

# Le vieil OM et la mer

par Jean-Pierre Bourdier, F6FQX

Il était une fois un vieil OM qui se rappelait la première fois où, entrant timidement dans un radio-club, il avait demandé : « ça marche comment la radio ? » ; un OM ancien lui avait alors répondu avec assurance : « la radio, c'est tout simple, c'est des ondes comme les vagues de la mer »...  
Explication si claire qu'une vocation était née aussitôt !



Plus tard, devenu vieux, notre OM, en vacances à la mer, regarda les vagues avec ses yeux de radioamateur, et se demanda alors si la réciproque était vraie : « les vagues de la mer, était-ce tout simple, comme les ondes radio ? »

## OBSERVATIONS.

Bon expérimentateur, le vieil OM observa la mer sous tous les angles : vue de dessus, de dessous (en plongée), hors du port, dans le port, au bout de la jetée, sur la plage. Que constata-t-il ?

**Vue de dessus et hors du port**, il vit effectivement les vagues. Elles correspondaient bien à l'image qu'il avait des ondes radio, avec des creux et des bosses se propageant du large vers le rivage.

Longueur d'onde, fréquence ou période, amplitude, célérité, tout cela « sentait bon la radio », avec même des ondes longues et des ondes courtes.

**Par dessous (en plongée) et hors du port**, il constata que les vagues se faisaient sentir également, mais de moins en moins au fur et à mesure qu'on descendait plus profond : des bouts d'algues « flottant entre deux eaux » lui parurent décrire des courbes fermées comparables aux trajectoires des corps flottant en surface.

**Dans le port**, l'OM vit aussi des vagues mais, cette fois, elles n'avançaient

plus, semblant faire du sur-place, avec des endroits très calmes et d'autres agités. Une petite voix lui susurra « il y a du ROS là-dessous ».

**Au bout de la jetée**, il constata un phénomène bizarre, apparemment sans équivalent en radio : la houle semblait se déformer et prendre un malin plaisir à pénétrer dans le port alors que la jetée avait pour but de l'en empêcher.

**Sur la plage** enfin, il vit deux phénomènes imbriqués ne correspondant pas a priori non plus à des « choses connues » en radio : d'une part une sorte de va-et-vient de la mer montant à l'assaut du sable, d'autre part des « moutons » et des vagues qui semblaient alors se « dissoudre » dans l'écume en se ruant sur le littoral.

## QUELLES INTERPRÉTATIONS « RADIO » DONNER À CES OBSERVATIONS ?

Méthodique, notre OM alla sur le Net, où il trouva de nombreux sites radioamateurs expliquant les ondes radio, et quelques sites uni-

versitaires dédiés à la mécanique des fluides (et, accessoirement, à la houle) ; il obtint des réponses à presque toutes ses interrogations. Et il les classa par thèmes.

## PROPAGATION DES ONDES RADIO, PROPAGATION DE LA HOULE.

« C'est clair, la houle se propage » se dit l'OM. Les vagues sont donc comme les ondes radio. Mais en radio, « ce qui se propage », c'est un champ électrique et un champ magnétique. Quels sont donc les champs que propage la houle ? En mécanique des fluides, on apprend qu'un fluide simple (i.e. incompressible, isotherme et non visqueux) est caractérisé, en chacun de ses points, par deux champs : vitesse (champ vectoriel) et pression (champ scalaire). Dans la houle donc, ce sont aussi deux champs qui se propagent. La propagation s'effectue, comme dans un coaxial, entre deux parois : pour le coaxial entre l'âme et la gaine, pour la houle entre l'air (la surface de l'eau) et le sol (le fond de la mer) ; ces parois imposent

ce qu'on appelle des conditions aux limites, qui sont structurantes pour les champs propagés : dans le coaxial, le champ magnétique est tangent aux parois et le champ électrique leur est perpendiculaire ; dans la mer, le champ-vitesse est tangent aux parois (fond et surface) et le champ-pression est donné en surface (pression atmosphérique).

En matière de propagation, un fait chagrina toutefois l'OM : la propagation des ondes radio a l'excellente idée de se faire à la même vitesse (celle de la lumière dans le milieu), quelle que soit la longueur d'onde, mais pour la propagation de la houle, c'est différent : la vitesse croît avec la longueur d'onde et décroît avec la hauteur d'eau. On voit nettement les vagues courtes « rattrapées » par les longues et la vitesse de propagation décroît quand la profondeur diminue, provoquant des « concentrations de houle » sur les anticlinaux sous-marins ou les pointes rocheuses. Quelle cacophonie dans les récepteurs si cela se passait ainsi avec les ondes !

Enfin, en radio, les champs transportent de l'énergie sous forme électrique et magnétique. Avec la houle, l'énergie transportée est naturellement de « même nature » que les champs propagés : énergie cinétique (cf. la vitesse) et énergie potentielle (cf. la pression).

## RÉFLEXION DES ONDES RADIO, RÉFLEXION DE LA HOULE.

Notre vieil OM sourit en pensant aux discussions interminables entre ses disciples à propos de ce qui se passe dans les lignes quand le ROS n'y est pas égal à un. Il chercha donc où la houle se présentait sous forme de vagues stationnaires et trouva naturellement l'intérieur du port : la « houle directe », une fois entrée dans le port, s'y réfléchit sur les différents quais pour se combiner et donner lieu à des « ventres et des noeuds » comme le long d'une ligne court-circuitée (ventres d'amplitude contre les murs verticaux du quai, noeuds à un quart d'onde plus loin). « Ça s'appelle le clapot, le clapotis ou le ressac ! » lui dit un pêcheur dont la barque montait et descendait le long du

quai. L'OM constata qu'il se passait avec la houle la même chose qu'avec les ondes radio : quand il n'y a pas d'ondes stationnaires (hors du port pour les vagues, dans une ligne adaptée à l'antenne pour les ondes radio) il y a transport d'énergie, quand il n'y a qu'ondes stationnaires (dans le port pour les vagues, par exemple dans une ligne en court-circuit pour les ondes radio) il n'y a aucun transport d'énergie car cette dernière est alors comme « piégée ».

## DIFFRACTION DES ONDES RADIO, DIFFRACTION DE LA HOULE.

« Bon sang, mais c'est bien sûr » se dit l'OM en voyant la houle contourner le bout de la jetée (« on ne dit pas le bout, mais le musoir ! » lui dit le pêcheur), « c'est de la diffraction, comme cela se passe sur les arêtes des collines ou des toits avec les ondes radio ». Certes, la diffraction fait l'objet de beaucoup moins de discussions entre OM que la réflexion, mais elle existe, et heureusement car, sans elle, deux stations VHF ne pourraient communiquer que si elles étaient en vue directe l'une de l'autre. Toutefois, ce qui est bon dans le cas des ondes radio est mauvais dans le cas de la houle puisqu'aucune digue ne peut complètement protéger un port, la diffraction permettant aux vagues de contourner toute digue et d'atteindre des endroits pourtant « à l'ombre de la jetée ».

## SUR LA PLAGE, UNE SORTE DE VA-ET-VIENT DE LA MER MONTANT À L'ASSAUT DU SABLE.

L'OM mit peu de temps à comprendre qu'il était en présence d'une réflexion comme en bout d'une ligne mal adaptée : la houle est partiellement réfléchi(e) (elle l'est à 100% par un mur vertical, à 0% par une plage horizontale), mais une partie de son énergie est « absorbée » par la plage (sous forme potentielle « en remontant les matériaux sur la grève », sous forme thermique « en les chauffant par frottement les uns contre les autres »).

## POURQUOI LES VAGUES SE DISSOLVENT-ELLES DANS L'ÉCUME EN SE RUANT SUR LE LITTORAL ?

Telle fut la dernière question que se posa notre OM. Malgré la déclaration du pêcheur, toujours aussi docte « On dit que la houle déferle et les surfeurs adorent ça, mais pas nous, les pêcheurs, car la houle se casse et peut nous casser avec nos canots ! », l'OM ne trouva aucune correspondance immédiate avec ce qui se passe en radio. Tout ce que lui apprit la mécanique des fluides, c'est qu'on n'est plus alors en présence de houle, mais de masses d'eau libérant leur énergie sous forme surtout cinétique (d'où la joie des surfeurs) et accessoirement thermique. Notre OM se dit que cela ressemblait finalement à ce qu'il advenait aux ondes progressives arrivant, en bout de ligne, à une antenne ou à une charge adaptées : les conditions sont alors telles que les ondes ne peuvent plus exister, et elles libèrent leur énergie sous forme de rayonnement et de chaleur.

Ses vacances terminées (et bien remplies), l'OM se promet de revenir l'année suivante pour réfléchir cette fois à la génération de la houle. Les ondes radio naissent de fluctuations de courants ou de charges, qui transfèrent à leur environnement une partie de leur énergie magnétique et électrique ? Quels pouvaient donc être les éléments porteurs d'énergie cinétique et potentielle, et qui en transfèreraient une partie à la mer sous forme de houle (ne voulant pas laisser notre OM un an sur sa faim, donnons lui la réponse tout de suite : « ces éléments, ce sont principalement les fluctuations atmosphériques : vents, dépressions et anticyclones ; mais certaines houles très particulières (non identifiées comme telles par le public) : tsunamis, marées (« Il faut dire marnage, pas marées ! » dirait le pêcheur) ont d'autres causes. En parlant de marée, invitons notre vieil OM à visiter sur la Rance la seule « usine électrique à houle » au monde : tournant comme une horloge depuis un demi-siècle, elle produit ses 240 MW, 24 h sur 24.

## ANNEXE À L'ARTICLE « LE VIEIL OM ET LA MER ».

Et si, pour faire sérieux, on mettait un peu de mathématiques dans tout ça ? La théorie des ondes radio a ses pères fondateurs (Laplace, Ampère, Maxwell, Hertz, etc.), celle des vagues de la mer a aussi les siens (Bernoulli, Airy, Navier, Stokes, etc.). La modélisation mathématique de la houle conduit à un système d'équations, plus compliqué que celui de Maxwell, bien que conceptuellement assez proche.

On y trouve :

- un potentiel scalaire dont dérive le champ vectoriel de vitesse, qui est irrotationnel ;
- une équation de continuité qui exprime la conservation de la matière, annulant la divergence du champ des vitesses ;

- une équation de conservation de la quantité de mouvement (un avatar de la célèbre formule  $F=m.y$ ), exprimant que la seule force externe est la pesanteur ;
- deux conditions aux limites (champ-pression atmosphérique en surface, champ-vitesse à composante normale nulle au fond).

Comme dans le cas des équations de Maxwell, un tel système n'est soluble qu'au prix de modélisations.

Le premier modèle de houle, dit « houle d'Airy » (1801-1892) est une houle monochromatique, d'amplitude faible au regard de la longueur d'onde et de la profondeur. La surface de l'eau est alors sinusoidale, les particules d'eau décrivent des ellipses dont la taille décroît avec la profondeur. La houle d'Airy est la plus proche du concept des ondes planes en radio. En particulier, une telle houle ne donne lieu à aucun déplacement de matière.

Le second modèle de houle, plus compliqué que le précédent, dit « houle de Navier(1785-1836)-Stokes (1819-1903) développe le potentiel scalaire en série convergente (un peu comme la transformée de Fourier dans le cas des ondes radio) ; le premier terme du développement correspond à la houle d'Airy. Au fur et à mesure qu'on ajoute des termes (2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> ordre), apparaissent des phénomènes nouveaux : d'une part, la surface n'est plus sinusoidale (les creux des vagues sont moins pointus que les crêtes), d'autre part les trajectoires des molécules d'eau ne sont plus des ellipses mais des trochoïdes, courbes non fermées, ce qui traduit un déplacement de matière (phénomène effectivement observé avec des houles importantes).

Bibliographie :

- Réflexion de la houle <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9899/travaux/optsee/hym/nome11/hym.htm>
- Théorie de la houle <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9899/travaux/optsee/hym/nome01/pa03.htm>

