

10.1 Topologie dynamique

Le système complet est composé d'un circuit déformable entre la fourniture d'énergie par la sous-station et le train. La sous-station fournit l'énergie à un niveau de tension adapté aux possibilités d'utilisation par un engin de traction, elle la reçoit selon d'autres caractéristiques, adaptées au transport, depuis le lieu de production.

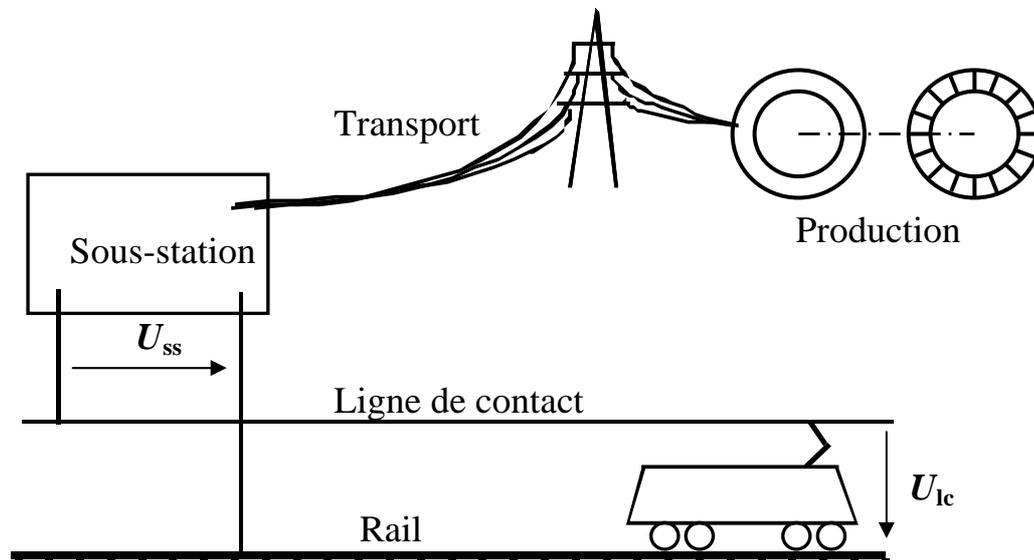


Fig. 10.3 Disposition schématique de la traction électrique.

10.2 Constitution du circuit de traction

Le circuit de traction est composé de deux conducteurs très différents :

1. La ligne de contact isolée des supports, de caractéristique bien connue à la construction.
2. Les rails et le terrain environnant dans lesquels le courant se répartit de manière indéterminée.

Cependant, on peut établir un schéma simplifié qui tient compte de toutes les impédances.

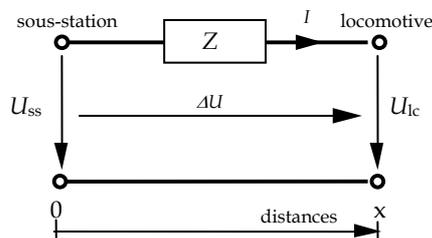


Fig 10.4 Circuit de traction : schéma simplifié.

Comme l'impédance Z , pour un type de construction donné, dépend de la distance, on parle souvent d'impédance linéique. On a calculé quelques valeurs pour des lignes de contact pour voies à trafic standard, en choisissant des valeurs moyennes pour le conducteur de terre. On notera que la construction de la voie nécessite des dispositions soigneuses pour garantir la continuité électrique afin que l'essentiel du courant passe par les rails.

	Impédance linéique [Ω/km]	
	Simple voie	Double voie
1,5 kV=	0,07	0,05
3 kV=	0,08	0,06
15 kV 16,7 Hz	$0,08 + j 0,13$	$0,05 + j 0,08$
25 kV 50 Hz	$0,13 + j 0,35$	$0,09 + j 0,21$

Fig. 10.10 Impédances linéiques de lignes typiques.

La tension effectivement disponible pour l'engin de traction est la tension délivrée par la sous-station, à laquelle on soustrait la chute de tension en ligne. Cette chute de tension dépend de la distance à la sous-station et de l'intensité du courant demandé par l'engin de traction. Toutes les lignes ne sont pas alimentées par une seule sous-station, mais en particulier en continu, on peut alimenter un tronçon de longueur d par les deux extrémités.

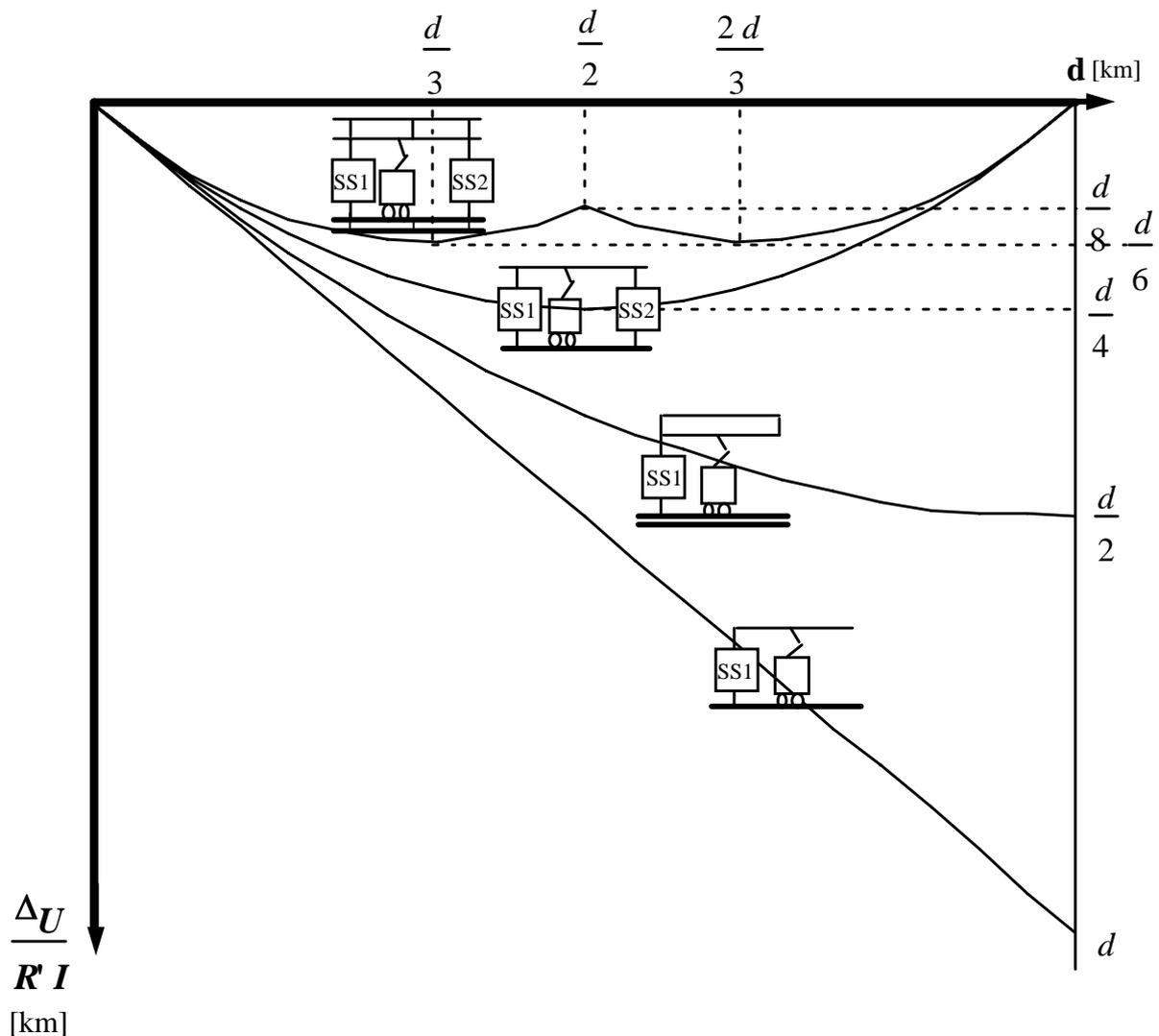


Fig. 10.17 Chutes de tension relatives en ligne.

10.2 Constitution

Les sous-stations et la ligne de contact sont reliées par des contacteurs qui permettent différentes architectures du circuit de traction. Il faut rendre attentif au fait que la mise en parallèle des sous-stations continues ne pose pas problème, mais que pour les sous-stations monophasées, il faut prendre garde à leur phase si on veut alimenter en parallèle la même section de ligne de contact.

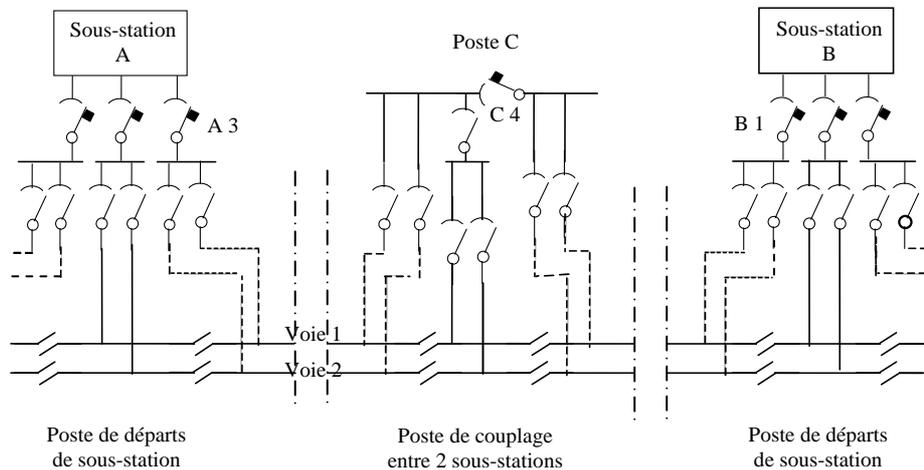


Fig. 10.46 Couplage entre deux sous-stations

Pour diminuer l'impédance linéique en monophasé, on a volontiers recours à l'alimentation en double tension, avec des autotransformateurs en ligne.

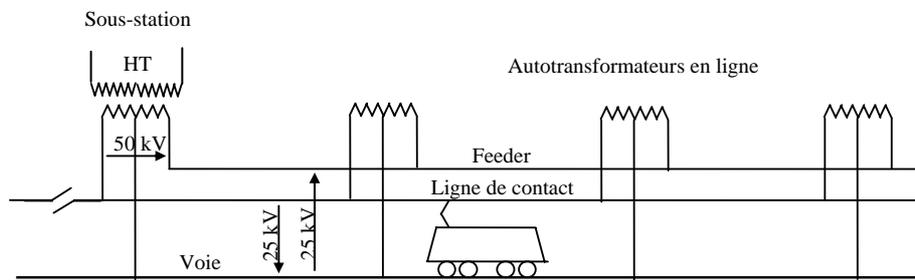


Figure 10.48 Alimentation double monophasé

	Intervalles entre sous-stations [km]	Puissance par sous-station [MVA]
Continu 1500 V	8 à 14	3 à 12
Monophasé 16,7 Hz 15 kV	30 à 60	10 à 30
Monophasé 50 Hz 25 kV	30 à 60	10 à 30
Monophasé 50 Hz 2 x 25 kV	40 à 90	30 à 60

Tableau 10.52 Intervalles et puissances des sous-stations selon les systèmes

C'est le transformateur qui définit la puissance nominale que peut fournir une sous-station, et il peut être surchargé pendant un temps court (p.ex. $200\% * P_n$ pendant 2 minutes). Pour les sous-stations à tension continue, la surcharge sera toutefois limitée par le courant maximal que peut conduire le redresseur.

10.3 Alimentation

Les lignes de contact monophasées à fréquence industrielle sont alimentées depuis le réseau triphasé général (fig. 10.52a) par des sous-stations triphasées – monophasées abaisseuses de tension. On veille à équilibrer au mieux la charge sur les trois phases du réseau d'alimentation pour les sous-stations qui se succèdent sur une ligne.

Les lignes de contact à tension continue sont alimentées également depuis le réseau triphasé général (fig. 10.52c) par des sous-stations comportant transformateur et redresseur triphasé. Au début de la traction électrique, on a pu observer des centrales de production à tension continue qui alimentaient directement la distribution sur la ligne de contact.

Les lignes de contact à fréquence spéciale peuvent être alimentées depuis des centrales de production et un réseau d'alimentation en monophasé à fréquence spéciale (fig. 10.52b) par des sous-stations de transformateurs monophasés, depuis le réseau général triphasé (fig. 10.52d) par des sous-stations de conversion de fréquence ou par une combinaison de ces deux modes.

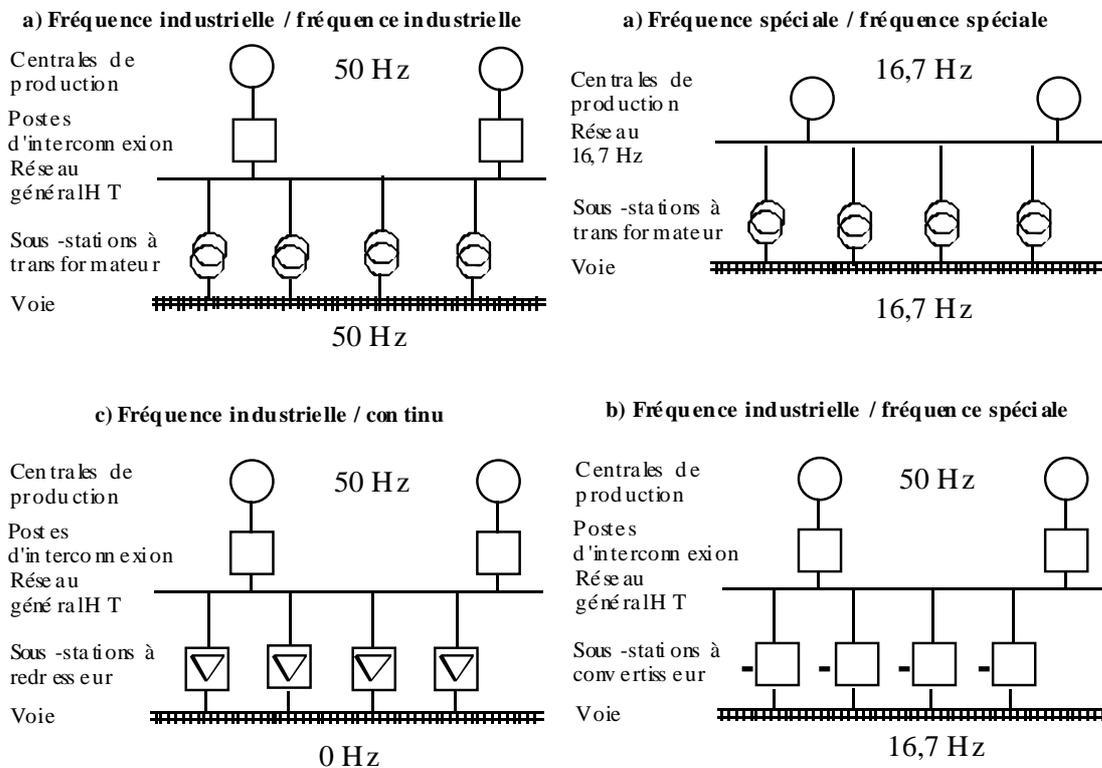


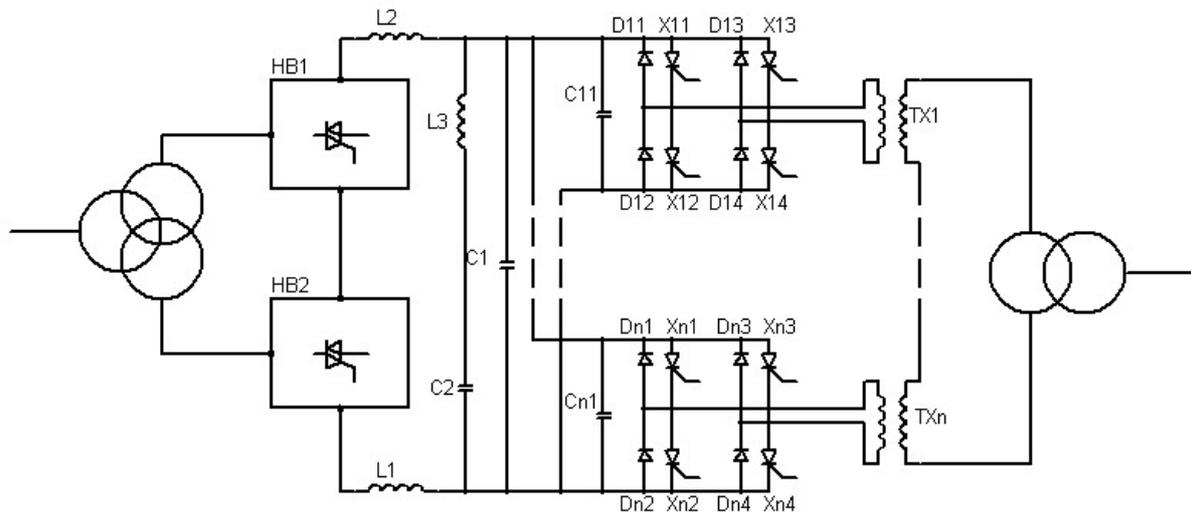
Fig. 10.53 Différentes possibilités d'alimentation.

Pour la conversion de fréquence, on a d'abord utilisé des convertisseurs tournants : rigides pour des réseaux à fréquence spéciale sans production propre, souple pour ceux qui ont leur production propre. On fait maintenant appel à des convertisseurs statiques à circuit intermédiaire à tension continue (convertisseur U). Tant côté triphasé que monophasé, on a une mise en cascade de plusieurs convertisseurs élémentaires, afin de garantir un faible taux d'harmoniques dues au hachage. Les premières réalisations ont fait appel à des GTO (CFF: Giubiasco) [122]. Les réalisations récentes font appel aux IGCT (DB: Bremen) [123] qui ont permis une diminution des pertes par conduction, – 25 %, une réduction d'un facteur 5 à 6 de la puissance du dispositif de commande de gâchettes et des temps de commutation réduits d'un facteur 6 à 8. Ces temps de commutation sont comparables à ceux des IGBT, qui ont eux des pertes par conduction plus élevées. La structure d'un IGCT est très comparable à celle d'un IGBT de même gamme, ce qui permet de profiter des gains de quantité dans les coûts de production.

Ces équipements sont réversibles.

On envisage même de tels équipements entre le 50 Hz triphasé et le 50 Hz monophasé [147]. Pour un surcoût de construction aujourd'hui modique par rapport aux simples transformateurs, on diminue les coûts d'exploitation :

- Pas de pénalités pour asymétrie de consommation à payer au fournisseur d'énergie.
- Harmoniques absorbées par les filtres du circuit intermédiaire.
- Puissance réactive fournie par le circuit intermédiaire.
- Réglage de tension de la ligne de contact à la valeur maximale admise lorsque la sous-station fournit de la puissance et à la valeur minimale lorsqu'elle en absorbe.



Transformateur triphasé à 50 Hz **Convertisseurs** **Circuit intermédiaire** **Convertisseurs en parallèle** **Transformateurs à secondaires en série** **Transfo. 16.7 Hz**

Fig. 10.62 Convertisseur de fréquence.

Pour alimenter les lignes à tension continue, on n'utilise plus aujourd'hui de machines tournantes ni de redresseurs à vapeur de mercure qui ont jalonné les premières décennies de la traction électrique. Le plus souvent, on utilise des redresseurs unidirectionnels à diodes.

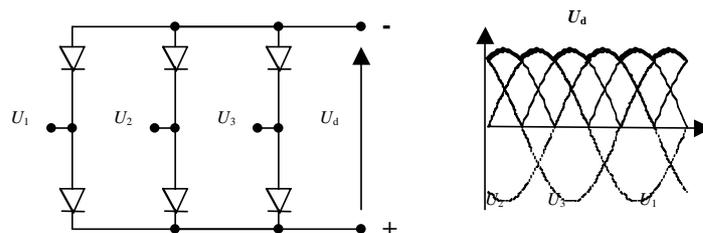


Fig.10.64 Redresseur en pont triphasé

On a vu qu'en monophasé, l'impédance linéique est complexe (fi. 10.10). Cela entraîne non seulement que la tension disponible pour l'engin de traction est plus faible qu'à la sous-station, mais en plus, elle est décalée en phase (fig.10.69a). Plutôt que de diminuer l'intervalle entre sous-station, ce qui peut se révéler très coûteux, on peut implanter des batteries de condensateurs en série dans la ligne de contact (RhB, NSB, fig. 10.69b) ou en parallèle (SNCF, fig. 10.69c). Non seulement la tension disponible à la ligne de contact est plus élevée, mais la puissance réactive que doit fournir la sous-station est plus faible : la différence de phase φ_{ss} entre le la tension U_{ss} à la sous-station et le courant I fourni est plus faible.

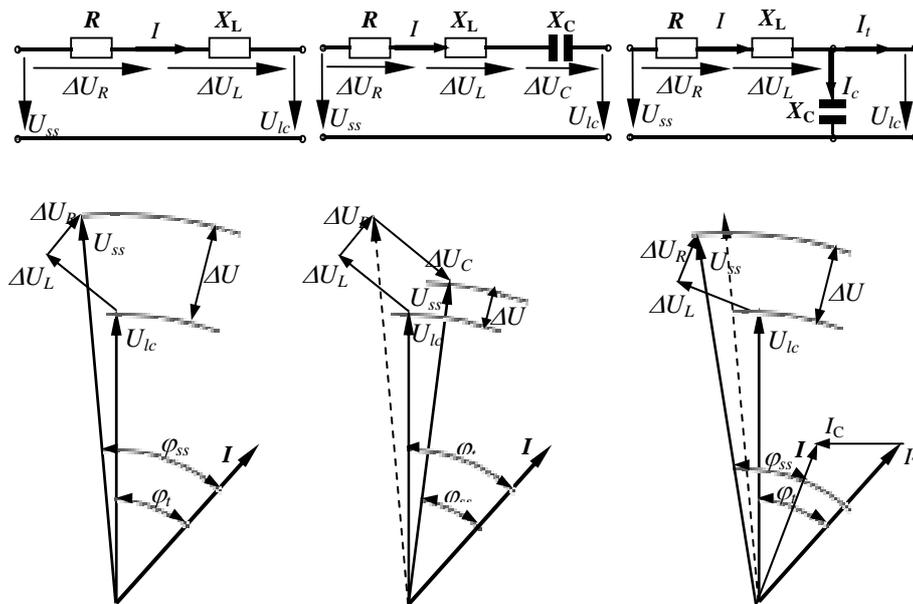


Fig. 10.69 Compensation des chutes de tension en monophasé par condensateur.

Plutôt que d'utiliser des composants passifs qui ne révèlent toute leur action que dans certaines portions de ligne pour des cas de charges limités, on s'oriente maintenant vers des compensateurs statiques (SVC) qui combinent batteries de selfs et compensateurs et semi-conducteurs commandés par un logiciel qui surveille tensions et courants à la ligne de contact. La valeur d'impédance peut ainsi être adaptée en temps réelle aux conditions de charges de la ligne de contact.

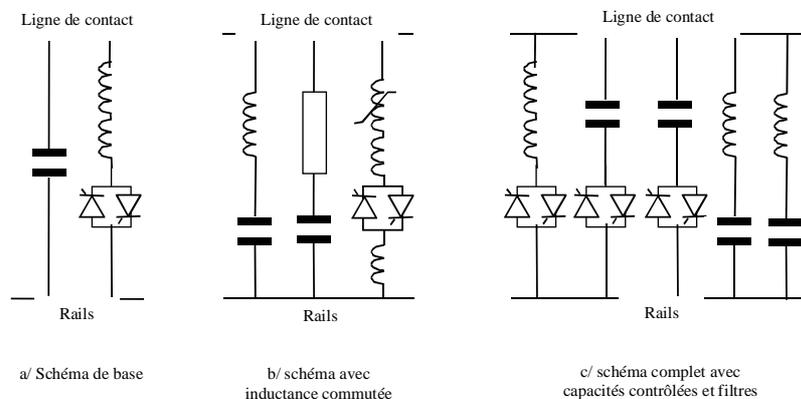


Fig. 10.71 Compensateurs statiques de puissance réactive.

Les sous-stations à tension continu doivent être considérées comme des sources de tension réelles ajustée pour U_0 , avec leur résistance interne R_i et conçues pour un courant nominal I_{ssn} . Elles peuvent être momentanément surchargées.

$$U_{ss} = U_0 - R_i \cdot I_{ss} \tag{10.75}$$

$$I_{ss2h} = 1,5 \cdot I_{ssn} \quad I_{ss1min} = 3 \cdot I_{ssn} \tag{10.76}$$

En monophasé, il faut tenir compte de l'impédance interne et on peut les surcharger.

$$I_{ss15min} = 1,5 \cdot I_{ssn} \quad I_{ss5min} = 2 \cdot I_{ssn} \tag{10.77}$$