



ACCUEIL

Règle à calcul d'inspiration astronomique pour évaluer les champs de rayonnement

Jean-François Lahaeye

31 janvier 2011

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

PRINCIPE

L'idée de base est que la magnitude absolue des astronomes est une représentation d'une Puissance Isotropique Rayonnée (PIRE) bien réellement par les étoiles : le modèle de l'antenne isotropique, réputé fictif quand il s'agit des ondes cohérentes fabriquées par les oscillateurs artificiels humains, devient crédible pour des ondes incohérentes ayant un spectre de corps noir, celles des lampes thermiques ou des étoiles. J'en viens donc à comparer une source thermique de lumière (par exemple une bougie rayonnant 60 watts, principalement dans l'infrarouge) avec une antenne radio ayant une puissance apparente rayonnée (PAR) de 60 watts. La PAR et la PIRE seront définies en conclusion avec les précautions d'usage. Avec l'étalonnage astronomique des magnitudes absolues, la bougie reportée à 10 parsecs donne une magnitude bolométrique absolue de 66,75. Pour manipuler une bougie à quelques mètres devant moi, j'ai donc créé une table de conversion des parsecs en mètres, ce qui fournit un étalonnage métrique des magnitudes : on passe des magnitudes absolues M aux magnitudes apparentes m avec $m = M - 87,4467685 + 5 \log D$ (où D est la distance d'observation en mètres et non plus en parsecs¹ (1 parsec = $3,0857 \times 10^{16}$ m). On vérifie que cet étalonnage métrique donne le même résultat que l'étalonnage astronomique en parsecs). En termes de puissance, l'augmentation d'une magnitude, correspond à un affaiblissement de 4 dB. J'ai donc imaginé une échelle de décibels astronomiques, comptés "à l'envers" (qui augmentent quand la magnitude augmente) avec l'équivalence 1 dB = 0,25 magnitude et avec la référence 0 dB = magnitude zéro.

Le passage du rayonnement isotropique au rayonnement d'un dipôle demi-onde se fait, classiquement, par une correction de +2,14 dBi (avec mes décibels astronomiques, le signe est inversé, et on écrira - 2,14 dBi). Avec une référence absolue pour les magnitudes astronomiques (et par suite pour les décibels astronomiques) on détermine l'éclairement énergétique (en watt par mètre carré) à n'importe quelle distance, la correction de 2,14 dBi permet de transposer le problème de l'éclairement incohérent d'une source thermique à celui de l'éclairement monochromatique d'une antenne : le passage du rayonnement incohérent au rayonnement cohérent ne pose pas de problème particulier puisqu'on raisonne uniquement sur des puissances. Disposant d'un éclairement, on calcule le champ électrique monochromatique avec $E \text{ max}$ (en volt par mètre) = $\sqrt{(2 \times 377 \times \text{éclairement})}$. En divisant par la racine de 2 on trouve la valeur efficace du champ.

Le but de cette « règle à calcul » est de s'épargner des calculs explicites, pas forcément très difficiles,

1 On rappelle que la loi de Pogson s'écrit usuellement : $m = M - 5 + 5 \log D$ (parsecs)

mais généralement longs et fastidieux. Les calculs sont donc faits et tabulés une fois pour toutes pour certaines valeurs caractéristiques graduées en décibels (et autres grandeurs logarithmiques telles que les magnitudes). La règle permet donc de comparer des grandeurs à peine comparables : des puissances extrêmes, microscopiques et astronomiques. L'utilisation de cette règle à calcul n'a pas, a priori, à se soucier des modélisations physiques, avérées ou conjecturales, qui ont présidé à sa conception. Il suffit en effet de savoir qu'elle s'appuie, méthodologiquement, sur les seules propriétés des logarithmes. La physique n'intervient que pour le choix, conventionnel, du ZERO de chacune des échelles logarithmiques mises en regard, c'est-à-dire d'une référence absolue des grandeurs physiques que l'on veut comparer, référence exprimée en unités physiques.

Deux espèces de grandeurs logarithmiques sont utilisées pour comparer entre elles des puissances en watts (et des grandeurs qu'on en tire directement comme les éclairagements et les énergies). Pour les magnitudes, j'ai conservé la référence astronomique usuelle d'une *magnitude bolométrique zéro* associée à un éclairagement de $2,52 \times 10^{-8}$ watt par mètre carré, produit par une source située à 10 parsecs. Je me suis borné à écrire la loi de Pogson en unités métriques afin de relier la magnitude apparente m à la magnitude absolue M pour des distances quelconques, pas forcément astronomiques :

$$m = M - 87,4467685 + 5 \log D$$

où la distance D de la source de magnitude absolue M est donnée en mètres.

Les décibels astronomiques ne sont rien d'autre qu'une façon différente d'écrire les magnitudes. Avec l'égalité $1 \text{ dB} = 0,25 \text{ magnitude}$, la loi de Pogson s'écrit, toujours en unités métriques :

$$g = G - 349,787047 + 20 \log D.$$

Les décibels et les magnitudes sont comptés, à partir de la même origine ($0 \text{ dB} = \text{zéro magnitude}$) et dans le même sens, propre à l'astronomie, qui augmente les magnitudes quand les puissances diminuent (et donc en sens contraire de l'usage habituel des décibels en acoustique ou en électricité).

L'éclairagement de $2,52 \times 10^{-8}$ watt par mètre carré correspond à une puissance isotropique Φ (flux des physiciens, luminosité des astronomes) de $3,0152 \times 10^{28}$ watts d'une source placée à 10 parsecs. L'*antenne isotropique*, cette fiction commode, physiquement impossible en rayonnement cohérent, mais si utile au calcul des antennes réelles, devient une réalité physique pour le rayonnement de corps noir d'une source sphérique. C'est, en somme, ce qui a motivé l'utilisation astronomique que j'ai inventée pour les décibels.

J'ai développé ici les calculs d'éclairagement et de champ électrique associés à une source monochromatique d'ondes électromagnétiques à diverses distances. Les magnitudes 60 à 80 tabulées ci-dessous permettront d'évaluer le champ rayonné par n'importe quelle antenne isotrope dans les puissances radioélectriques usuelles (de l'ordre du milliwatt au kilowatt). Une correction en dB permet de passer de l'antenne idéale à l'antenne réelle (on enlève 2,14 dB astronomiques pour passer de l'antenne isotrope fictive à l'antenne dipôle demi-onde, puis on applique la correction due au gain, « à l'envers » : en enlevant des décibels astronomiques au lieu de les ajouter comme en électronique usuelle). Le calcul explicite correspondant consiste à relier l'amplitude du champ électrique à l'éclairagement :

$$E_{\max} = \sqrt{(2 \times 377 \times \text{Eclairagement})}$$

où 377 ohms est l'impédance du vide. On en tire aussi une valeur efficace du champ :

$$E_{\text{eff}} = E_{\max} / \sqrt{2}.$$

Ainsi constituée, la règle permet d'apprécier des valeurs exactes des diverses grandeurs associées, mais seulement selon les décalages de 1 dB affichés dans la table. Mais, bien entendu, si l'on dispose de valeurs réellement mesurées, elles correspondront rarement (et pour ainsi dire jamais) aux valeurs tabulées. Si l'on veut faire mieux qu'un calcul d'ordre de grandeur, on peut faire quelques interpolations sommaires. Il y a moyen de faire des interpolations précises en réalisant des tabulations intercalaires (au dixième, au centième de décibel, etc.) en notant que :

Ajouter un décibel astronomique équivaut à diviser la puissance par 1,258925412

Ajouter 1/10 de dB équivaut à diviser par 1,023292992
Ajouter 1/100 de dB équivaut à diviser par 1,002305238

On peut de même étendre la tabulation vers les grandes ou vers les courtes distances, sous réserve de ne pas extrapoler ce qui se passe en zone de Rayleigh. Pour une précision supérieure, on peut toujours revenir aux formules explicites :

$$\text{Eclairement} = \Phi / (4 \pi D^2) \text{ et } E \text{ max} = \sqrt{(2 \times 377 \times \text{Eclairement})}$$

où Φ est le flux rayonné par la source, en watts. La donnée de Φ et de D suffit à tout calcul explicite. Selon la situation, Φ sera interprété comme PIRE ou comme PAR.

PRECISION

D'un point de vue mathématique, il n'y a certes pas de limite *a priori* de la précision d'un calcul logarithmique. Mais ici les logarithmes cachent des grandeurs physiques et on ne peut espérer faire mieux que la précision des mesures physiques qu'on y introduit. Dans la mesure où l'on considère que le zéro des échelles logarithmiques est conventionnel, on devrait admettre que la règle à calcul garantit autant de décimales que la mesure pourrait en fournir. Mais la mesure limitera presque toujours les résultats à une ou deux décimales seulement.

Notons pourtant que les corrections en décibels applicables à de purs rapports de puissance peuvent être très précises, dans le cas des lobes de rayonnement des antennes réelles, par exemple. C'est pourquoi la règle à calcul, tabulée pour des éclaircissements et des champs électriques d'une antenne isotrope, peut être considérée comme très fiable aussi pour une antenne réelle. La précision pourrait être étendue à l'infini, mais en pratique, même si la règle affiche encore quatre décimales pour le champ de l'antenne isotrope, la correction empirique des lobes de rayonnement limitera le plus souvent la précision réelle à une ou deux décimales seulement. Ce qui fait tout de même de cette règle un instrument de grande précision dans ce type de mesures : si on connaît la puissance et la position d'une source étalon, la règle peut alors rivaliser avec les meilleurs champmètres : ce qui n'est pas étonnant puisque, au niveau de la conception même d'un instrument, par définition des champs à partir des équations de Maxwell, l'étalonnage est toujours géométrique. Il s'agit donc bien d'une mesure physique indirecte car l'algorithme du calcul s'appuie sur deux mesures physiques : la connaissance de l'étalon en puissance et les mesures géométriques d'angle et de distance. On s'affranchit ainsi de l'étalonnage d'un instrument électrique, beaucoup plus délicat (à cause des non linéarités des composants, de la présence des amplificateurs, etc.). En revanche il est évident que cette méthode de mesure rapide par lecture d'une table ne révèle que les grandeurs associées aux sources connues et localisées, non à des sources cachées (en particulier, il ne peut révéler l'éventuelle présence de caustiques, à moins de compléter la mesure simple par une étude topographique complexe). Dans ce dernier cas, il faudra recourir à un ondemètre à absorption pour détecter la source cachée. Ou bien un analyseur de spectre, pour celui qui aurait les moyens (et l'utilité) de s'offrir un tel instrument.

QUELQUES PRECAUTIONS D'USAGE

Pour l'utilisation de la table des champs électriques, on doit garder en tête qu'aux grandes longueurs d'onde (disons au dessus de 30 cm) la valeur du champ n'est applicable que dans la zone de Fraunhofer (disons une distance à la source d'au moins deux longueurs d'onde², soit ici une distance d'au moins 0,60 m). Cela étant, pour passer d'une antenne isotrope à une antenne réelle (dipôle ou autre) on peut utiliser les décibels ordinaires de l'électronique à condition d'inverser les additions et les soustractions. La fréquence (ou longueur d'onde) n'entre en considération que pour distinguer les zones proche et lointaine mais aucunement dans la comparaison des puissances en tant que telles. Les décibels astronomiques seront donc utilisables quelle que soit la fréquence, dès qu'on s'est assuré qu'on est en zone lointaine, à la fréquence considérée.

2 Si D est le diamètre équivalent de l'antenne, on propose généralement les définitions suivantes :

Limite de Rayleigh $R_L = D^2 / 2\lambda$

Limite de Fresnel $R_F = 2D^2/\lambda$

Le rapport D/λ dépend du type d'antenne. On obtient néanmoins une approximation moyenne en posant $D = \lambda$.

Alors on est en zone de Rayleigh à moins d'une demi-longueur d'onde de la source, on dépasse la limite de Fresnel au-delà de deux longueurs d'onde. Jusqu'à l'infini on est alors en zone de Fraunhofer.

Pour effectuer une mesure, on distinguera :

- La Puissance Apparente Rayonnée (PAR) qui est la puissance vue par le récepteur, lequel ne « sait » pas si la source est isotrope ou directive, si elle rayonne comme le faisceau d'un projecteur, avec un gain directionnel purement apparent : la puissance réelle disponible à la source n'est pas changée mais seulement concentrée dans une direction privilégiée. La PAR évaluée dans le plan de rayonnement d'un dipôle apporte un gain de 2,14 dBi par rapport à l'antenne isotrope, à quoi s'ajoute le gain supplémentaire (de l'ordre de 10 à 20 dBd) d'une antenne directive par rapport au dipôle. Toute correction en dB (gain ou atténuation) se traduira par une lecture décalée sur la tabulation. Avec les décibels astronomiques, le gain correspondra à une soustraction et l'atténuation à une addition. Ce décalage permet de lire dans la colonne de puissance de la source, directement la PAR à la place de la puissance isotrope.

- La Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE) qui est la puissance disponible répartie uniformément dans tout l'espace : cela ne peut exister physiquement que pour du rayonnement incohérent, mais est utilisé comme référence fictive dans le calcul des antennes réelles.

Si on dispose de la PAR, la tabulation de la règle à calcul fournit directement la valeur de l'éclairement et du champ à une distance donnée. En France le site annuradio.fr fournit les PAR et diagrammes d'atténuation pour la plupart des émetteurs de radiodiffusion et le site cartoradio.fr fournit des points de mesure effectués sur le terrain. En disposant de la PAR dans une direction sans atténuation, la règle à calcul fournit la valeur du champ local, en visibilité directe de la source. Le champ réellement mesuré est généralement plus faible que la valeur calculée, soit que la mesure ne soit pas effectuée en visibilité directe, soit qu'elle ait même été faite dans l'intérieur d'un local. En pratique la règle à calcul fournit donc une mesure par excès.

PROPRIETES DE LA SOURCE			ETALONNAGE DU RECEPTEUR						
Magnitude absolue	Décibels astronomiques	Puissance en watts	ECLAIREMENTS EN WATTS PAR METRE CARRE VALEURS DE CRETE DU CHAMP EN VOLTS PAR METRES						
		Puissance isotropique	Éclairement à 10 parsecs	Éclairement à 1m	Éclairement à 2m	Éclairement à 5m	champ (V/m) à 1m	champ (V/m) à 2m	champ (V/m) à 5m
80	320	0,0003	2,51999E-40	0,0000240	0,0000060	0,0000010	0,1345	0,0672	0,0269
	319	0,0004	3,17248E-40	0,0000302	0,0000076	0,0000012	0,1509	0,0754	0,0302
	318	0,0005	3,99392E-40	0,0000380	0,0000095	0,0000015	0,1693	0,0846	0,0339
	317	0,0006	5,02804E-40	0,0000479	0,0000120	0,0000019	0,1899	0,0950	0,0380
79	316	0,0008	6,32993E-40	0,0000603	0,0000151	0,0000024	0,2131	0,1065	0,0426
	315	0,0010	7,96891E-40	0,0000759	0,0000190	0,0000030	0,2391	0,1196	0,0478
	314	0,0012	1,00323E-39	0,0000955	0,0000239	0,0000038	0,2683	0,1341	0,0537
	313	0,0015	1,26299E-39	0,0001203	0,0000301	0,0000048	0,3010	0,1505	0,0602
78	312	0,0019	1,59001E-39	0,00015	0,00004	0,00001	0,3377	0,1689	0,0675
	311	0,0024	2,0017E-39	0,00019	0,00005	0,00001	0,3790	0,1895	0,0758
	310	0,0030	2,51999E-39	0,00024	0,00006	0,00001	0,4252	0,2126	0,0850
	309	0,0038	3,17248E-39	0,00030	0,00008	0,00001	0,4771	0,2385	0,0954
77	308	0,0048	3,99392E-39	0,00038	0,00010	0,00002	0,5353	0,2676	0,1071
	307	0,0060	5,02804E-39	0,00048	0,00012	0,00002	0,6006	0,3003	0,1201
	306	0,0076	6,32993E-39	0,00060	0,00015	0,00002	0,6739	0,3369	0,1348
	305	0,0095	7,96891E-39	0,00076	0,00019	0,00003	0,7561	0,3781	0,1512
76	304	0,0120	1,00323E-38	0,00096	0,00024	0,00004	0,8484	0,4242	0,1697
	303	0,0151	1,26299E-38	0,00120	0,00030	0,00005	0,9519	0,4759	0,1904
	302	0,0190	1,59001E-38	0,00151	0,00038	0,00006	1,0680	0,5340	0,2136
	301	0,0240	2,0017E-38	0,00191	0,00048	0,00008	1,1983	0,5992	0,2397
75	300	0,0302	2,51999E-38	0,00240	0,00060	0,00010	1,3446	0,6723	0,2689
	299	0,0380	3,17248E-38	0,00302	0,00076	0,00012	1,5086	0,7543	0,3017
	298	0,0478	3,99392E-38	0,00380	0,00095	0,00015	1,6927	0,8464	0,3385
	297	0,0602	5,02804E-38	0,00479	0,00120	0,00019	1,8993	0,9496	0,3799
74	296	0,0757	6,32993E-38	0,00603	0,00151	0,00024	2,1310	1,0655	0,4262
	295	0,0953	7,96891E-38	0,00759	0,00190	0,00030	2,3910	1,1955	0,4782
	294	0,1200	1,00323E-37	0,00955	0,00239	0,00038	2,6828	1,3414	0,5366

	293	0,1511	1,26299E-37	0,01203	0,00301	0,00048	3,0101	1,5051	0,6020
73	292	0,1902	1,59001E-37	0,01514	0,00378	0,00061	3,3774	1,6887	0,6755
	291	0,2395	2,0017E-37	0,0191	0,0048	0,0008	3,7895	1,8948	0,7579
	290	0,3015	2,51999E-37	0,0240	0,0060	0,0010	4,2519	2,1260	0,8504
	289	0,3796	3,17248E-37	0,0302	0,0076	0,0012	4,7707	2,3854	0,9541
72	288	0,4779	3,99392E-37	0,0380	0,0095	0,0015	5,3528	2,6764	1,0706
	287	0,6016	5,02804E-37	0,0479	0,0120	0,0019	6,0060	3,0030	1,2012
	286	0,7574	6,32993E-37	0,0603	0,0151	0,0024	6,7388	3,3694	1,3478
	285	0,9535	7,96891E-37	0,0759	0,0190	0,0030	7,5611	3,7805	1,5122
71	284	1,2004	1,00323E-36	0,0955	0,0239	0,0038	8,4837	4,2418	1,6967
	283	1,5112	1,26299E-36	0,1203	0,0301	0,0048	9,5188	4,7594	1,9038
	282	1,9025	1,59001E-36	0,1514	0,0378	0,0061	10,6803	5,3401	2,1361
	281	2,3951	2,0017E-36	0,1906	0,0476	0,0076	11,9835	5,9917	2,3967
70	280	3,0152	2,51999E-36	0,2399	0,0600	0,0096	13,4457	6,7228	2,6891
	279	3,7959	3,17248E-36	0,3021	0,0755	0,0121	15,0863	7,5432	3,0173
	278	4,7788	3,99392E-36	0,3803	0,0951	0,0152	16,9271	8,4636	3,3854
	277	6,0161	5,02804E-36	0,4787	0,1197	0,0191	18,9926	9,4963	3,7985
69	276	7,5738	6,32993E-36	0,6027	0,1507	0,0241	21,3100	10,6550	4,2620
	275	9,5349	7,96891E-36	0,7588	0,1897	0,0304	23,9102	11,9551	4,7820
	274	12,0037	1,00323E-35	0,9552	0,2388	0,0382	26,8277	13,4138	5,3655
	273	15,1118	1,26299E-35	1,2026	0,3006	0,0481	30,1012	15,0506	6,0202
68	272	19,0246	1,59001E-35	1,5139	0,3785	0,0606	33,7741	16,8870	6,7548
	271	23,9506	2,0017E-35	1,9059	0,4765	0,0762	37,8951	18,9476	7,5790
	270	30,1520	2,51999E-35	2,3994	0,5999	0,0960	42,5190	21,2595	8,5038
	269	37,9591	3,17248E-35	3,0207	0,7552	0,1208	47,7071	23,8536	9,5414
67	268	47,7877	3,99392E-35	3,8028	0,9507	0,1521	53,5283	26,7641	10,7057
	267	60,1611	5,02804E-35	4,7875	1,1969	0,1915	60,0597	30,0299	12,0119
	266	75,7384	6,32993E-35	6,0271	1,5068	0,2411	67,3881	33,6941	13,4776
	265	95,3490	7,96891E-35	7,5876	1,8969	0,3035	75,6107	37,8054	15,1221
66	264	120,0373	1,00323E-34	9,5523	2,3881	0,3821	84,8366	42,4183	16,9673
	263	151,1180	1,26299E-34	12,0256	3,0064	0,4810	95,1883	47,5941	19,0377
	262	190,2463	1,59001E-34	15,1393	3,7848	0,6056	106,8030	53,4015	21,3606
	261	239,5058	2,0017E-34	19,0593	4,7648	0,7624	119,8349	59,9175	23,9670
65	260	301,5200	2,51999E-34	23,9942	5,9985	0,9598	134,4570	67,2285	26,8914
	259	379,5912	3,17248E-34	30,2069	7,5517	1,2083	150,8632	75,4316	30,1726
	258	477,8770	3,99392E-34	38,0282	9,5071	1,5211	169,2713	84,6357	33,8543
	257	601,6115	5,02804E-34	47,8747	11,9687	1,9150	189,9256	94,9628	37,9851
64	256	757,3840	6,32993E-34	60,2707	15,0677	2,4108	213,1000	106,5500	42,6200
	255	953,4900	7,96891E-34	75,8763	18,9691	3,0351	239,1021	119,5511	47,8204
	254	1200,3727	1,00323E-33	95,5226	23,8807	3,8209	268,2770	134,1385	53,6554
	253	1511,1797	1,26299E-33	120,2559	30,0640	4,8102	301,0117	150,5059	60,2023
63	252	1902,4626	1,59001E-33	151,3932	37,8483	6,0557	337,7407	168,8704	67,5481
	251	2395,0585	2,0017E-33	190,5927	47,6482	7,6237	378,9513	189,4757	75,7903
	250	3015,2000	2,51999E-33	239,9420	59,9855	9,5977	425,1904	212,5952	85,0381
	249	3795,9119	3,17248E-33	302,0691	75,5173	12,0828	477,0714	238,5357	95,4143
62	248	4778,7700	3,99392E-33	380,2824	95,0706	15,2113	535,2830	267,6415	107,0566
	247	6016,1149	5,02804E-33	478,7472	119,6868	19,1499	600,5973	300,2987	120,1195
	246	7573,8400	6,32993E-33	602,7070	150,6768	24,1083	673,8813	336,9407	134,7763
	245	9534,8996	7,96891E-33	758,7632	189,6908	30,3505	756,1073	378,0536	151,2215
61	244	12003,7274	1,00323E-32	955,2263	238,8066	38,2091	848,3663	424,1832	169,6733
	243	15111,7975	1,26299E-32	1202,5586	300,6397	48,1023	951,8827	475,9413	190,3765
	242	19024,6259	1,59001E-32	1513,9316	378,4829	60,5573	1068,0299	534,0150	213,6060
	241	23950,5849	2,0017E-32	1905,9270	476,4817	76,2371	1198,3493	599,1746	239,6699
60	240	30152,0000	2,51999E-32	2399,4199	599,8550	95,9768	1344,5700	672,2850	268,9140