

L'AUTOROUTE ET LA LIGNE HF

R. BERRANGER, F5NB

L'autre jour, subissant un ralentissement sur une autoroute à cause d'un problème survenu 20 km en aval, j'ai réfléchi à l'onde de ralentissement qui progressait à contre sens et je me suis dit qu'il y avait un bon parallèle à faire avec ce qui se passe dans une ligne HF.

J'ai déjà employé dans ces pages ⁽¹⁾, une analogie entre une ligne HF et une chaîne "à seaux" pour alimenter une rizière à partir d'une réserve d'eau. Le système était un peu compliqué et je cherchais depuis une démonstration plus simple. Je crois l'avoir trouvée.

Considérons la figure 1 :

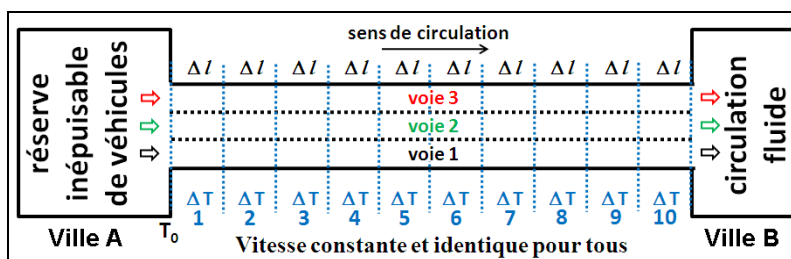


Figure 1 : L'autoroute : une liaison particulière

Nous avons un tronçon d'autoroute (un seul sens) qui relie les deux villes A et B. Le périphérique de l'une (la source) fournit sans discontinuer les véhicules que l'autoroute accepte. Le périphérique de l'autre (la charge) absorbe sans problème le débit de l'autoroute. Les associations de défense des usagers de la route ayant finalement obtenu gain de cause en ce 22^{ème} siècle, les véhicules sur l'autoroute roulent tous à une vitesse constante de 30 km/h et sont espacés d'une distance telle que s'ils s'arrêtent, la densité de voitures double (deux véhicules au lieu d'un par unité de distance). Il n'y a aucune possibilité pour un véhicule de faire marche arrière ou d'utiliser l'autre sens (glissières de sécurité). Par ailleurs, les voitures ne peuvent pas changer de file si la voie n'est pas libre (utopie ?).

Pour faciliter la démonstration, l'autoroute a été divisée en dix unités de distance (Δl), correspondant à dix unités de temps (ΔT).

1- L'autoroute est dégagée.

Dans ce cas, au bout d'un certain temps (régime établi), la circulation est fluide et constante dans le temps. Nous sommes dans un régime d'onde progressive (mouvement uniforme et constant des voitures dans le sens ville A -> ville B (source -> charge). Mais ce qui est intéressant, c'est de voir ce qui se passe à l'ouverture de l'autoroute et à la fermeture.

Commençons par le démarrage avec la figure 2 :

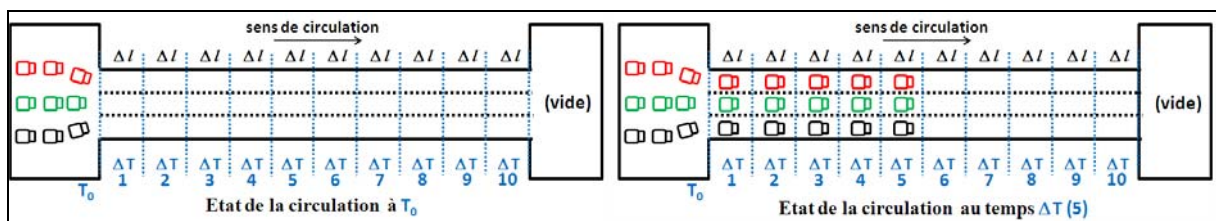


Figure 2 : Démarrage de la circulation

A T_0 , le périph' de la ville A est déjà complet et la barrière d'entrée sur l'autoroute s'ouvre. Cette dernière est encore vide, et le périph' de la ville B aussi. Pour une ligne HF, c'est l'instant où l'on démarre l'émission.

Au $\Delta T(5)$, les véhicules ont commencé à circuler sur l'autoroute, mais le périph' de la ville B est toujours vide. Pour une ligne HF, l'émetteur débite sa puissance dans la ligne, mais rien n'est encore rayonné par l'antenne.

Continuons avec la figure 3 :

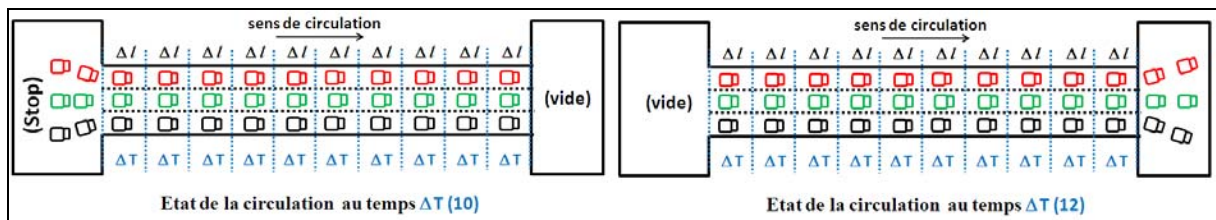


Figure 3 : Régime établi

Au $\Delta T(10)$, l'autoroute est complètement remplie, mais il n'y a encore aucune voiture sur le périph' de la ville B (aucun rayonnement).

Par ailleurs (pour éviter de multiplier les figures), il n'y a plus en réserve sur le périph' de la ville A que 6 voitures, correspondant à la circulation pendant 2 unités de temps (arrêt de l'émission après un petit délai).

Si l'on fait le point, on constate que la ville A a déjà fourni 30 véhicules, mais ils ont servi à "remplir" l'autoroute et aucun n'a encore débouché sur le périph' de la ville B.

Au $\Delta T(12)$, le périph' de la ville A est de nouveau vide, mais celui de la ville B contient 6 véhicules (le rayonnement a commencé). Quant à l'autoroute elle contient toujours 30 véhicules.

Terminons avec la figure 4 :

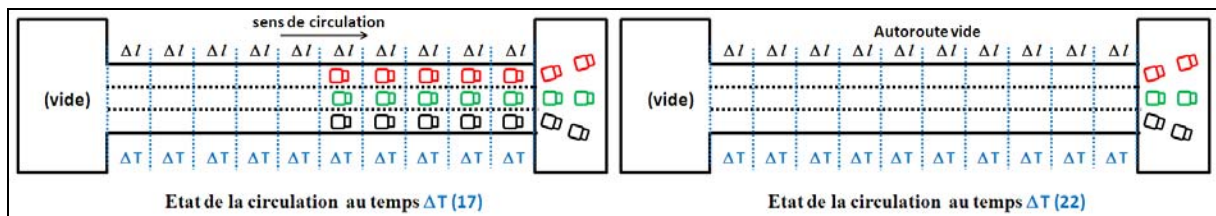


Figure 4 : Evacuation de l'autoroute

Au $\Delta T(17)$, l'autoroute s'est à moitié vidée dans le périph' de la ville B (le rayonnement s'est poursuivi).

Au $\Delta T(22)$, l'autoroute est complètement vide et les dernières voitures se sont dispersées dans le périph' de la ville B (toute l'énergie contenue dans la ligne a été rayonnée).

Au $\Delta T(23)$, nous serons revenus dans la situation de repos de la figure 1.

Analogies avec une ligne HF

Nous avons ici un cas idéal. En effet le périphérique de la ville B absorbe la totalité de l'énergie (symbolisée par une voiture que l'on pourrait assimiler à un gros photon) que le périphérique de la ville A peut fournir. L'autoroute se comporte comme un lieu qui stocke provisoirement l'énergie en la restituant après un retard de propagation. C'est pareil pour une ligne HF qui est chargée par une impédance égale à son impédance caractéristique. On dit que la ligne HF fonctionne en onde progressive. On remarquera que seule cette onde progressive

existe du début à la fin du processus, aussi bien durant les périodes transitoires (celles où la quantité d'énergie stockée par la ligne change) que durant la période stationnaire où rien ne change. On précisera également que l'émetteur "voit" à sa sortie une impédance constante pendant tout le processus, égale à celles de la ligne et de la charge.

2- L'autoroute est partiellement obstruée.

Examinons la figure 5 :

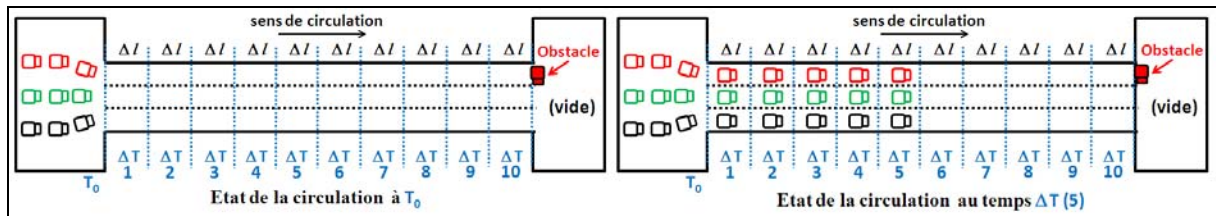


Figure 5 : Il y a un obstacle à la sortie

Nous sommes au temps T_0 . Les voitures de la ville A sont prêtes à démarrer et à envahir l'autoroute. Mais les voitures de la voie rouge ne se doutent pas qu'à l'entrée du périphérique B un camion bloque complètement leur voie.

Au $\Delta T(5)$, aucune différence avec la figure 2. En effet, rien n'empêche encore toutes les voitures de progresser.

Continuons avec la figure 6 :

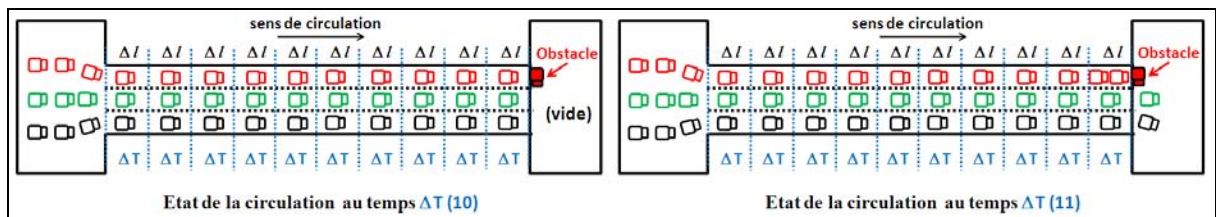


Figure 6 : L'autoroute se remplit normalement

Au $\Delta T(10)$, aucune différence non plus avec la figure 3. L'autoroute s'est remplie normalement. Mais la première voiture rouge va rencontrer un problème, car elle ne peut plus avancer.

Au $\Delta T(11)$, seules deux voitures sont sorties dans le périphérique B. La première voiture rouge s'étant arrêtée, la deuxième s'arrête à son tour derrière elle dans une portion Δl de l'autoroute (comme nous l'avons défini au début). Du côté du périphérique A, aucune incidence, il continue à fournir ses trois voitures par unité de temps. On remarquera que l'autoroute emmagasine déjà une voiture de plus que dans la figure 3. Avec une ligne, l'émetteur continue à fournir son maximum d'énergie, mais seulement les deux tiers sont rayonnés. Le surplus est stocké dans la ligne.

Poursuivons avec la figure 7 :

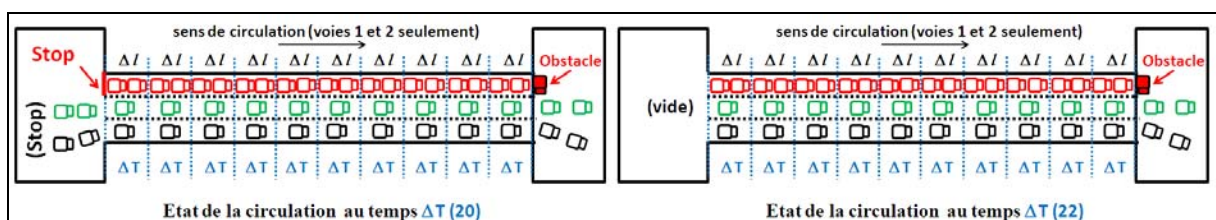


Figure 7 : C'est l'embouteillage !

Au $\Delta T(20)$, la voie rouge a continué à se remplir et le périphérique A, à débiter ses trois voitures. Mais maintenant il ne va plus pouvoir fournir que deux voitures. Il va avoir à gérer une voiture en trop par unité de temps (à la fourrière ?). Avec une ligne, à partir de cet instant, l'émetteur ne fournit plus que l'énergie qui est rayonnée.

On remarquera que le nombre de voitures stockées dans l'autoroute a augmenté d'un tiers (comme l'énergie stockée dans une ligne).

Par ailleurs, pour abrégé la démo, le périphérique A n'autorise plus que 4 voitures.

Continuons avec la figure 8 :

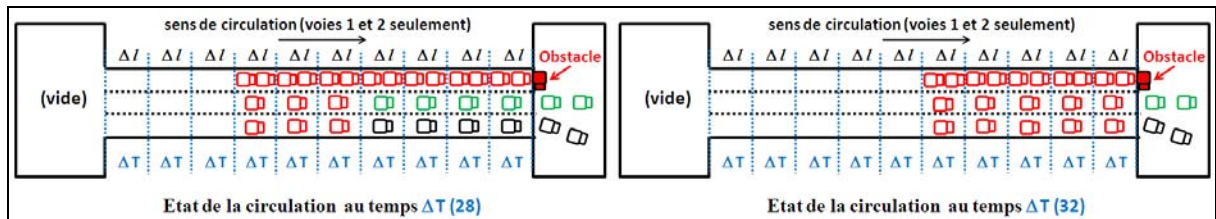


Figure 8 : Retour à la normale

Au $\Delta T(28)$, les voitures vertes et noires ont libéré de la place dans leurs voies et les voitures stockées sur la voie rouge peuvent maintenant les emprunter.

Au $\Delta T(32)$, il ne reste plus que les véhicules de la voie rouge sur l'autoroute. Les voitures continuent de déboucher sur le périphérique B (le rayonnement se poursuit).

Terminons avec la figure 9 :

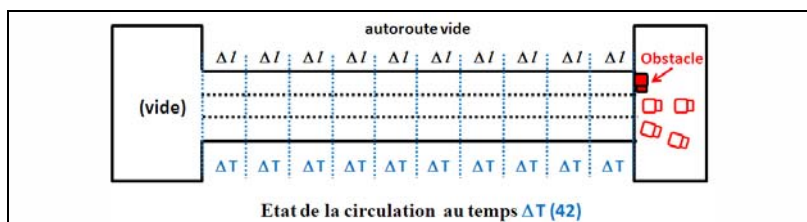


Figure 9 : Fin de l'épisode

Au $\Delta T(42)$, il ne reste plus aucune voiture sur l'autoroute (le rayonnement vient de cesser). Nous sommes revenus à l'état initial.

Analogies avec une ligne HF

L'obstruction d'une voie sur trois à la sortie de l'autoroute (de la ligne) équivaut à une puissance réfléchiée égale au tiers de la puissance directe (ROS de 3,8). Bien sûr, on pourrait dire que le périphérique A fournit en permanence 3 voitures par unités de temps et que l'obstacle qui bloque une voie en B oblige l'une des voitures à revenir en A. Ce comportement, possible mathématiquement (le résultat est le même), est absurde sur une autoroute. Il serait aussi absurde avec une rivière qui coule toujours de l'amont vers l'aval. Il en est de même pour une ligne. Dans la nature (libre), les déplacements s'effectuent toujours du "plus plein" vers le "plus vide". Et s'il y a des obstacles sur le parcours, ils ne font que ralentir le débit. Donc avec les lignes, dire que lorsqu'il y a désadaptation à la sortie, une partie de la puissance transmise par l'émetteur est réfléchiée par la charge et retourne vers l'émetteur est inconcevable ⁽²⁾. C'est d'autant moins concevable, qu'il y a plusieurs exemples qui montrent l'absurdité de cette idée reçue ⁽³⁾. Pourtant certains, même des professeurs d'Université, l'écrivent encore.

La confusion provient de l'attribution physique que chacun donne au terme "onde". On lit souvent que l'onde "transporte" l'énergie. Non, le transport de l'énergie est associé (ou non) à l'onde. L'onde décrit le comportement d'une force. Reprenons notre autoroute (figures 6 et 7). Jusqu'au $\Delta T(10)$ nous avons une onde qui se propage de la ville A vers la ville B. A cette onde est associé un transport d'énergie (3 voitures par unité de temps).

Du $\Delta T(10)$ au $\Delta T(20)$ une onde est apparue depuis B et se propage vers A. Cette onde ne transporte aucune énergie. Elle se soustrait de l'onde aller avec deux conséquences : elle diminue le débit et elle augmente l'énergie stockée dans l'autoroute, au fur et à mesure de sa progression vers la source A. Tant qu'elle n'y est pas arrivée, la source continue de débiter ses 3 voitures par unité de temps. Mais après $\Delta T(20)$, c'est l'autoroute (la ligne) qui n'autorise plus qu'un débit de 2 voitures par unité de temps. A partir de ce moment là, la source ne débite plus que l'énergie consommée par la charge. Il n'y a plus qu'une onde aller "progressive", l'onde en retour (réactive) a cessé d'exister ⁽⁴⁾. Nous sommes dans une période stationnaire et alors on peut dire que la ligne non adaptée a pour effet de ramener à son entrée une image de la désadaptation à sa sortie. Pour l'émetteur, cette image, qui est une impédance, peut être remplacée par un couple R-L ou R-C en composants discrets, son comportement sera exactement le même ⁽⁵⁾. C'est comme cela que l'on procède pour tester la tenue au ROS d'un émetteur. C'est aussi cela qui me fait dire qu'une ligne désadaptée a un comportement réactif. Bien sûr, certains me diront que mon autoroute est différente d'une ligne :

- Primo, la source n'est pas aussi "intelligente" que le périphérique A. Je répondrais qu'effectivement la période transitoire comporte en réalité plusieurs allers et retours, mais comme ceux-ci vont en décroissant, il est difficile de faire intervenir des fractions de voitures (Hi).

- Secundo, avec l'autoroute, le courant est continu, alors qu'en réalité il est alternatif. Je dirais que cela n'a une incidence que sur la répartition des voitures stockées dans la ligne qui ici est uniforme alors que dans une ligne, l'énergie "stationnaire" a une répartition pseudo sinusoïdale (les ondes stationnaires). Mais l'énergie qui transite est, elle, régulièrement répartie. On peut la mesurer, et alors on constate qu'elle est bien constante tout le long d'une ligne sans pertes.

Notes

- 1) *"Lignes : un problème d'irrigation ?" dans Radio-REF de mai 2004.*
- 2) *Voici un extrait du manuel du sous-officier des Transmissions de 1959, (très bien fait par ailleurs) : "Toute la puissance disponible à l'entrée (de la ligne) est transportée par l'onde incidente jusqu'à la sortie de la ligne. Mais comme la charge (peut être une résistance ?) a une impédance Z_s différente de l'impédance caractéristique Z_c , une partie seulement de la puissance, dite puissance utile (?), est réfléchie vers la source. Il y a donc perte d'énergie (?) par suite du défaut d'adaptation." (Les soulignés et les textes entre parenthèses sont de moi).*
- 3) *Prenons une antenne à la résonance ayant une impédance de 50Ω . Connectons-y une ligne bifilaire 300Ω (pertes négligeables), d'une longueur électrique $\lambda/2$. Connectons l'autre extrémité à un émetteur prévu pour être chargé par une impédance pure de 50Ω . Tout le monde sera d'accord pour dire que l'émetteur sera parfaitement chargé et travaillera dans des conditions optimales de puissance et de rendement. Toute la puissance fournie par l'émetteur sera transmise à l'antenne. Pourtant la charge de la ligne 300Ω sera complètement désadaptée et la ligne sera le siège d'ondes stationnaires d'un rapport 6 (ROS 6). Alors, d'où proviennent les watts réfléchis ? Ils n'existent pas. Par contre la ligne a emmagasiné beaucoup plus d'énergie*

(stationnaire) que si elle était correctement chargée. En conséquence, une caractéristique technique du système a changé : c'est sa bande passante (elle a diminué). J'ai développé ceci par ailleurs dans Radio-REF (et j'ai eu à en tenir compte professionnellement).

- 4) On peut alors se demander pourquoi les ondes stationnaires restent stables. C'est parce que nous avons affaire à un système synchrone. On peut le comparer à l'oscillation d'un pendule entretenu par un apport d'énergie oscillante (fournie par l'émetteur) et freiné par un frottement (la charge). Le système restera stable tant que la source ne changera pas, ni en amplitude, ni en phase et tant que la charge restera la même (parties actives et réactives).*
- 5) Sur l'abaque de Smith, cette impédance image se situe sur le cercle de ROS constant (ligne sans pertes).*