

*Les avantages relatifs des systèmes tri, bi et monophasés  
pour l'alimentation des réseaux à basse tension.*

---

M. M.-B. FIELD, auteur de cette communication, déclare d'abord qu'il ne parvient pas à comprendre les objections des partisans du système monophasé contre le triphasé. Dans le cas d'une grande installation de tramway, il pense que l'un quelconque des trois systèmes donnerait d'excellents résultats, mais le système triphasé, sans être plus compliqué (excepté peut-être en théorie) que le monophasé, possède certains avantages marqués au point de vue de la dépense de premier établissement, et, par dessus tout, l'efficacité et la stabilité du fonctionnement, qui justifieraient son adoption générale pour des installations aussi développées que celles que l'on rencontre actuellement, à Glasgow, par exemple.

L'auteur considère ensuite la transmission de la puissance, à partir d'une seule station centrale, à de nombreux points d'alimentation suffisamment éloignés pour rendre essentielle l'adoption des courants alternatifs à haute tension pour la transmission, et suppose de plus que l'on ne soit pas restreint quant au choix de la fréquence.

Il n'examine pas la possibilité d'alimenter les tramways avec des moteurs à courants alternatifs, ce qui lui paraît d'ailleurs impraticable actuellement, à cause de la complication dans les conducteurs aériens qui en résulterait.

On n'a ainsi d'autre ressource que d'établir des sous-stations et d'y établir des convertisseurs convenables pour transformer le courant alternatif à haute tension en courant continu à 500 volts.

*Machinerie de génération et de transformation.* — Les moyens de conversion sont : 1° les convertisseurs rotatifs combinés avec les transformateurs statiques; 2° les générateurs moteurs synchrones sans transformateurs; 3° les générateurs moteurs asynchrones sans transformateurs.

Les puissances relatives pour la même perte  $C^2 R$  d'un convertisseur rotatif, s'il est employé comme générateur à courant continu, ou comme convertisseur respectivement monophasé, triphasé, tétra ou hexaphasé sont les suivantes :

GÉNÉRATEUR à courant continu	ROTATIVE monophasée.	ROTATIVE triphasee.	ROTATIVE tétraphasée.	ROTATIVE hexaphasée.
1.00	0 825	1.31	1.61	1.94

Les connexions tétraphasées seront employées avec le système de transmission biphasé ordinaire, les connexions triphasées ou hexaphasées, avec le système triphasé, ou, quand c'est possible, par un arrangement convenable de transformateurs, avec le système biphasé. Le tableau ci-dessus n'est basé que sur le calcul, mais l'auteur ne doute pas que les résultats ne soient vérifiés par l'expérience.

Le tableau I a été extrait d'un mémoire de M. Eborall, la dernière colonne, relative aux rotatives de Glasgow de 500 k. w., ayant été ajoutée.

TABLEAU I

TYPE D'ÉQUIPEMENT.	Générateur- moteur asynchrone.	Générateur- moteur synchrone	Convertisseurs rotatifs et transformateurs	Rotative de Glasgow.	
Puissance du convertisseur de la sous-station . . . . .	500 kw.	500 kw.	500 kw.	500 kw.	
Vitesse du convertisseur . . . . .	300	300	300	500	
Nombre de poles (générateur) . . . . .	10	10	16	6	
Vitesse périphérique du commutateur . . . . .	1,880	1,880	3,100	3,250	
Nombre de barres commutatrices	270	270	560	324	
Élévation de température après 24 heures à pleine charge . . . . .	35° C.	35° C.	35° C.	30° après 12 heures (garantie)	
Effet utile {	pleine charge . . . . .	86 %	87 %	92 %	92.5 %
	demi-charge . . . . .	80 %	79 %	87.5 %	89.5 % (garantie)
Capacité de surcharge pendant une heure, avec balais fixes . . . . .	25 %	25 %	75 %	50 % (garantie)	
Facteur de puissance {	pleine charge . . . . .	91 %	100-96 %	100-96 %	—
	demi-charge . . . . .	88 %	»	»	»
Espace nécessaire par kilowatt (en pied carré) . . . . .	0.5	0.5	0.45	0.34	

Le tableau II donne le coût, en même temps que la comparaison de l'efficacité et du poids des machines rotatives tri et biphasées et des générateurs moteurs tri, bi et monophasés synchrones et asynchrones pour 25 périodes et 500 kilowatts (c'est le modèle des unités des sous-stations de Glasgow).

La machine monophasée travaille avec un tel désavantage comparativement aux machines bi et triphasées que l'auteur n'a pas cru utile de la mentionner dans ce tableau.



TABLEAU II

TYPE DE CONVERTISSEUR DE Sous-Station.	COUT y compris tout l'appareil de démarrage.	POIDS TOTAL	Effet utile de l'équi- pement :		
			Pleine charge	3/4 charge	1/2 charge
	Liv. st.	Ton.			
Rotative triphasée avec transformateurs . . .	A . . . 2,160	33	91	89.75	86.75
	B . . . 2,560	31	92	90.5	88
	C . . . 2,240	38	93.6	92.6	88.4
	D . . . 2,122	40	—	—	—
Rotative biphasée avec transformateurs . . .	A . . . 2,240	34	91	89.75	86.75
	B . . . 2,580	32	92	90.5	88
	C . . . 2,114	—	—	—	—
Générateur-moteur synchrone triphasé.	A . . . 2,400	42	89.5	88.25	85.25
	B . . . 2,280	44	86.5	85	81.5
	C . . . 2,320	42	90.0	87	80
Générateur-moteur synchrone biphasé.	A . . . 2,400	42	89.5	88.25	85.25
	B . . . 2,280	44	86.5	85	81.5
	C . . . 2,320	42	90	87	80
Générateur-moteur synchrone monophasé.	A . . . 2,500	44	88.5	87.25	84.25
	B . . . 2,440	48	85	83	79.
	C . . . 3,100	38	—	—	—
Générateur-moteur d'induction triphasé.	A . . . 2,680	50	89	87.75	84.75
	B . . . 2,260	44	85.5	84.5	81.5
	C . . . 2,360	43	89	86	80
Générateur-moteur d'induction biphasé.	A . . . 2,680	50	89	87.75	84.75
	B . . . 2,300	45	85	84	81
Générateur-moteur d'induction monophasé	A . . . 3,200	64	85	83.75	81
	B . . . 2,580	52	80	77	72

N. B. — Tout ce qui précède se rapporte à des équipements de convertisseurs de 500 kw., à de 500 à 550 volts du côté du courant continu, à 6,500 volts du côté du courant alternatif. A, B, C, D, se rapportent à différents constructeurs.

De ces renseignements, il résulte que le convertisseur rotatif est en soi supérieur à tous les autres; il réclame toutefois un plus grand nombre de commutateurs monopolaires à basse tension au tableau de distribution.

Au point de vue de la complication, il n'y a pas de différence entre une rotative avec son transformateur et un générateur-moteur sans

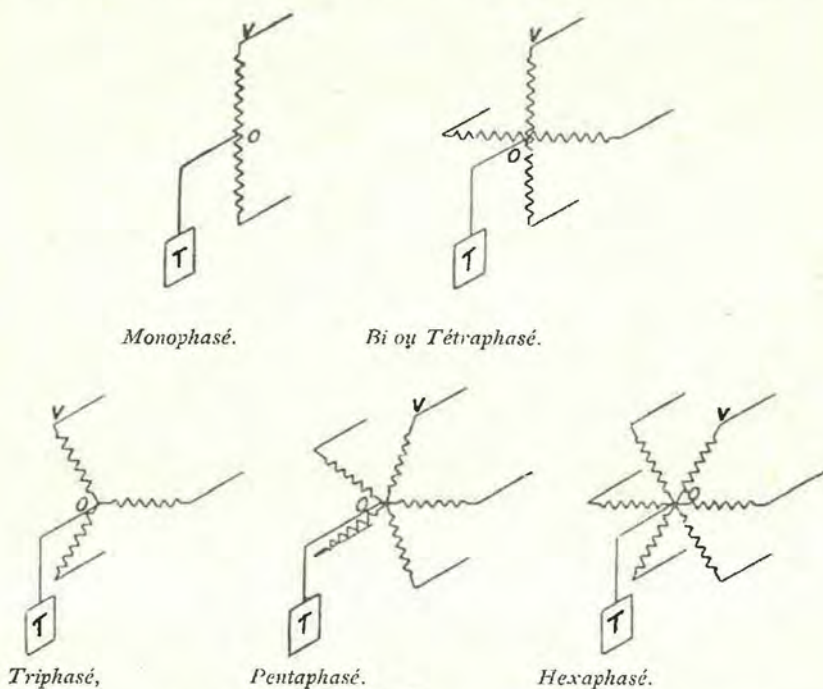


FIG. 28.

cet appareil. En ce qui concerne le fonctionnement et le démarrage, les rotatives bien étudiées à basse fréquence ne présentent aucune difficulté. Enfin, par rapport à la capacité de surcharge, à la facilité de réglage et de manœuvre, le convertisseur rotatif offre tout ce que l'on peut désirer.

*Câbles.* — Il est intéressant de noter que, théoriquement, le système triphasé devrait donner les meilleurs résultats, par rapport à la puissance qui peut être transmise avec un poids donné de cuivre et avec un minimum d'action sur l'isolement du système.

La figure 28 représente les systèmes renfermant les principes mono,



bi ou tétra, tri, penta ou hexaphasé, le point neutre dans chaque cas étant mis à la terre. Soit  $V$  le voltage et  $C$  le courant par fil dans chaque système (dans le monophasé, le voltage de la ligne =  $2V$ ), alors la puissance transmise dans les différents cas sera représentée par  $nVC \cos \varphi$ , dans lequel  $n$  = nombre de conducteurs et  $\varphi$  l'angle de décalage. La puissance transmise par unité de poids de cuivre sera la même dans chaque cas et par analogie le potentiel maximum par rapport à la terre; mais la différence maxima du potentiel existant entre deux points quelconques dans le système (c'est-à-dire entre les âmes d'un câble de ligne) est un minimum dans le cas du triphasé. De plus, si le point neutre n'est pas à la terre, on doit considérer comme l'action maxima sur l'isolement, le voltage par rapport à la terre de tout fil de ligne ou pôle, si l'un quelconque est mis accidentellement à la terre pendant un instant; cette action est encore évidemment un minimum dans le cas du triphasé.

Si l'on considère le cas de Glasgow, on a quatre câbles et trois âmes à chacune des cinq sous-stations; la section de ces câbles est de 0.1 ou 0.15 pouce carré par âme, selon le cas. Chacun de ces câbles peut être rendu indépendant des autres. Si l'on avait employé la transmission monophasée, on aurait obtenu un arrangement équivalent en prenant :

1° Un câble concentrique par circuit, ou quatre câbles par sous-station;

2° Deux câbles à âme simple, indépendants par circuit, ou huit câbles par sous-station;

3° Un câble à âme double par circuit, ou quatre câbles par sous-station.

Dans le cas d'une transmission biphasée, on pouvait adopter un arrangement correspondant avec :

1° Deux câbles concentriques par circuit;

2° Quatre câbles à âme simple par circuit;

3° Deux câbles à âme double par circuit;

4° Un câble à quatre âmes par circuit.

En comparant les divers systèmes, on peut conserver le même potentiel maximum par rapport à la terre dans chaque cas, en d'autres termes garder la même action sur l'isolement des générateurs, etc., ou bien on peut garder la même différence de potentiel entre les conducteurs de la ligne, c'est-à-dire, la même action sur l'isolement des câbles dans chaque cas. Il ne s'ensuit pas que ces deux conditions soient réalisées en même temps;

TABLEAU III

1000 Kw TRANSMIS SUR UN MILLE	Volts entre les fils de ligne ou les âmes	Volts par fil du système
1. Triphasé, âme triple; point neutre du système mis à la terre . . . . .	6,500	3,750
2. Monophasé concentrique; conducteur mis à la terre . . . . .	3,750	—
3. Monophasé concentrique; conducteur mis à la terre . . . . .	6,500	—
4. Monophasé, âme double; neutre mis à la terre . . . . .	6,500	3,250
5. Idem. . . . . idem. . . . .	7,500	3,750
6. Monophasé, deux câbles séparés, l'extérieur du neutre mis à la terre	7,500	3,750
7. Biphassé, deux câbles à âme double, le neutre mis à la terre . . . . .	6,500	3,250
8. Idem. . . . . idem. . . . .	7,500	3,750
9. Biphassé, 2 câbles à âme double, neutre mis à la terre . . . . .	6,500	3,250
10. Idem. . . . . idem. . . . .	7,500	3,750
11. Triphasé, âme triple; non mis à la terre . . . . .	6,500	3,750
12. Monophasé, âme double; non mis à la terre. . . . .	6,500	3,250
13. Monophasé, deux câbles séparés; non mis à la terre . . . . .	6,500	3,250
14. Biphassé, âme quadruple . . . . .	6,500	3,250
15. Biphassé, deux câbles à âme double . . . . .	6,500	3,250

Les prix ci-dessus se rapportent à des câbles isolés au papier, couverts de plomb, tirés  
 Dans chaque cas, la même puissance est transmise et la perte par mille en kilowatts

Courant par fil de ligne	Section par fil de ligne en pouce carré	Section totale en pouce carré	Volts par rapport à la terre, de tout fil de ligne, c'est-à-dire l'effort électrique sur les générateurs, etc	Volts entre deux âmes, c'est-à-dire, l'effort sur l'isolement du câble	Coût par mille posé assemblé, y compris les conduites et le tirage des câbles	
					A	B
					Liv. St.	Liv. St.
89	0.15	0.45	3,750	6,500	956	1,072
267	0.9	1.8	3,750	3,750	2,244	2,154
154	0.3	0.6	6,500	6,500	1,150	1,499
154	0.3	0.6	3,250	6,500	1,090	1,175
133	0.225	0.45	3,750	7.500	968	1,067
133	0.225	0.45	3,750	Effort sur l'isolement 3,750	1,128	1,280
77	0.15	0.6	3,250	6,500	1,138	1,256
66.5	0.1125	0.45	3,750	7,500	948	1,182
77	0.15	0.6	3,250	6,500	1,540	1,482
66.5	0.1125	0.45	3,750	7,500	1,352	1,374
89	0.15	0.45	6,500	6,500	1,144	1,168
154	0.3	0.6	6,500	6,500	1,204	1,284
154	0.3	0.6	6,500	6,500	1,420	1,456
77	0.15	0.6	6,500	6,500	1,240	1,388
77	0.15	0.6	6,500	6,500	1,692	1,590

dans des conduites en fer, couvertes de ciment.  
= 5.3.



Le tableau III donne la comparaison de ces divers systèmes de câbles ; la base admise est d'un mille (1 kilom. 609) de câble à âme triple avec le neutre mis à la terre, transmettant 1,000 kilowatts à 6,500 volts (triphase), la section de chaque âme étant 0.15 pouce carré ; dans tous les cas, le voltage efficace est rapporté et non l'ordonnée maxima de la courbe ondulatoire du voltage.

Dans ce cas, on verra que l'effort, sur l'isolement des générateurs, des transformateurs, etc., est de 3,750 volts, et, sur l'isolement des câbles, de 6,500 volts.

Les cas 2 et 3 représentent une transmission monophasée avec câbles concentriques. Dans ces circonstances, il sera essentiel de travailler avec un conducteur extérieur mis à la terre pour assurer la stabilité de fonctionnement. Avec 3,750 volts entre l'intérieur et l'extérieur, on aura le même effort sur l'isolement des générateurs, mais un plus petit effort sur celui des câbles. Avec une tension de travail de 6,500 volts, l'effort sur les générateurs sera plus grand et, sur les câbles, il sera le même que dans le cas 1. La quantité de cuivre dans la ligne sera quatre fois et 1.33 fois respectivement celle du cas 1, pour la même perte de transmission.

Les cas 4 et 5 représentent une transmission monophasée avec des câbles à deux âmes, le point neutre étant à la terre. Dans le cas 4, avec 1.33 fois la quantité de cuivre, on a le même effort sur les câbles mais un plus petit effort sur les générateurs ; avec la même quantité de cuivre, dans la ligne (cas 5), on a le même effort sur les générateurs, mais un plus grand dans les câbles.

Le cas 6 représente une transmission monophasée avec deux câbles séparés et un neutre à la terre. Dans cet exemple, le voltage de travail serait de 7,500, quand l'effort sur les générateurs et les câbles sera de 3,750, le poids du cuivre étant le même que dans le cas 1. L'inconvénient est qu'il faut deux fois le nombre de câbles actuels et la self-induction de la ligne est essentiellement augmentée.

Les cas 7 et 8 représentent les transmissions biphasées avec des câbles à quatre âmes et les points neutres mis à la terre. Ils correspondent exactement au monophasé des cas 4 et 5 et aux cas 9 et 10, où l'on fait emploi de deux câbles à deux âmes par circuit.

Le cas 11 représente le triphasé à trois âmes où le neutre n'est pas à la terre ; conséquemment, dans ce cas, le maximum d'effort possible sur les générateurs et les câbles est de 6,500 volts. On peut ainsi comparer les systèmes avec âme double et quadruple et des câbles séparés. Dans cet exemple, l'effort sur le générateur et les câbles,

comme dans le cas 10, sera de 6,500 volts, mais le poids de cuivre sera augmenté de 33 %.

Cette discussion sur la question des câbles est un peu longue, mais l'auteur pense qu'elle renferme tous les cas possibles et qu'elle donne une bonne base de comparaison. La dernière colonne du tableau indiquant les dépenses s'applique aux câbles recouverts de plomb et isolés au papier et comprend le coût de la conduite placée sur le système adopté à Glasgow; le tableau montre clairement que l'avantage réside certainement dans le système triphasé. La forme de l'onde de la F. E. M. a été supposée la même dans le cas des courants tri, bi ou monophasés.

L'auteur ajoute qu'il préfère un système non mis à la terre, sauf dans le cas d'emploi de câbles concentriques où le conducteur extérieur est à la terre; il estime que le câble à âme triple est le plus commode et le meilleur.

Les considérations précédentes pourraient être modifiées complètement par les exigences du *Board of Trade*, par exemple, si l'on prescrivait la protection des câbles par une armature extérieure autre que celle en plomb ou la limitation de la puissance à transmettre par un simple câble. Par exemple, les systèmes bi et monophasés réclament le même poids de cuivre, aussi longtemps que chaque phase est alimentée par un câble à âme double et que les systèmes ne sont pas mis à la terre; le système biphasé avec un câble à trois conducteurs est beaucoup plus coûteux quant au cuivre que le monophasé, mais si l'on doit avoir une enveloppe mise à la terre et que l'on utilise celle-ci comme conducteur, le biphasé avec deux câbles concentriques exige moins de cuivre que le monophasé avec un câble concentrique, puisque dans le premier cas, les deux extérieurs étant connectés avec la terre, forment une conduite commune et par suite leur section transversale peut être réduite.

Tout cela ressort de l'inspection du tableau IV. Il faut noter que le système triphasé avec le neutre à la terre est beaucoup meilleur que le biphasé avec deux concentriques. Dans le premier cas, la section de cuivre est de 0.45, et l'effort sur les générateurs est de 3,750 volts; dans le dernier, la section de cuivre est de 0.437, l'effort sur les générateurs est de 6,500 volts, ou bien il faut deux fois autant de câbles que dans le triphasé.



TABLEAU IV

TYPE	Voits par phase	Courant	Section en pouce carré	Perte totale par mille	Effort maximum possible sur l'isolement du système
				kw.	volts
Monophasé, âme double, ou deux câbles séparés; système non mis à la terre . .	6,500	154	$0.3+0.3=0.6$	6.3	6.500
Biphasé, conducteur triple, avec ou sans conducteur commun mis à la terre . .	4,600	109 109 154	$0.256+0.256$ $+0.362=0.874$	6.3	6.500
Monophasé, concentrique, extérieur mis à la terre . .	6,500	154	$0.3+0.3=0.6$	6.3	6.500
Biphasé, les deux extérieurs des concentriques mis à la terre . . . . .	6,500	77 77 109	$0.128+0.128$ $+0.181=0.430$	6.3	6.500

*Tableaux de distribution.* — On constatera ici une simplification par l'emploi du circuit monophasé. Le seul fait, toutefois, d'exiger trois fils par commutateur au lieu de deux, et éventuellement, ce qui n'est pas nécessaire, trois ampèremètres par circuit au lieu d'un, ne devrait pas avoir beaucoup de poids dans la détermination du choix d'un système.

*Génératrices.* — L'auteur a obtenu de différents constructeurs, pour la rédaction de sa notice, des prix de génératrices tri et monophasées correspondant en type et en puissance aux unités de 2500 kw. de Glasgow.

Les renseignements fournis à chaque constructeur étaient les suivants :



Puissance : 2,500 kw. ;

Voltage : 6,500 ;

Effet utile à pleine charge : 96 % ;

» à trois quarts de charge : 95 % ;

» à demi charge : 93 % ;

Vitesse : 75 révolutions ;

Périodes : 25 ;

Chute de pression entre la pleine charge et à vide, à vitesse et excitation constantes, et facteur de puissance de l'unité, ne devant pas dépasser 7 % ;

Fourniture de la génératrice sans palier, mais avec rhéostat, etc.

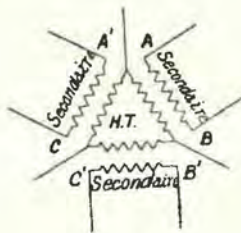
TABLEAU V

	GÉNÉRATRICES			
	TRIPHASÉES		MONOPHASÉES	
	Poids	Coût	Poids	Coût
	Tonnes	Liv. St.	Tonnes	Liv. St.
1	123	6,000	184	8,900
2	120	5,400	140	6,200
3	110	4,600	125	5,200
4	92	5,360	105	6,080

Dans le tableau V, l'auteur a essayé de réunir les renseignements obtenus des différents constructeurs, desquels il résulte que la génératrice triphasée est moins chère et plus légère que la monophasée.

M. Field fait toutefois remarquer que, si l'installation triphasée convient le mieux pour une grande installation de tramway, l'adoption ne lui en paraît pas recommandable quand la principale charge réside dans l'éclairage. Le moteur monophasé a, dans ces derniers temps, fait

de grands progrès et est maintenant une machine parfaitement pratique et très économique, et, vu les perfectionnements des génératrices monophasées et les méthodes qui permettent de les rendre automatiquement compound, on peut introduire dans les circuits d'éclairage un moteur à forte charge sans inconvénients. De même, on peut parfaitement bien, et dans un grand nombre de cas d'ailleurs la disposition est adoptée, introduire des lampes dans les circuits des moteurs triphasés, avec d'excellents résultats. Il est toutefois intéressant de noter que l'économie de cuivre dans le réseau à basse tension dans lequel on adopte le système triphasé est, contrairement à l'attendu, pratiquement nulle.



H.T. = haute tension

FIG. 29.

trois conducteurs on aura 1.73 fois le courant, c'est-à-dire la même densité de courant qu'auparavant; en d'autres termes, tandis qu'on distribue la même somme de puissance, on réduit le poids de cuivre de 13 1/2 % et on diminue les pertes de la distribution d'une même quantité. Cette considération semble indiquer un grand

avantage dans la distribution triphasée; mais cela n'est pas en réalité, car on adopterait certainement un système à trois fils dans la distribution monophasée.

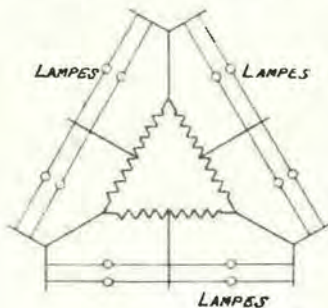


FIG. 30.

La disposition représentée fig. 30 pourrait, il est vrai, être comparée avec avantage, quant à l'économie de cuivre, avec le système monophasé à trois fils; c'est néanmoins une méthode impraticable par suite de la multiplicité des circuits et de



la difficulté du réglage. La seule méthode qui corresponde au système monophasé à trois fils et qui permet un réglage indépendant des divers

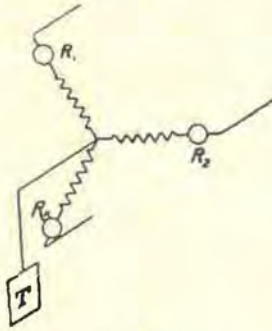


Fig. 31.

circuits est représentée dans la figure 31, où  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  sont des régulateurs série-shunt.

Pour autant que l'auteur a pu le déterminer, l'effet produit sur une phase par une variation de charge sur l'autre, ne diffère pas essentiellement dans les systèmes bi ou triphasé.

Un système triphasé a été adopté dernièrement avec grand succès en Amérique et en Suisse, où, pour éviter tout réglage dans les

sous-stations, le voltage d'une phase seule est maintenu constant dans la station génératrice et toutes les lampes à incandescence sont groupées sur cette phase; la constance de la tension sur cette phase I est obtenue en réglant le champ de la génératrice. Les phases II et III recevront les lampes à arc en série ou d'autres appareils dans lesquels un voltage constant n'est pas indispensable, et les moteurs seront groupés sur les trois phases. Dans ce cas, les lampes à incandescence peuvent être alimentées par un système à trois fils, le fil neutre étant relié au point milieu de la phase réglée, donnant ainsi une tension double de celle des lampes au voltage de travail entre les bornes du moteur. Quand on adopte un semblable système, on ne cherche pas à obtenir un équilibre des charges sur les trois phases, étant donné que toute génératrice triphasée bien étudiée peut être employé jusque 75 % de sa force normale comme génératrice monophasée, en employant deux fils de l'enroulement comme la monophasée; cela signifie que lorsqu'on emploie ce système, un courant supérieur de 30 % au courant normal qui a été estimé par phase, peut être pris de la phase chargée.

Il paraît néanmoins qu'en employant deux conducteurs, comme dans le monophasé, on détruit l'essence de l'économie de la transmission triphasée et il s'ensuit qu'une transmission biphasée avec des câbles à quatre âmes serait tout aussi avantageuse. Dans ce dernier cas, le réglage peut être effectué sur une seule phase ou deux phases peuvent être réglées indépendamment à la station génératrice. Il convient de remarquer que si deux moteurs bi et triphasés et des



transformateurs sont connectés à des circuits de charges non équilibrés, ils tendront à s'équilibrer. Par exemple, si de nombreux moteurs sont connectés à un circuit biphasé et sont alimentés par un générateur biphasé et si, pendant le fonctionnement d'un certain nombre de moteurs, le circuit d'une phase est ouvert à la génératrice, les moteurs quoique ne recevant, en réalité que du courant monophasé de la phase encore connectée à la génératrice, tourneront en réalité comme des biphasés, c'est-à-dire qu'ils seront *self-starting* et trouveront environ 0.8 de voltage normal à travers la phase coupée; en fait, les moteurs légèrement chargés engendreront et feront circuler, dans les moteurs plus lourdement chargés, les courants nécessaires à la phase mise hors circuit, de manière à les rendre aptes à travailler plutôt comme des moteurs biphasés que comme des moteurs monophasés.

#### DISCUSSION AU CONGRÈS

M. E. KOLBEN (Prague). — Les renseignements que M. Field donne dans son mémoire sont à son avis, parfaitement corrects, et montrent actuellement l'avantage du triphasé comparé au bi et au monophasé; il pense que le premier système se répandra d'une façon générale, non seulement pour la distribution de la puissance, mais également pour l'éclairage combiné avec l'alimentation des moteurs, comme c'est le cas dans les grandes villes. Un point très intéressant traité par M. Field est l'emploi des moteurs triphasés dans l'exploitation des chemins de fer. M. KOLBEN est d'accord avec M. Field, quand ce dernier dit qu'à présent le moteur triphasé n'est pas applicable dans l'exploitation des tramways, comme c'est le cas dans nos grandes villes; mais son champ d'application est le chemin de fer proprement dit. Dans ce cas, il signale la grande perte d'énergie provenant du réglage de la vitesse, par les moyens connus, que l'on rencontre dans les moteurs triphasés.

Il rappelle qu'au début du développement des tramways électriques en Amérique, avant qu'on eût adopté le mode actuel de réglage, il fallait que la puissance des stations génératrices fût de 20, 30 ou 40 % plus élevée que celle qui était nécessaire; c'est actuellement le cas pour le moteur triphasé.

D'autre part, si l'on considère une station génératrice en triphasé avec des sous-stations de conversion, le coût de la machinerie de la sous-station ne s'élèvera probablement pas à un tiers du coût supplé-

mentaire réclamé par l'augmentation de l'installation due au réglage du système de moteur triphasé, ceci complètement en dehors de la question d'économie.

Pour la distribution combinée de la lumière et de la puissance dans les grandes villes, le système triphasé est aussi le plus convenable, mais il est alors nécessaire d'adopter un plus grand nombre de périodes : 42 à 50.

Par exemple, à Prague, il existe une grande station de triphasé dans laquelle on a adopté le nombre de 50 périodes comme étant le plus apte à fournir, non seulement la puissance pour les tramways, mais encore tout l'éclairage public et privé, d'une seule station pour toute l'énergie consommée dans une ville. On ne peut imaginer rien de plus simple. Les unités génératrices sont de 1,000 à 3,000 chevaux et, par un seul jeu de conducteurs, on distribue la puissance aux différentes sous-stations et on alimente aussi les réseaux à basse tension pour les lampes et les moteurs.

Se référant à un tableau fourni par l'auteur du mémoire, M. KOLBEN signale que la différence de pression est peu importante si une ou deux phases d'une grande génératrice ou d'un groupe de transformateurs de grandes dimensions est chargée plus que les autres phases, même jusque 30 % de différence de charge non inductive; il n'est alors nécessaire de faire usage d'aucun dispositif spécial de réglage.

Le professeur H.-S. CARHART (Michigan) signale que, en Amérique, le système triphasé de distribution est le plus généralement répandu; le biphasé est très peu employé. Quant à la fréquence, pour la puissance et l'éclairage combinés, il est possible de la prendre en dessous de 50. Il a eu l'occasion de se rendre dernièrement à l'Exposition de Buffalo où une puissance de 5,000 chevaux était transmise du Niagara, au palais de l'Exposition, pour l'éclairage seulement, à la fréquence de 25 périodes et l'on ne constatait pas, à moins d'une observation attentive, de variation dans l'éclat des lampes à incandescence, de sorte qu'avec une fréquence légèrement supérieure à 25, les variations seraient invisibles. Pour les lampes à arc, une fréquence quelque peu plus élevée serait désirable; pour la transmission de la puissance, on sait qu'une plus basse fréquence est préférable.

Il fait en outre observer que les lampes à arc à l'air libre cèdent de plus en plus la place aux lampes à arc enfermé, et qu'il est possible de les grouper en série sur une distribution triphasée.

Sur interpellation du Président, le professeur CARHART confirme qu'aux Etats-Unis, les lampes à arc à l'air libre disparaissent, qu'on



ne les rencontre plus que dans les vieilles installations, et que les lampes à arc enfermées sont employées dans les nouvelles, qu'elles soient alimentées par les courants continus ou les courants alternatifs.

M. W.-B. ESSON pense que les opinions ont jusqu'ici beaucoup différé en ce qui concerne les avantages relatifs des courants de phases différentes, mais que l'on est actuellement en état de tirer des conclusions. Quant au conducteur neutre employé avec le courant alternatif, il ne pense pas qu'il joue le même rôle que la distribution à trois fils dans le courant continu, au sujet de la dépense en cuivre. Avec le courant alternatif monophasé, on peut évidemment employer un système à trois fils, mais on ne conçoit pas qu'avec une même dépense de cuivre ou à peu près, on se prive des avantages des courants polyphasés pour conserver l'ancien système à courant monophasé. Les stations utilisant primitivement ce dernier ont été transformées de manière à utiliser du courant biphasé. On a adopté ce dernier au lieu du triphasé pour des raisons de facilités, motivées par la canalisation existante.

M. ESSON affirme qu'il ne sera plus établi en Grande-Bretagne de stations utilisant du courant monophasé, à moins de circonstances spéciales, mais que toutes produiront, soit du triphasé, soit du continu.

M. le professeur SYLVANUS THOMPSON n'est pas tout à fait d'accord avec M. ESSON, quand celui-ci affirme que les idées sur la matière prennent corps définitivement; il y a et il y aura de fréquentes exceptions à la règle proposée, non seulement dans le cas cité par M. ESSON, mais encore dans d'autres. Il signale l'opinion de M. FERRANTI qui espère le retour au système monophasé, mais il ne la partage pas cependant; les complications du tableau de distribution et des autres parties d'une installation par courant triphasé sont plus imaginaires que réelles.

M. W. G. RHODES pose la question de savoir quel est le meilleur moyen à adopter: le transformateur statique et le convertisseur, le générateur moteur synchrone ou le générateur moteur asynchrone? Quelques personnes considèrent la combinaison du transformateur statique et du convertisseur comme étant la meilleure solution parce que son efficacité est nécessairement plus grande que celle des deux autres, puisque, dans le transformateur, il n'y a pas de pertes par frottement et dans le convertisseur, exempté en monophasé, les pertes en cuivre sont moindres que celles d'une machine, soit génératrice, soit motrice. Le générateur moteur asynchrone est



le plus mauvais système des trois parce que le facteur de puissance du moteur asynchrone nécessite une plus grande installation à la station génératrice que celle nécessaire autrement.

A un point de vue théorique, M. RHODES a déjà signalé que la combinaison d'un transformateur statique et d'un convertisseur rotatif doit être préférée. Il appartient à ceux qui ont une grande expérience de dire quel est le meilleur système, de la combinaison du transformateur statique et du convertisseur rotatif ou bien du générateur moteur synchrone. Cette question intéresse principalement la transmission de la puissance pour les chemins de fer secondaires d'assez long parcours où l'emploi des courants continus serait trop coûteux.

M. BLATHY répond que cela dépend des conditions à satisfaire. Si l'on doit faire usage d'accumulateurs en même temps que de dynamos à courant continu, on trouvera généralement avantageux d'employer des générateurs moteurs, parce que la charge des accumulateurs avec une tension plus élevée que celle à laquelle ils doivent être employés est quelque peu plus difficile avec un convertisseur rotatif. Dans tous les cas où l'on ne fera pas usage d'accumulateurs, le convertisseur rotatif et le transformateur statique seront supérieurs tant au point de vue de la dépense de premier établissement que de l'efficacité et dans l'aptitude à porter des surcharges; mais le système le plus convenable à employer pour les tramways et les railways dépendant d'une station centrale, à son avis, consiste à alimenter les moteurs directement par du courant triphasé, sauf dans quelques cas exceptionnels. Il n'existe absolument aucune difficulté de réglage et pas de perte inutile; même dans le cas de petits parcours et de fréquents arrêts, l'économie du système polyphasé pour les tramways est au moins égale à celle du système par courant continu, que celui-ci soit engendré à la station ou non. Sous ce rapport, un très grand progrès a été réalisé tout récemment et donnera ses preuves dans le prochain fonctionnement d'un chemin de fer qu'il a établi en Italie. Ce chemin de fer a 100 kilomètres de longueur environ, il a été exploité jusqu'ici par la vapeur; la vitesse y est d'environ 65 kilomètres à l'heure; c'est la première ligne de chemin de fer à long parcours équipée pour l'emploi du courant triphasé.

Sur diverses interpellations du Président, M. BLATHY répond que le transport des marchandises se fera à la vitesse de 32 kilomètres à l'heure et que la dépense d'énergie, par tonne transportée, prise à la station centrale n'est pas plus élevée que celle nécessaire pour faire le même travail avec du courant continu.

Il n'existe, d'autre part, aucune limitation à la charge des trains, et ceux-ci sont au moins aussi lourds que lorsqu'ils sont conduits par des machines à vapeur. Le même poids de la locomotive électrique pourra plutôt remorquer une plus forte charge et l'adhérence sera augmentée.

Il y a un autre point sur lequel l'attention n'a peut être pas été portée. Dans toute locomotive à vapeur, le couple sur la roue motrice est très variable; il varie entre 2 et 3; le poids pour l'adhérence doit être calculé pour le maximum. Dans la locomotive électrique le couple est absolument uniforme et le poids total d'adhérence est apte à utiliser le travail des moteurs. La locomotive électrique sera suffisante pour au moins 30 ou 40 % en plus de puissance motrice que la locomotive à vapeur d'un poids égal d'adhérence. Il faut aussi considérer que la locomotive électrique supprime le tender, ce qui représente en moyenne 30 tonnes, c'est-à-dire environ 10 % du poids total du train. Il en résulte que, simplement par suite du remplacement, par la traction électrique, de la traction à vapeur, on réalise une économie d'environ 10 % sur le poids total à remorquer, ou bien l'on peut augmenter la charge utile de cette quantité.

M. BLATHY déclare qu'il désirerait en outre entretenir le Congrès de la question de la fréquence. On a adopté généralement le nombre 50, d'après les indications données. Il conteste le fait et prétend que la fréquence dans le plus grand nombre de nouvelles installations du Continent est de 42; c'est à peu près la plus basse fréquence que l'on puisse adopter pour les lampes à arc. Pour les lampes à incandescence on peut descendre à 22 périodes, et il y a un moyen d'employer une faible fréquence pour ces lampes. Si l'on place trois filaments dans une lampe ou, ce qui est la même chose, si l'on place trois lampes côte-à-côte, on peut faire usage d'une fréquence aussi basse qu'on le désire, même avec 10 périodes, et la lumière sera uniforme pour autant que la somme d'énergie transmise par le circuit triphasé soit constante. Le flux d'énergie est uniforme avec le système triphasé et c'est là un avantage de ce dernier; dans le système monophasé, le flux d'énergie varie constamment entre un maximum et zéro; dans le biphasé, il varie entre 7 et 10; mais, dans le triphasé, en supposant une charge uniforme, le flux d'énergie est constant et il est évident que le plus économique des systèmes, considéré à un point de vue philosophique, doit être celui-là, et c'est une raison en faveur de la supériorité du courant continu avec son flux uniforme



d'énergie sur le système alternatif monophasé. Cet avantage est partagé par le système triphasé, mais non par le bi ni le monophasé.

M. BLATHY s'occupe ensuite de la transformation des stations monophasées en polyphasées. On ne peut notamment faire cette transformation qu'en biphasé quand les câbles existants sont concentriques, à cause d'une question de capacité ; mais toute nouvelle installation doit se faire en triphasé.

M. GEIPEL rapporte le résultat d'une expérience faite en groupant d'abord des lampes sur les trois phases, puis en supprimant toutes celles de deux phases, en conservant les autres, tout en activant les moteurs comme avant ; il en est résulté une chute de tension de 2 %, ce qui ne doit pas avoir lieu.

Le système triphasé permet d'abaisser le voltage des lampes, tout en conservant l'économie résultant du haut voltage pour les moteurs. Les générateurs triphasés sont, en outre, pour une même puissance, beaucoup moins coûteux que les générateurs monophasés.

M. FIELD réplique que la discussion a dépassé les limites de son mémoire, qui était consacré uniquement à l'étude des moteurs triphasés pour tramways et non pour chemins de fer, lesquels réclament des circuits à haute tension et non à basse tension.

Il fait remarquer qu'il ne comprend pas bien ce qu'entend M. BLATHY quand il dit que le flux d'énergie dans le biphasé varie entre 7 et 10. Il a toujours considéré que la puissance dans le circuit biphasé est à tout instant, théoriquement, aussi constante que dans le triphasé, pourvu que la charge soit équilibrée dans chaque cas.

En prenant le cas du biphasé, dans la face *A* on a :

$$\begin{aligned}\text{Volts} &= V \sin kt; \\ \text{Courant} &= C \sin (kt - \varphi).\end{aligned}$$

Dans la phase *B*, on a :

$$\begin{aligned}\text{Volts} &= V \sin (kt + 90^\circ); \\ \text{Courant} &= C \sin (kt + 90^\circ - \varphi).\end{aligned}$$

La puissance totale est conséquemment :

$$VC (\sin kt \cdot \sin (kt - \varphi) + \sin (kt + 90^\circ) \cdot \sin (kt + 90^\circ - \varphi)).$$

Cette expression développée donne une quantité indépendante de *t*.

Par analogie, le couple d'un moteur d'induction biphasé est théoriquement uniforme, tout comme celui d'un moteur d'induction triphasé. En pratique, toutefois, ces conditions idéales peuvent être plus complètement réalisées avec un système triphasé qu'avec un système biphasé.

Nous croyons utile de reproduire quelques extraits du rapport officiel sur le Congrès d'électricité de Paris en 1900, dans lequel il a été question, comme ci-dessus, des lampes à arc enfermé et de l'extension de leur emploi aux Etats-Unis.

« Les avantages des arcs enfermés sont : l'indépendance des foyers, leur montage en simple dérivation sur 110 volts ou par paires en série sur 220 volts, l'extrême simplicité du mécanisme, l'emploi des crayons de qualité médiocre, la consommation très réduite de charbons, la réduction de la main-d'œuvre.

» Leurs inconvénients, par contre, sont la teinte bleue de la lumière, les variations d'éclat qui ne peuvent être atténuées que par l'emploi d'un petit globe diffuseur absorbant une partie de la lumière; l'encrassement de celui-ci, par suite d'un dépôt ocreux de silice chargée d'un peu d'oxyde de fer pendant la combustion, et le rendement lumineux médiocre avec de gros charbons.

» ... Les arcs enfermés se sont très vite répandus aux Etats-Unis, grâce à leur simplicité et aussi aux moindres exigences du public au sujet de la fixité et du rendement de l'éclairage. En trois ans, ce système est devenu plus répandu que les lampes à arc ordinaire.

» ... On voit que l'arc enfermé à courant continu, bien que notablement inférieur à l'arc à l'air libre, présente encore une notable supériorité sur la lampe à incandescence ordinaire, et que ses grands avantages pratiques, cités plus haut, peuvent le faire préférer dans bien des applications à l'arc à l'air libre; aussi, aux Etats-Unis, où l'on se préoccupe beaucoup de simplifier la main-d'œuvre et d'économiser les charbons, qui sont chers relativement à l'énergie, l'arc enfermé a-t-il rapidement pris le pas sur l'arc libre.

» Il ne saurait en être de même de l'arc enfermé à courants alternatifs, car, d'après les essais récents de MM. Matthews, Thompson et Hilbish, son rendement est plus faible que celui des lampes à incandescence ordinaires : la consommation atteint, en effet, de 3 à 4.35 watts par bougie Hefner, aux bornes de la lampe, et 3.7 à 5.8 watts sur le réseau, au lieu de 2 pour l'arc enfermé à courant continu essayé comparativement. »

---



Nous avons, dans ce troisième article, complété l'examen des matières traitées dans les sections V, VI et IX, les seules dont nous ayons suivi les travaux:

Nous ferons remarquer que certaines des communications ayant figuré au programme n'ont, en réalité, pas été produites au Congrès, par suite de ce que leurs auteurs ne se sont pas présentés et n'ont pas fait parvenir leurs travaux en temps opportun.

Sont dans ce cas les travaux de la section des Mines renseignés dans la liste que nous avons donnée dans notre premier article, sous les numéros 6, 15, 16, 17 et 18.

Toutes les autres communications de cette section ont été analysées; il en est de même de toutes celles de la section V et de la plupart de celles de la section IX.

La table des matières qui termine ce dernier article est divisée par ordre des sections, et facilitera au lecteur la recherche des objets qui l'intéresseront particulièrement, dans l'ensemble de ceux que nous avons traités, librement et sans observer un ordre rigoureux, au cours des trois articles qui composent notre compte-rendu.

Bruxelles, avril 1902.

J. LIBERT et V. WATTEYNE.

## TABLE DES MATIÈRES

### Le Fer et l'Acier.

	Tome	Page
Liste des travaux présentés au Congrès . . . . .	VI	887
Les industries du fer et de l'acier de l'Ouest de l'Ecosse . . . . .	VII	92
La nomenclature de la métallographie . . . . .	VI	888
id. id. id. . . . .	VII	385
Les alliages du fer et du cuivre. . . . .	VII	394
L'influence du cuivre sur le fil d'acier . . . . .	VI	890
La méthode Brinell pour la détermination des propriétés du fer et de l'acier. . . . .	VII	436
Présence du calcium dans le ferro-silicium à haute teneur. . . . .	VI	890
Le spectre des flammes aux différentes périodes pendant le soufflage du Bessemer basique . . . . .	VII	468
Le traitement correct de l'acier. . . . .	VII	462
La bonne utilisation de la puissance des gaz des hauts-fourneaux . . . . .	VII	83
Les variations du carbone et du phosphore dans les lingots d'acier . . . . .	VII	430
Les efforts internes du fer et de l'acier . . . . .	VII	415

### Les Mines

Liste des travaux présentés au Congrès . . . . .	VI	892
L'adresse présidentielle . . . . .	VI	893
L'excursion aux charbonnages du district d'Hamilton . . . . .	VI	911
Les mines à l'Exposition . . . . .	VI	913
Généralités géologiques et statistiques sur les bassins houillers d'Ecosse. — Les houilles du calcaire carbonifère et les schistes pétrolifères du Lothian . . . . .	VII	473



	Tome	Page
Les mines d'or de Tarquah (Côte d'Or) . . . . .	VII	117
La fabrication des briques . . . . .	VI	894
Id. id. . . . .	VII	492
Les gisements aurifères de Klerksdorp (Transvaal)	VII	114
Les levés des plans de mines et leur raccord avec la surface par observation directe . . . . .	VI	896
Id. id. . . . .	VII	99
Les ressources minérales de la province de Québec (Canada) . . . . .	VII	110
L'exploitation et le traitement des minerais de cui- vre aux mines de Walkaroo et de Moonta (Australie du Sud) . . . . .	VII	509
Un nouveau diagramme du travail de la ventila- tion dans les mines . . . . .	VI	899
Les courants alternatifs et leurs applications possi- bles dans les mines . . . . .	VI	909
La fabrication du coke à Oliver (Pennsylvanie) .	VII	504

### L'Électricité

Liste des travaux présentés au Congrès . . . . .	VI	914
L'électricité à l'Exposition de Glasgow . . . . .	VI	915
Les voitures de chemins de fer à grande vitesse.	VII	519
Les dangers des lignes de trolley et leur prévention.	VI	921
Id. id. . . . .	VII	516
Les avantages relatifs des systèmes mono-, bi- et triphasés pour l'alimentation des réseaux à basse tension . . . . .	VII	550

---