Lignes électriques, un problème d'irrigation ?

Robert BERRANGER, F5NB

Cet article est la compilation de deux articles publiés dans Radio-REF, à savoir l'exposé d'un petit problème de physique en février 200x, et son corrigé en xxx 200x. Je remercie F8IC et F6FQX pour leur participation.

Enoncé du problème.

Soit le montage de la figure 1.

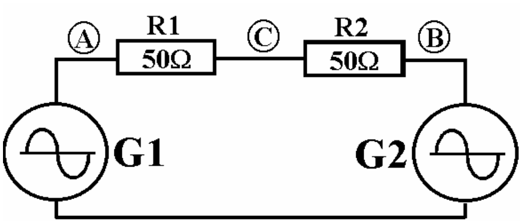

Figure 1

G1 et G2 sont deux sources de tension incluses dans deux générateurs synthétisés identiques. La référence de l'un est asservie sur la référence de l'autre. Ils ont mêmes fréquences et mêmes tensions de sortie. R1 et R2 sont les résistances internes des générateurs.
Soit U la tension qui serait mesurée aux bornes d'une charge de 50Ω connectée à un seul générateur, et I le courant dans cette charge. Dans tous les cas, les tensions U(A) et U(B) sont égales à 2U.

a) *On ajuste la phase d'asservissement des générateurs de façon que leurs signaux de sortie soient en phase.*

Dans ce cas, la tension U(C) est égale à 2U et le courant dans R1 et R2 est nul.

b) On rajuste la phase d'asservissement de façon que leurs signaux de sortie soient en opposition de phase (quand la tension de l'un est positive, la tension de l'autre est négative).

Dans ce cas, la tension U(C) est nulle et le courant dans R1 et R2 est égal à 2×I

Maintenant, intercalons au point C deux lignes Zo = 50Ω, de longueur électrique λ/4, et mises en série à l'aide d'une très petite résistance R3 = 0,05Ω. Nous avons le schéma de la figure 2.

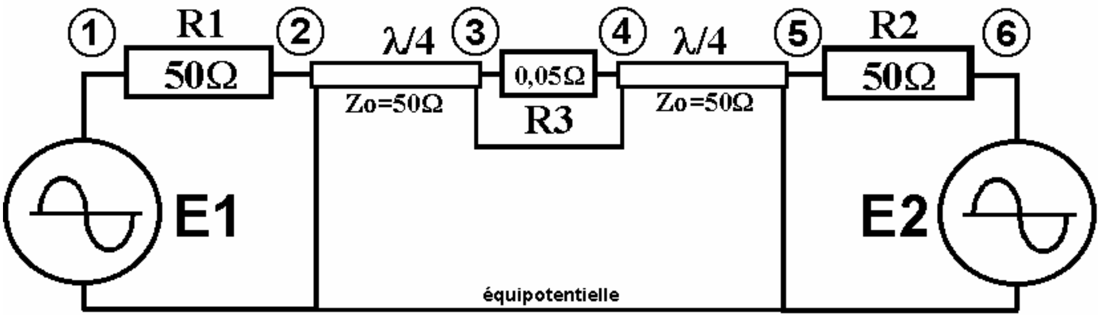

Figure 2

Soient E1 et E2, deux générateurs HF de même fréquence et d'amplitudes égales. Soit U la tension qui serait présente aux bornes d'une charge adaptée pour chaque générateur séparé. Dans ce cas les f.e.m. de chaque générateur sont égales à 2U. Et soit I le courant qui circulerait dans cette charge.

On demande les tensions et les courants aux points (2), (3) et (5) pour :

1) Des générateurs en phase.
2) Des générateurs en opposition de phase

Question subsidiaire :
On insère un ROS-mètre 50Ω successivement à chacun de ces points, et l'on demande le ROS mesuré pour les deux sens possibles de branchement.

Solution intuitive.

Tout d'abord, on remarquera que les deux lignes faisant λ/4, nous restons sur l'axe des réels, ce qui simplifie énormément les raisonnements et les calculs.
Ensuite, la ligne ayant une longueur totale de λ/2, ses deux extrémités (donc les points 2 et 5) seront le siège des mêmes tensions et des mêmes courants. La seule différence sera un déphasage de 180°.
Nous serons donc ramenés au cas d'une liaison directe, mais avec inversion des résultats en fonction du déphasage entre les générateurs. Ce ne sera toujours qu'une simple application de la loi d'ohm. Noter que ces résultats seront indépendants de l'impédance de la ligne.

Nous avons ainsi :
a) pour E1 et E2 en phase :
   U(2) = U(5) = 0
   I(R1) = I(R2) = 2.I
b) pour E1 et E2 en opposition de phase :
   U(2) = U(5) = 2.U
   I(R1) = I(R2) = 0

Q : *Et pour la tension aux points (3) et (4), et le courant dans R3 ?*

Là çà se complique un peu. Nous ne sommes plus indépendants de l'impédance de la ligne, et il faut faire intervenir certaines équations des lignes. Pour cela je laisse la parole à Jean-Pierre, F6FQX.

Solution mathématique.

On se souviendra que dans une ligne sans pertes, on a les relations suivantes le long de la ligne :
*U(pour x=0) = -j.Z*I(pour x=lambda/4) = - U(pour x=lambda/2)*
I(pour x=0) = -j.U(pour x=lambda/4)/Z = - I(pour x=lambda/2)

En appliquant au cas qui nous intéresse, cela donne les résultats suivants :

Quand les générateurs sont en phase :
*I(R1) = I(R2) = 2*I et I(R3) = 0*
*U(2) = U(5) = 0 et U(3) = U(4) = 2*U*

Quand les générateurs sont en opposition de phase :
*I(R1) = I(R2) = 0 et I(R3) = 2*I*
*U(2) = U(5) = 2*U et U(3) = U(4) = 0*

F6FQX.

Et le ROS ?

Le ROS-mètre mesurant un déséquilibre courant-tension[1], la réponse est simple. En effet, dans tous les cas, soit U est égale à zéro, soit c'est I, mais jamais les deux simultanément. Nous avons donc toujours un déséquilibre maximum, et le ROS indiqué sera infini, quel que soit le sens de branchement.

Voilà, ce n'était pas très compliqué. Maintenant, on peut corser le problème :

Q : *Et avec une ligne d'impédance différente de R1 et R2 ?*
R : Dans ce cas, avec Zo = 25Ω, la tension au point (3) est divisée par 2 et le courant dans R3 est multiplié par 2 (quand ils existent). Avec Zo = 100Ω, c'est la tension qui est multipliée par 2 et le courant divisé par 2. Pour les autres points, il n'y a aucun changement.
Q : *Et avec une résistance R3 non négligeable devant celle de la ligne ?*
R : Dans le cas où les sources sont en phase, aucun courant ne circule dans R3. Donc, elle peut être infinie, sans changer le résultat. Noter que quand elle est infinie, cela ne change pas non plus que les sources soient en phase ou en opposition. Nous avons deux systèmes séparés.
Dans le cas où les sources sont en opposition de phase, cela change complètement le mode de fonctionnement de la ligne. Nous noterons le cas particulier où R3 = 2xZo. Dans ce cas, les lignes fonctionnent en mode progressif.
Q : *Et si les tensions des générateurs n'étaient pas identiques ?*

Afin d'examiner cette question, nous allons faire un tour du côté du simulateur Spice, et modéliser une ligne pour obtenir un comportement "mesurable", et non plus par formules mathématiques interposées (sinon dans le simulateur).
Les phénomènes qui se produisent dans une ligne apparaissent quand le retard qu'elle amène ne devient plus négligeable devant la période du signal. Le premier paramètre sera donc le retard. Ensuite, elle doit avoir un comportement réactif particulier qui s'annule pour son impédance caractéristique.
La modélisation se fera donc par des tronçons de ligne à retard que l'on rajoutera pour faire le retard (la longueur) désiré.
La cellule élémentaire peut se modéliser avec bobines et condensateurs comme sur la figure 3.

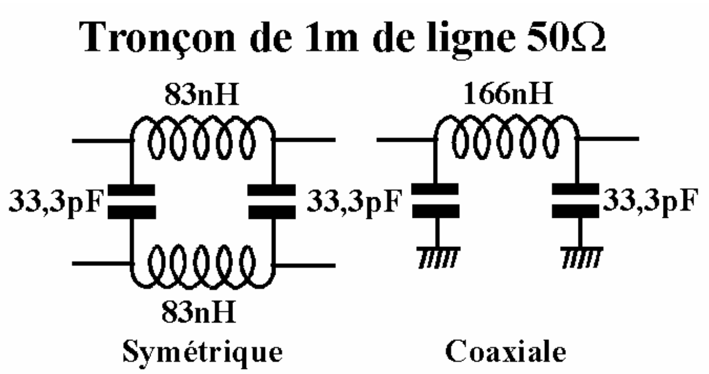

Figure 3

Nous pouvons déterminer une fréquence de résonance (avec LC = 166nH et 33,3pF) pour laquelle la cellule se comporte comme une ligne quart d'onde. C'est à dire que si l'on court-circuite la sortie, l'impédance d'entrée est infinie, et avec la sortie ouverte, l'impédance d'entrée est nulle. Ceci ne nous autorise pas à utiliser une seule cellule pour un quart d'onde car le retard ne correspond pas au quart de la période de la fréquence de résonance. Il faut mettre en série une infinité de cellules. Mais avec neuf cellules par quart d'onde, l'erreur d'approximation est négligeable.
C'est ainsi que j'ai modélisé chaque ligne de la figure 1 par neuf cellules coaxiales identiques à celles de la figure 2. Ceci va nous permettre de faire des mesures en nous affranchissant des problèmes matériels.

Nous avons donc deux tronçons quart-d'onde, d'une longueur de 9m. Cela correspond à une fréquence de travail de 8,34 MHz, confirmée par le simulateur.

Nous ferons des mesures de ROS au milieu de la ligne demi-onde, en utilisant la résistance R3 pour mesurer le courant.
Equations du ROS-mètre appliquées à la jonction des lignes (Zo = 50Ω)(1) :
$Vi = U_{(3)} + (1000 * (U_{(3)} - U_{(4)}))$
$Vr = U_{(3)} - (1000 * (U_{(3)} - U_{(4)}))$ ou $Vr = U_{(4)} + (1000 * (U_{(4)} - U_{(3)}))$
Les calculs de Vi et Vr sont faits directement par l'interface du simulateur. Il ne reste qu'à calculer le ROS :

$$ROS = \frac{Vi + Vr}{Vi - Vr}$$

N-B : *L'impédance caractéristique est obtenue en multipliant R3 par le facteur 1000 (=50Ω). Par ailleurs, nous n'avons pas à nous préoccuper de la phase, puisque grâce à deux lignes quart d'onde, et des charges résistives pures, nous restons sur l'axe des réels (cf. abaque de Smith).*

Nous commencerons par contrôler notre ROS-mètre en faisant E2 = 0, la ligne étant adaptée par R2 = 50Ω. Nous obtenons bien un ROS de 1.
Ensuite, nous remplaçons R2 par une résistance de 75Ω et nous obtenons bien un ROS de 1,5.

Maintenant, nous appliquons un coefficient de 0,2 à la source E2, en phase avec E1.
N-B : *Dans le simulateur, E1 est une source de tension directe et E2, une source de tension contrôlée par E1. Noter que la ligne produit une inversion de phase de la source E1.*
Nous avons au point (5) deux puissances correspondant aux critères avancés pour les puissances directe et réfléchie :
- Une puissance directe avec un courant en phase avec la tension
- Une puissance réfléchie avec une tension inversée, et un courant en phase avec cette tension.

Nous mesurons alors un ROS de 1,5, correspondant à 20% de puissance réfléchie(2).

Jusque là, tout va bien. Mais notre ligne est adaptée, puisqu'elle "voit" 50Ω à chacune de ses extrémités.
Maintenant, remplaçons R2 par 75Ω, ce qui devrait aussi apporter un ROS de 1,5. Nous augmenterons le facteur de E2 à 0,3 pour que le rapport de 20% soit respecté au point (5).
Nous mesurons le nouveau ROS, et alors nous trouvons un ROS de 1,08. Cela ne marche plus.

Nous pourrions conclure qu'il ne peut y avoir de puissance réfléchie que si la ligne est adaptée. Ceci semble contradictoire, mais seulement en apparence.
En effet, ce qui caractérise une ligne adaptée est la transmission progressive du signal. Or dans une ligne infinie, la transmission est toujours progressive, avec une puissance absorbée correspondant à son impédance caractéristique. Une ligne dont le signal a une durée plus courte que son retard, fonctionne comme une ligne infinie. C'est à dire que son comportement est indépendant de la charge jusqu'à ce que le signal atteigne celle-ci. Alors si la charge est désadaptée, une partie de la puissance retourne vers la source à travers la ligne qui se comporte comme à l'aller. Si maintenant, la source n'est pas adaptée non plus, il y aura une deuxième réflexion, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'énergie du signal soit entièrement consommée par la charge, la source, et la ligne si elle a des pertes. Ce comportement est facilement observable à l'oscilloscope.
Maintenant, si le signal dure beaucoup plus longtemps que le retard de la ligne, et s'il est stationnaire (c'est à dire à amplitude et fréquence constantes), alors, nous avons une période transitoire où la ligne se comporte comme avec l'impulsion. La différence, maintenant, c'est que le signal aller est encore là lors du "retour" et il s'oppose à lui, étant forcément plus important (ou à la limite, égal). Si le signal est sinusoïdal, il s'établit dans la ligne un équilibre avec répartition sinusoïdale des courants et tensions, les fameuses "ondes stationnaires". Celles-ci resteront stationnaires tant que le signal sera stationnaire également, c'est à dire de fréquence et d'amplitude constantes. Si nous changeons brusquement la fréquence ou le niveau, nous repartons dans une phase transitoire. Sinon, lorsque nous coupons le signal, nous avons une dernière phase transitoire pendant laquelle la puissance réfléchie retourne à la source (avec plusieurs aller-retours si la source n'est pas adaptée).

Résumons-nous :

Lorsque nous injectons le signal, nous avons une phase transitoire d'une durée double au retard de la ligne pendant laquelle les ondes stationnaires s'établissent dans la ligne. La puissance fournie par la source pendant cette période correspond à la "puissance directe".
Ensuite nous avons une période stable pendant laquelle la source ne fournit plus que la puissance consommée par la charge. Dans de plus ou moins bonnes conditions, si l'impédance présentée par la ligne à la source diffère de l'impédance de charge nominale (et également, mais ce n'est pas systématique, de l'impédance de la source). Durant cette période, seule la puissance consommée par la charge **transite** dans la ligne.
Enfin, lorsque nous coupons le signal, nous avons une autre phase transitoire pendant laquelle la ligne se "vide" (puissance réfléchie) dans la source avec des aller et retours vers la charge si la source n'est pas adaptée.
En dehors des périodes transitoires, la ligne se comporte avec l'émetteur comme un circuit RLC. La preuve, c'est que le moyen utilisé pour tester la tenue d'un émetteur au ROS consiste à lui connecter une charge RLC équivalente.
Certains objecteront en parlant de circulateurs et de coupleurs directifs. La démonstration résiste. On pourra revenir sur le sujet.

Et le problème d'irrigation ?

C'est une solution (un peu farfelue, j'en conviens) au problème de l'irrigation d'une rizière qui va nous venir en aide pour comprendre "physiquement" les explications ci-dessus.

Nous avons vu que la modélisation d'une ligne se faisait par la mise en série de tronçons d'un retard élémentaire. Dans la pratique électronique, nous avons un composant qui réalise cela. C'est une ligne à retard analogique fonctionnant par transfert de charge au rythme d'une

horloge numérique. Cette ligne à retard est appelée "chaîne à seaux". En l'occurrence, les seaux sont constitués de couples de condensateurs que l'on charge et décharge alternativement en progressant au rythme de l'horloge.
Cette ligne à retard m'a inspiré une "chaîne à seaux humaine".

Considérons le système de la figure 4.

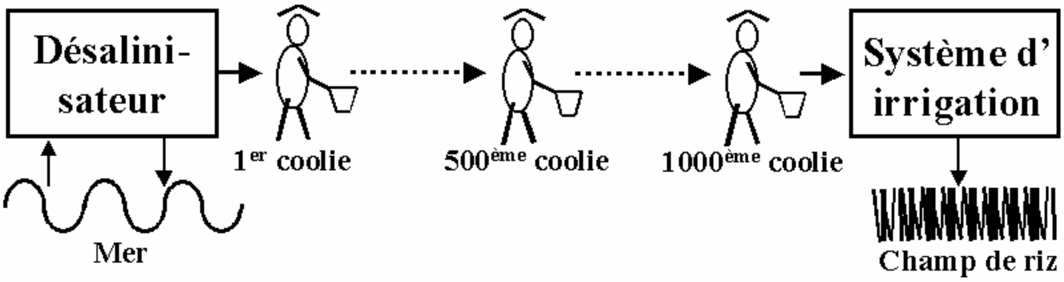

Figure 4

Nous sommes en Chine intemporelle.
Nous avons un désalinisateur d'eau de mer qui produit un seau d'eau par unité de temps. Il peut rejeter tout ou partie de cette eau à la mer (source adaptée).
Le coolie peut vider un seau par unité de temps. Il dispose de deux seaux, quand il en vide un, l'autre se remplit. Son comportement est simple. Il est là pour rétablir un équilibre, comme dans la nature. Donc, il videra son seau, soit chez le voisin qui est lui-même en train de vider son seau ailleurs que chez lui (effet d'entraînement), soit chez le voisin qui ne fait rien parce qu'il n'a plus d'eau à transférer.

Première hypothèse.

Le système d'irrigation accepte un seau d'eau par unité de temps (charge adaptée).

Cas N° 1. La durée de production est beaucoup plus courte que le nombre d'unités de temps de la chaîne (impulsion).
Dès le premier seau produit par le désalinisateur, le 1er coolie va remplir son seau, puis il va le transférer dans celui du second coolie qui est vide, puisque le seau du désalinisateur se remplit. Pendant l'unité de temps suivante, le deuxième coolie va démarrer le même processus que le premier, et ainsi de suite. La progression va se faire du premier vers le dernier.
Quand le désalinisateur s'arrête, le 1er coolie s'arrête à l'unité de temps suivante car il va voir des seaux vides de chaque côté. Puis ce sera le deuxième, etc…
Au millième coup, le millième coolie va déverser son premier seau dans le système d'irrigation et ainsi de suite jusqu'au dernier seau plein.

Conclusions :
- Tous les seaux d'eau produits ont été consommés par l'irrigateur.
- L'irrigation a eu lieu avec 1000 unités de temps de retard.
- La progression s'est faite naturellement[3] de la source vers la charge.

Cas N° 2. La durée de fonctionnement est beaucoup plus longue que le nombre d'unités de temps de la chaîne.
Dans ce cas, le processus est un peu plus complexe, et nous allons nous aider d'un diagramme qui représente les durées pendant lesquelles les seaux du premier et du dernier coolie sont pleins. Soit la figure 5 :

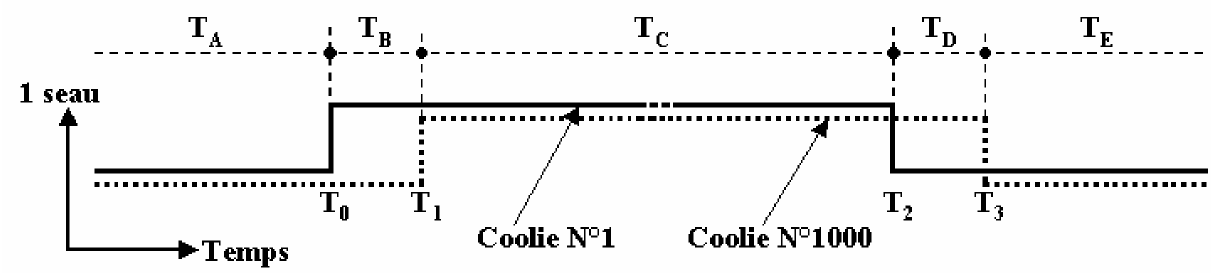

Figure 5

Pendant le temps T_A, il ne se passe rien. Les coolies regardent de chaque côté pour remplir leur seau. C'est une période "stationnaire".
A T_0, le désalinisateur produit le premier seau d'eau et le coolie N°1 remplit le sien. Puis, à l'unité de temps suivante, il transfère son seau au $2^{\text{ème}}$ coolie pendant que le désalinisateur remplit l'autre seau. Et ainsi de suite pendant tout le temps T_B.
A T_1, le premier seau d'eau est arrivé au $1000^{\text{ème}}$ coolie, après 1000 unités de temps. Le temps T_B représente une période transitoire pendant laquelle la chaîne (ligne) s'est remplie.
Pendant tout le temps T_C, nous avons une nouvelle période stationnaire, pendant laquelle tous les coolies transfèrent un seau par unité de temps. La chaîne reste dans le même état.
A T_2, le désalinisateur arrête brusquement sa production. A l'unité de temps suivante, le1^{er} coolie n'a plus d'eau ni d'un côté, ni de l'autre. Il arrête donc son travail. Puis vient le tour du $2^{\text{ème}}$ coolie, et ainsi de suite jusqu'à T_3 où le $1000^{\text{ème}}$ coolie verse son dernier seau dans l'irrigateur.
La chaîne (ligne) s'est donc vidée pendant le temps T_D qui constitue une deuxième période transitoire. A la fin de cette période, nous entamons une nouvelle période stationnaire où il ne se passe rien (à part le mouvement brownien oculaire des coolies qui cherchent de l'eau à transférer).
Nous pouvons en tirer les mêmes conclusions que pour le cas N° 1. Ce qui nous permet de récapituler pour l'hypothèse où la charge est adaptée à la ligne. Noter qu'alors, l'adaptation de la source n'a aucune influence sur le processus. Nous constatons donc que :

- Toute l'énergie produite est consommée par la charge
- Le débit est constant et régulier dans toute la ligne
- Les durées de production et de consommation sont égales
- La consommation a lieu avec un retard sur la production qui est égal au temps de propagation dans la ligne
- Ce temps de propagation détermine deux périodes transitoires, l'une au démarrage, et l'autre à la coupure.
- Entre ces deux périodes, nous avons une période stationnaire pendant laquelle aucun paramètre ne change.

Deuxième hypothèse.

Le système d'irrigation n'accepte que 80% d'un seau d'eau par unité de temps (charge désadaptée).

<u>**Cas N° 1.**</u> La durée de fonctionnement est beaucoup plus courte que le nombre d'unités de temps de la chaîne (impulsion).

Pendant les 999 premières unités de temps, il n'y a **aucune différence** avec la première hypothèse (charge adaptée). Pour comprendre ensuite ce qui se passe, nous allons dilater l'échelle et nous intéresser aux cinq derniers coolies. Nous prendrons une impulsion très courte de 4 unités de temps (à peine démarré, le désalinisateur est tombé en panne). Nous avons sur la figure 6 les diagrammes pour une durée allant de la 995ème à la 1008ème unité de temps.

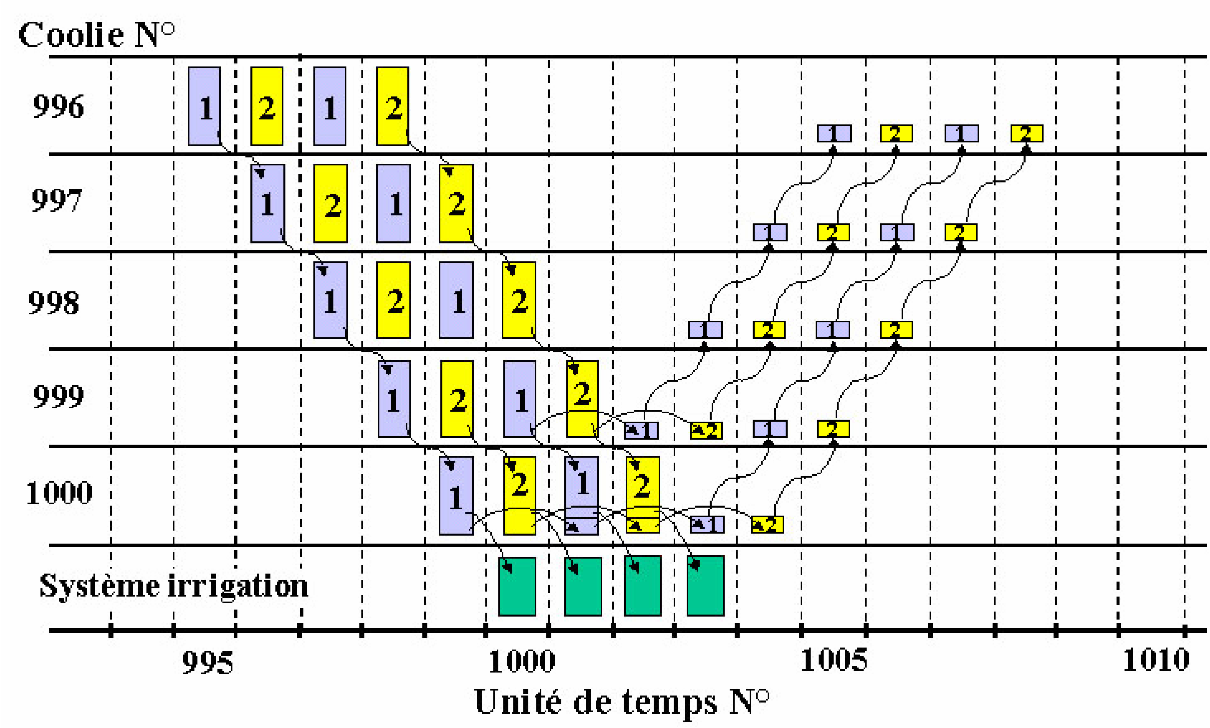

Figure 6

Pour chaque unité de temps nous avons fait figurer le seau N°1 en bleu et le seau N°2 en jaune.
Description du processus :

- T_{1000} : Le coolie N° 1000 verse son seau n°1 dans l'irrigateur et il lui en reste 20%. Le coolie N° 999 verse son seau N°2 dans le N°2 du coolie N° 1000.
- T_{1001} : Le coolie N° 1000 verse son seau N°2 dans l'irrigateur et il lui en reste encore 20%. Le coolie N° 999 verse son seau N°1 dans le N°1 du coolie N° 1000. Il lui en reste 20%. Le coolie N° 998 verse son seau N°2 dans le N°2 du coolie N° 999. Le 998 a les deux seaux vides, et se met à attendre.
- T_{1002} : Le coolie N° 1000 verse son seau n°1 dans l'irrigateur et il lui en reste 20%. Le coolie N° 999 verse son seau N°2 dans le N°2 du coolie N° 1000 et il lui en reste 20%. A la fin de l'unité de temps, le coolie 998 et ses prédécesseurs attendent toujours, le coolie 999 a ses deux seaux avec 20% d'eau, et le N° 1000 a un seau plein et un seau à 20%. Si l'on tient compte de ce qui a été versé, nous retrouvons nos quatre seaux d'eau complets (principe de la conservation d'énergie).
- T_{1003} : Le coolie N° 1000 verse son seau n°2 dans l'irrigateur et il lui en reste 20%. Le coolie N° 999 voyant que le seau N°2 du coolie N° 1000 a de l'eau et pas celui du N° 998 verse donc son seau N°2 dans le N°2 du N° 998. Le sens est inversé. A la fin de l'unité de temps, le 998 a un seau à 20%, le 999, un seau à 20%, et le 1000 ses deux seaux à 20%. Le compte y est.
- T_{1004} : Le coolie N° 998 qui a un seau à 20% le verse chez le N° 997 qui n'a aucune eau, continuant ainsi le mouvement de retour. Le N° 999 vide son deuxième seau dans celui du 998, et le N° 1000, entraîné par le mouvement, vide le sien dans celui du 999.
- Et ainsi de suite…

C'est donc reparti vers le désalinisateur, où le premier seau arrivera à la 2000ème unité de temps. Comme celui-ci est adapté, il rejettera à la mer toute l'eau en retour. S'il était désadapté et qu'il n'accepte, par exemple, que 70% de la quantité d'eau, alors il se passerait une réflexion, comme à l'irrigateur, et il repartirait 30% des 20% (6%) d'eau vers celui-ci. Dans la pratique, il y a toujours des pertes, et l'amortissement a lieu très rapidement.

Certains me diront que la démonstration est un peu acrobatique. Je leur concède. Mais avec des impulsions, le comportement des lignes avec les réflexions est facilement observable par ailleurs. Par contre, les descriptions comportementales habituelles avec des signaux stationnaires ne sont que le résultat de raisonnements mathématiques.

Cas N°2. Regardons donc sur la figure 7, comment notre chaîne à seaux va se comporter dans le cas où le signal est stationnaire pendant beaucoup plus de temps que le retard de la chaîne.

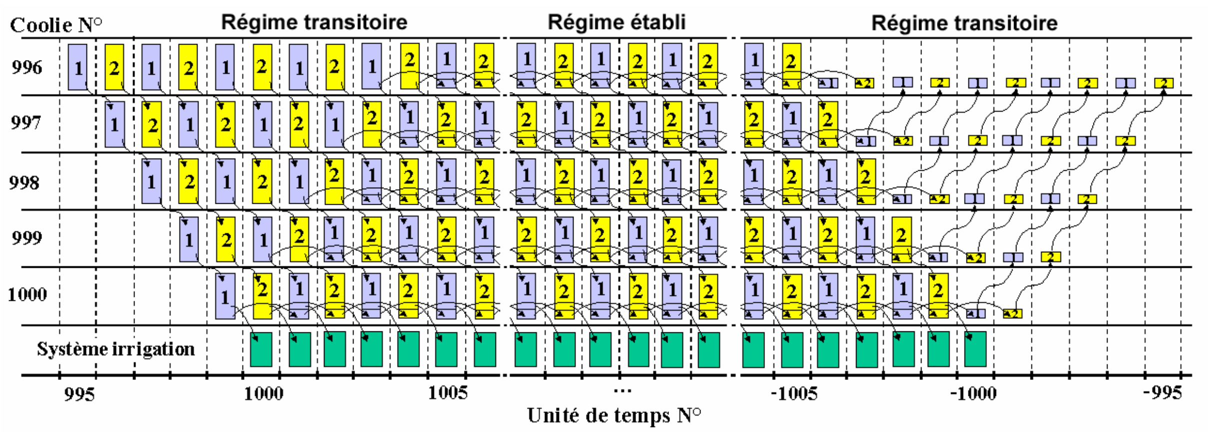

Figure 7

Nous avons maintenant trois régimes de fonctionnement :

- Un régime transitoire pendant lequel tous les seaux se remplissent successivement. Nous pouvons parler d'onde progressive d'une durée égale au temps de transit de la chaîne. Ensuite nous avons une autre onde dirigée en sens inverse de "rétention" d'eau, d'une durée encore égale au temps de transit de la chaîne. Noter que si l'onde est bien en retour, elle n'est pas attachée à un transport d'eau (de puissance). Il y a donc bien onde réfléchie, mais pas d'énergie réfléchie, car cette énergie "charge" la chaîne. Par ailleurs, cette onde ne dure que le temps de retard de la chaîne.
- Un régime stationnaire pendant lequel ne transite plus que 80% d'eau dans la chaîne, bien que tous les seaux soient pleins. Le désalinisateur ne peut plus fournir toute son eau au premier coolie. Soit il la rejette à la mer (source adaptée), soit il est obligé de restreindre sa production et il risque la surchauffe (comme les transistors du PA), à moins qu'un système régulateur (l'ALC) ne vienne diminuer l'alimentation du désalinisateur en énergie calorifique (fournie par le driver). Noter qu'il y a bien une onde permanente de transport d'eau (énergie) vers l'irrigateur, mais qu'il n'y en a pas en retour(4).
- Un régime transitoire pendant lequel tous les seaux se vident successivement en retour vers le désalinisateur. Nous avons encore une onde réfléchie, avec transport d'énergie celle-là. En fait cette énergie ne revient pas de l'irrigateur (charge), mais bien de la chaîne (ligne).

J'aurais pu prendre un autre système, par exemple la circulation sur une autoroute. Supposons un débit régulier sur 3 voies. Nous pouvons parler d'une onde de voitures de la ville A vers la ville B. Si à un endroit, pour une cause quelconque, la chaussée se rétrécit brusquement à deux voies (accident), alors il se produit une onde de ralentissement en retour vers la ville A. Au bout d'un certain temps, le débit sera réduit aux 2/3 sur toute l'autoroute. Mais pendant tout le temps, les voitures continueront de circuler de la ville A vers la ville B. La troisième voie servira simplement de "réservoir" (j'espère pour ses occupants qu'ils réussiront à se mélanger aux deux autres). Mathématiquement, on pourrait dire que trois files de voitures partent de A vers B et à l'endroit de l'accident, l'une d'entre elles retourne vers A et seulement deux arrivent en B. Inattaquable sur le plan mathématique, mais pas sérieux sur le plan réel.

Et les ondes stationnaires ?

Jusqu'à présent nous avons raisonné en puissance, et nous savons que la puissance transportée est constante le long d'une ligne. Mais cette puissance peut être le résultat d'une combinaison de deux variables, dont le produit est une constante.
Maintenant, nous pouvons imaginer que l'eau produite par le désalinisateur a une couleur changeante avec le temps, d'une manière sinusoïdale, comme une tension ou un courant. Alors, en régime établi, et seulement en régime établi, nous remarquerons, en photographiant toute la ligne en synchronisme avec la loi sinusoïdale (effet stroboscopique stable), que la répartition des couleurs le long de la ligne est une combinaison **stationnaire et sinusoïdale** des couleurs de base, mais de longueur d'onde moitié (ici, longueur d'onde dépendant du rapport entre le nombre d'unités de temps dans une sinusoïde et le nombre d'unités de temps dans la ligne).
Si maintenant, notre puissance est la multiplication d'une tension par un courant, tous deux sinusoïdaux, la combinaison de cette tension avec celle correspondant à l'énergie stockée dans la ligne (répartie sinusoïdalement), formera des ondes stationnaires sinusoïdales également. La même tension se retrouvera au maximum toutes les demi-longueurs d'ondes(5), et donc au minimum aux quarts d'ondes intermédiaires. Concernant le courant, comme la puissance est constante, il sera maximum quand la tension sera minimum, et inversement. Mais attention, si l'on mesure le courant et la tension en un point et que l'on multiplie les deux, on n'obtiendra qu'une puissance apparente. Il faudra tenir compte du déphasage entre courant et tension, occasionné par la combinaison de la puissance réactive stockée dans la ligne (comme dans un circuit oscillant), avec celle transitant vers la charge. La puissance transmise sera alors égale à $U \times I \times \cos(\varphi)$, avec phi = déphasage.
Enfin, si les ondes sont stationnaires, c'est parce que le signal est entretenu et stable, en amplitude et en fréquence. Si nous avons un signal modulé a très large bande (étalement de spectre), alors, il n'y aura plus d'ondes stationnaires et il sera impossible de faire des mesures sur une ligne désadaptée.

Conclusion.

Elle sera brève et contenue dans le constat suivant :
- **S'il y a de la puissance réfléchie, il n'y a pas d'ondes stationnaires, et s'il y a des ondes stationnaires, il n'y a pas de puissance réfléchie.**

Je ne sais pas si j'aurai convaincu les inconditionnels qui invoquent les lois de Maxwell(6) pour expliquer le fonctionnement du ROS-mètre, mais s'ils commencent à douter, ce sera un début.

F5NB.

Annexe.

Ayant soumis cet article à Jean-Pierre, F6FQX, pour un avis éclairé(7), celui-ci a fait quelques remarques et commentaires, dont je vous livre des extraits :

- *A ceux qui parlent de Maxwell comme du recours ultime, il peut être rappelé que les premiers théoriciens de l'électromagnétisme (Hertz et Poincaré notamment) ont effectivement étudié la propagation le long des lignes comme celle des champs E et H dans le diélectrique entre les conducteurs de la ligne. Cette méthode, bien sûr correcte, a néanmoins deux très gros inconvénients : elle n'est pas explicite du tout (essayez de trouver une histoire de coolies avec des vecteurs E et H et vous m'en direz des nouvelles), elle est en outre très ardue mathématiquement parlant (tout le monde ne peut avoir le cerveau de Hertz ou de Poincaré...). Or, dans le cas qui nous intéresse, à savoir celui des lignes TEM, on a la chance de se trouver en face de champs transversaux, ce qui permet de donner un sens aux concepts de tension et d'intensité. Ces deux concepts simplifient considérablement les mathématiques à utiliser et sont très explicites (derrière eux, les coolies sont omniprésents). Dans les guides d'ondes autres que les lignes TEM, on n'a pas la chance d'avoir des champs transversaux, et les concepts de tension et d'intensité n'existent plus.*
  Gardons Maxwell pour les cas où l'on ne peut pas faire autrement.

- *Les équations de Maxwell sont des outils géniaux parce qu'ils permettent de rassembler dans un formalisme très simple les relations qui existent entre des concepts très abstraits et très compliqués. Faire appel à elles à tout bout de champ (sic) équivaut à mesurer ce qui sort d'un émetteur avec l'aide d'un cheval tirant des tonneaux de bière dans une rue en pente, parce que c'est ainsi que James Watt a défini la puissance.*

- *Votre démonstration à base de coolies vous a certainement demandé beaucoup de travail, mais je pense que cela valait la peine, car c'est assez rare de voir un phénomène ondulatoire expliqué aussi clairement et sans mathématiques excessives .*

F6FQX.

Notes de l'auteur.

(1) En amplitude et en phase. Pour ceux qui auraient un doute, relire l'article "Fonctionnement du ROS-mètre" paru dans R-REF de mars 2003, ainsi que "ROS-mètre, thème et variations" dans R-REF de décembre 2003.

(2) Si l'on supprime les lignes en gardant R3 pour "fabriquer" notre ROS-mètre, alors les deux sources peuvent être complètement dé corrélées (fréquences et amplitudes différentes). Dans ce cas, $K(Vi)^2$ mesure bien la puissance générée par E1 qui est dissipée dans R2, et $K(Vr)^2$ mesure la puissance générée par E2 qui est dissipée dans R1. Nous avons réussi à mesurer séparément deux puissances présentes simultanément en un point et circulant en sens inverse. Et ceci, avec un ROS-mètre composé d'une résistance, d'un amplificateur, de deux voltmètres et d'un additionneur/soustracteur (voir la variation N°1 de l'article de décembre 2003, où tout est combiné dans un seul ampli opérationnel). Point besoin de faire appel aux équations de Maxwell, cela résulte du fait que la tension <u>ne peut pas</u> être déphasée de plus de 90° avec le courant. Noter que pour vérifier cela, il faut que R1 = R2 = Zo du ROS-mètre.

(3) Pour expliquer que le dernier coolie ne reverse pas son seau dans le seau vide du précédent, on peut faire intervenir dans sa psychologie un phénomène d'attraction : Un seau qui se vide a plus d'attraction qu'un seau qui est déjà vide. J'admets que si nous réduisons le tronçon de ligne à un espace atomique, il faudra bien faire appel aux forces d'interaction, dont l'électromagnétique. Et c'est ainsi que Maxwell s'incorpore dans le sujet.

(4) En arithmétique, 80% est aussi égal à 100% - 20%. On pourrait imaginer que les coolies ne conservent pas leur 20% d'eau, mais les reverse dans le seau de leur prédécesseur qui est vide. Ceci suppose qu'ils fassent deux opérations par unité de temps. Nous aurions alors deux chaînes, l'une qui transporterait 100% de l'eau vers l'irrigateur et l'autre 20% de l'eau vers le désalinisateur. Ces deux chaînes emprunteraient toujours alternativement deux seaux différents. Les eaux aller et retour ne se mélangeraient jamais.
Personnellement, je dirais que la nature humaine et l'univers en général utilisent toujours les solutions les plus simples, et que celle de l'eau stationnaire est la plus probable. De plus, concernant les lignes électriques, cette explication n'est jamais mise en défaut par les mesures.

(5) Car les ondes stationnaires ont été formées par deux ondes allant en sens inverse.

(6) Elles y sont si l'on mesure le courant à l'aide d'un transformateur. Mais, s'il fallait évoquer Maxwell à chaque fois qu'on utilise un transfo, y compris les transfos secteur, où irions-nous ?

(7) Relire l'article de F6FQX sur le R-REF de mars 1991, "Les quatre formules magiques du professeur Maxwell".