

Principes de la télédétection

Applications à l'observation
de la Terre et son climat

Hélène Chepfer

Professeure à Sorbonne Université

Laurence Picon

Professeure à Sorbonne Université

Marine Bonazzola

Maîtresse de conférences à Sorbonne Université

Hélène Brogniez

Professeure à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

Marjolaine Chiriaco

Maîtresse de conférences à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

Solène Turquety

Professeure à Sorbonne Université

DUNOD

Le travail sur cet ouvrage a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'Avenir portant la référence n° ANR-11-IDEX-0004 - 17-EURE-0006.

Uniformisation des illustrations : Bernadette Coléno

Illustration de couverture : https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/02/Sentinel-1_radar_modes. Copyright : ESA/ATG medialab.

© Dunod, 2023
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-085831-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

● Table des matières

Avant-propos	VI
Remerciements	VIII
Chapitre 1 Principes physiques	1
1. Notions de rayonnement	1
2. Notions de transfert radiatif pour la télédétection passive	24
3. Notions de transfert radiatif pour la télédétection active	34
Chapitre 2 Mission spatiale : quelques éléments	43
1. Notions d'orbitographie	43
2. Les instruments de mesure	52
3. Observations collectées	62
4. Quelques autres aspects d'une mission spatiale	66
Chapitre 3 Observer les gaz atmosphériques	69
1. Composition chimique de l'atmosphère	69
2. Caractériser la quantité d'un gaz atmosphérique	78
3. Principe de la mesure	85
4. Missions spatiales	111
5. Exemples d'enjeux scientifiques actuels	119

Chapitre 4	Observer les aérosols, les nuages, et les précipitations	128
1.	Aérosols, nuages et précipitations	128
2.	Caractériser les aérosols, nuages et précipitations	132
3.	Mesures par télédétection	141
4.	Missions spatiales	159
5.	Enjeux scientifiques actuels	165
Chapitre 5	Observer l'océan	173
1.	Description de l'océan	173
2.	Température de la surface de la mer	181
3.	Hauteur des océans	187
4.	Courants marins	191
5.	Salinité	200
6.	Couleur de l'eau	204
7.	Glace de mer	209
8.	Enjeux scientifiques actuels	214
Chapitre 6	Observer les surfaces continentales	224
1.	Les surfaces continentales	224
2.	Végétation	232
3.	Feux de biomasse	246
4.	Hydrologie continentale	248
5.	Exemples d'enjeux scientifiques actuels	263
Chapitre 7	Observer le bilan radiatif de la Terre	271
1.	Le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère terrestre	271
2.	Bilan énergétique à la surface de la Terre	295

3. Termes du bilan radiatif et énergétique de la Terre	301
4. Enjeux scientifiques	305
Réponses aux QCM	323
Index	324

Avant-propos

Ce livre présente les principes physiques fondamentaux de la télédétection et décrit leurs différentes applications à l'observation spatiale de la Terre et de son climat, sous forme de chapitres thématiques.

Il s'adresse à toute personne désirant s'informer sur les méthodes scientifiques utilisées dans le domaine de l'observation spatiale. Il est destiné notamment aux étudiant.e.s en licence de physique, mathématique, électronique et aux étudiant.e.s de niveau master et doctorat d'autres disciplines (sciences et vie de la Terre, sciences de l'environnement, géographie, informatique, science des données, intelligence artificielle...). Il intéressera aussi les professionnels souhaitant compléter leur formation (professeur.e.s de lycées, ingénieur.e.s dans l'industrie, chercheur.se.s dans des domaines connexes). Les formalismes mathématiques et physiques sont de niveau première ou deuxième année post-bac.

La télédétection spatiale touche un public nombreux et varié parce qu'elle contribue à faire progresser les connaissances sur l'environnement et le climat de la Terre, et parce qu'une mission spatiale d'observation de la Terre agrège de nombreuses personnes ayant des expertises scientifiques variées venues d'horizons et de formations initiales diverses.

Le premier chapitre présente les principes physiques généraux de la télédétection. Il contient quelques équations mais les concepts physiques et mathématiques ne sont pas complexes. Le deuxième chapitre décrit les principales briques qui composent toute mission spatiale d'observation de la Terre. La plupart des éléments présentés dans ces deux premiers chapitres sont transposables à l'observation spatiale des autres planètes du système solaire qui utilisent les mêmes principes de la télédétection, les mêmes concepts instrumentaux, les mêmes équations de l'orbitographie, etc.

Les chapitres 3 à 6 décrivent les applications de la télédétection spatiale dédiées à l'observation de la Terre : les gaz atmosphériques (Chapitre 3), les aérosols, les nuages et les précipitations (Chapitre 4), l'océan (Chapitre 5), et enfin les surfaces continentales (Chapitre 6). Ces chapitres partagent la même structure : tout d'abord une description succincte des caractéristiques du milieu que l'on cherche à observer, puis l'exposé du principe de la mesure, en adaptant les notions générales présentées dans les chapitres 1 et 2 aux cas précis examinés dans chaque chapitre. Ensuite, les principales caractéristiques des missions spatiales dédiées à l'observation de ce milieu sont abordées. Enfin, chaque chapitre se termine par la présentation des enjeux scientifiques actuels en lien avec l'observation spatiale.

Les milieux présentés dans les chapitres 3 à 6 sont observés par satellite à l'échelle globale pour de nombreuses raisons : la surveillance des cyclones, des sécheresses, des

inondations, les rendements agricoles, la gestion des forêts, la pêche, la surveillance des feux de forêt, comprendre le climat de la Terre, etc. Un lecteur intéressé par l'observation spatiale d'un milieu particulier pourra lire directement le chapitre correspondant tout en s'appuyant sur les chapitres 1 et 2.

Le septième et dernier chapitre est consacré à l'observation spatiale du bilan radiatif de la Terre, une grandeur fondamentale exclusivement dédiée à la surveillance de notre climat, et qui met en jeu les différentes composantes du système Terre vues dans les chapitres 3 à 6.

Chaque chapitre contient des exercices d'application ainsi que des QCM permettant de vérifier que les notions de base ont été bien comprises. Sur le site des éditions Dunod, à la page de présentation de l'ouvrage, le lecteur trouvera en complément de nombreux exercices corrigés pour s'entraîner, des interviews d'experts scientifiques travaillant sur les missions spatiales d'observation de la Terre en orbite actuellement ou en projet, des annexes permettant d'approfondir certaines notions abordées dans l'ouvrage. En ligne, le lecteur trouvera également des liens vers des bases de données collectées par satellites et une bibliographie référençant des livres anglophones de niveau avancé pour aller plus loin.

L'intégralité des droits d'auteurs est reversée à l'association Femmes & Sciences.

Remerciements

Nous remercions les nombreux étudiant-es qui ont choisi depuis des années de suivre nos enseignements de télédétection dans différents établissements d'enseignement supérieur. Leur curiosité, leur envie d'apprendre, leurs questions toujours bienvenues, nous stimulent au quotidien et nous font progresser dans nos travaux de recherche. Leurs demandes récurrentes de support pédagogique en français sur la télédétection et l'observation spatiale à leur niveau, ont abouti à des polycopiés plus ou moins matures, précurseurs de ce manuel d'enseignement.

Nous tenons à remercier chaleureusement nos collègues enseignant-es, chercheur-ses, ingénieur-es pour avoir partagé avec nous leur expertise scientifique ou technique, relu des parties de cet ouvrage, donné des conseils de rédaction, suggéré des illustrations et des lectures. Nous avons apprécié la richesse de nos échanges et leur adhésion à notre projet : Sabine Arnaud, Assia Arouf, Jordi Badosa, Silvano Bonazzola, Jacqueline Boutin, Anne Boynard, Philippe Chambon, Isabelle Chiapello, Olivier Chomette, Cathy Clerbaux, Nicolas Clerbaux, Francis Codron, Pierre Coheur, Corinne Evesque, Artem Feofilov, Yves Goulas, Fatima Karbou, Marjolaine Krug, Alice Le Gall, Audrey Martini, Alexis Mouche, Vincent Noel, Luis Olivera, Catherine Ottlé, Odile Picon, Patrick Raberanto, Nicolas Rambaux, Jean-Claude Roger, Nico Sneeuw, Nicolas Viltard, Simon Whitburn, Dave Winker.

Nous remercions sincèrement nos trois relectrices représentantes du public visé par cet ouvrage, étudiante en licence, étudiante en master, et enseignante au lycée, pour avoir accepté de partager avec nous leurs questions et leurs incompréhensions à la lecture de la première version de ce manuscrit. Leurs réactions et leurs commentaires nous ont été très utiles pour faire mûrir cet ouvrage d'enseignement : Beatrice Altamura, Louise Killian, Sandrine Irace-Guigand.

Nous remercions vivement l'Établissement Universitaire de Recherche Climate Graduate School de l'Institut Pierre Simon Laplace pour avoir soutenu ce projet. En particulier Hervé Le Treut directeur du volet éducation et Estelle Fournel cheffe de projet éducation qui ont permis la concrétisation de cet ouvrage.

Cet ouvrage contient des illustrations construites à partir des observations mises à disposition, au nom de leur pays, par les agences spatiales Européenne (ESA), Française (CNES), Américaine (NASA), Japonaise (JAXA) et par les services qui leur sont associés (ex. Copernicus, EUMETSAT). Nous en sommes reconnaissants.

Nous remercions Laetitia Jammet pour nous avoir fait confiance ainsi que Vanessa Beunèche. Elles ont patiemment guidé nos pas dans le monde de l'édition d'ouvrages d'enseignement. Nous remercions également Bernadette Coléno pour son travail sur les illustrations.

Introduction

Ce chapitre présente les principes physiques généraux de la télédétection pour l'observation de la Terre depuis l'espace. Il introduit les notions élémentaires de rayonnement, les définitions des grandeurs utilisées en télédétection, puis les principes de la télédétection passive et de la télédétection active.

Objectifs

- Connaître** les grandeurs utilisées en télédétection pour décrire le rayonnement
- Identifier** les propriétés physiques pilotant le rayonnement mesuré par télédétection
- Comprendre** l'équation de transfert radiatif
- Expliquer** les termes importants de l'équation de transfert radiatif pour la télédétection

Plan

- 1 Notions de rayonnement
- 2 Transfert radiatif appliqué à la télédétection passive
- 3 Transfert radiatif appliqué à la télédétection active

1 Notions de rayonnement

Le mot « télédétection » signifie détection à distance. Il décrit « l'ensemble des techniques et connaissances utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques ou biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci »¹. On se focalise ici sur les mesures faites depuis l'espace vers la Terre dans les domaines de longueurs d'onde comprises entre environ 100 nm et environ 30 cm.

La télédétection consiste à mesurer le rayonnement émis, diffusé, ou réfléchi par un milieu pour en déduire les propriétés de ce milieu. Dans cette section, nous introduirons les grandeurs utilisées pour définir le rayonnement (§ 1.1) ainsi que les interactions élémentaires entre une onde électromagnétique et un milieu (§ 1.2) puis nous présenterons

1. d'après Terminologie de Télédétection et Photogrammétrie, 1997.

les sources de rayonnement naturel et artificiel utilisées en télédétection (§ 1.3), et nous introduirons l'équation dite **du transfert radiatif** utilisée pour l'observation de la Terre dans sa forme la plus générale (§ 1.4). Elle sera ensuite développée dans chaque chapitre en fonction des spécificités de l'objet étudié.

1.1 Définitions du rayonnement et des interactions onde-milieu

• Grandeurs et unités du rayonnement

En télédétection, on utilise le champ électrique $\vec{E}$ transporté par une onde électromagnétique, que l'on peut écrire :

$$\vec{E} = E_{//} \vec{i} + E_{\perp} \vec{j} \quad (1.1)$$

où $E_{//}$ et $E_{\perp}$ sont les deux composantes du vecteur $\vec{E}$ dans un plan $(0, \vec{i}, \vec{j})$, perpendiculaire à la direction $\vec{k}$ de propagation de l'onde (Figure 1.1.a). Le champ électrique est une grandeur dont la valeur dépend de sa position dans l'espace et du temps, caractérisé par son amplitude et sa phase. On associe à la propagation de l'onde électromagnétique, la longueur d'onde λ , son intensité, et son état de polarisation.

Lorsque l'onde entre en interaction avec un milieu, les propriétés du champ $\vec{E}$ peuvent être modifiées, c'est pourquoi en télédétection on distingue le champ incident $\vec{E}_{inc}$ avant l'interaction avec le milieu, du champ émergent $\vec{E}_{emerg}$ après l'interaction avec le milieu (Figure 1.1.b).

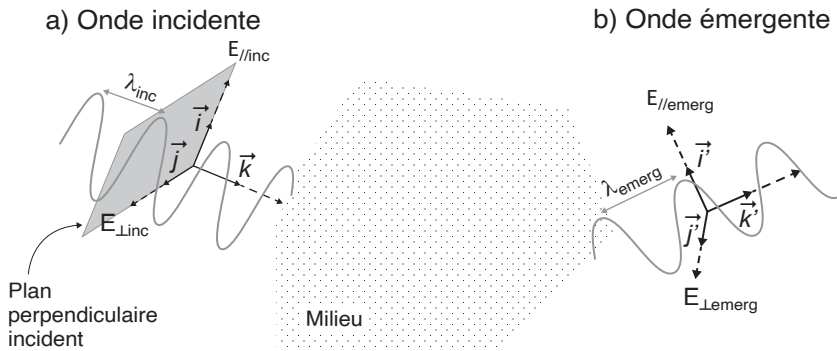


Figure 1.1 – Représentation de l'onde incidente (indice inc) et émergente (indice emerg).

La figure 1.2 présente les domaines spectraux d'intérêt pour l'observation de la Terre par télédétection : ceux-ci s'étendent de l'ultraviolet aux micro-ondes. On distingue le domaine des **courtes longueurs d'onde** qui inclut l'**ultraviolet**, le **visible** et le **proche infrarouge**, le domaine des **grandes longueurs d'onde** qui inclut l'**infrarouge**, et le domaine des **micro-ondes**. Le domaine spectral du rayonnement est décrit par la longueur d'onde λ . Il peut s'exprimer également en fréquence en utilisant les relations données ci-dessous.

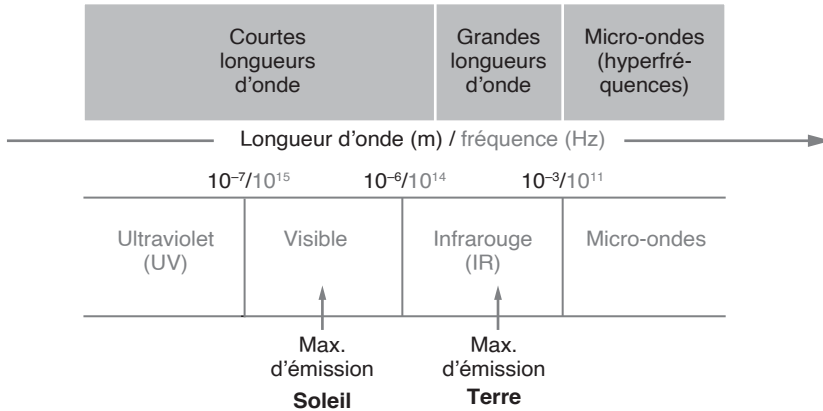


Figure 1.2 – Les principaux domaines spectraux utilisés en télédétection pour l’observation de la Terre et les intervalles spectraux d’émission maximale des rayonnements solaire et terrestre.

Les définitions des différentes grandeurs utilisées pour décrire le rayonnement en télédétection ainsi que les relations entre ces grandeurs sont données dans l’encart ci-dessous.

GRANDEURS UTILISÉES POUR DÉCRIRE LE RAYONNEMENT

- **Grandeurs caractérisant le domaine spectral du rayonnement**

Longueur d’onde λ (m) ; fréquence $\nu = \frac{c}{\lambda}$ (Hz) avec $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; nombre d’onde $\bar{\nu} = 1/\lambda$ (m^{-1}), pulsation $\omega = 2\pi\nu$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

- **Notion d’angle solide**

L’angle solide Ω , mesuré en stéradians (sr), est l’équivalent tridimensionnel de l’angle. Il s’agit de l’aire S (m^2) divisée par R^2 où S est la portion de la surface d’une sphère de rayon R (m) interceptée par un cône dans la direction (θ, ϕ) , S étant perpendiculaire à l’axe du cône (Figure 1.3) : $\Omega = \frac{S}{R^2}$. En coordonnées sphériques, l’angle solide élémentaire est donné par : $d^2\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\phi$.

- **Grandeurs caractérisant le champ électrique monochromatique en un point de l’espace**

$E_{\lambda//} = E_{o//} \exp(i(\omega t + \phi))$, et son complexe conjugué $E_{\lambda//}^* = E_{o//} \exp(-i(\omega t + \phi))$
 $E_{\lambda\perp} = E_{o\perp} \exp(i(\omega t + \phi))$, et son complexe conjugué $E_{\lambda\perp}^* = E_{o\perp} \exp(-i(\omega t + \phi))$
 où ϕ est le déphasage de l’onde (rad), $E_{o//}$ l’amplitude du champ suivant l’axe $\vec{i}$ et $E_{o\perp}$ l’amplitude du champ suivant l’axe $\vec{j}$.

Rappel de la notation complexe. $\exp(i(\omega t + \phi)) = \cos(\omega t + \phi) + i \sin(\omega t + \phi)$
 où $\cos(\omega t + \phi)$ est la partie réelle et $\sin(\omega t + \phi)$ la partie imaginaire du nombre complexe, avec $i^2 = -1$. Le complexe conjugué de $\exp(i(\omega t + \phi))$ est $\exp(-i(\omega t + \phi)) = \cos(\omega t + \phi) - i \sin(\omega t + \phi)$.

- **Grandeurs caractérisant l'intensité du rayonnement monochromatique, c'est-à-dire à une longueur d'onde λ**

Énergie élémentaire dW_λ (Joules) émise, transportée ou reçue à la longueur d'onde λ .

Puissance élémentaire : $dP_\lambda = \frac{dW_\lambda}{dt}$ (watts, W).

Luminance L_λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) : énergie traversant une surface dS par unité de temps dt dans une direction θ par rapport à la normale à dS , dans un intervalle spectral fini $d\lambda$, dans une unité d'angle solide $d^2\Omega$ (Figure 1.3) : $L_\lambda = \frac{d^5W_\lambda}{(d\lambda d^2\Omega dt dS \cos(\theta))}$.

Flux F_λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) : énergie traversant une surface de 1 m^2 par unité de temps, dans un intervalle spectral défini, provenant d'une demi-sphère (supérieure ou inférieure) (Figure 1.3) : $F_\lambda = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} L_\lambda(\theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi$. Attention, en toute rigueur F_λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) est une densité de flux, même s'il est d'usage de l'appeler flux.

Lorsque ces grandeurs sont intégrées sur un intervalle spectral $\Delta\lambda$, elles sont notées $F_{\Delta\lambda}$ et $L_{\Delta\lambda}$.

- **Grandeurs caractérisant l'état de polarisation du champ électrique**

Vecteur de Stokes dans une direction donnée $I_\lambda, Q_\lambda, U_\lambda, V_\lambda$,

$$I_\lambda = E_{\lambda//} E_{\lambda//}^* + E_{\lambda\perp} E_{\lambda\perp}^*$$

où I_λ est proportionnel à la luminance L_λ

$$Q_\lambda = E_{\lambda//} E_{\lambda//}^* - E_{\lambda\perp} E_{\lambda\perp}^*$$

$$U_\lambda = E_{\lambda//} E_{\lambda\perp}^* + E_{\lambda\perp} E_{\lambda//}^*$$

$$V_\lambda = E_{\lambda//} E_{\lambda\perp}^* - E_{\lambda\perp} E_{\lambda//}^*$$

L'énergie transportée par l'onde par unité de temps est mesurée en watts (W). La luminance indique quant à elle l'énergie transportée par l'onde par unité de temps dans une direction précise par opposition au flux qui indique l'énergie transportée par l'onde par unité de temps intégrée sur une demi-sphère (Figure 1.3).

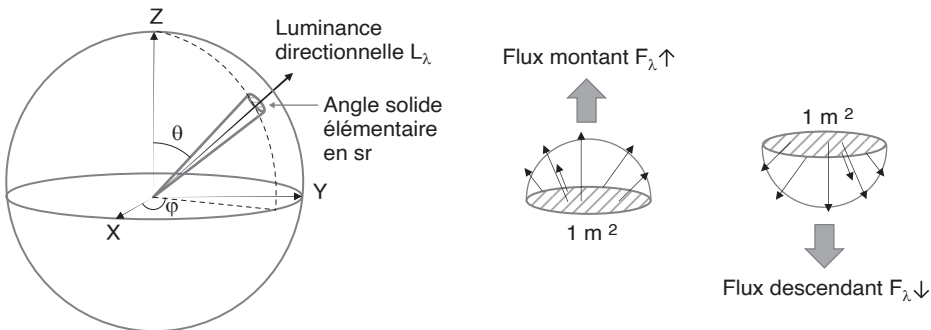


Figure 1.3 – Représentation de la luminance (à gauche) et des flux montant (au milieu) et descendant (à droite).

La luminance est une grandeur directionnelle dont la direction est indiquée par les coordonnées sphériques (θ, φ) .

La **luminance** et le **flux** sont les deux grandeurs clés pour décrire le rayonnement en télédétection. Ces deux termes sont employés soit pour décrire le rayonnement intégré sur tout le spectre électromagnétique, soit pour décrire l'intensité du rayonnement intégré sur un intervalle spectral donné $\Delta\lambda$ ou à une longueur d'onde précise λ (cas monochromatique). La luminance L_λ est proportionnelle à l'**intensité** I_λ qui s'écrit :

$$\begin{aligned} I_\lambda &= E_{\lambda//} \cdot E_{\lambda//}^* + E_{\lambda\perp} \cdot E_{\lambda\perp}^* \\ &= E_{o//} e^{i(\omega t + \phi)} \cdot E_{o//} e^{-i(\omega t + \phi)} + E_{o\perp} e^{i(\omega t + \phi)} E_{o\perp} e^{-i(\omega t + \phi)} \\ &= E_{o//} E_{o//} + E_{o\perp} E_{o\perp} = I_{\lambda//} + I_{\lambda\perp} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Pour obtenir une description plus complète de l'onde au-delà de son intensité dans une direction donnée, on caractérise son état de polarisation en combinant les deux composantes du **champ électromagnétique** $E_{//}$ et $E_{\perp}$ (Figure 1.1) et leurs complexes conjugués $E_{//}^*$ et $E_{\perp}^*$ en quatre éléments distincts (I, Q, U, V) appelés **éléments du vecteur de Stokes** définis dans l'encadré précédent.

Exercice d'application

Calculer les quatre éléments du vecteur de Stokes (I, Q, U, V) dans les cas suivants. Pour chaque cas, représenter le vecteur électrique $\vec{E}$, et préciser s'il s'agit d'une onde polarisée elliptiquement, circulairement ou linéairement.

- a) $E_{o,\lambda\perp} = 0$
- b) $E_{o,\lambda\perp} = E_{o,\lambda//}$ et $E_{\lambda\perp} = E_{\lambda//} e^{i(\frac{\pi}{2})}$
- c) $E_{o,\lambda//} = 0$

SOLUTION

- a) $(2I_{o\lambda//}, 2I_{o\lambda//}, 0, 0)$ polarisation linéaire suivant $\vec{i}$
- b) $(2I_{o\lambda//}, 0, 0, i2I_{o\lambda//})$ polarisation circulaire
- c) $(2I_{o\lambda\perp}, -2I_{o\lambda\perp}, 0, 0)$ polarisation linéaire suivant $\vec{j}$

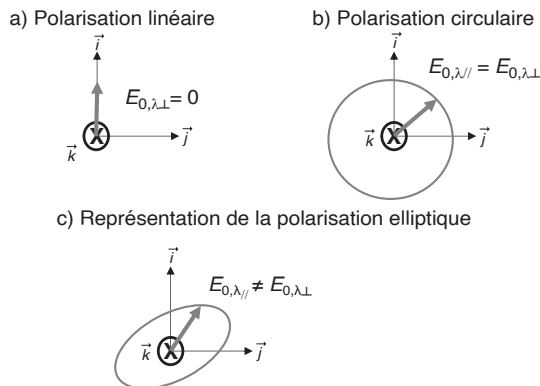


Figure 1.4 – Représentation de l'état de polarisation de $\vec{E}$.

1.2 Interaction rayonnement - milieu

a) Interactions entre une onde et un milieu

Le milieu contient des objets de dimension r (en mètres, m). Ces objets peuvent avoir des dimensions r différentes. La concentration d'objets dans ce milieu est décrite par une **distribution en taille** $n(r)$ (en nombre·m⁻³ · μm⁻¹) qui indique le nombre d'objets de dimension r par unité de volume³. Chaque objet contenu dans le milieu est composé de molécules. Les niveaux énergétiques de ces molécules sont discrets et dépendent des atomes qui constituent les molécules.

La capacité d'une onde à interagir avec un milieu dépend en premier lieu de deux paramètres : le rapport entre la taille des objets r et la longueur d'onde λ , et la distribution en taille des objets $n(r)$. Une onde interagit avec un objet isolé si la taille de celui-ci est plus grande ou comparable à la longueur de l'onde λ . À l'inverse, lorsqu'un objet est beaucoup plus petit que la longueur d'onde λ , la probabilité d'interaction est très faible et l'onde se propagera sans « voir » l'objet isolé. Un milieu étant composé de plusieurs objets et non d'un seul, une onde pourra éventuellement interagir avec un milieu composé d'objets de petites tailles par rapport à λ si ceux-ci sont présents en forte concentration dans le milieu.

Lorsque l'**interaction** a lieu, elle peut être de deux types : diffusion ou absorption.

- Lors d'une **diffusion**, l'onde est déviée (il y a un changement de direction) lors de son interaction avec le milieu, mais la longueur d'onde λ n'est généralement pas modifiée par cette interaction. Dans ce cas, la longueur de l'onde incidente λ_{inc} est égale à la longueur de l'onde émergente λ_{emerg} . On appelle **réflexion** la diffusion entre deux milieux matériels différents dans des directions particulières
- Lors d'une **absorption**, l'onde incidente λ_{inc} est absorbée par le milieu, puis réémise de manière isotrope, – les propriétés de l'onde réémise sont identiques dans toutes les directions – à une longueur d'onde λ_{emerg} qui peut éventuellement être différente de la longueur d'onde incidente λ_{inc} . Pour que l'onde puisse être absorbée par le milieu, il faut que la longueur d'onde λ_{inc} corresponde à un niveau de transition énergétique des molécules qui composent les objets contenus dans le milieu (Chapitre 3).

Ces processus sont représentés sur la figure 1.5. Sans rentrer dans les détails, l'état de polarisation de l'onde peut également être perturbé par l'interaction onde/milieu.

3. En toute rigueur, $n(r)$ décrit le nombre d'objets de dimension comprise entre r et $r + dr$ (où dr tend vers 0) par unité de volume.

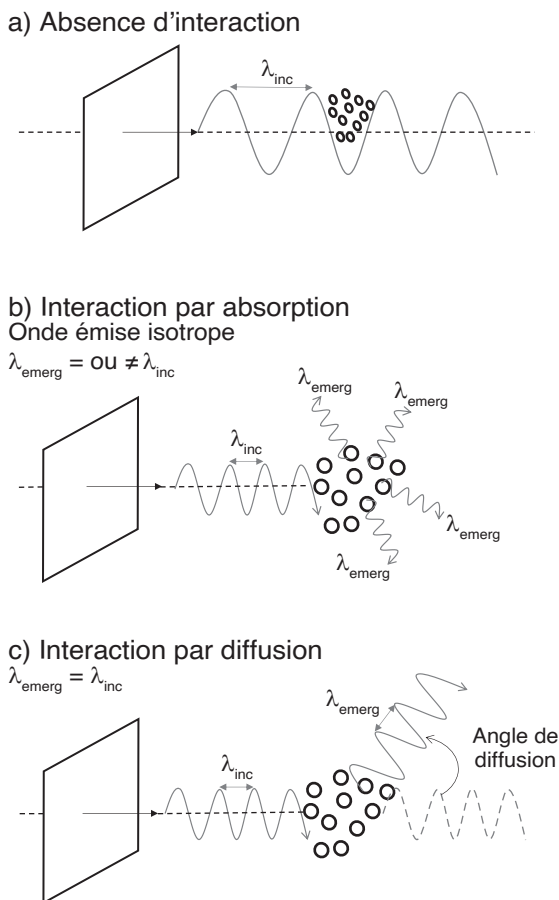


Figure 1.5 – Représentation des phénomènes d'interaction, d'absorption et de diffusion.

Ces différentes interactions entre une onde λ_{inc} et un milieu sont décrites par les grandeurs physiques présentées ci-dessous. On distingue les grandeurs associées à un objet isolé de taille r de celles associées à un milieu composé de nombreux objets de différentes tailles.

Les **efficacités d'extinction** $Q_{\lambda, \text{ext}}$, de **diffusion** $Q_{\lambda, \text{diff}}$ et d'**absorption** $Q_{\lambda, \text{abs}}$ d'un objet isolé (de taille r) avec une onde incidente de longueur d'onde (λ) sont des grandeurs sans dimension.

Elles sont additives : $Q_{\lambda, \text{ext}} = Q_{\lambda, \text{diff}} + Q_{\lambda, \text{abs}}$

En l'absence d'interaction, $Q_{\lambda, \text{ext}} = Q_{\lambda, \text{diff}} = Q_{\lambda, \text{abs}} = 0$

En présence d'interaction, $Q_{\lambda, \text{ext}} > 0$.

La figure 1.6 illustre l'allure de l'évolution de $Q_{\lambda, \text{ext}}$, en fonction de $\chi = \frac{2\pi r}{\lambda}$ appelé le **paramètre de taille** de l'objet à la longueur d'onde (λ). Elle montre que $Q_{\lambda, \text{ext}}$ est proche de 0 lorsque l'objet est petit par rapport à la longueur d'onde (χ proche de 0) puis $Q_{\lambda, \text{ext}}$

augmente avec χ donc avec la taille de l'objet à une longueur d'onde fixe. $Q_{\lambda,ext}$ atteint 1 lorsque l'objet est suffisamment grand par rapport à la longueur d'onde pour qu'il y ait systématiquement une interaction. $Q_{\lambda,ext}$ peut même tendre vers 2 lorsque des phénomènes de diffraction dévient l'onde incidente et s'ajoutent aux phénomènes de diffusion en l'absence d'absorption ($Q_{\lambda,abs} = 0$).

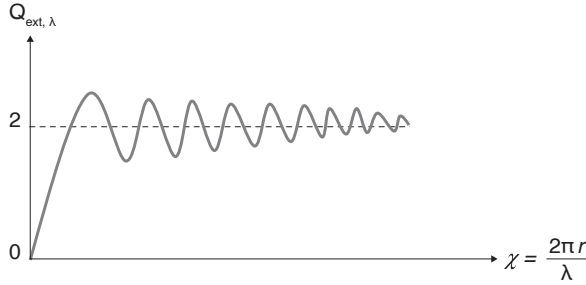


Figure 1.6 – Exemple de l'allure de l'évolution de $Q_{ext,\lambda}$ en fonction de χ .

La **section efficace d'extinction** $C_{\lambda,ext}(r)$ (en m^2) d'un objet isolé de taille r à une longueur d'onde (λ) s'exprime en fonction de l'efficacité d'extinction $Q_{\lambda,ext}$ et de la taille de l'objet r :

$$C_{\lambda,ext}(r) = Q_{\lambda,ext} \pi r^2 \quad (1.3)$$

Les **sections efficaces d'absorption** $C_{\lambda,abs}(r)$ et **de diffusion** $C_{\lambda,diff}(r)$ s'expriment de la même manière en fonction de $Q_{\lambda,abs}$ et $Q_{\lambda,diff}$.

Elles sont additives : $C_{\lambda,ext} = C_{\lambda,diff} + C_{\lambda,abs}$

Soit un ensemble d'objets de distribution en taille $n(r)$ contenus dans un élément de volume, r_{min} est le rayon du plus petit objet et r_{max} le rayon du plus grand objet dans ce milieu. Nous utilisons le **coefficient d'extinction** $\sigma_{\lambda,ext}(m^{-1})$ pour décrire la capacité de cet ensemble d'objets à atténuer une onde de longueur d'onde (λ) :

$$\sigma_{\lambda,ext} = \int_{r_{min}}^{r_{max}} C_{\lambda,ext}(r) n(r) dr \quad (1.4)$$

Les **coefficients d'absorption** $\sigma_{\lambda,abs}(r)$ et **de diffusion** $\sigma_{\lambda,diff}(r)$ en m^{-1} s'expriment de la même manière en fonction des sections efficaces $C_{\lambda,abs}$ et $C_{\lambda,diff}$.

Ces coefficients sont additifs : $\sigma_{\lambda,ext} = \sigma_{\lambda,diff} + \sigma_{\lambda,abs}$

L'importance relative de la diffusion par rapport à l'absorption dans un milieu donné à une longueur d'onde (λ) donnée est quantifiée grâce à une grandeur sans dimension appelée **albédo de diffusion simple** ($\bar{\omega}_0$) compris entre 0 (pour un milieu entièrement absorbant) et 1 (pour un milieu entièrement diffusant) :

$$\bar{\omega}_0 = \frac{\sigma_{\lambda,diff}}{\sigma_{\lambda,ext}} = \frac{\sigma_{\lambda,diff}}{\sigma_{\lambda,abs} + \sigma_{\lambda,diff}} \quad (1.5)$$

Notons que l'albédo de diffusion simple ($\bar{\omega}_0$) ne doit pas être confondu avec l'albédo de surface ou l'albédo planétaire (α_p) qui seront définis dans les chapitres 6 et 7.

La capacité d'absorption d'un milieu dépend des niveaux de transitions énergétiques des molécules constituant les objets qui composent le milieu. Elle est souvent décrite à l'échelle macroscopique par la partie imaginaire de l'**indice de réfraction** du milieu $m_{i,\lambda}$ avec :

$$m_{i,\lambda} = \frac{\lambda \sigma_{\lambda,abs}}{4\pi} \quad (1.6)$$

Donc $Q_{\lambda,abs} = 0$ quand $m_{i,\lambda} = 0$.

Rappelons que l'indice de réfraction décrivant la propagation de l'onde dans ce milieu s'écrit $m_\lambda = m_{r,\lambda} - im_{i,\lambda}$. Sa partie réelle $m_{r,\lambda}$ est égale à c/v où c est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide et v sa vitesse de phase dans le milieu.

Cet indice de réfraction est lié aux propriétés diélectriques du milieu. En effet, certains milieux sont électriquement neutres mais les charges électriques peuvent y avoir un mouvement de faible amplitude et former un dipôle sous l'effet d'un champ électrique extérieur. Ces milieux sont caractérisés par leur **constante diélectrique** $\epsilon_{c\lambda}$:

$$\epsilon_{c\lambda} = \epsilon' + i \epsilon''$$

où la partie réelle ϵ' est appelée **permittivité**. La **constante diélectrique relative** $\epsilon_{r\lambda}$ est définie par :

$$\epsilon_{r\lambda} = \frac{\epsilon_{c\lambda}}{\epsilon_{0\lambda}}$$

où $\epsilon_{0\lambda}$ est la constante diélectrique du vide. Cette constante diélectrique relative dépend de la répartition des charges électriques dans le milieu. Elle dépend des propriétés physiques et chimiques du milieu et elle est liée à son indice de réfraction complexe m_λ par la relation :

$$m_\lambda = \sqrt{\epsilon_{r\lambda}} \quad (1.7)$$

Les propriétés diélectriques de l'eau, en particulier la répartition entre partie réelle et partie imaginaire, sont importantes dans le domaine micro-ondes.

GRANDEURS CARACTÉRISANT LES INTERACTIONS ENTRE UNE ONDE ET UN MILIEU

Efficacités d'extinction $Q_{\lambda,ext}$, de diffusion $Q_{\lambda,diff}$ et d'absorption $Q_{\lambda,abs}$ (sans unité) d'un objet isolé (de taille r)

Sections efficaces d'extinction $C_{\lambda,ext}(r)$, d'absorption $C_{\lambda,abs}(r)$ et de diffusion $C_{\lambda,diff}(r)$ (en m^2) d'un objet isolé de taille r

Coefficient d'extinction du milieu $\sigma_{\lambda,ext}$, d'absorption $\sigma_{\lambda,abs}(r)$ et de diffusion $\sigma_{\lambda,diff}(r)$ en m^{-1}

Albédo de diffusion simple du milieu $\bar{\omega}_0$ (sans unité)

Indice de réfraction du milieu $m_\lambda = m_{r,\lambda} - im_{i,\lambda}$ avec $m_{i,\lambda} = \frac{\lambda \sigma_{\lambda,abs}}{4\pi}$

Constante diélectrique du milieu $\epsilon_{c\lambda}$, et relative $\epsilon_{r\lambda}$ (sans unité)