec qui sera établi en tenant compte des particularités propres à chaque installation de client et au réseau qui l'alimente. Ces mesures pourraient être requises notamment pour vérifier la validité des données sur les installations du client ainsi que les résultats de l'étude d'émission, ou pour vérifier que l'installation respecte effectivement les limites d'émission autorisées. À noter que les mesures n'ont pas pour but de remplacer l'étude d'émission préalable au raccordement ou à l'addition d'équipements perturbateurs.
- Hydro-Québec se réserve le droit de faire des mesures pour vérifier en tout temps qu'une installation de client respecte effectivement les limites d'émission autorisées.

Références :

- [1]. Caractéristiques et cibles de qualité de tension fournie par le réseau de transport d'Hydro-Québec, G. Beaulieu ERCP, TransÉnergie, édition en vigueur. (Actuellement disponible sur internet à l'adresse : http://www.hydroquebec.com/transenergie/publications/fr/pdf/cib_tesec.pdf).
- [2]. Techniques d'essai et de mesure – Section 7 : Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'interharmoniques, ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés. Norme de la Commission Électrotechnique Internationale CEI 61000-4-7- édition en vigueur.
- [3]. Techniques d'essai et de mesure – Section 30 : Méthodes de mesure de la qualité de fourniture, Publication de la Commission Électrotechnique Internationale CEI 61000-4-30 – édition en vigueur.
- [4]. Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems. Rapport technique de la Commission Électrotechnique Internationale IEC/TR 61000-3-6 - édition 2.0 - 2008-02.
- [5]. Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems. Rapport technique de la Commission Électrotechnique Internationale IEC/TR 61000-3-7 - édition 2.0 -2008-02.
- [6]. Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems. Rapport technique de la Commission Électrotechnique Internationale IEC/TR 61000-3-13 - édition 1.0 -2008-02.
- [7]. Techniques d'essai et de mesure – Section 15 : Flickermètre – Spécifications fonctionnelles et de conception. Norme de la Commission Électrotechnique Internationale CEI 61000-4-15 - édition en vigueur.
- [8]. Guide de coordination électrique, Projet Association Canadienne de l'électricité 180-D-590, Telecommunications Committee on Electrical Coordination et ACÉ, 1989.
- [9]. Directives concernant la protection des lignes de télécommunication contre les effets préjudiciables des lignes électriques et des chemins de fer électrifiés, Volume II - Calcul des tensions et courants induits dans les cas pratiques. CCITT, Union Internationale des Télécommunications. Genève, 1989.
- [10]. Méthodes de mesure des caractéristiques et cibles de qualité de tension, R. Bergeron et al., IREQ rapport no. 99-220 rev. 1 : déc 2000.
- [11]. Arc furnace flicker assessment and mitigation. A. Robert, M. Couvreur, Article B-1.08, PQA'94 Proceedings Part 1, Amsterdam, Oct. 1994.

Annexe A

Évaluation des niveaux maxima d'émission d'harmoniques en fonction des lieux d'impédance

Cette annexe donne à titre indicatif des informations complémentaires et des exemples sur des méthodes possibles pour évaluer, selon la section 3.6.1, les niveaux maxima d'émissions de courants harmoniques en fonction des lieux d'impédance fournis pour le réseau.

A.1 Format des lieux d'impédance harmonique

Rappelons que les lieux d'impédance harmonique servent à définir la plage des valeurs possibles de l'impédance du réseau de transport pour les rangs harmoniques visés par les limites d'émission. L'impédance harmonique du réseau peut avoir n'importe laquelle valeur sur le pourtour ou à l'intérieur des lieux. Les lieux d'impédance du réseau n'incluent pas l'effet de l'installation du client considérée.

Les lieux d'impédance du réseau de transport sont définis dans le plan $R \pm jX$ et ils peuvent être délimités sous forme de secteurs, de polygones ou de cercles.

A.1.1 - Secteurs

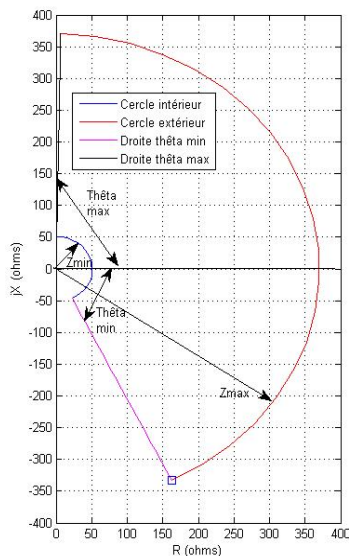


Figure A.1.1 : Lieu d'impédance défini sous forme de secteur

Les lieux d'impédance du réseau sous forme de secteurs sont délimités par les paramètres suivants pour chaque rang harmonique (voir figure A.1.1) :

- Deux arcs de cercle centrés à l'origine et de rayon Z_{\min} et Z_{\max} respectivement.
- Deux segments de droite reliant les arcs de cercle de rayon Z_{\min} et Z_{\max} le long de l'angle minimal (thêta min) et de l'angle maximal (thêta max).

A.1.2 - Polygones

Les lieux d'impédance du réseau peuvent aussi être définis sous forme de polygones pour circonscrire de plus près, au besoin, les valeurs de l'impédance à certains rangs harmoniques. La figure suivante (A.1.2) montre un polygone à six côtés et on se limitera, de façon générale, à des polygones à huit côtés. Pour définir celui-ci, Hydro-Québec fournit un tableau des coordonnées des points R_i et jX_i pour les différents rangs harmoniques.

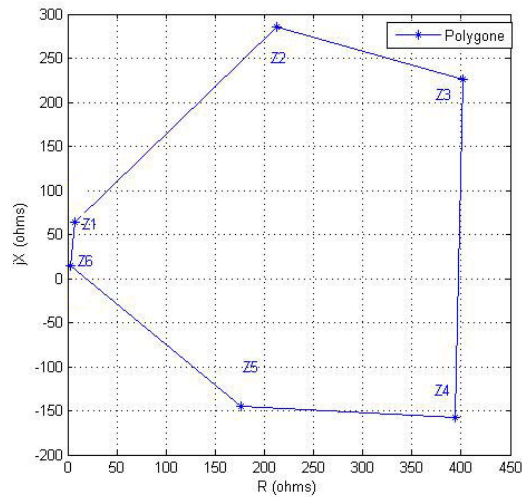


Figure A.1.2 : Lieu d'impédance défini sous forme de polygone

A.1.3 – Cercles

Le cercle est généralement utilisé pour regrouper les valeurs possibles d'impédance du réseau pour plusieurs rangs harmoniques. Le cercle est délimité par :

- Une valeur de résistance minimale (R_{\min}) pour les rangs harmoniques considérés;
- Les angles maximal (thêta max) et minimal (thêta min) de l'impédance délimités par les segments de droites de leur intersection avec la droite R_{\min} jusqu'à leur intersection avec le cercle;
- Le module de l'impédance maximale délimitant le cercle de diamètre (Z_{\max}) centré en abscisse à ($Z_{\max}/2$) comme le montre la figure suivante.

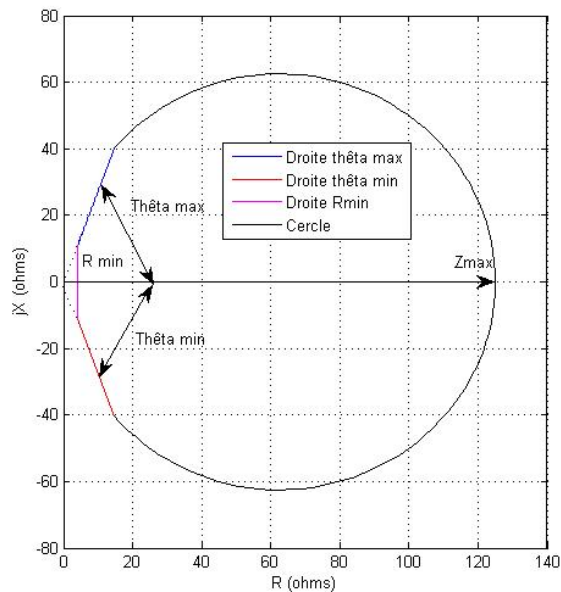
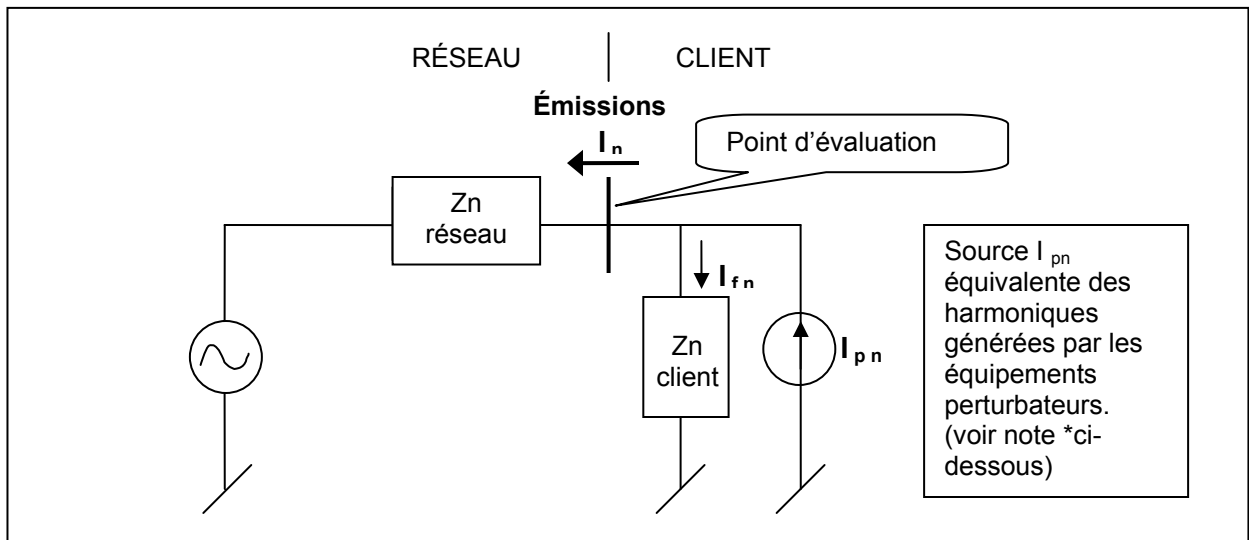


Figure A.1.3 : Lieu d'impédance défini sous forme de cercle

A.2 - Évaluation des niveaux maxima d'émission de courants harmoniques en fonction des lieux d'impédance du réseau

L'installation de client (producteur ou client de charge) raccordée ou à raccorder au réseau de transport d'Hydro-Québec est représentée dans ce qui suit de façon synthétisée par un équivalent Norton. Ainsi, pour chaque rang harmonique et, au besoin, pour chaque condition d'opération de l'installation de client à évaluer, on considère une source de courant harmonique équivalente en parallèle avec l'impédance harmonique de l'installation du client et l'impédance harmonique du réseau spécifiée par un lieu. Tel que mentionné dans la note ci-dessous, cette représentation n'exclut pas l'utilisation de modèles plus détaillés ou adaptés lorsque requis.



Note* : Cette figure représente, de façon simplifiée, les équipements perturbateurs du client par une source équivalente de courants harmoniques. Cette simplification n'a pas pour but de restreindre l'utilisation de modèles de simulation plus détaillés lorsque requis. Par exemple, on peut représenter les sources de courant avec leurs angles pour chaque groupe de redresseurs avec leurs filtres respectifs et on peut adapter le circuit et ses paramètres selon les résultats de modèles détaillés de convertisseurs pour les harmoniques non caractéristiques.

Figure A.2.1 - Schéma équivalent pour évaluer les émissions d'harmoniques

où :

- I_{pn} : Source équivalente d'harmonique de rang n générée par les équipements perturbateurs du client.
- I_{fn} : Courant harmonique de rang n dans les filtres, condensateurs ou autres équipements de l'installation du client.
- I_n : Courant harmonique de rang n émis vers le réseau
- Zn_{client} : Impédance harmonique équivalente de rang n de l'installation du client.
- $Zn_{réseau}$: Lieu d'impédance harmonique du réseau dans lequel il faut chercher la valeur d'impédance qui maximise l'émission de courant harmonique de rang n.

Pour cette représentation équivalente, le courant harmonique (I_n) de rang n émis dans le réseau consiste en un diviseur de courant tel que :

$$I_n = \frac{Zn_{client}}{Zn_{réseau} + Zn_{client}} * I_{pn} \quad \text{Éq. A.2.1}$$

Pour chaque rang harmonique, le courant I_n maximal émis peut être évaluée avec l'équation A.2.1 en choisissant dans le lieu d'impédance du réseau la valeur qui maximise l'indice calculé. Cette maximisation doit être faite au besoin pour les différentes conditions d'exploitation de l'installation de client et la plus grande valeur ainsi obtenue donne le courant émis à chaque rang harmonique.

Deux méthodes possibles sont illustrées dans ce qui suit et elles nécessitent l'utilisation d'algorithmes appropriés. Il peut exister d'autres méthodes pour atteindre l'objectif précédent.

A.2.1 Méthode itérative :

Cette approche consiste à balayer le lieu d'impédance harmonique du réseau à l'aide d'une boucle itérative pour trouver la valeur d'impédance du lieu de $Z_{n_{réseau}}$ qui maximise le courant harmonique (I_n) de rang n dans l'équation A.2.1.

A2.2 Méthode géométrique :

Dans l'équation A.2.1, si pour un cas donné on ne considère qu'une valeur de $Z_{n_{client}}$ à la fois, le numérateur de l'équation serait fixe et, pour maximiser le courant harmonique (I_n), il suffira de minimiser le module du dénominateur, c'est-à-dire, minimiser $|Z_{n_{réseau}} + Z_{n_{client}}|$:

$$|Z_{n_{réseau}} + Z_{n_{client}}| = \sqrt{(\text{Re}(Z_{n_{réseau}}) + \text{Re}(Z_{n_{client}}))^2 + (\text{Im}(Z_{n_{réseau}}) + \text{Im}(Z_{n_{client}}))^2} \quad (\text{Éq. A.2.2})$$

On peut aussi montrer que minimiser la somme des deux vecteurs précédents équivaut à trouver la distance minimale, dans le plan complexe, entre les points du lieu de $Z_{n_{réseau}}$ et le point correspondant au vecteur négatif de $Z_{n_{client}}$ (c.-à-d. : $-Z_{n_{client}} = (\text{Re}(-Z_{n_{client}}), \text{Im}(-Z_{n_{client}}))$). En effet, la distance entre deux points quelconques $Z_1=(x_1, y_1)$ et $Z_2=(x_2, y_2)$ est donnée par :

$$d = \sqrt{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)} \quad (\text{Éq. A.2.3})$$

En remplaçant Z_2 par le vecteur négatif de $Z_{n_{client}}$ dans l'équation précédente, on obtient :

$$d = \sqrt{((\text{Re}(Z_{n_{réseau}}) - \text{Re}(-Z_{n_{client}}))^2 + (\text{Im}(Z_{n_{réseau}}) - \text{Im}(-Z_{n_{client}}))^2)} \quad (\text{Éq. A.2.4})$$

L'équation A.2.2 est équivalente à l'éq. A.2.4, mais cette dernière donne une signification géométrique à la solution recherchée, à savoir que, minimiser le module de l'éq. A.2.2 équivaut à minimiser la distance entre le point $-Z_{n_{client}}$ et le lieu d'impédance harmonique du réseau $Z_{n_{réseau}}$. Ainsi, pour les conditions décrites, la valeur d'impédance du réseau qui minimise la distance entre ces points permet de déterminer le courant harmonique maximum dans l'éq. A.2.1.

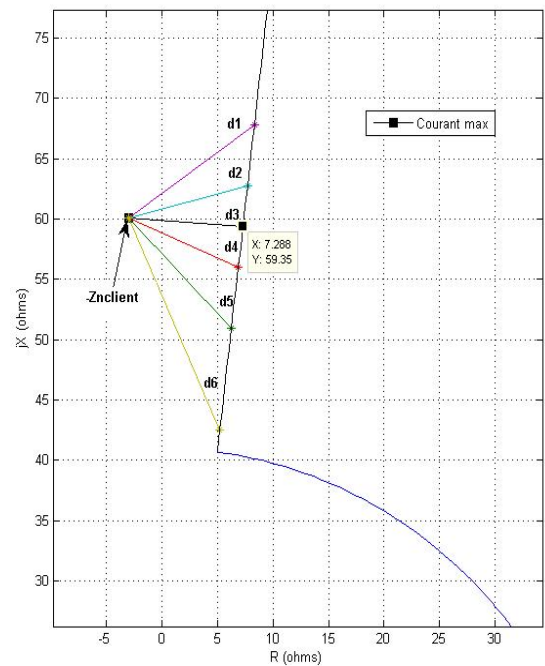
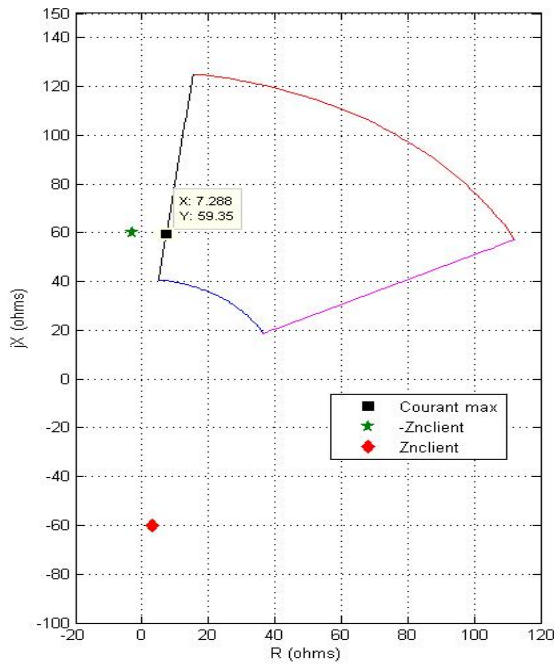
En supposant que la partie réelle de l'impédance harmonique de l'installation du client est positive, le point $-Z_{n_{client}}$ se situera à gauche de l'axe imaginaire dans le plan complexe, de sorte que, la distance la plus courte entre ce point et le lieu d'impédance du réseau se situe sur le contour du lieu d'impédance, qu'il soit défini par un secteur, un polygone ou un cercle.

A2.3 Exemple

La figure suivante montre un exemple de lieu d'impédance du réseau défini sous forme de secteur (graphique de gauche).

Après un balayage du lieu en question pour maximiser l'émission en courant donné par l'équation A.2.1, on trouve que l'impédance de réseau correspond à un point se trouvant sur le contour du secteur à $7,288+j 59,35$ ohms - figure A.2.2, graphique de gauche (intuitivement, ce cas s'approche d'une résonance car les parties imaginaires de $Z_{n_{réseau}}$ et de $Z_{n_{client}}$ sont semblables).

En utilisant la méthode géométrique consistant à minimiser la distance entre les points du lieu $Z_{n_{réseau}}$ et le point $-Z_{n_{client}}$ selon l'équation A.2.4, on trouve le même résultat (graphique de droite). En effet, parmi les distances $d1$ à $d6$ indiquées sur le graphique, on peut voir dans le tableau que la distance minimale $d3$ correspond au même point d'impédance de réseau (7,288, 59,35) que celui obtenu par balayage pour maximiser le courant.



Distances (sans unités)	
d1	1,369
d2	1,102
d3	1,031
d4	1,070
d5	1,304
d6	1,944

Figure A.2.2 : Exemple illustrant le résultat de deux méthodes pour trouver l'impédance de réseau maximisant le courant harmonique.