

traduction de l'article original paru en anglais dans le Journal of Modern Physics du 24 avril 2019 :

Mignonat, M.(2019).Missing Mass and Galactic Dust with a Size Greater than 200 Microns, Minimum Size of the Micrometric Dust around the Sun. *Journal of Modern Physics*,10,548-556)

## **Matière manquante et poussière galactique d'une taille supérieure à 200 microns, taille minimum de la poussière micrométrique autour du soleil**

Marc MIGNONAT, Société d'Astronomie des Pyrénées Occidentales, Pau Idron, France,mmignonat@libertysurf.fr

Résumé : Les études des glaciologues montrent que depuis 30000 ans, la terre reçoit chaque année 40000 Tonnes de poussières, poussières d'une taille moyenne d'environ 200microns. En déterminant de quel volume proviennent ces 40000T, on peut estimer la masse de poussière contenue dans la Galaxie. Des arguments sont donnés pour affirmer que la poussière tombant sur terre est représentative de la poussière galactique:1) la répartition des grandes poussières est globalement homogène dans la galaxie( cec qui n'exclut l'existence de gaz ou de nuages de poussières avec des densités différentes dans la voie lactée) ; 2)il y aurait une taille minimum que j'ai calculée pour les micrométéorites dans l'environnement solaire qui induirait un déficit pour les micrométéorites ayant une taille comprise entre 5 et 50 microns. La densité n'est donc pas plus grande dans le système solaire. Ensuite un calcul très simple (comme celui fait par l'observatoire de Paris en 1910) permet d'estimer cette masse à approximativement 4 fois celle de la matière noire. Ainsi, la poussière interstellaire de grande taille( >200 microns) pourrait-elle être la matière manquante? Une méthode de vérification est proposée pour confirmer ou réfuter cette hypothèse.

**Mots clé :** matière noire, poussière, galaxie : poussière inter stellaire

### **1. introduction**

Chaque année, la Terre reçoit 40000T de poussières et ce chiffre n'a pas varié depuis au moins 30000 ans.[1] Une étude en 2016 [2] des sédiments marins montre qu'il n'y a pas de variation de cette valeur depuis au moins 40 millions d'années avec un maximum à la fin de l'éocène(à 35 millions d'années) et à la fin du miocène(à 8,2 millions d'années).

Dans sa thèse de 2010[3], Dobriča précise que sur chaque m<sup>2</sup>, il tombe en moyenne chaque année une micrométéorite (soit 30.000 tonnes contre 10 tonnes seulement de météorites macroscopiques). Elles sont trop petites pour que l'on s'en aperçoive (leur taille moyenne est de 200 microns). Par exemple, lors d'une collecte en antarctique en 2006, dans 24 m<sup>3</sup> de neige filtrés ont été extraites plus de 1300 micrométéorites. Cette taille moyenne de 200 microns ne correspond pas à ce que l'on suppose sur la matière noire.

La matière noire désigne une catégorie de matière hypothétique, invoquée pour rendre compte d'observations astrophysiques où il y a un défaut de masse ( l'abondance des éléments prévus par la nucléosynthèse, les différentes anisotropies dans le fond diffus cosmologique notamment pour le redshift autour de 1000, les estimations de masse des galaxies et des amas de galaxies qui expliquent leur formations). On peut toutefois remarquer que dans toutes ces observations sur de « particules » ou des « gaz », on ne trouve pas de poussière supérieure au micron.

Différentes hypothèses sont explorées sur la composition de la matière noire : gaz moléculaire, étoiles mortes, naines brunes en grand nombre, trous noirs, etc. Comme on ne trouve aucune matière visible, les astrophysiciens supposent une matière non baryonique avec d'autres particules( par ex,neutrinos, axions, peut être des superparticules comme le neutralino). Ces particules sont regroupées sous le nom générique de « WIMP ».

La théorie MOND[4] dit que cette matière noire n'existerait pas, et fait l'hypothèse que son existence serait due à une méconnaissance partielle des lois de la gravité

Des astrophysiciens comme Magnan[5] considère que la matière noire n'existe pas, qu'il s'agit d'une erreur résultant d'une trop grande incertitude existant sur les mesures des vitesses et des masses à l'intérieur des galaxies.

Aussi, j'ai eu la curiosité d'essayer d'estimer la masse globale de la poussière dans la Galaxie avec l'approche utilisée par l'observatoire de Paris en 1910 et de la comparer avec celle de la matière noire. Mais d'abord, nous devons savoir si la densité dans l'environnement solaire est représentative de celle de la Galaxie. Pour cela, nous devons nous interroger sur l'homogénéité de la répartition de la poussière et voir si la taille des poussières reçues est représentative de l'ensemble des poussières.

## **2. Répartition de la poussière dans la Galaxie et taille de la poussière**

### **2.1 Homogénéité globale dans la Galaxie:**

1)-Le calcul résultant de l'observation (estimation en 1910 de 10000T/an sur la terre[6]) donne une absorption de 2 magnitudes par Kpc( ce qui signifie qu'une étoile située près du centre galactique à 8,5 Kpc subit une extinction de 16 magnitudes et est donc souvent invisible). Cette extinction, proportionnelle à la distance implique une répartition homogène des poussières entre nous et le centre galactique.

2)-On peut citer la thèse de 2012 de ARAB [7]sur l'évolution des poussières interstellaires. Dans cette thèse exhaustive,il considère que le milieu interstellaire désigne l'ensemble de la matière emplissant l'espace entre les étoiles constitué d'un mélange de gaz et de poussières extrêmement ténu d'un atome/cm<sup>3</sup>. Les poussières sont des particules solides dont la taille est comprise entre le nanomètre et le micron. Leur faible taille proche des longueurs d'ondes d'émissions(<100nm) explique leur températures plus chaudes soit autour de 17k soit autour de 30k. La répartition est homogène mais les poussières avec une taille supérieure au micron ne sont pas prise en compte.

3)-ZAGURY en 2002 [8]relève déjà les incompatibilités entre la théorie standard de l'extinction interstellaire et l'observation.Avec les données issues de l'international ultraviolet satellite, il a été étudié l'extinction pour les nébuleuses dans le spectre UV autour du pic à 2200Å et dans les directions de faible et très faible rougissement. Il trouve que l'extinction suit une fonction linéaire du proche IR jusqu'au UV lointain, ce qui est incompatible avec la théorie standard de l'extinction interstellaire. Il remarque que l'observation du rougissement de la lumière issue des étoiles est contaminé par la lumière diffusée avec un très faible angle de diffusion. Pour lui, cela remet en question tous les modèles de poussières actuellement utilisés puisque la conséquence est qu'il n'y a pas de différence dans les proportions moyennes des poussières selon les différentes directions d'observations. Il rappelle qu'il est toujours posé que « la poussière interstellaire représente une très faible partie de la matière interstellaire, essentiellement gazeuse ». La quantité de poussière est constante, très probablement parce que la répartition de la poussière est homogène au sein de la Galaxie.

4)-Des études plus récentes[9,10] montrent un brassage des poussières et suggèrent une fragmentation des nuages de gaz: Sur une ligne de visée, il est constaté que l'intensité des raies d'absorption de H<sub>2</sub>CO varie d'une année sur l'autre (l'enregistrement a été fait sur 18 ans). Cela suggère des mouvements turbulents de la matière interstellaire qui provoque un lent renouvellement sur la ligne de visée que les auteurs attribuent au mouvement de la terre autour du soleil et au mouvement du soleil dans la Galaxie (20km/s dans la direction définie par  $\alpha \approx 18h$  et  $\delta \approx 30^\circ$ ). Mais même si les concentrations gazeuses sont variables, pour les auteurs, « Il apparaît donc finalement que dans ce type de nuage, les poussières sont distribuées de manière relativement uniforme et qu'il n'existe pas de fortes fluctuations »

### **2.2 Taille de la poussière**

1)-Les vieilles études des années 1950 pour les particules « très grandes par rapport à la longueur d'onde » déterminaient, à partir des mesures des indices de couleur[11] et des coefficients

d'absorptions, qu'il n'y avait pas de place pour l'absorption neutre dans la Galaxie[12]. Toutefois, il existait quelques études isolées comme celle de Alter [13] qui en fonction de la longitude galactique, trouvait un coefficient de 0,873 mag/Kpc (au lieu de 0,17Kpc) qui nécessitait une masse plus importante de poussière. La conclusion de Delay en 1954 [14] de ces études est que, à partir de l'étude seule de l'absorption, il est impossible de déduire quelle est la nature des particules responsables de l'absorption.

2)- Il est écrit en 1946 que la poussière ne peut excéder quelques milliers d'angstrom [15]. Gyngard [16] trouve 25 microns en 2018 et Gregory en 2005 [17] une masse d'environ  $10^{-17}$ kg. La raison de la faible taille des particules est expliquée par l'équilibre entre la croissance des grains possible pour chaque atome sauf H et He quand la température est supérieure à 10-20°K et la destruction par choc ou évaporation [15].

3)-D'autres vieilles études montre que la pression de radiation  $P_r$  sur les particules plus grande que la longueur d'onde empêche la présence dans l'espace des particules de quelques dizaines de microns. Les particules sont en équilibre entre la pression de radiation  $P_r$  et la force de gravitation  $F_g$  ; ces deux forces diminuent avec le carré de la distance, aussi le rapport entre  $P_r$  et  $F_g$  est constant [14]. Quand  $P_r$  domine, les grains sont repoussés à plusieurs parsecs de l'étoile [18].

4)-Il est toutefois intéressant de déterminer le rayon  $r$  minimal des grains qui ne seront pas repoussés et resteront dans l'environnement terrestre. Un calcul simple (voir calcul en annexe) permet de déterminer le rayon minimal  $r$ ,  $r = 3 \sigma T^4 R_0 / 8 G M_0 \rho$  ( avec  $\sigma$  constant de Stefan,  $T$  température de l'étoile,  $R_0$  rayon de l'étoile avec une masse  $M_0$ ,  $G$  constante de gravitation et  $\rho$  densité du grain); pour le soleil,  $r \approx 120\rho$  (soit un rayon de 120 $\mu$  ou une taille voisine de 240 $\mu$  pour un objet de densité 1, une taille de 64 $\mu$  pour une chondrite de densité 3,8 ou 50 $\mu$  pour une sidérite de densité 4,8). Cette taille minimum est en conformité avec les prélèvements fait par Dobrica en Antartique [3] aussi bien qu'avec les dernières études issues de la sonde Cassini avec la récolte de 36 micrométéorites de l'extérieur du système solaire [19] et issues de la récolte en 2017 de poussières sur les toits de plusieurs villes d'Europe [20].

### **Enfinement sur l'homogénéité et la taille :**

A partir des études citées ci-dessus aux paragraphes 2-1 et 2-2, il apparaît : d'abord, il est raisonnable de penser que la répartition de la poussière est globalement homogène ( ce qui n'exclut pas l'existence de nuages de gaz ou de poussières) et que les poussières récoltées sur terre sont représentatives de celles de la Galaxie. On peut remarquer que les hypothèses récentes faites seulement à partir des études sur les gaz (où l'on ne trouve pas de poussière supérieure au micron) ne peuvent expliquer les 40000T tombant annuellement sur la terre.

Deuxièmement, il n'y aurait pas une forte densité de poussières autour du soleil puisque une catégorie de poussières est sous représentée. Les vieux articles montrent la difficulté de l'étude de la poussière neutre et déterminent pour les petits grains une taille maximum proche de la longueur d'onde. Il est important de remarquer qu'une taille minimum de micrométéorites peut être calculée dans l'environnement terrestre. Ainsi, les particules d'une taille approximative entre 6 et 50  $\mu$  seraient sous-représentées. Plus précisément, en prenant en compte la densité croissante, il y aurait une diminution progressive de la quantité de poussières à partir de 240 $\mu$  pour arriver à une quasi absence vers 50 $\mu$  ( puisque seule les particules avec une densité supérieure à 5 pourraient être plus petites). On suppose donc que ces particules de tailles intermédiaires seraient plus abondantes à équidistances des étoiles.

## **3.Calcul approximatif de la masse des poussières de la Galaxie :**

### **3.1.Dans un premier temps, le volume de la Galaxie est à déterminer**

De manière habituelle, on va considérer que notre Galaxie a une forme approximativement ellipsoïde avec un rayon équatorial  $R' = 50000$  AL et un rayon polaire  $R'' = 5000$  AL. Ainsi, on obtient le volume  $V_g$  en multipliant deux fois le rayon équatorial  $R'$  par le rayon polaire  $R''$ .

$$Vg = \left(\frac{4}{3}\right)\pi R^2 \times R'' = 5 \times 10^{61} m^3 \quad (1)$$

### 3.2 Deuxièmement, il est nécessaire de déterminer la masse volumique de la poussière dans la Galaxie.

Pour calculer cette valeur, il faut estimer de quel volume viennent les 40000T de poussières reçues annuellement par la terre.

La Terre en un an, va balayer le volume d'un tore dont le grand rayon R est le rayon de l'orbite terrestre et le petit rayon r de la section du tore est le rayon de la sphère dans laquelle l'attraction terrestre va s'exercer.

Ce rayon r est difficile à estimer.

Si on considère que les poussières sont en orbite solaire, alors il faut prendre le rayon maximal d'influence gravitationnelle terrestre, à savoir, les points de Lagrange L1 et L2 situés à environ 0.01UA = 1,5 millions km. Mais, cette hypothèse maximaliste peut être écartée car alors, au cours du temps, la Terre passant approximativement au même endroit, la quantité de poussières récoltée aurait décru et tendue vers zéro.

Un calcul possible pour avoir le plus grand volume est de considérer que la composante de la vitesse des poussières est nulle dans le plan de l'écliptique ; et de prendre comme distance maximale le temps d'atteindre la Terre dans son temps de passage. En un point donné, la Terre peut supposer avoir une influence maximale pendant son temps de passage  $T_p$  soit :  $T_p = \text{diamètre} / \text{vitesse} \approx 12000 / 30 = 400$  s. Cette influence étant inversement proportionnelle au carré de la distance, nous allons éviter un calcul intégral en faisant l'approximation que le temps d'influence sera multiplié par 2, soit  $400s \times 2 = 800s$

Les poussières concernées seront celles qui auront pu atteindre la Terre pendant ce trajet de 800s. Même en supposant l'accélération g de la pesanteur égale à celle présente à la surface terrestre, ce qui est excessif, soit  $g=10m/s^2$ , nous n'arrivons qu'à une distance d parcourue de 3200km ( $d=gt^2/2$ ). Nous aurons donc, à priori une surface de balayage dans une fourchette haute en supposant un petit rayon du tore balayé par la Terre de 9500km.

Un calcul similaire avait déjà été fait en 1911 par Salet[6] de l'observatoire de Paris qui, cherchant à calculer l'absorption à partir de la quantité de poussières reçue annuellement par la Terre (estimation en 1910 de 10000T/an), avait fait une estimation du volume d'espace duquel provenaient ces poussières. En supposant que les poussières aient eu une vitesse voisine de la Terre soit 20 à 30 km/s et en tenant compte de l'hypothèse que le soleil, immobile, ait augmenté par son attraction leur densité près de la Terre, Salet estimait que les poussières étaient récoltées dans le volume d'une sphère de rayon x tel que  $x^2 = 5 R^2$  avec R rayon terrestre=6500km. ( donc  $x=11914km$ ) Ainsi, il avait trouvé un rayon équivalent de 11914km, ce qui est légèrement supérieur à la valeur que je trouve, mais en 1910 le mouvement galactique, n'était pas connu et le soleil était supposé immobile.

Le volume du tore  $V_t$  dans lequel les poussières sont récoltées par la terre est alors :

$$V_t = 2\pi^2 r^2 R = 2\pi^2 (9,5 \cdot 10^6)^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \approx 2,7 \cdot 10^{26} m^3.$$

La masse volumique  $M_v$  des poussières présentes dans l'espace est alors :

$$M_v = 4 \cdot 10^7 / 2,7 \cdot 10^{26} \approx 1,5 \cdot 10^{-19} kg/m^3. \text{ Cette valeur est très élevée (on compte habituellement pour le vide interstellaire une particule par } cm^3 \text{ soit environ } 1,67 \cdot 10^{-21} kg/m^3)$$

### 3.3. La masse totale $M_t$ des poussières présentes dans la Galaxie peut alors être estimée

$$(1)(2) \Rightarrow M_t = V_g \times M_v \approx 7,5 \cdot 10^{42} kg$$

La masse visible de la Galaxie est estimée aux alentours de  $4 \cdot 10^{41} kg$  [21,22]

Celle de la matière noire, environ 5 fois plus importante serait de  $2 \cdot 10^{42} kg$ , c'est à dire approximativement 4 fois plus petite que la valeur que je viens juste de calculer. Cependant cette valeur a le même ordre de grandeur.

## 4. Hypothèses et conclusion :

Les ordres de grandeur, obtenus par le calcul qui vient d'être fait, invitent à la réflexion. Ils me conduisent à faire l'hypothèse que la matière manquante pourrait être retrouvée par un calcul gravitationnel classique plus élaboré que celui que j'ai effectué, en particulier avec l'inclusion des structures détaillées de la Galaxie, une meilleure précision par les glaciologues ou les géologues de la quantité de poussières reçues annuellement par la terre et la mesure dans l'espace de la quantité de poussières avec une taille supérieure au micron.

Je ne suis pas le seul à me poser des questions sur la matière noire. Mais, c'est peut-être la première étude qui cherche à estimer la masse de la poussière galactique à partir de la poussière (>200 $\mu$ ) reçue par la terre et, dans cette étude, je fais l'hypothèse que la répartition de la poussière dans la Galaxie est globalement homogène (ce qui n'exclue pas des variations locales avec de grands nuages de gaz ou de poussières). Cette homogénéité globale, même si j'ai cité plusieurs études en sa faveur remet en question la théorie standard de l'extinction interstellaire, aussi faut-il rester prudent. Une autre raison est que je suppose que la poussière vient de l'extérieur du système solaire parce que la quantité de poussière est constante depuis 40 millions d'années, mais 40 millions d'années n'est pas un long temps à l'échelle astronomique.

On relève que le calcul permet de trouver que la masse excéderait la valeur connue de la masse manquante de près de 4 fois. Aussi, pour expliquer cet excès de masse, il faut supposer, soit que nous sommes par hasard dans une zone de la Galaxie avec une forte densité ( mais c'est peu probable), soit que la poussière est répartie principalement dans la zone interplanétaire ( cette zone pourrait aller très loin au delà du nuage d'Oort). Il est alors logique de penser que cette poussière existe autour de chaque étoile. En multipliant cette quantité de poussière interplanétaire par le nombre d'étoiles, on pourrait aussi trouver plus précisément la matière manquante. Cette hypothèse a l'avantage de conserver les mécanismes déjà connus de la formation des galaxies.

Un élément en faveur d'une origine extérieure au système solaire est que la radiation IR des poussières est plus importante dans le plan galactique que dans le plan de l'écliptique. (On fait ainsi l'hypothèse que le maximum de poussières micrométriques n'est pas dans le plan de l'écliptique).

Mais la meilleure vérification de ces hypothèses pourrait être donnée par une récolte directement dans l'espace et la mesure de la densité de la poussière à l'intérieur du système solaire. Le rayon minimal  $r$  de la poussière dans l'environnement solaire pourrait être au environ de  $r \approx 120\mu/\rho$  ( $\rho$ = densité de la micrométéorite).

Et, si la poussière est interplanétaire, la densité serait plus élevée dans le plan de l'écliptique ; si la poussière vient d'une région extérieure au système solaire, alors la densité de la poussière micrométrique en divers points à l'intérieur du système solaire (par ex dans ou en dehors du plan de l'écliptique) serait approximativement constante.

## Conflits d'intérêt

L'auteur déclare ne pas avoir de conflit d'intérêt pour la publication de ce papier

## Références

1-Winckler, G. & H. Fischer (2006). 30,000 years of cosmic dust in Antarctic ice, *Science*, Vol. 313, pp. 491

2-Chavrit, D.; Moreira, M.; Moynier, F;(2016) Estimation of the extraterrestrial  $^3\text{He}$  and  $^{20}\text{Ne}$  fluxes on Earth from He and Ne systematics in marine sediments *Earth Planet. Sci.Let.* 436, 10-18

3-Dobriča, E., *Micrométéorites concordia : des neiges antartiques aux glaces cométaires*, Thèse 2010 Paris 11 en partenariat avec Université Paris-Sud. Faculté des Sciences d'Orsay

4-Tortora, C., Jetzer, P., Napolitano, N.R., Dark matter and alternative recipes for the missing mass. *ArXiv* 1201.6587

- 5-Magnan,C., Le théorème du jardin, 2014 Ed.amds
- 6-Salet, P (1911). Sur l'absorption de la lumière des étoiles par les météorites. Bulletin astronomique, 1911, Série 1, Vol. 28, pp 241-251
- 7-Arab, H., Evolutions des poussière interstellaires: apport des données de l'observatoire spatial Herschel. Thèse. Université Paris Sud. Paris XI 2012
- 8-Zagury,F., Interpretation of the UV spectrum of some stars with little reddening. New Astronomy 5(5)-285-298 august 2000)
- 9- Boissé,P., Thoraval,S.,La distribution des poussières à l'échelle de l'unité astronomique dans les nuages interstellaires 1990, A&A 228, 483
- 10-Marscher & Als, 1993, ApJ 419, L101
- 11-Stebbens,J., Whitford,A.E.,Absorption and Space Reddening in the Galaxy from the Colors of Globular Clusters Ap.J., 84, 1936,p.132 ([doi:10.1086/143755](https://doi.org/10.1086/143755))
- 12- Greenstein, J.L., Henyey,I.G.; Ap.J. 89, 1939, p.647
- 13-Alter, G., Memoirs and observ. Czechoslovak astr. Soc., Prague, n°10, 1949
- 14-Dufay,J. Nébuleuses galactiques et matière interstellaire. 1954 Paris.Albin Michel Ed.
- 15-Oort, J.H., Van de Hulst,H.C.,Gas and smoke in interstellar space B.A.N., 10, 1946, p.187
- 16-Frank Gyngard, Manavi Jadhav, Larry R.Nittler, Rhonda M. Stroud et Ernst Zinner, « Bonanza: An extremely large dust grain from a supernova », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 221, 15 janvier 2018, p. 60-86 ([DOI 10.1016/j.gca.2017.09.002](https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.09.002)).
- 17-Gregory L., Matloff, L. J., Applications of the electrodynamic Tether to Iinterstellar Travel. ArXiv February, 2005.
- 18-Schalén, C., Zur Frage einer allgemeinen Absorption des Lichtes im Weltraum. Astr. Nachr. 1929, 236, p249 ([doi:10.1002/asna.19292361602](https://doi.org/10.1002/asna.19292361602))
- 19-Altobelli, N., & Als, 2016.Flux and composition of interstellar dust at Saturn from Cassini's Cosmic Dust Analyzer. Science.352, 312-318 ([doi:10.1126/science.aac6397](https://doi.org/10.1126/science.aac6397))
- 20-Genge, M.J., Larsen,J., Van Ginneken, M., Suttle, M.D.,An urban collection of modern-day large micrometeorites: Evidence for variations in the extraterrestrial dust flux through the Quaternary.Geology (2017) 45 (2): 119-122.([doi.org/10.1130/G38352.1](https://doi.org/10.1130/G38352.1))
- 21-Andreas H. W. Küpper, Eduardo Balbinot, Ana Bonaca, Kathryn V. Johnston, David W. Hogg, Pavel Kroupa, and Basilio X. Santiago (April 2015). Globular cluster streams as galactic high-precision scales . Astrophysical Journal, Volume 803, Number 2
- 22-McMillan, P.J.(July 2011). Mass models of the Milky Way. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 414 (3) : 2446-2457.

## Annexe:

calcul de la taille minimum de la poussière autour d'une étoile

Soit un corps A avec une taille largement supérieure à la longueur d'onde des ondes électromagnétiques émises par l'étoile (sinon le calcul n'est pas valable).

Le mouvement de ce corps A sera lié à l'équilibre entre la force d'attraction  $F_g$  de l'étoile et la force de la pression de radiation  $F_r$  due à l'étoile.

La force  $F_r$  sera proportionnelle à la surface du corps A exposée au flux et dépendra aussi de l'albédo de A. On simplifie le problème en supposant que le corps A est sphérique avec un rayon moyen  $r$  et on ne tient pas compte de l'albédo. Ainsi, la surface de A qui reçoit l'énergie est une demi sphère ayant une surface  $\pi r^2/2$ . L'énergie  $E_r$  reçue par le corps A est :

$E_r = (F_0 R_0^2 / R^2) (\pi r^2 / 2)$  .  $(F_0 R_0^2 / R^2)$  est le flux stellaire à la distance R qui est la distance entre l'étoile et le corps A ( $F_0$ : flux stellaire au niveau du rayon stellaire  $R_0$ ).

L'énergie gravitationnelle  $E_g$  est:  $E_g = (GM/R) (4\pi r^3 \rho / 3)$  avec M masse de l'étoile, G constante de gravitation,  $\rho$  densité du corps A.

En posant l'égalité entre  $E_r$  et  $E_g$  et en posant  $F_0 = \sigma T^4$ , on obtient:  $r = 3 \sigma T^4 R_0^2 / 8 G M R \rho$  (3)  
avec T température de l'étoile,  $R_0$  rayon de l'étoile,  $\sigma$  = cte de Stefan.

On veut calculer le rayon minimum  $r$  qui permet à un objet de se rapprocher de l'étoile.

Dans ce cas  $R = R_0$ , et donc, (3) devient  $r = 3 \sigma T^4 R_0 / 8 G M \rho$  (4)

Pour le soleil, (4) peut s'écrire  $r \approx 1.26 \times 10^{-4} / \rho$  mètres ou  $r \approx 0.12 \text{ mm} / \rho$  (avec  $T = 5778 \text{ K}$ ,  $R_0 = 695.5 \times 10^6 \text{ m}$ ,  $M = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ )