

# Cours Sécurité des biens et des personnes

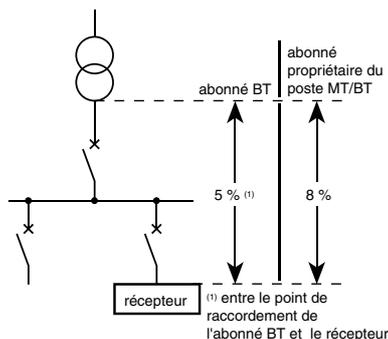
## Chute de tension au démarrage et en régime permanent

### Etude pluri technologique

## 1. Normalisation

### Les normes limitent les chutes de tension en ligne

La norme NF C 15-100 impose que la chute de tension entre l'origine de l'installation BT et tout point d'utilisation n'excède pas les valeurs du tableau ci-dessous. D'autre part la norme NF C 15-100 § 559-6-1 limite la puissance totale des moteurs installés chez l'abonné BT tarif bleu. Pour des puissances supérieures aux valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous, l'accord du distributeur d'énergie est nécessaire.



#### Chute de tension maximale entre l'origine de l'installation BT et l'utilisation

	éclairage	autres usages (force motrice)
abonné alimenté par le réseau BT de distribution publique	3%	5%
abonné propriétaire de son poste HT-A/BT	6%	8% (1)

(1) Entre le point de raccordement de l'abonné BT et le moteur.

#### Puissance maxi de moteurs installés chez un abonné BT (en kVA)

(I < 60 A en triphasé ou 45 A en monophasé)

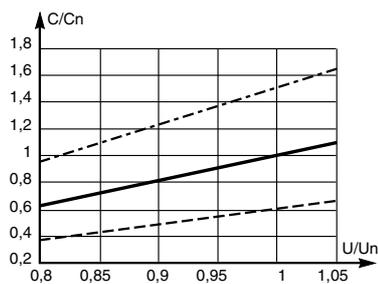
moteurs	triphasés (400 V)		monophasés (230 V)
	à démarrage direct pleine puissance	autres modes de démarrage	
locaux d'habitation	5,5	11	1,4
autres réseau aérien	11	22	3
locaux (1) réseau souterrain	22	45	5,5

(1) Les autres locaux comprennent des locaux tels que ceux du secteur tertiaire, du secteur industriel, des services généraux des bâtiments d'habitation, du secteur agricole, etc.

L'examen préalable par le distributeur d'énergie est nécessaire dans les cas de moteurs entraînant une machine à forte inertie, de moteurs à lent démarrage, de moteurs à freinage ou inverseur de marche par contre-courant.

### Influence de la tension d'alimentation d'un moteur en régime permanent

La courbe ci-après montre que les couples C et Cn varient en fonction du carré de la tension. Ce phénomène passe relativement inaperçu sur les machines centrifuges mais peut avoir de graves conséquences pour les moteurs entraînant des machines à couple hyperbolique ou à couple constant. Ces défauts de tension peuvent réduire notablement l'efficacité et la durée de vie du moteur ou de la machine entraînée.



— couple en régime permanent

- - - couple de démarrage réel  
Cd nominal = 0,6Cn

- . - . - couple de démarrage réel  
Cd nominal = 1,5Cn

Evolution du couple moteur en fonction de la tension d'alimentation.

### Effets des variations de la tension d'alimentation en fonction de la machine entraînée

Le tableau ci-dessous résume les effets et les défaillances possibles dus aux défauts de tension d'alimentation.

variation de tension	machine entraînée		effets	défaillances possibles
$U > U_n$	couple parabolique (machines centrifuges)	ventilateur	échauffement inadmissible des enroulements dû aux pertes fer	vieillessement prématuré des enroulements perte d'isolement
		pompe	échauffement inadmissible des enroulements dû aux pertes fer pression supérieure dans la tuyauterie	vieillessement prématuré des enroulements pertes d'isolement fatigue supplémentaire de la tuyauterie
	couple constant	concasseur pétrin mécanique tapis roulant	échauffement inadmissible des enroulements puissance mécanique disponible supérieure	vieillessement prématuré des enroulements perte d'isolement fatigue mécanique supplémentaire de la machine
$U < U_n$	couple parabolique (machines centrifuges)	ventilation, pompe	temps de démarrage augmenté	risque de déclenchement des protections perte d'isolement
		concasseur pétrin mécanique tapis roulant	échauffement inadmissible des enroulements blocage du rotor non-démarrage du moteur	vieillessement prématuré des enroulements perte d'isolement arrêt de la machine

## 2. Chute de tension en régime permanent

### Calcul de la chute de tension en ligne en régime permanent

La chute de tension en ligne en régime permanent est à prendre en compte pour l'utilisation du récepteur dans des conditions normales (limites fixées par les constructeurs des récepteurs).

Le tableau ci-contre donne les formules usuelles pour le calcul de la chute de tension.

Plus simplement, les tableaux ci-dessous donnent la chute de tension en % dans 100 m de câble, en 400 V/50 Hz triphasé, en fonction de la section du câble et du courant véhiculé ( $I_n$  du récepteur). Ces valeurs sont données pour un  $\cos \varphi$  de 0,85 dans le cas d'un moteur et de 1 pour un récepteur non inductif. Ces tableaux peuvent être utilisés pour des longueurs de câble  $L \neq 100$  m : il suffit d'appliquer au résultat le coefficient  $L/100$ .

### Formules de calcul de chute de tension

alimentation	chute de tension (V CA)	en %
monophasé : deux phases	$\Delta U = 2 I_n L (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$	100 $\Delta U / U_n$
monophasé : phase et neutre	$\Delta U = 2 I_n L (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$	100 $\Delta U / V_n$
triphasé : trois phases (avec ou sans neutre)	$\Delta U = \sqrt{3} I_n L (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$	100 $\Delta U / U_n$

$I_B$  = courant d'emploi en ampères.

$U_n$  : tension nominale entre phases.  $U_n = \sqrt{3} V_n$ .

$V_n$  : tension nominale entre phase et neutre.

$L$  = longueur d'un conducteur en km.

$R$  = résistance linéique d'un conducteur en  $\Omega/\text{km}$ . Pour le cuivre  $R = 22,5 \Omega/\text{mm}^2/\text{km}$  /  $S$  (section en  $\text{mm}^2$ ) et pour l'aluminium  $R = 36 \Omega/\text{mm}^2/\text{km}$  /  $S$  (section en  $\text{mm}^2$ ).  $R$  est négligeable au delà d'une section de 500  $\text{mm}^2$ .

$X$  = réactance linéique d'un conducteur en  $\Omega/\text{km}$ .  $X$  est négligeable pour les câbles de section < 50  $\text{mm}^2$ . En l'absence d'autre indication, on prendra  $X = 0,08 \Omega/\text{km}$ .

$\varphi$  = déphasage du courant sur la tension dans le circuit considéré.

### Chute de tension dans 100 m de câble en 400 V/50 Hz triphasé (%)

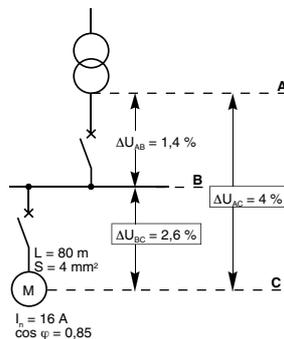
cos = 0,85		aluminium																													
câble	cuivre	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300						
$S$ ( $\text{mm}^2$ )	$S$ ( $\text{mm}^2$ )	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300		
1	0,5	0,4																													
2	1,1	0,6	0,4																												
3	1,5	1	0,6	0,4														0,4													
5	2,6	1,6	1	0,6	0,4													0,6	0,4												
10	5,2	3,2	2	1,4	0,8	0,5												1,3	0,8	0,5											
16	8,4	5	3,2	2,2	1,3	0,8	0,5											2,1	1,3	0,8	0,6										
20	6,3	4	2,6	1,6	1	0,6												2,5	1,6	1,1	0,7	0,5									
25	7,9	5	3,3	2	1,3	0,8	0,6											3,2	2	1,3	0,9	0,6	0,5								
32	6,3	4,2	2,6	1,6	1,1	0,8	0,5											4,1	2,6	1,6	1,2	0,9	0,6	0,5							
40	7,9	5,3	3,2	2,1	1,4	1	0,7	0,5										5,1	3,2	2,1	1,5	1,1	0,8	0,6	0,5						
50	6,7	4,1	2,5	1,6	1,2	0,9	0,6	0,5										6,4	4,1	2,6	1,9	1,4	1	0,7	0,6	0,5					
63	8,4	5	3,2	2,1	1,5	1,1	0,8	0,6										8	5	3,2	2,3	1,7	1,3	0,9	0,8	0,6					
70		5,6	3,5	2,3	1,7	1,3	0,9	0,7	0,5									5,6	3,6	2,6	1,9	1,4	1,1	0,8	0,7						
80	6,4	4,1	2,6	1,9	1,4	1	0,8	0,6	0,5									6,4	4,1	3	2,2	1,5	1,2	1	0,8						
100		8	5	3,3	2,4	1,7	1,3	1	0,8	0,7	0,65							5,2	3,8	2,7	2	1,5	1,3	1	0,95						
125			4,4	4,1	3,1	2,2	1,6	1,3	1	0,9	0,21	0,76						6,5	4,7	3,3	2,4	1,9	1,5	1,3	1,2	0,95					
160				5,3	3,9	2,8	2,1	1,6	1,4	1,1	1	0,97	0,77					6	4,3	3,2	2,4	2	1,6	1,52	1,2	1					
200				6,4	4,9	3,5	2,6	2	1,6	1,4	1,3	1,22	0,96						5,6	4	3	2,4	2	1,9	1,53	1,3					
250					6	4,3	3,2	2,5	2,1	1,7	1,6	1,53	1,2						6,8	5	3,8	3,1	2,5	2,4	1,9	1,6					
320						5,6	4,1	3,2	2,6	2,3	2,1	1,95	1,54							6,3	4,8	3,9	3,2	3	2,5	2,1					
400						6,9	5,1	4	3,3	2,8	2,6	2,44	1,92								5,9	4,9	4,1	3,8	3	2,6					
500							6,5	5	4,1	3,5	3,2	3	2,4									6,1	5	4,7	3,8	3,3					

cos = 1		aluminium																														
câble	cuivre	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300							
$S$ ( $\text{mm}^2$ )	$S$ ( $\text{mm}^2$ )	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300			
1	0,6	0,4																														
2	1,3	0,7	0,5																													
3	1,9	1,1	0,7	0,5														0,5														
5	3,1	1,9	1,2	0,8	0,5													0,7	0,5													
10	6,1	3,7	2,3	1,5	0,9	0,5												1,4	0,9	0,6												
16	10,7	5,9	3,7	2,4	1,4	0,9	0,6											2,3	1,4	1	0,7											
20	7,4	4,6	3,1	1,9	1,2	0,7												3	1,9	1,2	0,8	0,6										
25	9,3	5,8	3,9	2,3	1,4	0,9	0,6											3,7	2,3	1,4	1,1	0,7	0,5									
32	7,4	5	3	1,9	1,2	0,8	0,6											4,8	3	1,9	1,4	1	0,7	0,5								
40	9,3	6,1	3,7	2,3	1,4	1,1	0,7	0,5										5,9	3,7	2,3	1,7	1,2	0,8	0,6	0,5							
50	7,7	4,6	2,9	1,9	1,4	0,9	0,6	0,5										7,4	4,6	3	2,1	1,4	1,1	0,8	0,6	0,5						
63	9,7	5,9	3,6	2,3	1,6	1,2	0,8	0,6										9	5,9	3,7	2,7	1,9	1,4	1	0,8	0,7	0,6					
70	6,5	4,1	2,6	1,9	1,3	0,9	0,7	0,5										6,5	4,1	3	2,1	1,4	1,1	0,9	0,8	0,7						
80	7,4	4,6	3	2,1	1,4	1,1	0,8	0,6	0,5									7,4	4,8	3,4	2,3	1,7	1,3	1	0,9	0,8	0,6					
100	9,3	5,8	3,7	2,6	1,9	1,4	1	0,8	0,7	0,6								5,9	4,2	3	2,1	1,5	1,3	1,2	1	0,8	0,6					
125		7,2	4,6	3,3	2,3	1,6	1,2	1	0,9	0,7	0,6							7,4	5,3	3,7	2,6	2	1,5	1,4	1,3	1	0,8					
160			5,9	4,2	3	2,1	1,5	1,3	1,2	1	0,8	0,6						6,8	4,8	3,4	2,5	2	1,8	1,6	1,3	1,1						
200			7,4	5,3	3,7	2,6	2	1,5	1,4	1,3	1	0,8							5,9	4,2	3,2	2,4	2,3	2	1,6	1,4						
250				6,7	4,6	3,3	2,4	1,9	1,7	1,4	1,2	0,9							7,4	5,3	3,9	3,1	2,8	2,5	2	1,6						
320					5,9	4,2	3,2	2,4	2,3	1,9	1,5	1,2								6,8	5	4	3,6	3,2	2,5	2						
400					7,4	5,3	3,9	3,1	2,8	2,3	1,9	1,4									6,2	5	4,5	4	3,2	2,7						
500						6,7	4,9	3,9	3,5	3	2,5	1,9										7,7	6,1	5,7	5	4	3,3					

Pour un réseau triphasé 230 V, multiplier ces valeurs par  $\sqrt{3} = 1,73$ .  
 Pour un réseau monophasé 230 V, multiplier ces valeurs par 2.

### Exemple d'utilisation des tableaux



Un moteur triphasé 400 V, de puissance 7,5 kW ( $I_n = 15$  A)  $\cos \varphi = 0,85$  est alimenté par 80 m de câble cuivre triphasé de section 4  $\text{mm}^2$ .  
 La chute de tension entre l'origine de l'installation et le départ moteur est évaluée à 1,4%.  
 La chute de tension totale en régime permanent dans la ligne est-elle admissible ?

### Réponse :

pour  $L = 100$  m, le tableau page précédente donne :

$\Delta U_{AC} = 3,2\%$

Pour  $L = 80$  m, on a donc :

$\Delta U_{AC} = 3,2 \times (80/100) = 2,6\%$

La chute de tension entre l'origine de l'installation et le moteur vaut donc :

$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC}$

$\Delta U_{AC} = 1,4\% + 2,6\% = 4\%$

La plage de tension normalisée de fonctionnement des moteurs ( $\pm 5\%$ ) est respectée (transfo. HTA/BT 400 V en charge).

## 2. Chute de tension au démarrage

Pour qu'un moteur démarre dans des conditions normales, le couple qu'il fournit doit dépasser 1,7 fois le couple résistant de la charge.

Or, au démarrage, le courant est très supérieur au courant en régime permanent.

Si la chute de tension en ligne est alors importante, le couple du démarrage diminue de façon significative. Cela peut aller jusqu'au non-démarrage du moteur.

Cette chute de tension doit être évaluée pour :

- vérifier que les perturbations provoquées sur les départs voisins sont acceptables
- calculer la chute de tension effective aux bornes du moteur au démarrage.

Le tableau ci-contre permet de connaître la chute de tension au point B au moment du démarrage : il donne une bonne approximation du coefficient de majoration  $k_2$  en fonction du rapport de la puissance de la source et de la puissance du moteur.

## Chute de tension en ligne au démarrage d'un moteur : risque de démarrage difficile

**Exemple :**

• sous une tension réelle de 400 V, un moteur fournit au démarrage un couple égal à 2,1 fois le couple résistant de sa charge

• pour une chute de tension au démarrage de 10%, le couple fourni devient :  $2,1 \times (1 - 0,1)^2 = 1,7$  fois le couple résistant.

Le moteur démarre correctement.

• pour une chute de tension au démarrage de 15% le couple fourni devient :  $2,1 \times (1 - 0,15)^2 = 1,5$  fois le couple résistant.

Le moteur risque de ne pas démarrer ou d'avoir un démarrage très long.

En valeur moyenne, il est conseillé de limiter la chute de tension au démarrage à une valeur maximum de 10%.

## Calcul de la chute de tension au démarrage

Par rapport au régime permanent, le démarrage d'un moteur augmente :

- la chute de tension  $\Delta U_{AB}$  en amont du départ moteur. Celle-ci est ressentie par le moteur mais aussi par les récepteurs voisins
- la chute de tension  $\Delta U_{AC}$  dans la ligne du moteur.

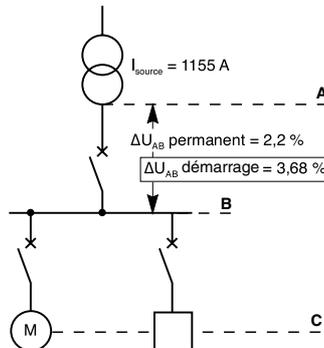
## Chute de tension au démarrage en amont du départ moteur

**Coefficient de majoration de la chute de tension en amont du départ du moteur au démarrage** (voir exemple ci-dessous)

Id/In	démarrage							
	étoile triangle		direct					
	2	3	4	5	6	7	8	
isource/Id	2	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50
	4	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75
	6	1,17	1,34	1,50	1,67	1,84	2,00	2,17
	8	1,13	1,25	1,38	1,50	1,63	1,75	1,88
	10	1,10	1,23	1,34	1,45	1,56	1,67	1,78
	15	1,07	1,14	1,20	1,27	1,34	1,40	1,47

Ce tableau a été établi en négligeant le  $\cos \varphi$  transitoire de l'installation au moment du démarrage du moteur. Néanmoins, il donne une bonne approximation de la chute de tension au moment du démarrage. Pour un calcul plus précis il faudra intégrer le  $\cos \varphi$  au démarrage. Cette remarque s'applique surtout quand  $I_{source} = 2I_{n \text{ moteur}}$

**Exemple d'utilisation du tableau**



Pour un moteur de 18,5 kW ( $I_n = 35 \text{ A}$ ,  $I_d = 175 \text{ A}$ ), le courant total disponible à la source est :  $I_{source} = 1155 \text{ A}$ .

La chute de tension  $\Delta U_{AB}$  en régime permanent est 2,2%.

Quelle est la chute de tension  $\Delta U_{AC}$  au démarrage du moteur ?

**Réponse :**

$$I_{source}/I_d = 1155/175 = 6,6.$$

Le tableau donne pour  $I_{source}/I_d = 6$  et  $I_d/I_n = 5$  :

$$k_2 = 1,67.$$

On a donc :

$$\Delta U_{AB \text{ démarrage}} = 2,2 \times 1,67 = 3,68 \%$$

Ce résultat est tout à fait admissible pour les autres récepteurs.

## Chute de tension au démarrage aux bornes du moteur

La chute de tension en ligne au démarrage est fonction du facteur de puissance  $\cos \varphi$  du moteur à sa mise sous tension.

La norme IEC 947-4-1 définit les limites extrêmes de ce facteur de puissance en fonction de l'intensité nominale du moteur :

- pour  $I_n \leq 100$  A,  $\cos \varphi \leq 0,45$
- pour  $I_n > 100$  A,  $\cos \varphi \leq 0,35$ .

Le tableau ci-dessous donne la chute de tension en % dans 1 km de câble parcouru par 1 A, en fonction de la section du câble et du  $\cos \varphi$  du moteur.

La chute de tension au démarrage (en %) dans un circuit moteur s'en déduit par :

$$\Delta U \text{ (en \%)} = k_1 \times I_d \times L$$

$k_1$  : valeur donnée par le tableau ci-dessous

$I_d$  : courant de démarrage du moteur (en A)

$L$  : longueur du câble en km.

### Chute de tension au démarrage dans 1 km de câble parcouru par 1 A (en %)

S (mm <sup>2</sup> ) cos φ du moteur au démarrage	câble cuivre												câble aluminium										
	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	10	16	25	35	50	70	95	120	150	
<b>0,35</b>	2,43	1,45	0,93	0,63	0,39	0,26	0,18	0,14	0,11	0,085	0,072	0,064	0,058	0,61	0,39	0,26	0,20	0,15	0,12	0,09	0,082	0,072	
<b>0,45</b>	3,11	1,88	1,19	0,80	0,49	0,32	0,22	0,16	0,12	0,098	0,081	0,071	0,063	0,77	0,49	0,33	0,24	0,18	0,14	0,11	0,094	0,082	
<b>en régime établi*</b>																							
<b>0,85</b>	5,83	3,81	2,20	1,47	0,89	0,56	0,37	0,27	0,19	0,144	0,111	0,092	0,077	1,41	0,89	0,58	0,42	0,30	0,22	0,17	0,135	0,112	

(\*) La dernière ligne de ce tableau permet le calcul de la chute de tension en régime établi ( $\cos \varphi$  à charge nominale) avec la même formule en remplaçant  $I_d$  par  $I_n$  moteur.

### Exemple d'utilisation du tableau

Un moteur de 18,5 kW ( $I_n = 35$  A et  $I_d = 5 \times I_n = 175$  A) est alimenté par un câble de cuivre triphasé, de section 10 mm<sup>2</sup>, de longueur 72 m. Son  $\cos \varphi$  au démarrage est 0,45. La chute de tension au dernier niveau de distribution est égale à 2,4 % et

$$I_{\text{source}}/I_d = 15.$$

Quelle est la chute de tension totale en régime établi et la chute de tension totale au démarrage ?

### Réponse :

- d'après le tableau ci-dessus (dernière ligne), la chute de tension dans la ligne moteur en régime établi vaut :

$$\Delta U_{BC} = 0,89 \times 35 \times 0,072 = 2,24 \%$$

$$\Delta U_{AC} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC}$$

$$\Delta U_{AC} = 2,4 \% + 2,24 \% = 4,64 \%$$

Ce résultat est tout à fait acceptable pour le fonctionnement du moteur.

- d'après le tableau ci-dessus, la chute de tension dans la ligne moteur au démarrage vaut :

$$\Delta U_{BC} = 0,49 \times 175 \times 0,072 = 6,17 \%$$

$$\Delta U_{AC} = \Delta U_{BC} + (\Delta U_{AB} \times k2) \text{ (voir tableau page précédente)}$$

$$\Delta U_{AC} = 6,17 + (2,4 \times 1,27) = 9,22 \%$$

Ce résultat est admissible pour un démarrage correct du moteur.

