

Introduction

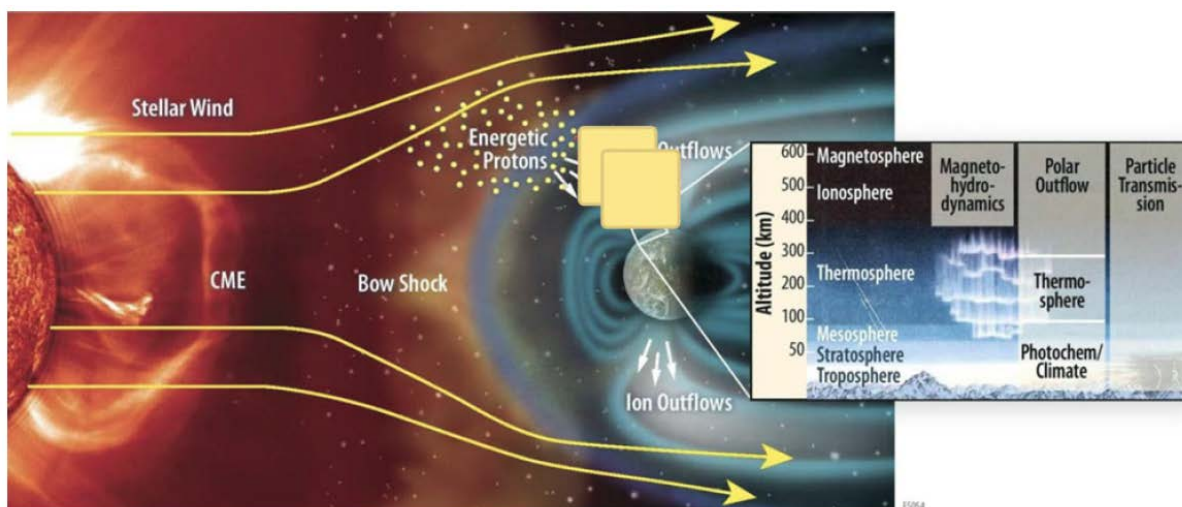
Airapetian, V. S., Barnes, R., Cohen, O., Collinson, G. A., Danchi, W. C., Dong, C. F., ... & Yamashiki, Y. (2020). Impact of space weather on climate and habitability of terrestrial-type exoplanets. *International Journal of Astrobiology*, 19(2), 136-194.

Les progrès actuels dans la détection d'exoplanètes de type tellurique ont ouvert une nouvelle voie pour la caractérisation des atmosphères exoplanétaires et la recherche de biosignatures de la vie.

Afin de préciser les conditions favorables à l'origine, au développement et au maintien de la vie telle que nous la connaissons dans d'autres mondes, nous devons comprendre la nature des environnements globaux (astrosphérique) et locaux (atmosphérique et de surface) des exoplanètes dans les zones habitables (ZH) autour des étoiles naines de type G-K-M.

L'environnement global est formé par les perturbations dues aux étoiles, sous forme d'éruptions stellaires (flares), d'éjections de masse coronale (CME), de flux de particules énergétiques (stellar winds), collectivement appelés **météo spatiale astrosphérique. (Figure ci-dessous).**

Sa caractérisation permettra de comprendre comment un écosystème exoplanétaire interagit avec son étoile hôte, puis préciser les conditions physiques, chimiques et biochimiques susceptibles de créer des conditions favorables et/ou défavorables au climat et à l'habitabilité planétaires, ainsi que l'évolution de la dynamique interne planétaire à l'échelle des temps géologiques.



Les vents stellaires et les éjections de masse coronale (CME) influencent la forme de la magnétosphère exoplanétaire qui se comprime sous ces effets combinés (bow shock). Les rayons ultraviolets X et les particules énergétiques accélérées par les éjections de masse coronale (CME) pénètrent dans l'atmosphère. Les effets combinés des rayons ultraviolets X, des vents stellaires et des éjections de masse coronale (CME) entraînent des écoulements de l'atmosphère exoplanétaire. Ces processus contrôlent le climat et l'habitabilité des exoplanètes.

L'objectif de cet article est une tentative de mieux préciser la météo de l'espace générée par l'étoile Ioumma, afin d'en évaluer l'impact sur la magnétosphère et l'atmosphère de la planète Ummo.

A) La météo de l'espace générée par l'étoile loumma

Avant tout on rappelle ci-après les données déjà publiées ou calculées concernant loumma. Ces valeurs figurent dans les articles « loumma étoile de type K » et « loumma étoile active ».

	Soleil	loumma	Simulation loumma	Incertitude
Masse (kg)	1,99E+30	1,48E+30	1,48E+30	
Rayon (km)	6,96E+05	5,17E+05	4,86E+05	6,00%
Température de surface °K	5780	4580	4584	-0,09%
Luminosité absolue (10²⁶ W)	3,83	0,83	0,74	10,84%
Indice BV	0,65	1,15	1,15	
Type Spectral	G2		K4,K5	
Age (Gyears)	4,6		6,3	
Période de rotation (jours)	27	15.4		
Nombre de Rossby	1.8		0.58	+ - 15%
Luminosité X(10²⁰ W)	2		20	+ - 40%
Champ magnétique à 1 R* (Gauss)	2	216	197	
Flux magnétique 1 R* (10¹⁹ Gauss.m²)	3.2		~65	+ -40%

Une étoile active est une étoile qui montre une activité magnétique importante, ce qui se manifeste par des phénomènes variés et souvent spectaculaires à sa surface ou dans son atmosphère. Les paramètres magnétiques du tableau ci-dessus permettent déjà de se rendre compte que loumma est une étoile beaucoup plus active que le Soleil : cela est dû principalement à sa période de rotation plus faible que celle du Soleil et à son nombre de Rossby.

Le tableau suivant construit à l'aide d'une IA (Chat GPT) permet de saisir rapidement ce que signifie étoile calme à étoile hyperactive. L'étoile loumma, avec un rapport $L_x/L_{lum} \sim 3 \cdot 10^{-5}$, se situerait à la limite de la catégorie des étoiles actives, et loin des étoiles hyperactives.

Niveaux d'activité stellaire						
Niveau d'activité	L_X / L_α	Période rotation	Taches stellaires (%)	Flares	T coronale (MK)	Exemples
Faible / calme	$< 10^{-7}$	> 25 j	$< 0,3$ %	Très rares	$\sim 1-2$	Soleil (min)
	$10^6 - 10^{-5}$	10-25 j	1-5 %	Hebdo	$\sim 2-5$	Soleil jeune
Active 	$10^{-5} - 10^{-3}$	1-10 j	5-20 %	Quotidiennes	$\sim 5-10$	RS CVn, T Tauri
	$> 10^{-3}$	< 10 j	20-50+ %	Superflares fréquents	$\sim 10-20$	AD Leo, Proxima Cen
Hyperactive 				$\sim 10-20$	0,1-20	AD Leo, Proxima Cen

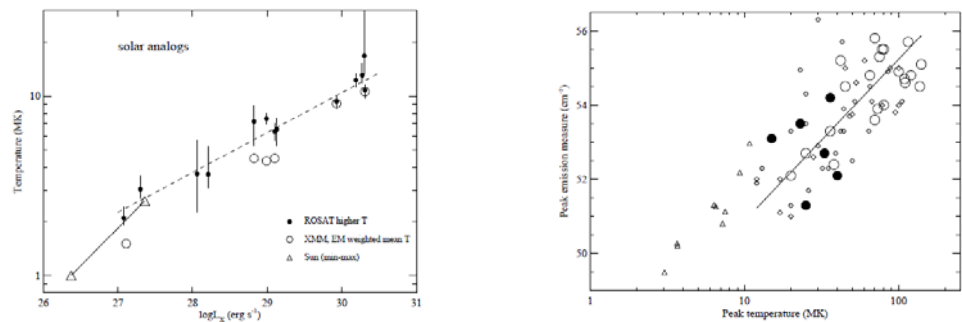
Ce premier tableau issu d'échanges avec l'IA doit bien sûr être vérifié.

Article de Güdel de 2004 et extraction des données pertinentes

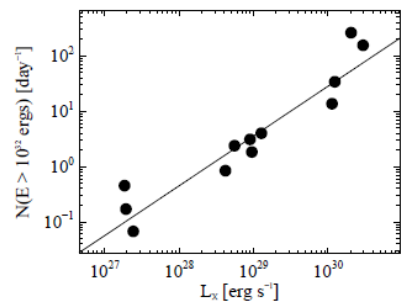
Pour vérifier le tableau ci-dessus, on va s'appuyer sur l'article de 2004 de Güdel, duquel on va extraire les informations qui nous intéressent :

Güdel, M. (2004). X-ray astronomy of stellar coronae. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 12, 71-237.

Concernant la température de la couronne : avec une valeur de $L_X \sim 2 \cdot 10^{28}$ ergs/s ($2 \cdot 10^{21}$ W), on aurait d'après Güdel une température coronale de l'ordre de 4 à 5 M°K. Lors d'éruptions violentes (superflares), la température peut monter bien au-delà de 10M°K.



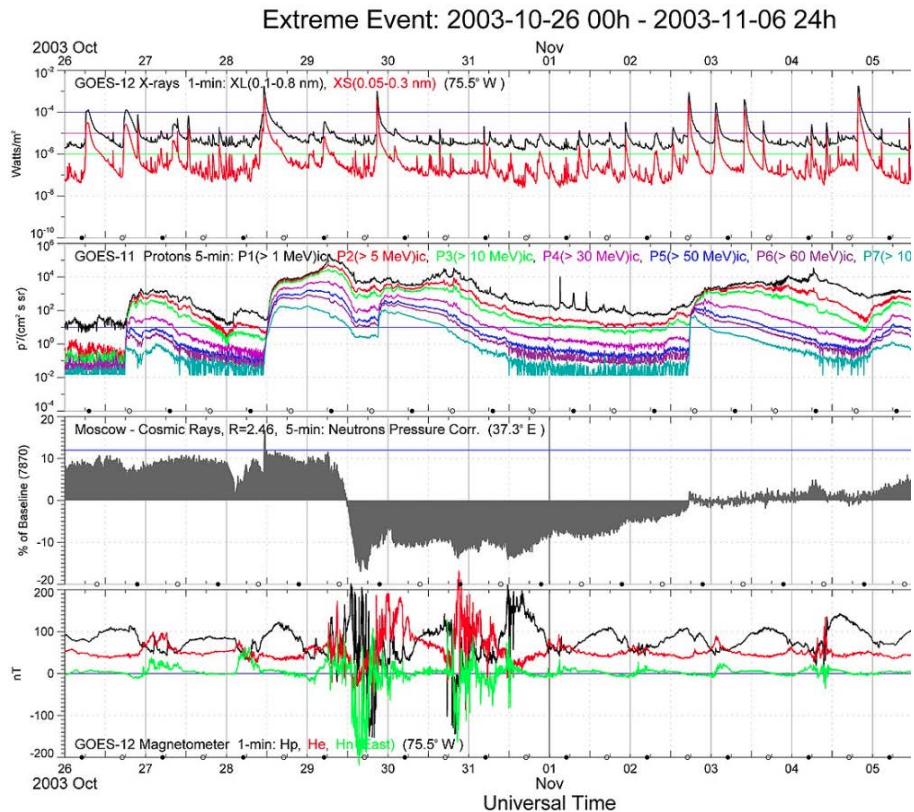
Concernant la fréquence des flares : Le graphique suivant montre que pour $L_X \sim 2 \cdot 10^{28}$ ergs/s, on aurait de l'ordre de 1 flare/jour avec une énergie supérieure à 10^{32} ergs. Ceci est cohérent de l'estimation de l'IA et sera très utile pour la suite.



Concernant la phénoménologie des flares : La plus forte activité de Ioumma suggère de faire un parallèle entre ce qui pourrait se passer *quasi quotidiennement* sur Ioumma et l'évènement solaire exceptionnel intitulé « Halloween 2003 ». Cela pourrait donner une idée de la phénoménologie en jeu, et on se reportera souvent à ce phénomène de 2003 sur Terre.

J'invite le lecteur à consulter le site :

https://en.wikipedia.org/wiki/2003_Halloween_solar_storms



Cet évènement est un des mieux documentés et assorti de nombreuses mesures. Ce qui est intéressant, c'est de visualiser les pics d'énergie X (ligne du haut) et les pics de variation du champ magnétique terrestre à différents endroits (ligne du bas). Si on prend par exemple la courbe verte, on note une moyenne nulle en général, avec des fluctuations importantes étalées sur une journée.

Cette phénoménologie exceptionnelle pour nous serait quasi quotidienne dans le système Ioumma-Ummo.

Concernant l'énergie emportée par les flares : Güdel fournit une loi de distribution en énergie que nous utiliserons plus loin et qui s'écrit :

$$\frac{dN}{dE} = kE^{-\alpha}$$

dN est le nombre de flares par unité de temps, dont l'énergie est comprise dans l'intervalle E à $E+dE$.

α vaut environ 1.8 et k est un coefficient.

En résumé, en suivant Güdel, on aurait pour Ioumma :

Température coronale : 4 à 5 M°K, avec des pics de température bien au-delà de 10 M°K

Flares d'énergie $> 10^{32}$ ergs : **environ 1 par jour**

Tout cela précise bien les ordres de grandeur du tableau de synthèse fourni par Chat GPT.

Quelques informations complémentaires sur la notion de flare

Rappelons qu'un flare (ou éruption stellaire) est une libération soudaine et massive d'énergie due à la reconnexion magnétique dans l'atmosphère d'une étoile (comme le Soleil ou une étoile active). C'est un peu comme un court-circuit magnétique dans la couronne de l'étoile, qui réorganise brutalement les lignes de champ magnétique et libère leur énergie accumulée.

Cette énergie est au début localisée dans les régions actives proches de la surface de l'étoile, comme par exemple dans les boucles coronales. L'énergie magnétique s'accumule, puis se libère brutalement par reconnexion.

Cette énergie est répartie sur plusieurs postes :

- Le chauffage de la couronne pour 30 à 50 % : c'est ce qui peut porter la couronne de l'étoile à plusieurs M°K et détectable dans les rayons X, UV.
- L'accélération d'électrons/protons à haute énergie pour 10 à 30 % de l'énergie du flare.
- L'émission de lumière optique/UV: $\sim 10\%$
- L'éjection de matière et d'énergie cinétique (vent + CME) ~ 10 à 30 %

Un flare correspond à une explosion magnétique dans la couronne stellaire, chauffant le plasma, éjectant des particules, et émettant un large spectre de rayonnement (X, UV, optique). Ce n'est pas une explosion "dans" l'étoile, mais dans son atmosphère magnétique.

Les CME (éjection de matière coronale) sont les principaux vecteurs de fuite d'énergie magnétique vers l'espace.

Le reste est dissipé localement dans la couronne (chauffage, rayonnement, particules accélérées).

Un flare typique pour le Soleil a une énergie de l'ordre de 10^{30} ergs : c'est 100 fois plus faible que pour Ioumma. Cela signifierait notamment qu'une CME serait 100 fois plus forte en moyenne pour Ioumma que pour le Soleil en termes énergétiques.

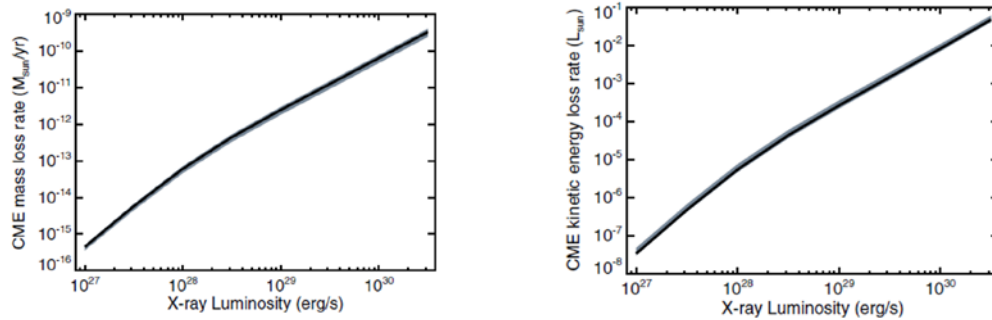
Voyons si tout cela est cohérent, grâce cette fois ci à l'article suivant.

Drake, J. J., Cohen, O., Yashiro, S., & Gopalswamy, N. (2013). Implications of mass and energy loss due to coronal mass ejections on magnetically active stars. *The Astrophysical Journal*, 764(2), 170.

La figure suivante donne la luminosité X de l'étoile en ordonnée.

Le Soleil se situe d'après notre tableau initial à $2 \cdot 10^{27}$ ergs/s et Ioumma à $2 \cdot 10^{28}$ ergs/s.

A gauche, la masse annuelle perdue. A droite, l'énergie cinétique perdue.



Qu'il s'agisse de la masse annuelle perdue par CME ou de l'énergie cinétique perdue, on retrouve de manière cohérente le facteur 100 attendu.

Vitesse des masses éjectées

La figure ci-dessus donnant les énergies cinétiques est intéressante. A masse de CME éjectée constante, les vitesses des masses éjectées seraient 10 fois plus élevées en provenance de Ioumma que celles en provenance du Soleil.

Voici pour le Soleil quelques paramètres typiques et les références associées (origine Chat GPT).

Paramètre	Valeur typique	Références
Masse CME	10^{14} à 10^{17} g	<i>Vourlidas et al. 2010, Howard et al. 1985</i>
Vitesse	200 à 3000 km/s	<i>Gopalswamy et al. 2009, Yashiro et al. 2004</i>
Moyenne	~450 km/s	<i>SOHO/LASCO dataset</i>
Énergie cinétique	10^{29} à 10^{32} erg	<i>Emslie et al. 2005, Aarnio et al. 2011</i>

Et maintenant, voici une comparaison des vitesses de CME entre le Soleil et Ioumma (Origine Chat GPT) :

Vitesse estimée de CME		
Masse CME (g)	 Soleil	 Étoile active (km/s)
$1,0 \times 10^{15}$	600	6.325
$1,0 \times 10^{16}$	400	2.000
$1,0 \times 10^{17}$	200	632

Dans tous les cas, les vitesses des CME dues à Ioumma seraient supérieures d'un facteur 3 à 10 à celles observées pour le Soleil. Cela signifie qu'après un flare, les particules énergétiques arrivent rapidement sur Umma, et sont suivies de près par une énorme bouffée de plasma magnétisé.

Comment utiliser tous ces paramètres ?

Comme expliqué dans l'article de Airapetian et al, toutes ces données sont nécessaires pour estimer l'impact d'une étoile sur l'habitabilité de ses potentielles planètes. L'objectif des chercheurs est de bien caractériser (chiffrer) tous ces paramètres afin de mieux évaluer leur effet sur l'atmosphère d'une exoplanète, et en conséquence sur le vivant.

Le tableau suivant résume de manière très sommaire, sans chiffrage, le principal impact de chacun de ces « vecteurs » sur une planète.

Vecteur impactant	Effet principal sur une planète
Rayons X / EUV	Ionisation / chauffage de la thermosphère, altération chimique de l'ozone
UV proche (NUV, FUV)	Ionisation plus superficielle, effet sur les couches moyennes
Protons / électrons (SEP)	Dépôts énergétiques profonds, peut percer jusqu'à la mésosphère, détruire l'ozone
Plasma (CME, vent rapide)	Pression dynamique, interaction avec la magnétosphère, érosion atmosphérique
Rayonnement optique	Moins pénétrant, faible effet direct

L'ampleur du travail pour arriver à en déduire l'habitabilité d'une exoplanète est on le voit absolument colossal.

B) Impact sur la magnétosphère d'Ummo

Dans la suite, il n'est pas question pour nous de rentrer dans le détail de tous ces effets induits dans l'atmosphère de la planète Ummo. Nous allons nous intéresser modestement à l'impact de cette météo de l'espace sur le champ magnétique de la planète Ummo, dont nous donnerons plus loin les caractéristiques.

Ce sujet est très important sur Terre, car lors d'une éruption Solaire, les variations induites du champ magnétique terrestre peuvent conduire à de très fortes perturbations sur nos systèmes électriques, électroniques, sur les satellites, etc. On peut s'en faire une idée actualisée (2023) en parcourant la thèse suivante :

Veronika Haberle. Determination of space weather effects on the geomagnetic field : an automatic derivation of geomagnetic baselines containing quiet variations. Earth and Planetary Astrophysics [astro-ph.EP]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2023. English. (NNT : 2023TOU30283). (tel-04573929)

Concrètement, nous nous intéresserons à l'effet de ces variations de champ magnétique, puis à leur traduction en champs électriques et courants induits géomagnétiques (GIC en anglais pour Geomagnetically induced currents).

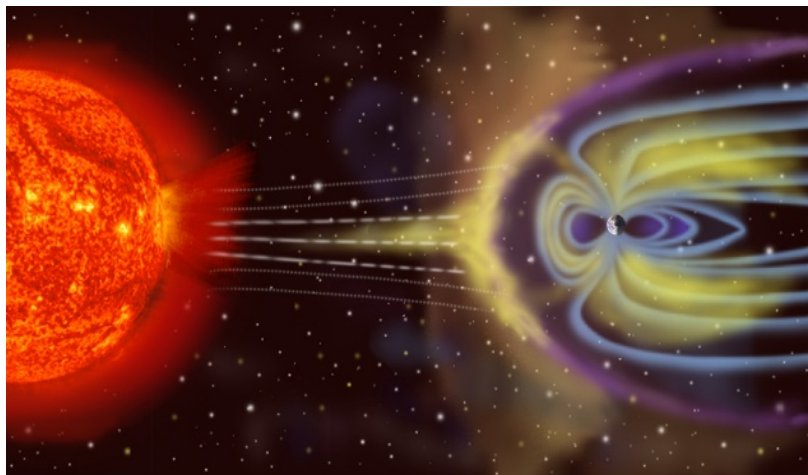
Ces GIC sont des phénomènes électriques au sol, provoqués par des perturbations du champ magnétique d'une planète : ces perturbations sont elles-mêmes causées par l'interaction entre l'environnement spatial (vents solaires, CME, particules énergétiques, etc.) et la magnétosphère de la planète.

Pour faire simple, les GIC proviennent principalement des CME (éjection de matière coronale).

Une CME rapide et massive transporte un nuage de plasma magnétisé (champ magnétique + particules chargées). Lorsqu'elle entre en interaction avec la magnétosphère terrestre, elle déforme brutalement le champ magnétique, et cet ébranlement induit sur Terre des courants dans les lignes à haute tension, pipelines, câbles sous-marins, etc.

Les autres vecteurs sont moins impactant voire pas du tout. On les cite pour mémoire.

- Les vents solaires rapides provoquent des perturbations modérées à longues durées et peuvent aussi parfois induire des GIC, surtout aux hautes latitudes.
- Les rayonnements X, UV chauffent l'ionosphère et provoquent des perturbations radio ou GNSS (effet ionosphérique). Mais ils ne génèrent pas directement de GIC au sol.
- Les particules énergétiques peuvent ioniser l'atmosphère à haute altitude, surtout aux pôles et peuvent aussi contribuer à des effets secondaires (comme des dommages aux satellites), mais pas directement aux GIC.



Dans la suite, nous aurons besoin essentiellement pour progresser des informations issues de l'article de Güdel de 2004, à savoir :

- La loi de distribution énergétique des flares, à ajuster pour Iouma.
- La correspondance $L_x \sim 2 \cdot 10^{28} \text{ ergs/s} \Rightarrow 1 \text{ flare/jour}$ avec une énergie supérieure à 10^{32} ergs .

Nous aurons aussi besoin des caractéristiques de la planète Ummo, et principalement des données concernant sa magnétosphère.

Rappel des données concernant Ummo

Le tableau suivant résume les données trouvées sur UmmoWiki d'une part, et certaines données estimées dans différents articles : « Habitabilité de la planète Ummo », « Les aurores boréales sur Ummo », « Zone habitable des exoplanètes et application à Ummo ».

	Ummo Données	Ummo Calcul
Masse (10^{24} kg)	9,36E+00	
Inclinaison	4,60E+03	
Rayon (km)	7252	
Durée du jour (heures)	30,92	
Excentricité de l'orbite	0,0078	
Distance à Ioumma (10^{10} km)	9,96	
Durée du jour	30,8	
Gravité (m/s ²)	11,88	
Année Ummo (jours)	231,9	
Pression atmosphérique (Pa) à l'équateur	239000 à 311000	
Température équateur °C	12	Incertitude importante sur cette donnée probablement maximale
Champ magnétique (Gauss)	0,07 à 0,23	0,157
Champ magnétique		Dipolaire
Rayon d'équilibre magnétique (*R Ummo)		1 à 5,7

Le champ magnétique supposé dipolaire de Ummo est plus faible que le champ magnétique terrestre. Avec une étoile plus active comme Ioumma, cela entraîne une plus forte compression de la magnétosphère de Ummo, expliquant comme nous l'avons déjà montré comment le vent stellaire pouvait pénétrer jusqu'à des latitudes très basses et provoquer des aurores boréales jusqu'à l'équateur.

Par ailleurs, la très forte variation annoncée du champ magnétique de la planète est très intrigante : une amplitude de 0.16 Gauss, soit 16000 nT, est très certainement due aux tempêtes géomagnétiques générées par Ioumma.

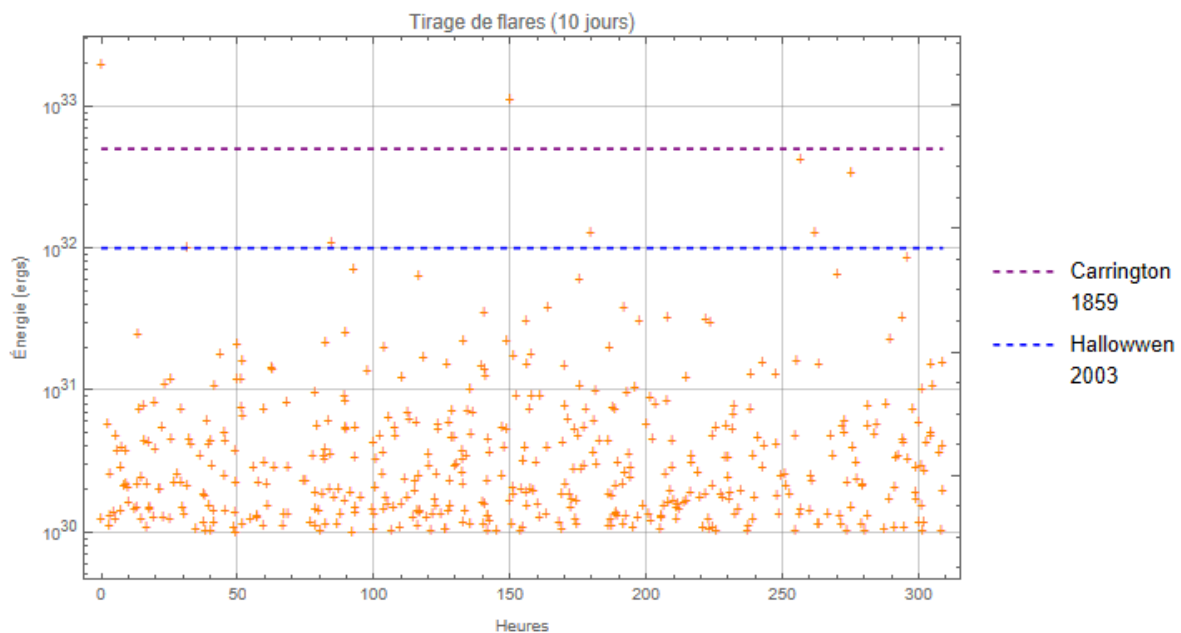
Le taux d'éruption de l'étoile Ioumma.

D'après Güdel (2004), et comme vu précédemment, nous avons une loi du type : $N(>E) = (E/10^{32} \text{ ergs})^{-\alpha}$ par jour. Il s'agit d'une loi probabiliste que nous allons maintenant simuler.

Cette loi doit indiquer qu'en moyenne, Ioumma génère environ 1 flare/jour dont l'énergie est au-dessus de 10^{32} ergs, sans pour cela qu'il y en ait un chaque jour de manière systématique : nous sommes dans le domaine des probabilités !

Le codage de cette loi figure en Annexe 1.

La figure suivante présente ce qu'il se passe sur une dizaine de jours, soit 309 heures sur Ummo. La moyenne de flares par jour est de 47 sur cette période. On note la présence sur 10 jours de 8 flares d'énergie supérieure à 10^{32} ergs, ce qui respecte bien la loi de Güdel ci-dessus.



Ce type de flare est exceptionnel pour le Soleil : c'est pour cela que j'ai positionné les deux événements de 1859 et 2003 ayant eu lieu sur Terre : de tels événements pour nous hors du commun seraient d'après cette figure quasi journaliers sur Ummo.

C'est le moment de rappeler les ordres de grandeurs correspondants à ces événements extrêmes.

1. Événement de Carrington (1859). Il s'agit d'une éruption solaire extrême avec CME (éjection de masse coronale). L'énergie estimée se situe entre **10^{32} et 10^{33} ergs.**

- dB/dt estimé au sol : jusqu'à ~ 5000 nT/min $\rightarrow$ soit ~ 80 nT/s
- Courants induits : de plusieurs centaines à milliers d'ampères mesurés dans les lignes télégraphiques à l'époque.
- Impact géomagnétique : aurores boréales visibles jusqu'à Cuba et Rome
- Références :
 - o Cliver & Svalgaard (2004), *Solar Physics* — « The 1859 Solar-Terrestrial Disturbance »
 - o Green et al. (2018), *Space Weather*

2. Événement d'Halloween (Octobre–Novembre 2003) Energie de l'ordre de 10^{32} ergs.

- dB/dt mesuré : Jusqu'à ~ 3000 nT/min, soit ~ 50 nT/s
 - o Satellites endommagés (SOHO, ACE)
 - o Avions déviés des pôles
 - o Blackouts radio, GPS affectés
- Références :
 - o Pulkkinen et al. (2005), *Space Weather*
 - o Balch (2008), *Space Weather* — « Halloween Storms: Geoeffective Solar Events »

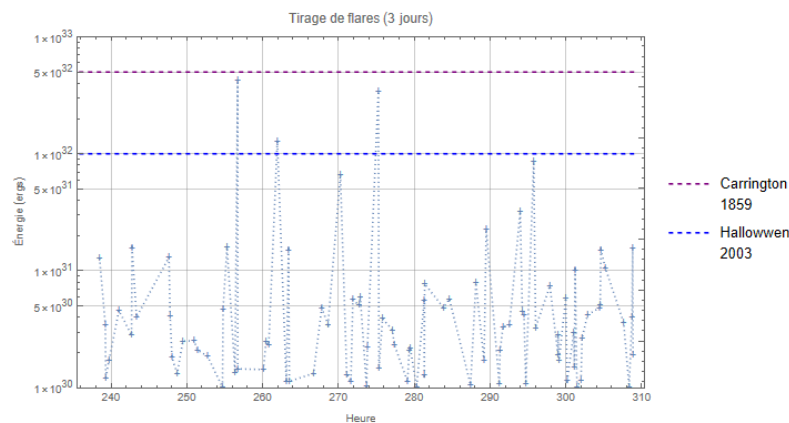
Les conséquences géomagnétiques sur Terre de tels événements sont donc extrêmement importantes.

Avec de tels événements journaliers, les conséquences sur Umho devraient être spectaculaires :

- Toute infrastructure conductrice de grande taille sera soumise régulièrement à des courants induits.
- De tels phénomènes vont provoquer régulièrement des aurores boréales visibles jusqu'à l'équateur.
- Les communications radios vont être extrêmement perturbées.

=> Pour une civilisation technologique, la vie va être compliquée.

Le graphique ci-dessous fait un zoom sur les 3 derniers jours du graphique probabiliste précédent. Chaque pic d'énergie va engendrer heure après heure toute une série d'événements plus ou moins importants sur Umho via des fluctuations horaires importantes de son champ magnétique.



Ordre de grandeur des variations du champ magnétique induit sur Umho

L'article suivant de 2022 balaie les différents phénomènes accompagnant les événements solaires exceptionnels. Cliver, E. W., Schrijver, C. J., Shibata, K., & Usoskin, I. G. (2022). Extreme solar events. *Living Reviews in Solar Physics*, 19(1), 2.

Voici un extrait très résumé du début du chapitre 6, notamment sans les références bibliographiques.

« En raison de la menace que représentent les courants induits géomagnétiquement (CIG) pour le réseau électrique, le dB/dt est de plus en plus utilisé comme mesure de la force des tempêtes. Les statistiques des valeurs extrêmes permettent de calculer qu'un orage magnétique avec une variation

dH/dt (où H est la composante horizontale de B) de 1 000 à 4 000 (1 000 à 6 000) nT/minute à 55-60 de latitude géomagnétique nord pourrait se produire une fois tous les 100 (200) ans. La force de l'orage et l'amplitude du GIC, qui dépendent fortement de la conductivité locale du sol ne sont toutefois pas étroitement liées. Les tempêtes extrêmes considérées dans cet article sont généralement accompagnées d'effets auroraux, indicateurs de variations rapides du champ géomagnétique, s'étendant jusqu'aux basses latitudes magnétiques. »

Dans ces conditions, comment progresser de manière simple ? Nous allons le faire par analogie, sachant que c'est un pis-aller, mais nous ne voyons pas d'autre solution à ce stade. D'après ce que nous avons vu précédemment, les dB/dt engendrés au sol lors d'événements extrêmes sur Terre sont de l'ordre de 50 nT/s, dus à des flares exceptionnels de l'ordre de 10^{32} ergs (Halloween 2003).

Compte tenu des effets observés lors de ces événements extrêmes sur Terre (aurores boréales à l'équateur, perturbations des ondes radios, courants induits élevés), et de ce que nous savons par ailleurs sur la vie sur Ummo, nous pouvons très grossièrement supposer qu'un événement de 10^{32} ergs sur la Terre aura le même effet sur Ummo. Ce n'est pas très rigoureux, d'autant plus que le champ magnétique de Ummo est plus faible que celui de la Terre, mais encore une fois, il s'agit d'un pis-aller.

Il y a cependant deux points essentiels à mentionner.

Le premier concerne la variation du champ magnétique planétaire. Sur Terre, on a enregistré en 2003 des variations de l'ordre de 5000 nT, soit 0.05 Gauss. Compte tenu de la valeur du champ magnétique terrestre (0.6 Gauss aux pôles), et de la très faible fréquence de ces événements, on affiche habituellement un champ magnétique quasi constant pour la Terre en un lieu donné, car la plupart du temps, le Soleil est calme. En revanche, les Ummites précisent bien que le champ magnétique de leur planète Ummo est très variable, allant de 0.07 Gauss à 0.23 Gauss, soit une amplitude très importante de ± 8000 nT par rapport à un champ moyen de 0.15 Gauss.

Le second point vient de la fréquence de tels événements, quasi journalière sur Ummo, et exceptionnelle sur Terre : ceci est dû à l'activité magnétique bien plus forte de Ioumma que celle de notre Soleil, comme nous l'avons vu précédemment. L'impact sur le champ magnétique d'Ummo est donc suffisamment important et quasi journalier pour nécessiter l'apport d'une telle précision : on comprend ainsi que c'est un phénomène régulier justifiant d'afficher un champ variant de 0.07 Gauss à 0.23 Gauss selon la météo de l'espace due à Ioumma. En tout cas, c'est comme cela que je suis tenté de l'interpréter.

On retiendra donc dans la suite que sur Ummo, on peut rencontrer des variations de champ aussi élevées que ± 8000 nT.

Comment relier maintenant de telles variations de champ magnétique à l'énergie de l'événement ?

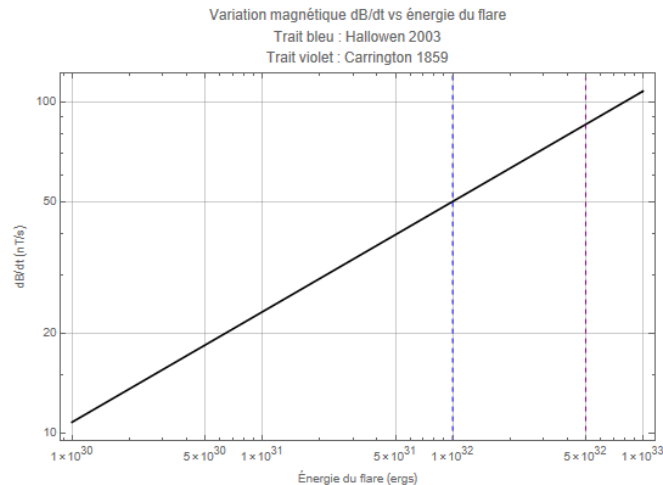
Certains auteurs utilisent une loi empirique telle que : $\Delta B = B_0 \left(\frac{E_f}{E_0} \right)^{1/3}$

E_f est l'énergie du flare considéré. E_0 vaut ici 10^{32} ergs pour se recalcr sur notre événement de 2003. Cette loi n'est pas du tout linéaire, ce qui veut dire qu'un flare E_f avec une énergie 50 fois plus faible que E_0 engendrera un ΔB de 27 % du flare de référence, ce qui reste énorme (4300 nT) et comparable à l'effet d'un événement exceptionnel sur Terre (3000 à 5000 nT).

La durée d'un flare est peu corrélée avec son niveau : Güdel parle d'une durée moyenne de quelques minutes, aussi va-t-on prendre comme hypothèse une durée de 5 mn pour tous les flares sur Ummo, et ce quel que soit leur niveau. Au final, on va donc obtenir une loi empirique du type :

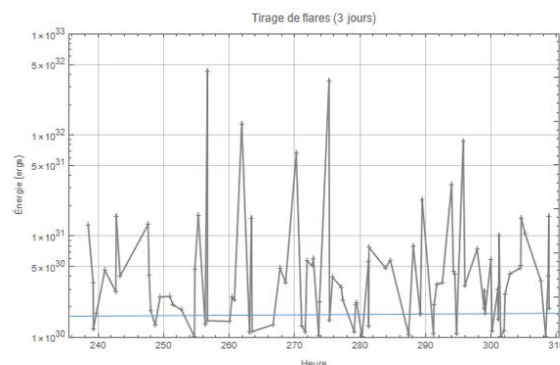
$$\frac{dB}{dt} == \frac{\Delta B}{\Delta T} == coef \left(\frac{E_f}{E_0} \right)^{1/3}$$

Le coefficient est obtenu en se recalant sur un évènement terrestre comme celui de 2003, de manière à obtenir empiriquement 50 nT/s pour $E_f=E_0=10^{32}$ ergs, le tout avec une durée typique de 300s (5 mn). Ce recalage a juste pour but de montrer via le graphique ci-dessous que les effets d'un flare de quelques 10^{30} ergs vont induire des effets magnétiques non négligeables par rapport à celui généré par un flare de 10^{32} ergs, de par la loi en puissance 1/3.



On a porté sur ce graphique l'évènement de 2003 (ligne verticale bleue), et également l'évènement de 1859 en violet, situant l'effet non loin de 80 nT/s.

Si maintenant on revient à la loi de distribution des flares (Annexe 1), on montre que celle-ci donne au moins 1 flare par heure d'énergie supérieure à 1.65×10^{30} ergs (graphique ci-dessous). Compte tenu de l'information empirique liant l'énergie d'un flare et son effet sur le champ magnétique, cela revient à avoir un dB/dt de l'ordre de 12.5 nT/s toutes les heures, soit 25 % de l'effet du flare de référence (10^{32} ergs) toutes les heures.



Comme nous l'avons déjà signalé, les variations du champ magnétique sur Ummo seraient de l'ordre de ± 8000 nT, donc du double de ce qui a été constaté sur Terre. D'un côté, les effets se situeraient dans la plage située entre 25 % et 100 % des effets du flare de référence (Halloween 2003), mais peut-être faudrait-il tenir compte de ce facteur 2 supplémentaire d'un autre côté. L'un dans l'autre, nous en resterons à l'estimation moyenne suivante, à savoir un effet important sur le champ magnétique d'Ummo quasiment toutes les heures, dans l'ordre de grandeur de celui de l'évènement terrestre de fin octobre 2003.

Les courants induits sur une ligne de transmission en Suède

De quoi parle t on maintenant concrètement ? L'article suivant date de 2005 ; il fait l'analyse détaillée de l'évènement Halloween 2003.

Pulkkinen, A., Lindahl, S., Viljanen, A., & Pirjola, R. (2005). Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space weather*, 3(8).

L'article évoque principalement les courants induits sur les lignes de transmission en Suède et ayant conduit à un blackout d'une heure pour 50000 usagers suédois.

Les auteurs ont effectué quelques simulations numériques pour restituer ces courants induits, de l'ordre de plusieurs centaines d'Ampères comme le montrent les différentes simulations. Selon les hypothèses, et les lieux géographiques considérés, ces courants induits peuvent atteindre 700 Ampères crête comme le montrent les figures suivantes.

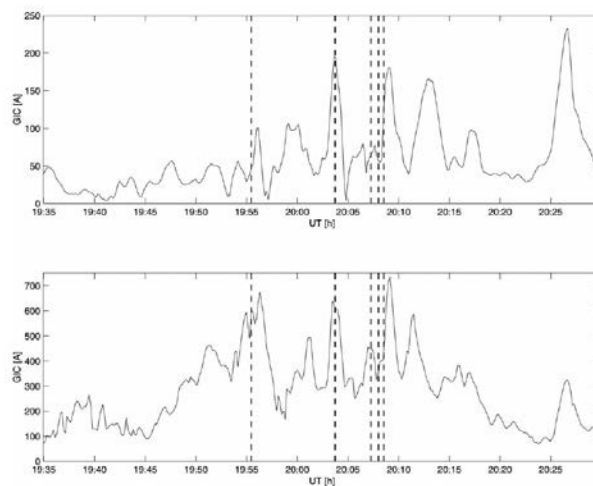


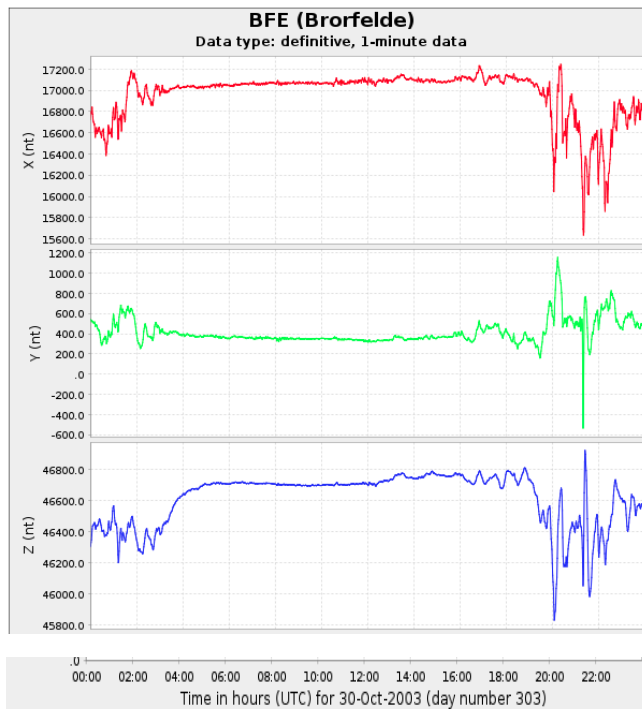
Figure 6. Modeled GIC in a simple transmission line segment for 30 October 2003. (top) GIC modeled using the Brorfelde geomagnetic data. (bottom) Maxima of GIC taken over all magnetometer stations. The dashed lines indicate the times of the failures in the Swedish high-voltage power transmission system. See the text for details.

Il est frappant de constater que ces courants induits peuvent durer une heure. Par ailleurs, leur allure est relativement bien corrélée aux variations du champ magnétique mesurées en Scandinavie.

On peut trouver sur INTERMAGNET (acronyme de INTERNational Real-time MAGNETic Observatory Network, qui est une organisation internationale réunissant des instituts mettant en œuvre des magnétomètres terrestres) les données exactes enregistrées à la station de Brorfelde au Danemark.

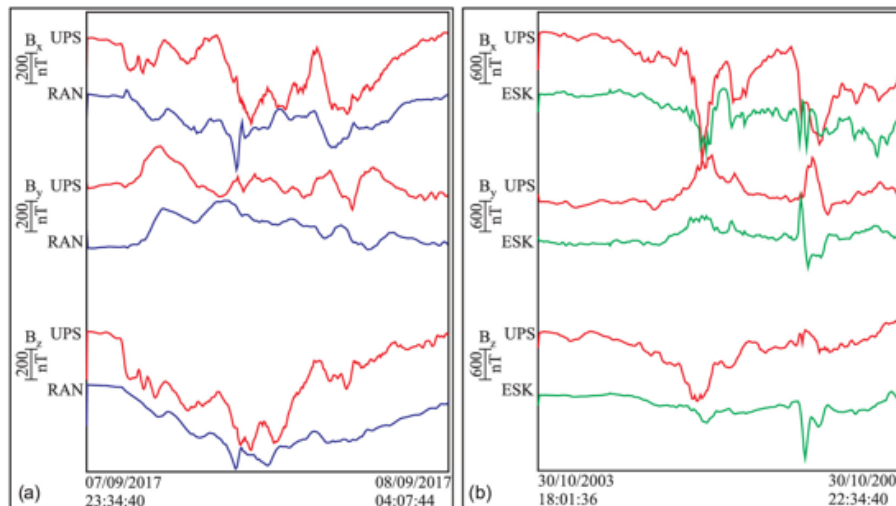
Les voici ci-dessous, montrant les variations du champ magnétique terrestre selon {Bx,By, Bz}.

Pour faire la comparaison, il faut examiner la partie droite des graphiques, à partir de 19h.



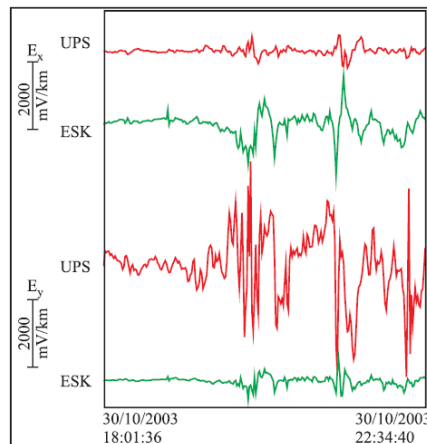
Le passage des champs magnétiques aux effets induits sur une ligne électrique ne sont pas triviaux et dépendent notamment de la conductivité du sol sur une grande profondeur (**voir explication de la physique en Annexe 2**). Ce point est important, car par exemple pour l'évènement de 2003, les variations de champ n'ont pas été les mêmes en Suède (en rouge ci-dessous, figure (b)) et en Ecosse (en vert ci-dessous, figure (b)).

The Role of Tectonic Plate Thickness and Mantle Conductance in Determining Regional Vulnerability to Extreme Space Weather Events: Possible Enhancement of Magnetic Source Fields by Secondary Induction in the Asthenosphere



Cette dernière étude (Simpson, F., & Bahr, K. (2020) *Space Weather*, 18(12)) montre que l'intensité des champs électriques est influencée par l'épaisseur de la plaque lithosphérique et la conductance de l'asthénosphère (produit conductivité-épaisseur) et qu'elle est cinq fois plus importante dans le sud de la Suède (> 5 V/km pour la tempête « Halloween » du 30 octobre 2003) que dans le centre de l'Écosse. La figure ci-dessous présente les champs électriques estimés à partir des champs

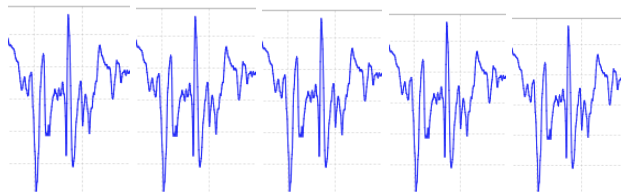
magnétiques mesurés (figure 1b ci-dessus), et des fonctions de transfert terrestres pour les zones géographiques considérées (revoir Annexe 2).



⇒ La valeur des données géologiques locales pertinentes peut faire varier d'un ordre de grandeur l'estimation des champs électriques induits.

Et sur Ummo ?

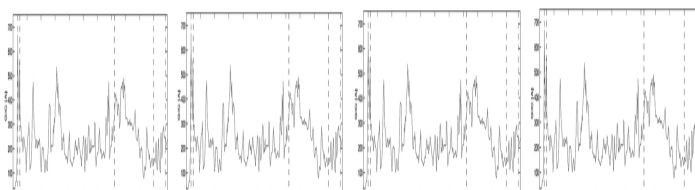
D'après tout ce qui précède, on aurait sur Ummo un champ magnétique extrêmement variable, qui serait **en permanence chahuté par l'activité importante de Ioumma**. Cela donnerait un champ magnétique qui pourrait ressembler à celui-ci après, heure après heure, jour après jour, ad infinitum...



... une impulsion par heure...

Pour en déduire des champs électriques, **et en suivant les études de GIC sur Terre**, il faudrait connaître la géologie d'Ummo. Mais nous avons peu de détails sur la composition et la conductance du manteau de la planète.

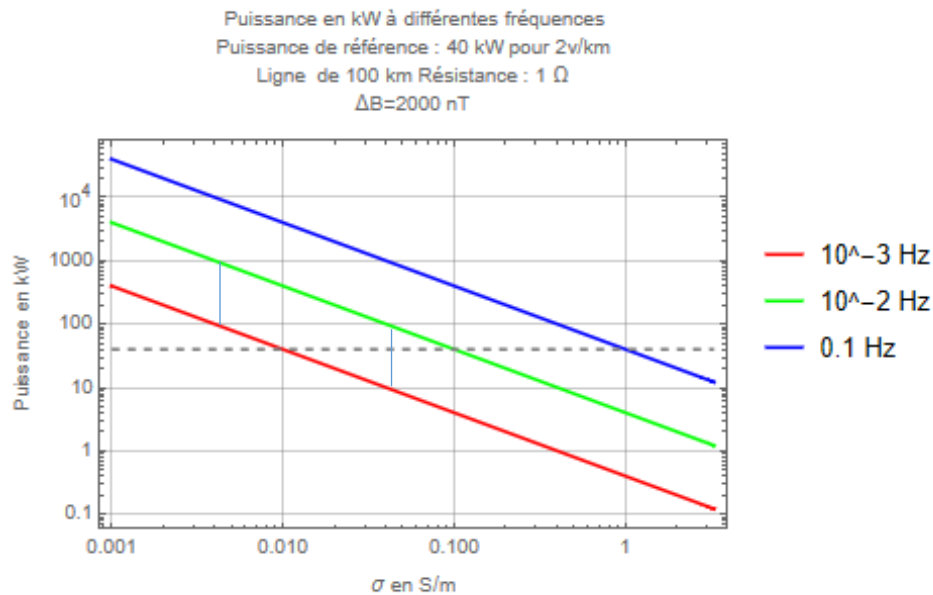
Faute d'informations, nous ne pouvons que faire des hypothèses et poursuivre notre raisonnement par analogie en restant prudents. Si on revient sur l'article de Pulkkinen, et sur des variations temporelles du champ magnétique comme ci-dessus, alors on peut envisager des courants induits qui ressembleraient au graphique suivant, heure après heure, jour après jour, induisant sur des lignes conductrices des courants de quelques centaines d'Ampère très fluctuants. Pour faire cette simulation, Pulkkinen a considéré une ligne de 100 km de long, avec une résistance de 1 Ohm.



une impulsion par heure...

Les résultats de Pulkkinen (disons 200 V, 200 Ampère sur une ligne de 100 km et 1 Ohm) donneraient par analogie une puissance permanente de l'ordre de 40 kW. Mais comme le montre clairement

l'Annexe3 dont est tiré le graphique ci-après, la méconnaissance de la conductivité des différentes couches géologiques peut engendrer des écarts sur ce résultat d'un facteur supérieur à 10 :



Comme le montre l'Annexe 2, les simulations de GIC de Pulkkinen laissent penser que les fréquences « utiles », tout au moins sur Terre (et en Suède), se situeraient vers 10^{-3} Hz avec un niveau intéressant jusqu'à 10^{-2} Hz. Si ensuite on borne sur le graphique les conductivités équivalentes d'une multicouche entre 0.005 et 0.05 S/m (traits bleus verticaux), on atteindrait dans le meilleur des cas une puissance proche de 1 MW comme montré ci-dessus.

Discussion sur l'exploitation énergétique des GIC sur Ummo

L'estimation précédente suggère que les courants induits géomagnétiquement (GIC) sur Ummo pourraient générer des puissances électriques de l'ordre de 40 kW sur des lignes conductrices longues de 100 km, en réponse à des variations de champ magnétique de type « événement Halloween 2003 », survenant quasi quotidiennement.

Il est tentant d'envisager une exploitation énergétique systématique de ce phénomène. Cependant, cette possibilité soulève un certain nombre de questions techniques.

1. Fiabilité et intermittence. L'activité magnétique de Ioumma est régulière, mais non linéairement distribuée : les flares varient en fréquence et en intensité, selon une distribution en loi de puissance. Cela implique une intermittence énergétique, rythmée par l'apparition des flares les plus intenses. Les systèmes de collecte doivent donc être capables d'absorber des pics de courant importants sans dégradation, en étant idéalement accompagnés de dispositifs de stockage.

2. Rendement énergétique. La conversion du champ magnétique variable en énergie électrique repose sur la conductivité du sol (inconnue pour nous), la conception des lignes conductrices, leur géométrie et leur intégration dans le réseau technologique Ummite. Le rendement global du système reste très incertain, notamment en présence de pertes résistives, d'effets capacitifs, et d'instabilités magnétiques secondaires.

3. Infrastructure nécessaire. Exploiter les GIC nécessite des réseaux de conducteurs de grande longueur, idéalement orientés pour maximiser le champ électrique. Il faut également des systèmes de transformation, régulation et stockage de l'énergie. Ces systèmes doivent être robustes : les GIC peuvent générer des surtensions destructrices s'ils ne sont pas maîtrisés.

4. « Rentabilité » pour autant que cela ait un sens sur Ummo. Même si la puissance estimée (de l'ordre de 40 kW) semble modeste, rappelons que cette valeur est obtenue sans aucune infrastructure active de production (pas de turbine, pas de combustion, pas de capteur mobile). Elle est quasi permanente si l'activité stellaire de Ioumma est confirmée. Elle pourrait s'ajouter sur un réseau dense de lignes, atteignant des puissances de l'ordre du mégawatt, voire davantage. La rentabilité énergétique pourrait donc s'avérer intéressante, notamment dans des régions isolées ou dans un contexte de rareté des autres ressources énergétiques.

5. Hypothèse d'une exploitation directe du champ magnétique. Les GIC exploitent le champ électrique induit. Certains passages des lettres Ummites suggèrent que leur civilisation aurait tiré parti directement des variations du champ magnétique pour produire de l'énergie, peut-être via des systèmes de type toroïdal, ou d'autres dispositifs que nous ne connaissons pas sur Terre. Car pour ces fréquences (10^{-3} à 10^{-2} Hz), il n'existe chez nous aucune technologie éprouvée permettant de convertir efficacement des variations lentes de champ magnétique global en énergie électrique. De plus, les dispositifs comme les transformateurs, les inducteurs, ou les anneaux de courant fonctionnent chez nous avec des champs alternatifs à plus haute fréquence et dans des environnements très contrôlés. En l'absence d'indications sur la structure des matériaux, l'échelle des dispositifs, nous ne disposons d'aucun cadre physique ou théorique clair pour modéliser cette éventualité ou procéder par analogie. En l'état, cette piste reste donc spéculative et ne permet pas d'estimation quantitative.

En synthèse : La civilisation Ummite aurait très bien pu envisager l'exploitation énergétique des GIC comme source énergétique secondaire, ou au minimum comme phénomène à canaliser et stabiliser pour éviter des dégâts sur ses réseaux électriques. Mais sans connaissance précise de la géophysique souterraine de Ummo, toute tentative supplémentaire de dimensionnement reste peu pertinente.

Conclusion

Notre science progresse et s'intéresse de plus en plus à la météo de l'espace engendrée par les étoiles possédant des exoplanètes. Cette météo peut générer des effets importants sur une exoplanète située dans la zone habitable de son étoile.

Pour cette étude, nous avons considéré le couple Ioumma-Ummo pour lequel nous possédons un ensemble de données assez important.

Nous avons tout d'abord mis en évidence ce que signifie : Ioumma, étoile active. Dans ce contexte, nous nous sommes rendus compte que son activité pourrait induire des phénomènes extrêmes avec une fréquence quasi quotidienne, ces phénomènes étant accompagnés d'événements moins violents mais répartis tout au long d'une journée.

De tels événements dans le système solaire sont peu fréquents, le Soleil étant considéré comme une étoile calme. Mais il existe parfois des phénomènes extrêmes, du même niveau que ceux d'une étoile active. Sur Terre, cela peut engendrer des aurores boréales visibles proche de l'équateur, des pannes sur les lignes haute tension, des perturbations radioélectriques, etc...

Par analogie, nous avons utilisé un tel événement, intitulé Halloween 2003, car nous avons beaucoup de mesures et d'effets sur Terre pour ce cas. A ce stade, cette analogie paraît légitime, car on nous parle effectivement sur Umma d'aurores boréales fréquentes, de perturbations des communications radio, et de courants induits pouvant être utilisés pour accumuler de l'énergie électrique.

2003 a aussi été l'année de la création de la revue « Space Weather » : il semblait en effet grand temps de s'intéresser de très près à cette branche de la science, indispensable pour surveiller ces événements marquants voire impactants pour une civilisation technologique.

Devant la complexité et la foison des effets engendrés dans l'atmosphère et l'ionosphère d'une planète par tous ces phénomènes, nous nous sommes limités au magnétisme planétaire induit lorsque les plasmas magnétisés émis par l'étoile rencontrent le bouclier magnétique de la planète et de fait perturbent le champ magnétique de la planète.

Ce volet en lui-même est complexe et nous avons procédé prudemment en essayant de ne pas commettre de non-sens sur le plan de la physique. De proche en proche, nous en sommes venus à considérer la question plus prosaïque des courants induits sur différents conducteurs de grande longueur, les fameux GIC. C'est un sujet dont la maturité a beaucoup progressé depuis 50 ans, et grâce aux stations de mesures magnétiques réparties dans le monde, nous avons une bonne connaissance de la phénoménologie générale jusqu'à la formation des courants induits dans les conducteurs de grande longueur.

C'est ici que nous avons principalement eu besoin d'avancer par analogie, car nous ne connaissons pas grand-chose sur la nature des sols et sous-sols profonds de la planète Umma. A supposer une similitude avec ceux de la Terre, et des variations de champ magnétique identiques à celles d'un événement extrême sur Terre, on en déduit l'existence de courants fluctuants et quasi permanents de quelques centaines d'Ampères sur des conducteurs de grande longueur (~100 km). Cette quasi permanence est due rappelons-le à l'activité magnétique très forte de l'étoile Ioumma.

Les puissances estimées prudemment sont faibles (40 kW) mais utilisables. Compte tenu des nombreuses hypothèses et analogies effectuées pour arriver à ce résultat, il m'a semblé peu pertinent de développer une quelconque tentative d'optimisation technologique.

Annexe 1 Codage de la loi de distribution des flares en langage Mathematica

Exemple d'un tirage sur 10 jours.

```
(*Paramètres de la loi de puissance*) alpha = 1.83;
Emin = 10^30; (*énergie minimale des flares en ergs*)
Eref = 10^32; (*énergie de référence pour normalisation*)
(*Paramètre:1 flare>Eref par jour*) lambdaRef = 1;
days = 10;
hoursPerDay = 30.9;
totalTime = days * hoursPerDay;
(*Fonction de génération d'énergie selon loi de puissance entre Emin et Emax*)
generateEnergy[] := Module[{r, En}, r = RandomReal[];
  En = Emin * (1 - r) ^ (-1 / (alpha - 1));
  En]

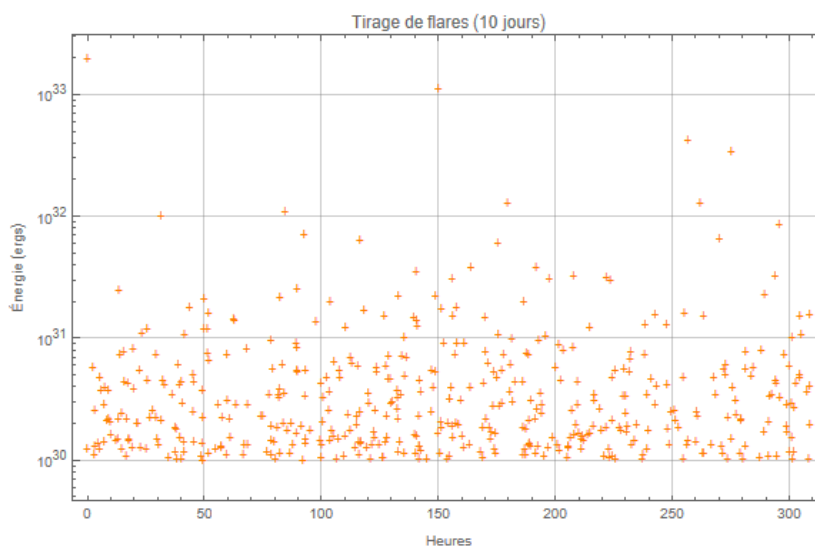
(*Nombre de flares par jour selon une loi de Poisson*)
flaresPerDay = RandomVariate[PoissonDistribution[lambdaRef * (Eref / Emin) ^ (alpha - 1)], days];

(*Générer les flares et leur temps d'occurrence*)
flares = {};
Do[Do[AppendTo[flares, {t = (day - 1) * hoursPerDay + RandomReal[{0, hoursPerDay}], generateEnergy[]}],
  {t, 1, flaresPerDay[day]}], {day, 1, days}];

(*Trier par temps*)
flaresSorted = SortBy[flares, First];
```

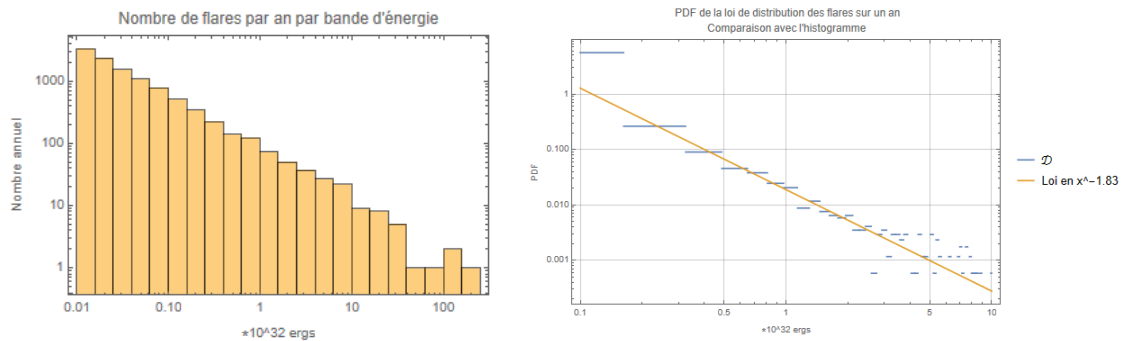
Pour chaque jour, on tire le nombre de flares selon une loi de Poisson, en prenant bien en compte la loi de distribution des flares en énergie. On obtient par exemple la séquence suivante sur 10 jours :

flaresPerDay= {60,40,51,40,38,62,59,41,36,51} : ce tirage sur 10 jours donne une séquence statistique de flares répartis à la fois en temps et en énergie. Cela permet de faire la représentation graphique suivante.

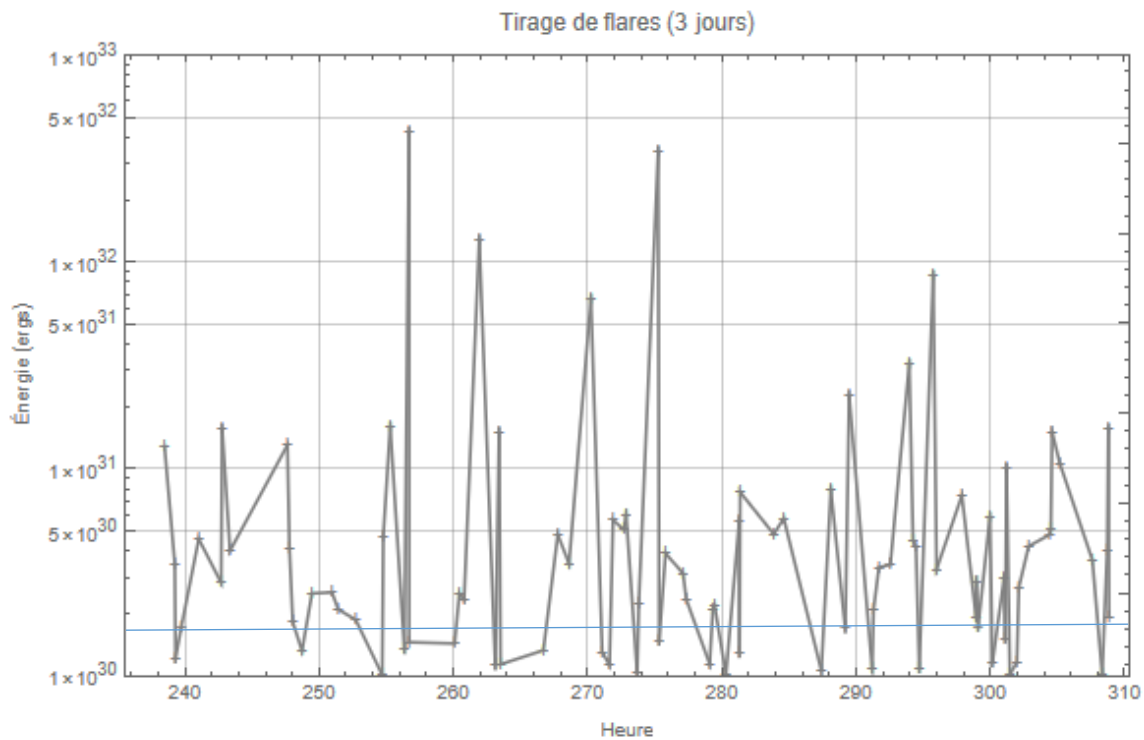


On obtient bien une moyenne de l'ordre de 1 flare/jour d'énergie $\geq 10^{32}$ ergs.

On vérifie sur un tirage plus important de 232 jours que la loi globale est bien respectée. Ci-dessous à gauche, on représente un histogramme de ce tirage, qui donne ici 235 flares par an de plus de 10^{32} ergs soit 1.013 flare par jour de plus de 10^{32} ergs (1 année = 232 jours). Et à droite, on compare cet histogramme à une loi de distribution en $x^{-1.83}$.



Comme prévu, la plupart des flares se situent vers les plus basses énergies, entre 10^{30} et 10^{31} ergs. Avec une telle loi de probabilité, on obtient 1 flare par heure d'énergie supérieure à $1.7 \cdot 10^{30}$ ergs. Le graphique suivant est une loupe sur les 3 derniers jours, avec une ligne pour $1.7 \cdot 10^{30}$ ergs.



ANNEXE 2 Loi de Faraday ou Equations de Maxwell ?

Cette annexe a pour but de montrer comment les champs électriques sont induits sur une ligne de transmission, et qu'il n'y a pas de contradiction entre la loi de Faraday appliquée de manière très simple et les équations de Maxwell.

Boteler, D. H., & Pirjola, R. J. (2017). Modeling geomagnetically induced currents. *Space Weather*, 15(1), 258-276.

Résumé de l'article

Comprendre le risque géomagnétique pour les systèmes électriques nécessite de pouvoir modéliser les courants géomagnétiquement induits (GIC) produits dans un réseau électrique. Cet article présente les avancées en matière de modélisation des GIC, en commençant par examiner les questions fondamentales concernant la localisation de la force motrice des GIC. Nous décrivons ensuite les deux principales approches de modélisation de réseau mathématiquement équivalentes et présentons un exemple de circuit simple. Une modélisation précise des GIC produits lors d'événements météorologiques spatiaux réels nécessite d'inclure les caractéristiques appropriées du système, les champs magnétiques sources et la structure de conductivité terrestre. Nous montrons comment plusieurs niveaux de tension peuvent être inclus dans la modélisation des GIC et comment la configuration du réseau affecte les valeurs des GIC. Les champs magnétiques sources peuvent être inclus en utilisant des modèles d'ondes planes ou de courant de ligne, ou en utilisant des données d'observatoires géomagnétiques avec un schéma d'interpolation approprié. La structure de conductivité terrestre peut être représentée par des modèles 1D, 2D ou 3D qui permettent de calculer la fonction de transfert entre les champs électriques et magnétiques à la surface terrestre. Pour les structures 2D et 3D, cela impliquera une fonction d'impédance tensorielle et des champs électriques qui ne sont pas nécessairement orthogonaux aux variations du champ magnétique. Il est désormais techniquement possible d'inclure toutes ces caractéristiques dans la modélisation des GIC, et diverses implémentations logicielles sont en cours de développement pour faciliter leur utilisation dans les études de risques.

Les fondamentaux

Il existe une grande confusion quant à la manière dont les perturbations géomagnétiques alimentent réellement les GIC. La loi de Faraday permet de relier le champ électrique intégré autour de la boucle formée par une ligne électrique, les connexions à la terre aux extrémités et le chemin de retour le long de la surface terrestre à la vitesse de variation du flux magnétique à travers la boucle (Figures a et b de la page suivante).

Cependant, des calculs simples montrent qu'aux fréquences du GIC (10^{-4} à 1 Hz), la vitesse de variation du flux magnétique est très faible, ce qui donne un champ électrique insuffisant, intégré autour de la boucle, pour alimenter les GIC observés.

Prenons par exemple la boucle formée par une ligne électrique de 200 km de long à une altitude de 30 m et la surface terrestre, avec un champ magnétique sinusoïdal à travers la boucle, d'amplitude de 2000 nT et de période de 5 min (pulsation = $2\pi / \text{Période}$). En appliquant la loi de Faraday, on obtient un champ électrique intégré autour de la boucle de seulement 0,25 V. (figure a)

$$\Rightarrow B_0 \omega L_{\text{Prof}} = 2000 \cdot 10^{-9} \cdot 2\pi / 300 \cdot 30 \cdot 200000 = 0.251 \text{ V.}$$

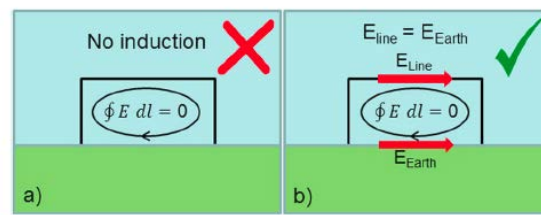
On pourrait en déduire hâtivement qu'il y a un problème, puisqu'on observe des courants induits élevés lors d'événements exceptionnels.

En comparaison, l'application des équations de Maxwell faisant intervenir la fréquence, pour une Terre uniforme de résistivité de $1\,000\ \Omega\text{m}$ donne un champ électrique intégré de $1\,633\ \text{V}$.

⇒ $B_0 \omega L E_{p_peau} = 2000 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \pi / 300 \cdot 200000 = 1633\ \text{V}$, obtenu avec une épaisseur de peau de $E_{p_peau} \sim 1/\sqrt{\omega \mu_0 \sigma} \sim 195\ \text{km}$. Ce calcul est approximatif, effectué en régime quasi statique, pour illustrer le concept. Pour plus de détails sur l'épaisseur de peau, on pourra consulter :

https://em.geosci.xyz/content/maxwell1_fundamentals/harmonic_planewaves_homogeneous/skinepth.html

Le fait que l'intégrale autour de la boucle ligne électrique-surface terrestre soit pratiquement nulle (figure a) est parfois interprété à tort comme signifiant l'absence totale d'induction. En réalité, l'induction implique une boucle s'étendant profondément dans la Terre (figure 2). L'intégrale nulle autour de la boucle formée par la ligne de transmission et la surface terrestre montre que le champ électrique dans la ligne de transmission a la même amplitude et la même direction que le champ électrique le long de la surface terrestre (Figure b). C'est la partie sous Terre qui est à l'origine du champ électrique.



⇒ Le phénomène de profondeur de peau est réellement fondamental pour comprendre le phénomène d'induction, générant une FEM aussi élevée.

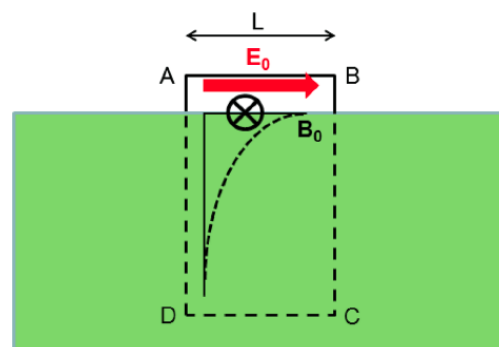


Figure 2. Geomagnetic induction in the loop ABCD.

Comme les différents paramètres varient en fonction de la fréquence, les spécialistes parlent maintenant de la fonction de transfert terrestre pour relier les variations temporelles du champ magnétique aux variations temporelles du champ électrique induit.

Ceci est l'objet de l'article suivant.

Boteler, D.H. and Pirjola, R.J. (2019) Numerical Calculation of Geoelectric Fields That Affect Critical Infrastructure. International Journal of Geosciences , 10, 930-949.

Résumé de l'article

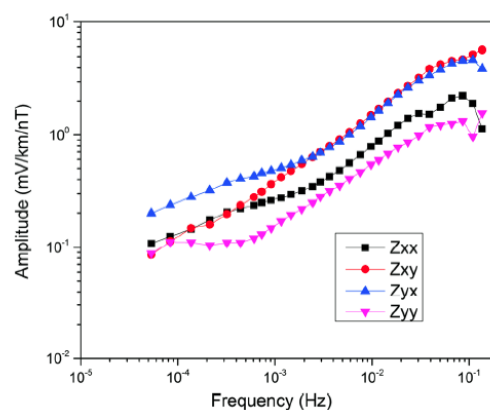
L'une des applications modernes du géomagnétisme consiste à déterminer l'effet des perturbations géomagnétiques sur les infrastructures critiques telles que les réseaux électriques et les pipelines. L'évaluation du risque géomagnétique pour ces systèmes nécessite le calcul des champs géo électriques produits lors de ces perturbations. Ces champs géo électriques peuvent ensuite être utilisés comme données d'entrée pour les modèles de systèmes afin de calculer leur impact. Cet article décrit les implications du calcul des champs géo électriques produits lors de perturbations géomagnétiques réelles. La théorie de l'induction géomagnétique est présentée et utilisée pour dériver la fonction de transfert terrestre reliant les variations des champs géo électrique et géomagnétique à la surface de la Terre. Il est ensuite démontré comment cette théorie peut être utilisée pour effectuer des calculs pratiques des champs géo électriques et comment le processus de calcul peut être vérifié par comparaison avec des solutions analytiques obtenues à partir de données synthétiques de variation géomagnétique. La précision des champs géo électriques calculés pour l'évaluation des risques géomagnétiques est limitée, non pas par la précision des méthodes de calcul, mais par la disponibilité des mesures du champ géomagnétique et des informations sur la conductivité terrestre sur toute l'étendue de l'infrastructure affectée.

Les fondamentaux

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K(f)B(f)e^{i2\pi ft} df$$

Cette équation résume le problème. Il faut connaître bien entendu la série temporelle $B[t]$ donnant les variations en fonction du temps du champ magnétique dans la zone considérée, puis faire sa transformée de Fourier $B[f]$.

Ensuite, il faut déterminer pour ladite zone la fonction de transfert terrestre $K[f]$. Un exemple a été donné dans l'article de 2017 de Boteler et Pirjola :



Connaissant $K[f]$, le produit de convolution est effectué en fréquence, ce qui donne $E[f]$. La transformée de Fourier inverse donnera alors $E[t]$.

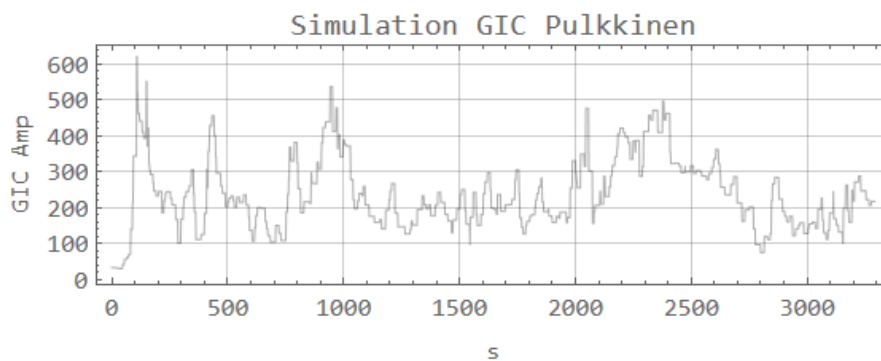
Cela paraît simple écrit comme cela, mais l'article de 2019 explique la complexité de la tâche, et notamment son application à un réseau électrique réel sur un socle terrestre réel.

Exemple d'une fonction $E[f]$ à partir de $E[t]$

Dans le texte, nous faisons référence à un article de Pulkkinen de 2005, dans lequel il calcule le GIC induit en Suède par simulation numérique, sur une ligne de 100 km et de 1 Ohm. Dans ce cas, le champ électrique $E[t] = R * GIC[t] = GIC[t]$, et donc $E[f] = GIC[f]$.

J'ai numérisé la figure 5 de Pulkkinen, ce qui me donne $GIC[t]$.

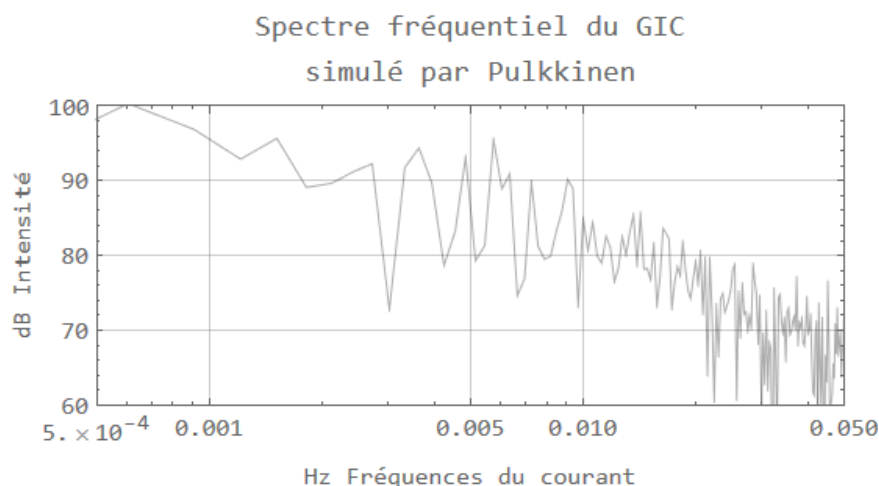
Ensuite, je calcule la transformée de Fourier de ce « signal », que je considère comme stationnaire. Cela me permettra de tracer $GIC[f]$, la transformée de Fourier de $GIC[t]$.



Le module de la transformée de Fourier est représenté ci-dessous. L'intensité du signal est exprimée en dB : une variation de 20 dB correspond à une variation du niveau du signal d'un facteur 10. Un niveau de 6 dB correspond à une variation d'un facteur 2.

L'échelle des fréquences est logarithmique pour une meilleure visualisation.

Comme on le voit, le niveau du signal s'écroule pour des fréquences supérieures à 0.02 Hz. Le spectre est mieux fourni autour de 0.001 Hz, avec un niveau intéressant jusqu'à 0.01 Hz.



Ceci permet d'appréhender le fait que les zones de fréquence intéressantes se situent entre 0.001 Hz et 0.01 Hz, tout au moins pour les phénomènes simulés en Suède en 2003.

ANNEXE 3

Estimation de l'amplitude du champ électrique induit en fonction de la nature du manteau. Application sur une ligne de 100 km et 1Ω.

Paramètres

B_0 amplitude du champ magnétique

ω pulsation = $2 \pi \nu$ ν étant la fréquence de l'onde.

σ conductivité du sol

$\delta[\nu, \sigma]$ profondeur de peau

E_{amp} amplitude du champ électrique généré

Formule à simuler On utilise la formule suivante très simplifiée :

$$E_{amp}[\nu, \sigma] = B_0 2 \pi \nu \delta[\nu, \sigma]$$

Cette formule provient de l'article :

Boteler, D. H., & Pirjola, R. J. (2017). Modeling geomagnetically induced currents. Space Weather, 15(1), 258-276.

$$E_0 = -j\omega p B_0 \quad (11) \quad p = 1 / \sqrt{j\omega\mu_0\sigma}$$

La conductivité du sol permet de calculer la profondeur de peau (notée p ci dessus) et comme nous sommes en régime quasi statique (fréquence < 1 Hz), nous pouvons utiliser l'approximation quasi statique.

Les données proviennent du site ci dessous.

https://em.geosci.xyz/content/maxwell11_fundamentals/harmonic_planewaves_homogeneous/skindepth.html

Profondeur de peau

Skin Depth

Skin depth defines the distance a wave must travel before its amplitude has decayed by a factor of $1/e$. The skin depth is the reciprocal of the decay constant β . Thus:

$$\delta = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\omega} \left(\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right)^{1/2}$$

Since β depends on the frequency and the physical properties of the media, so does the skin depth. For a general case, the skin depth can be considered a fairly complicated function. However, approximations exist in the quasi-static and wave regimes.

Approximations

Quasi-Static Approximation

In the quasi-static regime ($\epsilon\omega \ll \sigma$), the skin depth is approximately equal to:

$$\delta = \frac{1}{\beta} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}.$$

Le tableau suivant donne des valeurs de conductivité pour différents sols, et les profondeurs de pénétration en m à 1 Hz.

Nous allons utiliser ces valeurs pour examiner ce qu'il advient de la profondeur de peau pour des fréquences allant de 10^{-3} à 10^{-1} Hz, qui sont les fréquences d'intérêt en tout cas sur Terre.

Type	σ	μ_r	ϵ_r	δ (1Hz)
Air	0 S/m	1	1	∞
Sea Water	3.3 S/m	1	80	277 m
Igneous	10^{-4} S/m	1	5	50,300 m
Sedimentary (dry)	10^{-3} S/m	1	4	15,900 m
Sedimentary (wet)	10^{-2} S/m	1	25	5,000 m

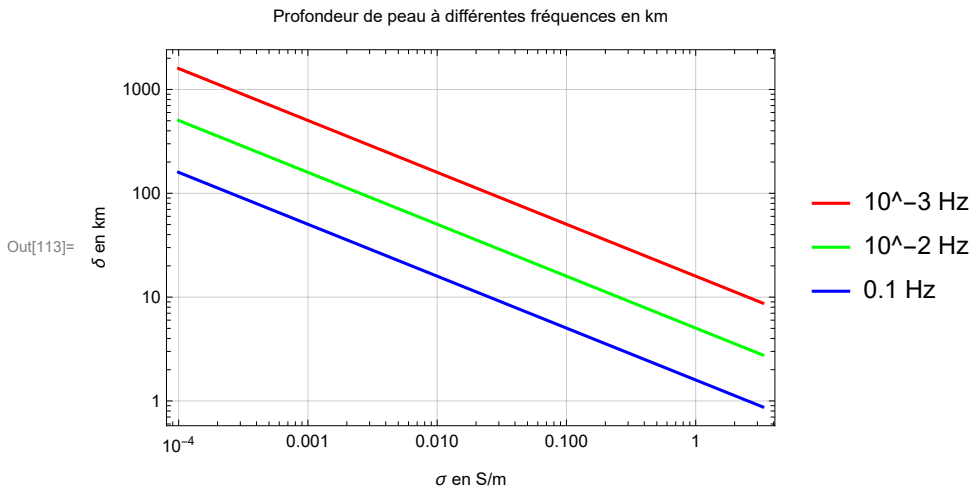
$$\delta[\nu, \sigma] = \frac{\text{Sqrt}[2 / (2 \text{ Pi } \nu \mu_0 \sigma)]}{\mu_0} \rightarrow \frac{4 \text{ Pi } 10^{-7}}{\text{nombre pi}}$$

[racine carrée]
[nombre pi]

```

In[113]:= LogLogPlot[{δ[0.001, σ] / 1000, δ[0.01, σ] / 1000, δ[0.1, σ] / 1000}, {σ, 10^-4, 3.3},
  |tracé log-log
  Frame → True, GridLines → Automatic, PlotStyle → {Red, Green, Blue, {Dashed, Gray}},
  |cadre |vrai |lignes de grille |automatique |style de tracé |ro... |vert |bleu |en tirets |gris
  PlotLegends → {"10^-3 Hz", "10^-2 Hz", "0.1 Hz"}, FrameLabel →
  |Légendes de tracé |Étiquette de cadre
  {"σ en S/m", "δ en km", "Profondeur de peau à différentes fréquences en km"}]

```



Ces valeurs sont bien sûrs à considérer très prudemment, car quand on lit une profondeur de peau de 1000 km, il est bien évident que cela ne doit pas représenter la réalité : la croûte planétaire est en effet constituée de plusieurs couches différentes que ce modèle très simple ne prend pas en compte.

Amplitude du champ électrique induit par une variation du champ magnétique

De manière simplifiée, l'amplitude du champ peut s'écrire comme suit, avec une amplitude de variation du champ magnétique de **2000 nT** :

```

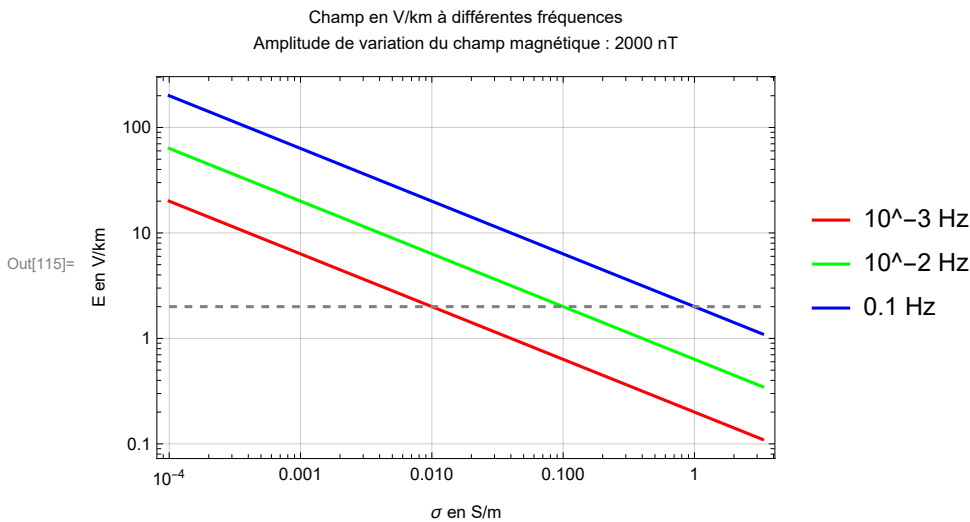
In[114]:= Eamp[v_, σ_] = B0 2. Pi v δ[v, σ] /. B0 → 2000 × 10^-9;
  |nombre pi

```

```

In[115]:= LogLogPlot[{1000 Eamp[0.001,  $\sigma$ ], 1000 Eamp[0.01,  $\sigma$ ], 1000 Eamp[0.1,  $\sigma$ ], 2},
  { $\sigma$ , 10-4, 3.3}, PlotStyle → {Red, Green, Blue, {Dashed, Gray}}, Frame → True,
  GridLines → Automatic, PlotLegends → {"10-3 Hz", "10-2 Hz", "0.1 Hz"},
  FrameLabel → {" $\sigma$  en S/m", "E en V/km", "Champ en V/km à différentes fréquences"},
  Amplitude de variation du champ magnétique : 2000 nT}]

```



Ces quelques abaques appellent quelques remarques

- * Elles sont construites pour une amplitude de variation du champ de 2000 nT : pour une variation potentielle de 8000 nT, il faut multiplier les valeurs par un facteur 4, mais est ce réaliste?
- * Selon les fréquences une variation d'un facteur 100 donne un facteur 10 sur la valeur du champ électrique généré (variation en $\sqrt{v}$)
- * Les valeurs relevées en Suède sont de l'ordre de 2 V/km (ligne pointillée) . Cela est cohérent d'un sous sol dont la conductivité est située entre 10⁻³ et 10⁻² S/m, et des basses fréquences de l'ordre de 10⁻³ Hz
- * Un sol volcanique (igneous) possède une très faible conductivité , de l'ordre de 10⁻⁴ S/m. Cela peut induire des champs élevés, par exemple de l'ordre de 20 V/km pour 10⁻³ Hz. Mais comme expliqué plus haut, il faut faire très attention au fait que cela correspondrait à des profondeurs de peau de plus de 1000 km ! Remarquons que pour 10⁻² Hz, on obtient 20 V/km pour une conductivité plus réaliste de 10⁻³ S/m (sol sédimentaire sec) induisant une profondeur de peau de 159 km.

Puissance électrique potentiellement utile sur une ligne de 100 km

Voyons maintenant la puissance électrique que l'on pourrait en tirer ; pour cela on prendra comme Pulkkinen (2005) une ligne de 100 km avec une résistance de 1 Ω .

```

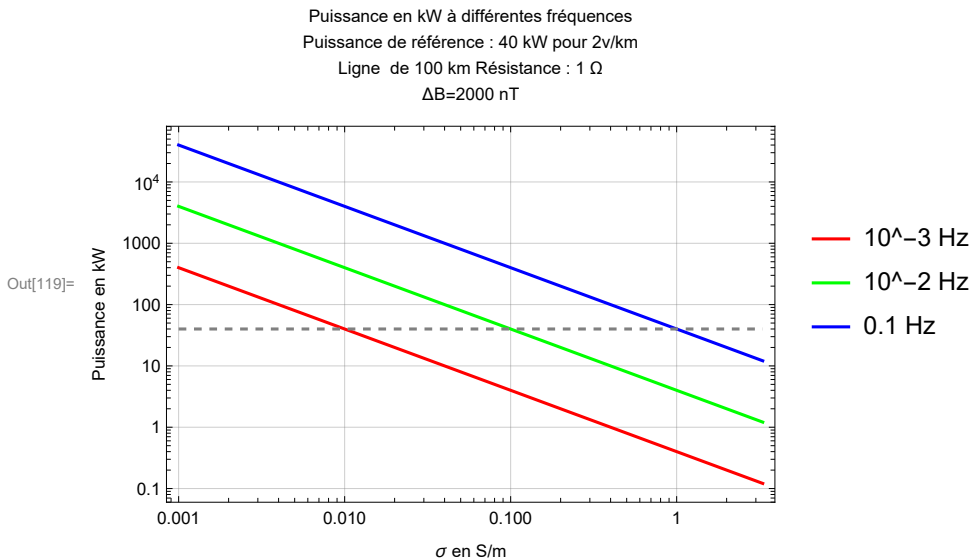
In[117]:= Puiss[v_,  $\sigma$ ] = (Eamp[v,  $\sigma$ ] * 100000) ^ 2;

```

```

In[119]:= LogLogPlot[{Puiss[0.001,  $\sigma$ ] / 1000, Puiss[0.01,  $\sigma$ ] / 1000, Puiss[0.1,  $\sigma$ ] / 1000, 40},
  { $\sigma$ , 10-3, 3.3}, PlotStyle → {Red, Green, Blue, {Dashed, Gray}}, Frame → True,
  GridLines → Automatic, PlotLegends → {"10-3 Hz", "10-2 Hz", "0.1 Hz"}, FrameLabel →
  {" $\sigma$  en S/m", "Puissance en kW", "Puissance en kW à différentes fréquences"},
  Puissance de référence : 40 kW pour 2v/km
  Ligne de 100 km Résistance : 1  $\Omega$ 
   $\Delta B = 2000$  nT"}]

```



Quelques remarques :

- * Par rapport au graphique précédent, on se limite à une conductivité de 10⁻³ S/m et à celle de l'eau de mer (3.3 S/m)
 - * La gamme de fréquence de 10⁻³ à 10⁻¹ Hz reste supposée pertinente comme sur Terre
 - * La référence de 2 V/km donne une puissance de 40 kW pour une ligne de 100 km, 1 Ω . Cette valeur étant située à peu près au milieu du graphique, on la garde comme ordre de grandeur de référence faute de mieux
- Comme on le montre en Annexe 2, les fréquences intéressantes pour produire du courant sont situées vers 10⁻³ Hz (courbe rouge), et intéressantes jusqu'à 10⁻² Hz (courbe verte).

Un empilement de couches géologiques sur Umho plus favorable (c'est à dire avec une moins bonne conductivité d'ensemble), pourrait donner des puissances supérieures. Mais on ne connaît pas en réalité la fonction de transfert "terrestre" sur Umho (voir Annexe 2).

Conclusion

La nature du sous sol joue un très grand rôle sur les champs électriques induits, et en conséquence sur les puissances disponibles sur un conducteur de grande longueur.

En restant conservateurs, on garde la valeur de 2V/km comme référence : cela induit une puissance disponible de 40 kW sur une ligne de 100 km, 1 Ω .

Un ensemble de données favorables pourrait conduire à une puissance proche de 1 MW , mais

nous n'avons pas les informations permettant d'aboutir à une telle conclusion.
Comme évoqué dans le texte, 1 MW correspond à la puissance de nos premières centrales hydroélectriques, ce qui peut constituer une source d'énergie d'appoint intéressante.