

الفصل الأول: مدخل

- يعتمد الاستشعار عن بعد على استعمال الخصائص الفيزيائية للأجسام المنظورة، وبخاصة الخصائص البصرية Propriétés Optiques، بهدف الحصول على معلومات عن طبيعة هذه الأجسام.
- يتم حمل هذه المعلومات إلى نظام الملاحظة بواسطة إشعاع كهرومغناطيسي، كالضوء الذي يمثل التمظهر المرئي لهذا الإشعاع، فيتلقى نظام الملاحظة هذا الإشعاع ويترجمه إلى عناصر يفهمها المستعمل كالمرئيات أو المعطيات المرقمة (بون. ف وروشون.ج، 1996).
- سنتطرق في هذا الفصل بشكل مبسط إلى طبيعة الإشعاع الكهرومغناطيسي وكيف يعبر هذا الإشعاع عن خصائص الأجسام الخاضعة للملاحظة.

1- ماهية الاستشعار عن بعد¹.

يعرف الاستشعار عن بعد بأنه مجموع المعارف والتقنيات المستعملة من أجل تحديد الخصائص الفيزيائية والحيوية للأجسام (الحصول على معلومات عن الأجسام الأرضية) من مسافات بعيدة، ودون اتصال أو تلامس مباشر، باستغلال خصائص الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة أو المنعكسة من هذه الأجسام (ظواهرات أرضية، الجو، مياه البحار والمحيطات).

"بمعنى آخر، فإن الاستشعار عن بعد علم وفن، يهدف إلى الحصول على معلومات عن جسم ما أو منطقة أو ظاهرة معينة، من خلال تحليل معطيات يتم اكتسابها بجهاز لا يلمس ذلك الجسم أو تلك المنطقة أو الظاهرة المدروسة" (صادق عبد العلي، 2000، ص: 29).

ويمكن تقسيم الاستشعار عن بعد إلى قسمين (أنظر أبو راضي. ف، 2002):

¹- وهي ترجمة من أكثر الترجمات استعمالاً لمصطلح Télédétection الفرنسي ومصطلح Remote sensing الإنجليزي، ونذكر من بين الترجمات الأخرى: الاستشعار الفضائي، الاستشعار من بعد، الاستشعار النائي والاستشعار من البعد...

- الاستشعار الموجب أو النشط (أو الفعال) **Téledétection active** تكون البيانات المستقبلية فيه عبارة عن انعكاسات طيفية، حيث تقوم الأقمار الاصطناعية بإرسال الموجات الكهرومغناطيسية إلى سطح الأرض، فترتطم به وتنعكس ليستقبلها الرادار الذي يقوم بإرسالها إلى محطات الاستقبال الأرضية؛

- الاستشعار السالب **Téledétection passive** تكون البيانات المستقبلية فيه عبارة عن الانبعاث الطيفي من سطح الأرض والجسام التي عليها والتي يعرف مقدارها من خلال البيانات الرقمية التي تلتقطها أجهزة الأقمار الاصطناعية ثم ترسلها إلى محطات الاستقبال الأرضية.

ويمكن تلخيص عملية الاستشعار عن بعد بواسطة الأنظمة التصويرية² **Systèmes imageurs**، من بدايتها إلى نهايتها، في سبعة مراحل (المركز الكندي للاستشعار عن بعد) هي (الشكل 1):

1- مصدر الطاقة أو الإضاءة (A)، حيث يوجد بالضرورة، في أصل كل عمليات الاستشعار عن بعد، مصدر للطاقة يقوم بإضاءة الهدف؛

2- الإشعاع والغلاف الجوي (B)، حيث يتفاعل الإشعاع مع الغلاف الجوي أولاً خلال انتقاله بين مصدر الطاقة والهدف، وثانياً عند انتقاله من الهدف باتجاه جهاز الرصد؛

3- التفاعل مع الهدف (C)، بمجرد وصولها إلى الهدف الأرضي تتفاعل الطاقة مع سطح الهدف؛ وترتبط طبيعة هذا التفاعل بخصائص الإشعاع وبخاصيات سطح الهدف الأرضي؛

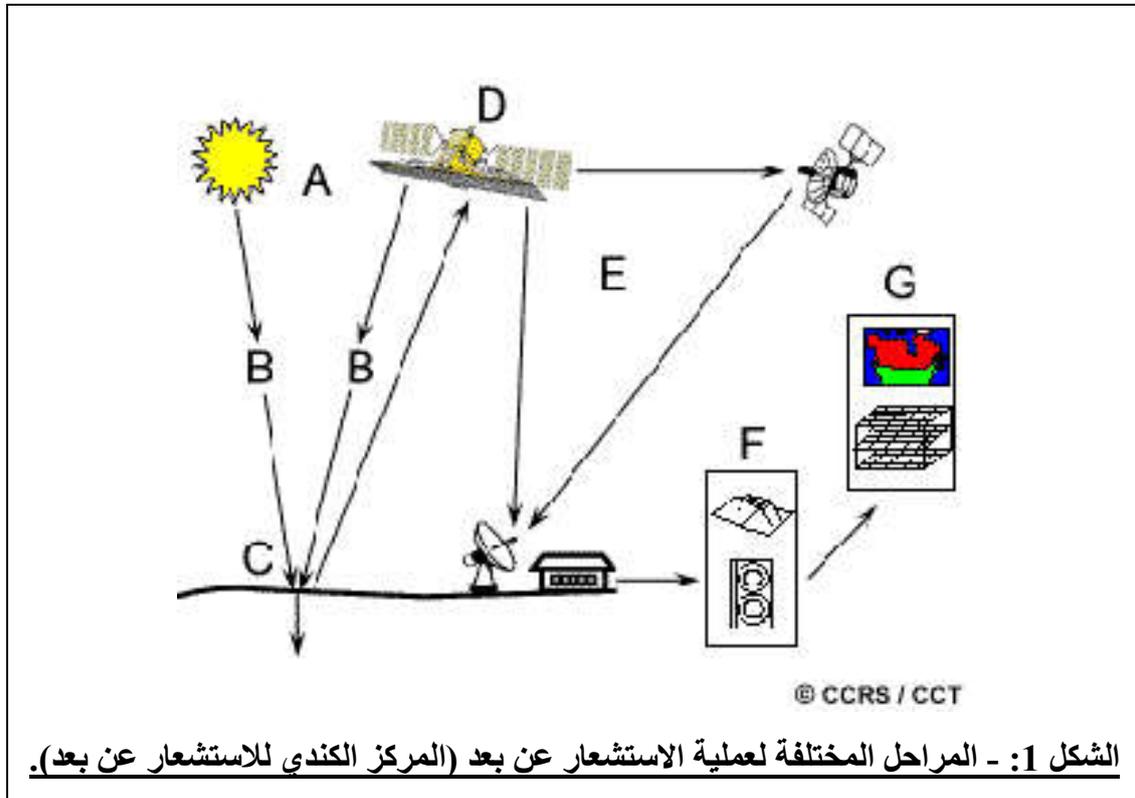
4- تسجيل أجهزة الرصد للطاقة (D)، بعد أن يتم انعكاس أو انبعاث الطاقة من الهدف الأرضي، يجب رصدها بواسطة جهاز رصد (يوجد على مسافة بعيدة)، كي يتم تسجيلها في الأخير؛

²- يمكن أن تتم عملية الاستشعار عن بعد من خلال الإشعاع المنبعث وأجهزة الرصد غير التصويرية **non-imageurs** وهي حالات نادرة.

5- الإرسال والاستقبال والمعالجة (E)، بعد أن تقوم أجهزة الرصد بتسجيل الطاقة، يتم إرسالها نحو محطة استقبال أرضية، عبر وسائط إلكترونية في الغالب، حيث يتم تحويل المعلومة إلى صور (رقمية أو فوتوغرافية)؛

6- التفسير والتحليل (F)، تحتاج الصورة المعالجة بعد ذلك إلى تفسير بصري و/أو رقمي، بهدف استخراج المعلومة المراد الحصول عليها بخصوص الهدف الأرضي؛

7- التطبيقات (G)، تكمن المرحلة الأخيرة لعملية الاستشعار عن بعد في استغلال المعلومة المستخرجة من الصورة لفهم الهدف الأرضي بشكل أفضل قصد استكشاف مظاهر جديدة أو المساعدة على حل إشكالات خاصة.



الشكل 1: - المراحل المختلفة لعملية الاستشعار عن بعد (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

2- تاريخ الاستشعار عن بعد وتطوره.

يمكن تقسيم تطور الاستشعار عن بعد، منذ نهاية القرن الثامن عشر إلى الوقت الحاضر، إلى أربعة مراحل، تميزت كل مرحلة منها بإنجازات علمية وتقنية خاصة، مع

وجود تداخل بين كل مرحلة وبين المرحلة التي تليها، بحيث يصعب وضع تاريخ معين للانتقال من مرحلة إلى أخرى (أنظر أبو راضي، 2002):

***/- المرحلة الأولى: من المنطاد إلى الطائرة.**

لقد أصبح الاستشعار عن بعد ممكنا بفضل أحداث مميزة عرفها التاريخ الإنسانية في مرحلة ليست حديثة، تتمثل بالأساس في تحليق الإنسان في الجو بواسطة المنطاد (بين 1773 و1783)، والتوصل إلى إخراج أول صورة فوتوغرافية سنة 1839 (أو 1827)، الأمر الذي مكن فيليكس تورناشون Félix Tournachon من التقاط أول صورة جوية لمدينة باريس سنة 1858. وكانت تلك نقطة انطلاق علم الاستشعار الفضائي (ف. بون F. Bonn ؛ ج. روشون G. Rochon، 1996)، تلاها بعد ذلك بسنتين التقاط أول صورة جوية لمدينة بوسطن بالولايات المتحدة الأمريكية بواسطة منطاد على ارتفاع 630 مترا، في حين تم التقاط أول صورة جوية في روسيا لمدينتي كرونستاند وبيترسبورغ سنة 1886 (أنظر أبو راضي، 2002).

كما استخدم في هذه المرحلة الحمام الزاجل المزود بأجهزة تصوير صغيرة الحجم وخفيفة الوزن، واستخدمت الطائرات الورقية. وتعود أول صورة جوية التقطت بواسطة طائرة ورقية إلى عالم الطقس الإنجليزي أرشيبالد سنة 1882، بينما التقطت أول صورة جوية من طائرة ورقية بالولايات المتحدة الأمريكية في أبريل سنة 1906 لمدينة سان فرانسيسكو بعد الزلزال المدمر الذي ضرب المدينة والحريق الكبير الذي أصابها تلك السنة. بعد اختراع أول طائرة سنة 1896، وتقدم الطيران، أصبحت الطائرات المصدر الرئيسي للصور الجوية. وقد أخذت أول صورة جوية من الطائرة في 1909/04/24 فوق منطقة سونتوتشيللي بإيطاليا أثناء رحلات الأخوين رابت التدريبية لضباط البحرية الإيطالية. وتعتبر هذه المرحلة الطويلة نسبيا (بين 1773 و1930)، فترة التأسيس لهذا العلم؛

***/- المرحلة الثانية: التصوير الجوي للاستكشاف والتجسس (من الطائرة**

للساروخ):

تميزت هذه المرحلة، والتي يمكن حصرها بين سنة 1930 وسنة 1945، بزيادة استخدام الصور الجوية لإعداد الخرائط، ودراسة الظواهر الطبيعية.. وقد عرفت فترة الحرب "العالمية" الثانية استخداما خاصا للصور الجوية تمثل في استغلالها في مجال التجسس والاستكشاف وتحديد الأهداف العسكرية وتقدير الخسائر وحصرها. كما عرفت هذه الفترة صدور أولى الكتب العلمية المفصلة التي تعالج موضوع استخدام الصور الجوية في دراسة علوم الأرض وغيرها من الظواهر الطبيعية، فقد صدر في هذا الصدد سنة 1941 كتاب إيردلي A.J.Eardley بعنوان " Aerial J.W.Bagley " وكتاب بيجلي "phoyographs :Their Use and Interpretation بعنوان "Aerophotography and Aerosurveying". وقد نتجت المجهودات التي بذلت بهدف تطوير الطائرات والزيادة في سرعتها وارتفاع تحليقها.. بإطلاق أول الصواريخ الأمريكية والسوفييتية؛

***/- المرحلة الثالثة: من الوصف البصري إلى التحليل الكمي.**

وامتدت من سنة 1945 إلى سنة 1960. حيث كانت الدراسة في بداية هذه المرحلة تعتمد على الوصف البصري، ثم أصبحت الدراسات في السنوات الأخيرة، تعتمد على التحليل الكمي للمعلومات والبيانات التي يتم استمدادها من الصور الجوية، الأمر الذي فتح آفاقا جديدة وواسعة ومجالات متنوعة للتطبيق كإنتاج الخرائط واستخدام الأرض ودراسة التربة والظواهر الجيولوجية والجيومورفولوجية والمياه والغطاء النباتي.. وقد بدأ خلال هذه الفترة الحصول على الصور الجوية الضوئية من ارتفاعات عالية نتيجة لاستخدام الصواريخ وإنجاز الرحلات الجوية المدارية (السوفييتية و الأمريكية). كما شاع استخدام وسائل التسجيل³ المحمولة جوا بواسطة طائرات خفيفة ومروحيات، والتي تعمل في نطاق الطيف المرئي Le visible؛ بالإضافة إلى وسائل تسجيل أخرى تعمل خارج نطاق الطيف المرئي L'invisible والتي وجدت استخدامات كثيرة في علوم الأرض..

³ - كالأشرطة المغنطة وأجهزة المسح كآلة التصوير التلفزيونية والرادار الرأسي ومسجل الصور الجانبية ورادار قياس الارتفاع وقياس الارتفاع بالليزر..

وقد تميزت السنوات الأخيرة من هذه المرحلة ببداية غزو الفضاء بالأقمار الاصطناعية، حيث تم إطلاق أول قمر اصطناعي سوفيتي (سبوتنيك 1) ضمن مدار له حول الأرض سنة 1957، تبعه بعد ذلك إطلاق سلسلة من الأقمار الاصطناعية السوفيتية والأمريكية.

*/- المرحلة الرابعة: من الاستشعار الضوئي إلى الاستشعار الحراري.

تمتد هذه المرحلة من بداية العقد السادس من القرن العشرين الميلادي إلى الوقت الحاضر، وقد تميزت بالتطور السريع في مجال الصواريخ، مكن من حمل أول إنسان إلى الفضاء الخارجي سنة 1961، ومن إنزال أول إنسان على سطح القمر سنة 1969. كما شهدت فترة الستينيات ظهور أجهزة جديدة تستخدم وسائل الاستشعار الحراري في الأشعة تحت الحمراء والاستشعار في الموجات الكهرومغناطيسية القصيرة جدا. في حين عرفت فترة السبعينيات من القرن العشرين تطورا سريعا في وسائل الاستشعار الفضائي، واكبه انتشار استخدام جهاز الحاسوب وملحقاته الإلكترونية الحديثة، كما عرفت لأول مرة استخدام الصور الملتقطة ضمن الموجات الطيفية المختلفة في دراسة الموارد الطبيعية، وأصبح لعلم الفضاء اتجاه خاص يتطور بسرعة ويعتمد مختلف المنجزات العلمية الرياضية والفيزيائية وبخاصة الحاسوب.

تميزت الأبحاث الأمريكية، خلال فترة الثمانينيات من القرن العشرين، بالتحول من إرسال رواد فضاء إلى إطلاق المركبات الآلية، كما أصبحت نفس الفترة دراسة المرئيات الفضائية وتحليلها مادة مستقلة تدرس في معظم جامعات العالم. بعد استخدام سفن الفضاء منصة لملاحظة ووسائل التسجيل خارج نطاق الطيف المرئي، جاءت المكننة، في الترتيب الثالث، مظهرا من مظاهر تكنولوجيا الفضاء الحديثة.

إجمالا يمكن القول، إن التطور التاريخي الذي عرفه الاستشعار عن بعد، قد تم في أربعة مجالات مختلفة هي (ف. بون F. Bonn ؛ ج. روشون G. Rochon، 1996):

- التطور الذي حصل في مجال الطيف، وتمثل في انتقال الملاحظة من نطاق الطيف المرئي إلى الملاحظة خارج نطاق الطيف المرئي، وهو ما يعبر عنه بإبصار ما لا يبصر؛
- التطور الذي حصل في المجال الفضائي، وتمثل في السعي نحو إبصار مجالات ونطاقات مساحتها أوسع فأوسع، مع أكبر دقة ممكنة وهو ما يتم التعبير عنه بالسباق نحو أصغر بيكسل⁴ Pixel ؛
- التطور الذي حصل في المجال الزمني، وتمثل في البحث عن تكرار الملاحظة من خلال مرور القمر الاصطناعي مرات متعددة من نفس الموقع. وهو أمر يكتسي أهميته خصوصا عندما يتعلق الأمر بالتطبيقات التي تهتم بدراسة الظواهر ذات التطور السريع؛
- التطور الذي حصل في مجال طرق تحليل المعطيات، حيث بدأ تحليل الصور المحصل عليها من خلال الاستشعار عن بعد بالملاحظة البصرية من خلال تفسير الصور الجوية. بعد ظهور الصور الرقمية بدأ تطبيق عدد من أنظمة تحليل الصور المعتمدة على أجهزة الحاسوب. ثم تم الانتقال إلى طور الذكاء الاصطناعي من خلال برامج الحاسوب التي تقوم بفك رموز الصور بنفس طريقة عقل الإنسان، لكن ونظرا لعدم توصل الإنسان إلى إجابات شافية للعديد من الأسئلة فهناك عودة لتحليل الصور بصريا بعد أن يتم تكبيرها وتوضيح تفاصيلها بواسطة الحاسوب.

3- أهمية الاستشعار عن بعد.

أصبح الاستشعار عن بعد، حاليا، من الوسائل الهامة لاستكشاف الثروات الطبيعية ولحل المشكلات البيئية على سطح الأرض، فمعرفة الظروف الشاملة التي تحيط بالأرض بدقة لا يمكن أن تستقيم بدون اللجوء إلى الأقمار الصناعية، كما أن دراسة الظواهر الجيولوجية أو الزراعية بواسطة الطرق التقليدية أو من الطائرة تستغرق وقتا طويلا ولا تؤدي إلى الدراسة المتكاملة، بالإضافة إلى تكلفتها العالية نسبيا (صادق. ع.ع، 2000).

⁴- وحدة مساحية تمثل أصغر مساحة متجانسة، مكونة للصورة المسجلة، يتم تحديدها من خلال أبعاد شبكة العينات.

وتظهر أهمية الاستشعار عن بعد بجميع أنواعه الجوي والراداري والفضائي..، في قدرته الهائلة على جمع معلومات وفيرة عن كوكب الأرض، والاحتفاظ بهذه المعلومات في أشكال مختلفة يمكن الرجوع إليها عند الاقتضاء، كما تظهر هذه أهمية الاستشعار عن بعد في إمكانية مراقبة ومتابعة كوكب الأرض بشكل مستمر من خلال إجراء المقارنات بين فترات زمنية مختلفة. لقد أصبح بالإمكان التنقيب والكشف عن الموارد الطبيعية والمائية والثروات البترولية والمعدنية، من خلال تحليل المرئيات والمعلومات التي توفرها الأقمار الصناعية. ثم عندها فقط يأتي دور البعثات العلمية الأرضية لتقوم بأعمال البحث والتنقيب والحفر في الأماكن التي حددت سلفا بواسطة تقنيات الاستشعار عن بعد (أبو راضي . ف، 2002).

إن مقارنة الاستشعار عن بعد بالوسائل الأخرى للدراسة والاستكشاف، تبين أن تقنية الاستشعار عن بعد تتميز بالعديد من الخصائص المفيدة نذكر من أهمها (صادق. ع.ع، 2000) :

- إمكانية التغطية الشاملة لمساحات واسعة يبلغ آلاف الكيلومترات المربعة في وقت واحد، وتحت ظروف واحدة (تغطي الصورة الواحدة من صور لاندسات مساحة تقدر بحوالي 34000 كلم²)؛
- السعة الكبيرة في تجميع البيانات وتخزينها وإمكانية معالجتها رقميا واستخلاص النتائج منها؛
- إمكانية إعادة الحصول على البيانات بسرعة؛
- الحصول على معلومات متكررة للظواهر المتغيرة ذات الطابع الديناميكي: كالفيضانات والأعاصير والبراكين والزلازل.

4- تطبيقات الاستشعار عن بعد.

تكمن أهمية الاستشعار عن بعد أيضا، في تطبيقاته التي تطل ميادين جد متنوعة، نكتفي في هذه الفقرة، بالإشارة إلى عدد منها (الجدول 1)، على أن نتناول بشيء من التفصيل، في فصل خاص، بعض النماذج من تطبيقات الاستشعار عن بعد تشمل مجالات متنوعة (أنظر الفصل السادس).

التطبيقات	المجال
الجيولوجيا – علم التربة – علم أشكال سطح الأرض	علوم الأرض
جودة المياه – التيارات البحرية والمحيطية – النباتات البحرية	الأوساط البحرية والساحلية
الرصد الجوي – الحصيلة الطاقية والمائية	الغلاف الجوي والمناخ
السلوك المائي عند سطح طبقة التربة وداخلها – الدورة المائية	هندسة المياه السطحية (الهيدرولوجيا)
وضع خرائط النباتات	الغلاف الحيوي
الإحصائيات الزراعية والغابوية – نمو المدن	تهيئة المجالات
تحديد المواقع الأثرية ووضع الخرائط لها	علم الآثار
الإنذار بالمجاعات – تحديد ومراقبة مخيمات اللاجئين	الإغاثة الإنسانية
الوقاية من الأوبئة	الصحة
حرائق الغابات – الفيضانات – الجفاف – البقع النفطية Marées noires	الكوارث في الطبيعة
التغيرات المناخية – التصحر – مكونات الغلاف الجوي	التغيرات العالمية

الجدول 1: - من مجالات تطبيق الاستشعار عن بعد (دروس جامعة جنيف، 2004).

الفصل الثاني : الأسس الفيزيائية للاستشعار عن بعد.

يعتمد الاستشعار عن بعد على استعمال الخصائص الفيزيائية للأجسام المنظورة، وبخاصة الخصائص البصرية Propriétés Optiques، بهدف الحصول على معلومات عن طبيعة هذه الأجسام. يتم حمل هذه المعلومات إلى نظام الملاحظة بواسطة إشعاع كهرومغناطيسي، كالضوء الذي يمثل التمثيل المرئي لهذا الإشعاع، فيتلقى نظام الملاحظة هذا الإشعاع ويترجمه إلى عناصر يفهمها المستعمل كالمرئيات أو المعطيات المرقمة (بون. ف وروشون.ج، 1996).

سنتطرق في هذا الفصل بشكل مبسط إلى طبيعة الإشعاع الكهرومغناطيسي وكيف يعبر هذا الإشعاع عن خصائص الأجسام الخاضعة للملاحظة.

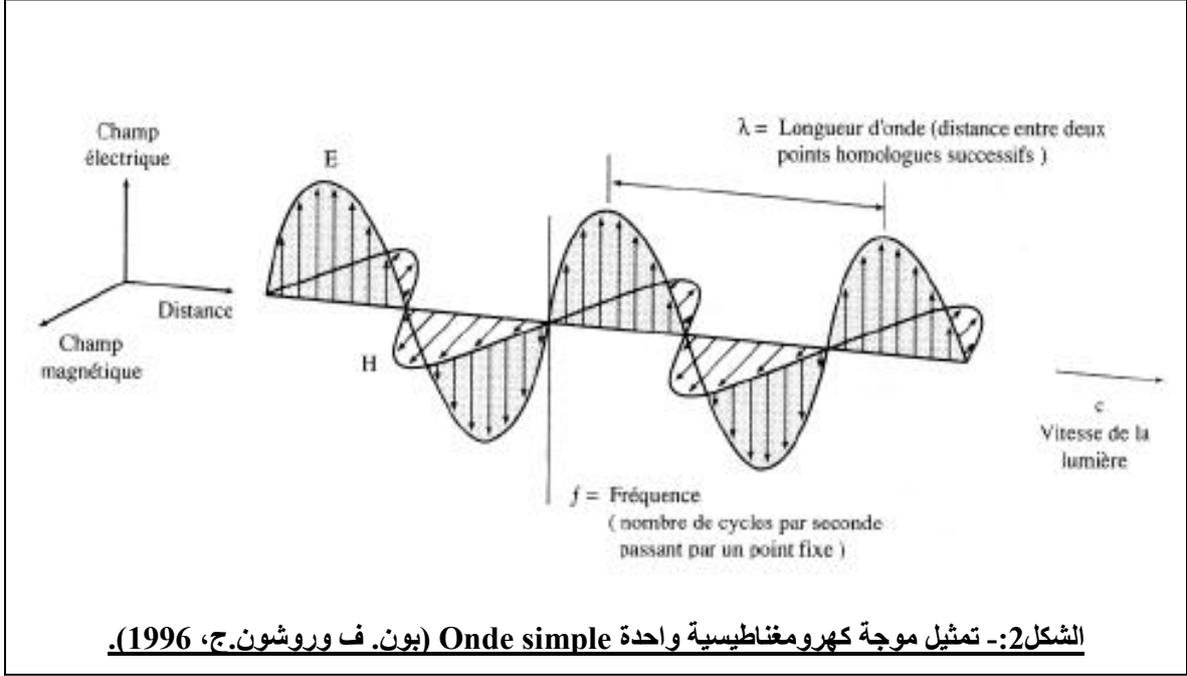
1- الإشعاع الكهرومغناطيسي (أو الموجات الكهرومغناطيسية).

1.1: تعريف.

يمثل الإشعاع طاقة محمولة في الفضاء على شكل موجات Ondes أو جزيئات Particules. ونتحدث عن الإشعاع الكهرومغناطيسي Rayonnement Electromagnétique عندما يتصرف الإشعاع كحقل قوى تؤثر تغيراته في الخصائص الكهربائية والمغناطيسية للمادة⁵. ويمثل الضوء الجزء المرئي من الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يستطيع الإنسان رصده بعينه (أنظر بوشان. ت: Pouchain .T، 2001). تتمثل الموجة الكهرومغناطيسية في متجهين (2vecteurs)، متعامدين غير منفصلين، يسيران بسرعة الضوء (300000 كلم في الثانية)، ويتغير مداهما Amplitude بشكل دوري مع الزمن⁶ هما: الحقل الكهربائي E والحقل المغناطيسي H. وتنتشر الموجة الكهرومغناطيسية بشكل متعامد مع المستوى الذي يحدده هذين المتجهين (الشكل 2).

⁵ - أي أنه يتفاعل مع المادة.

⁶ - أي تتباعد وتكرر بشكل منتظم.



- يمكن توصيف الإشعاع المغناطيسي من خلال عناصر الموجة التالية (الشكل 2):
- **الدورة T (Période):** والتي تمثل الوقت الذي تستغرقه الموجة للقيام باهتزازة كاملة؛
 - **التردد ν (أو الذبذبة Fréquence):** وتمثل عدد الاهتزازات في الثانية وهي عكس الدورة T ويمكن حسابها من خلال الصيغة الرياضية التالية: $\nu = 1/T$ ؛
 - **طول الموجة λ (Longueur d'onde):** وهي المسافة التي تفصل بين نقطتين متماثلتين متتاليتين على الموجة (قمتين متتاليتين مثلا)، وهي المسافة التي تقطعها الموجة بالسرعة (v) خلال دورة واحدة (الشكل 2 والشكل 3)، وبالتالي يمكن التوصل إلى حساب طول الموجة من خلال العلاقة التالية:

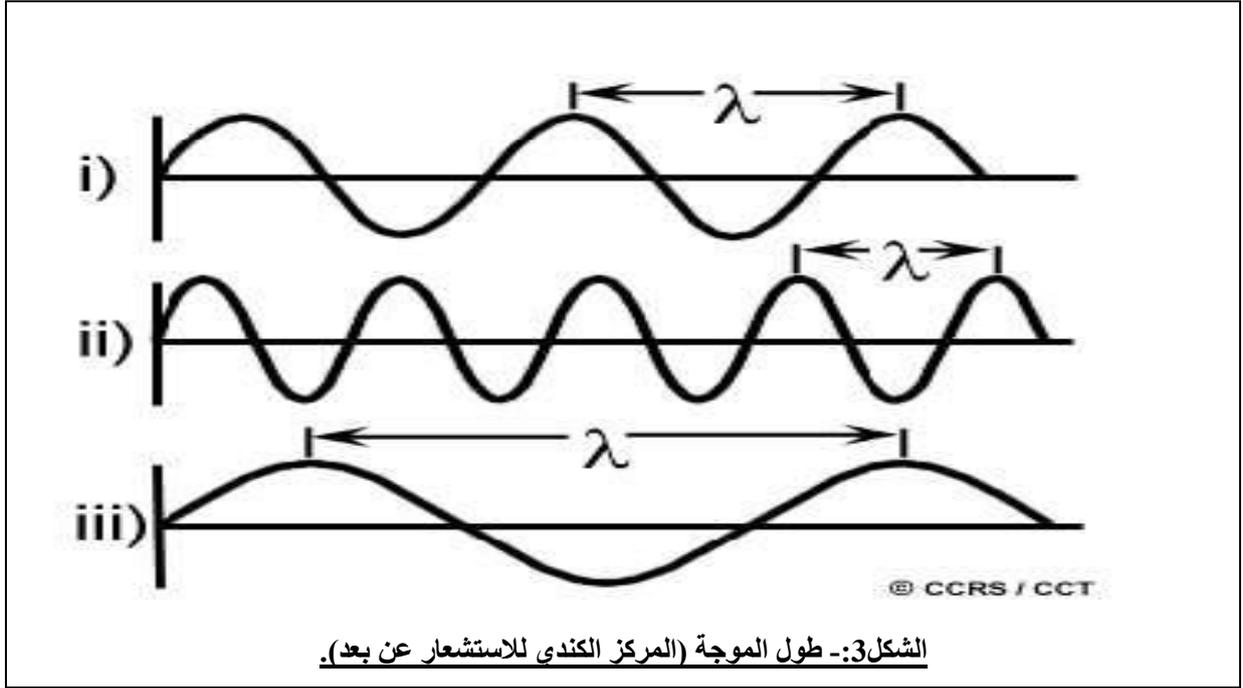
$$\lambda = \nu * T$$

$$\nu = 1/T \text{ وبما أن}$$

$$\lambda = \nu / \nu \text{ فإن الصيغة تصبح كالتالي:}$$

- **السرعة v (Vitesse):** وهي سرعة انتشار الموجة الكهرومغناطيسية في الفضاء، وتقاس السرعة التي ينتشر بها الضوء في الفراغ ($c = 300000 \text{ km/s}$)؛

- المدى E_0 (Amplitude): والتي تعبر عن شدة الموجة الكهرومغناطيسية (Intensité I)، فكلما كان مدى الموجة كبيرا، كلما كان الإشعاع شديدا؛
- الاستقطاب (Polarisation): ويميز، تغير السطح الذي تهتز الموجة بداخله. فإذا كان تغير هذا السطح يتم بشكل اعتباطي، فإن الموجة توصف حينها بكونها غير مستقطبة non polarisée ؛ أما إذا بقي هذا السطح ثابتا فإن الاستقطاب يكون حينها خطيا Polarisation rectiligne.



2.1- ملاحظات:

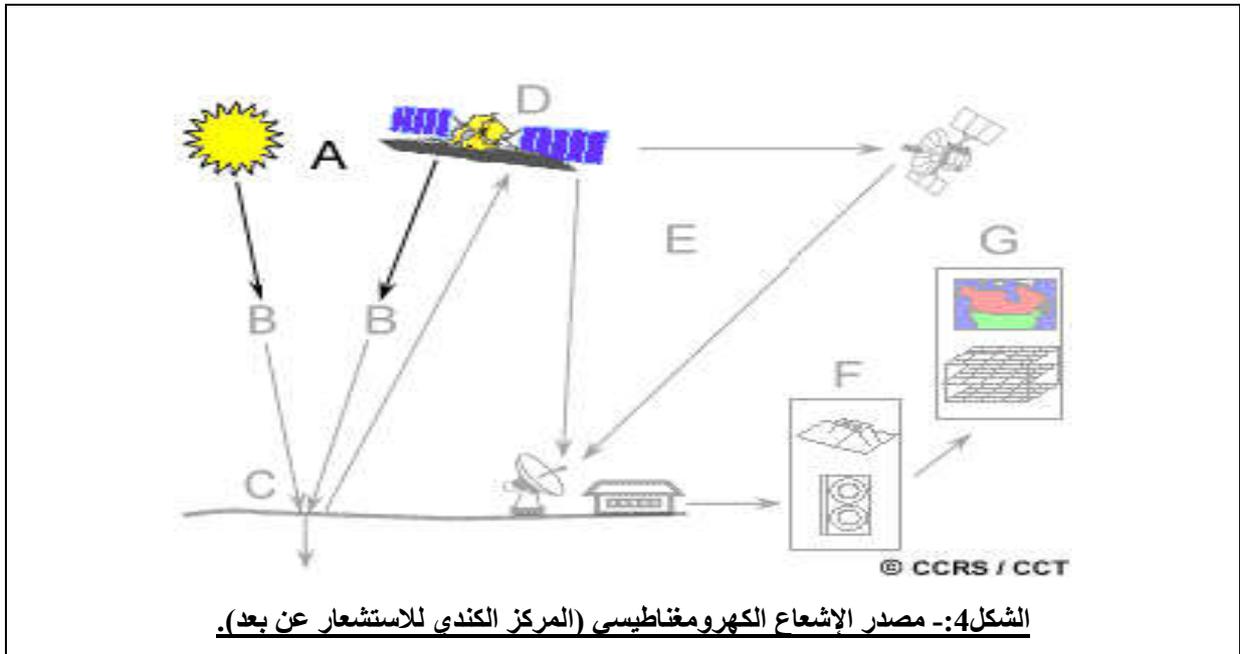
- /*- كلما كان التردد (أو الذبذبة) عاليا، كلما كان طول الموجة صغيرا؛
- /*- يتميز التردد بالاستقلالية عن الوسط الذي تنتشر فيه الموجة؛ بينما يؤثر وسط الانتشار في سرعة الموجة، ويؤثر بالتالي في طول الموجة (فسرعة الموجة وطولها في الماء، يختلفان عنهما في الزجاج أو في الهواء..). لذلك يتعين وصف نوع الموجات، من خلال ترددها، وليس من خلال طول الموجة أو سرعتها. لكن بالنسبة للترددات داخل نطاق الطيف المرئي، ونطاق فوق البنفسجي ونطاق تحت الأحمر (أنظر الفقرات اللاحقة)، فغالبا ما يتم وصف الإشعاع الكهرومغناطيسي من خلال طول الموجات: فعندما يتم التعبير عن

طول الموجات بالميكرومتر (microns)، فإن أطوال الموجات التي تستعمل بكثرة، تترجم إلى أرقام سهلة ومبسطة7؛

/*- إن طول الموجات وسرعات انتشارها تضعف في الأوساط الأخرى (غير الهواء أو الفراغ)، كالوسط المائي وتسمى نسبة نقصان سرعة الموجة بالنسبة لسرعتها في الفراغ: مؤشر الانكسار n (Indice de Réfraction n) للوسط المعتبر m ؛

/*- تتناسب الطاقة المحمولة عبر موجة معينة مع تردد الموجة: فكلما كان التردد عاليا (أي كلما كان طول الموجة صغيرا)، كلما كانت الطاقة قوية؛

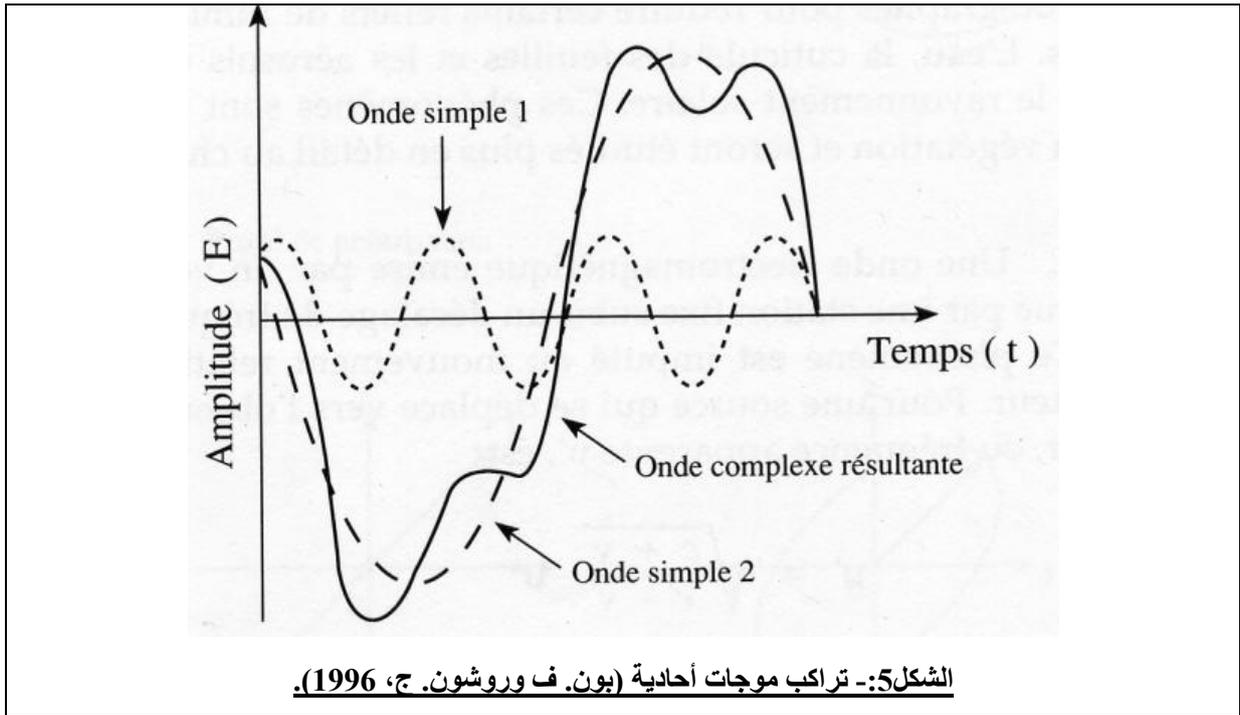
/*- إن إضاءة الهدف تتطلب وجود مصدر للطاقة على شكل إشعاع كهرومغناطيسي (الشكل4)، إلا إذا كان الهدف قادرا على إنتاج هذه الطاقة بنفسه.



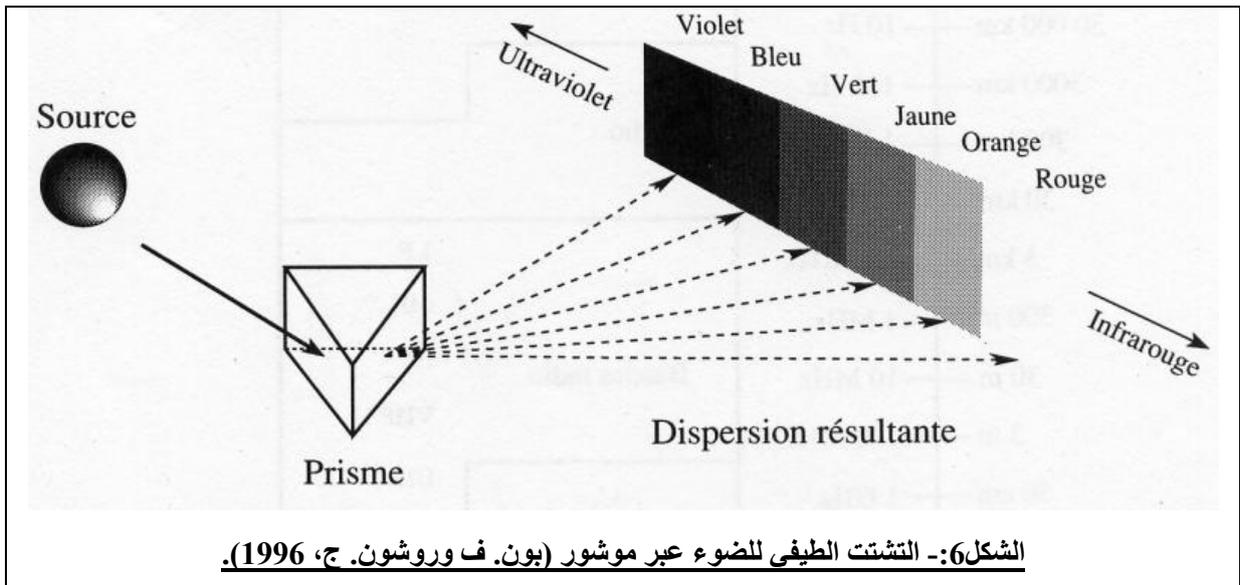
2- الطيف الكهرومغناطيسي (Spectre).

تنتج مختلف الموجات الكهرومغناطيسية التي نلاحظها في الطبيعة، عن تراكب لموجات أحادية ("بسيطة") تتميز كل واحدة منها بمدى وبذبذبة مختلفين وبالتالي يكون لكل واحدة منها طول موجة خاص. فتراكب موجتين أحاديتين مثلا يؤدي إلى تكون موجة واحدة معقدة (الشكل 5).

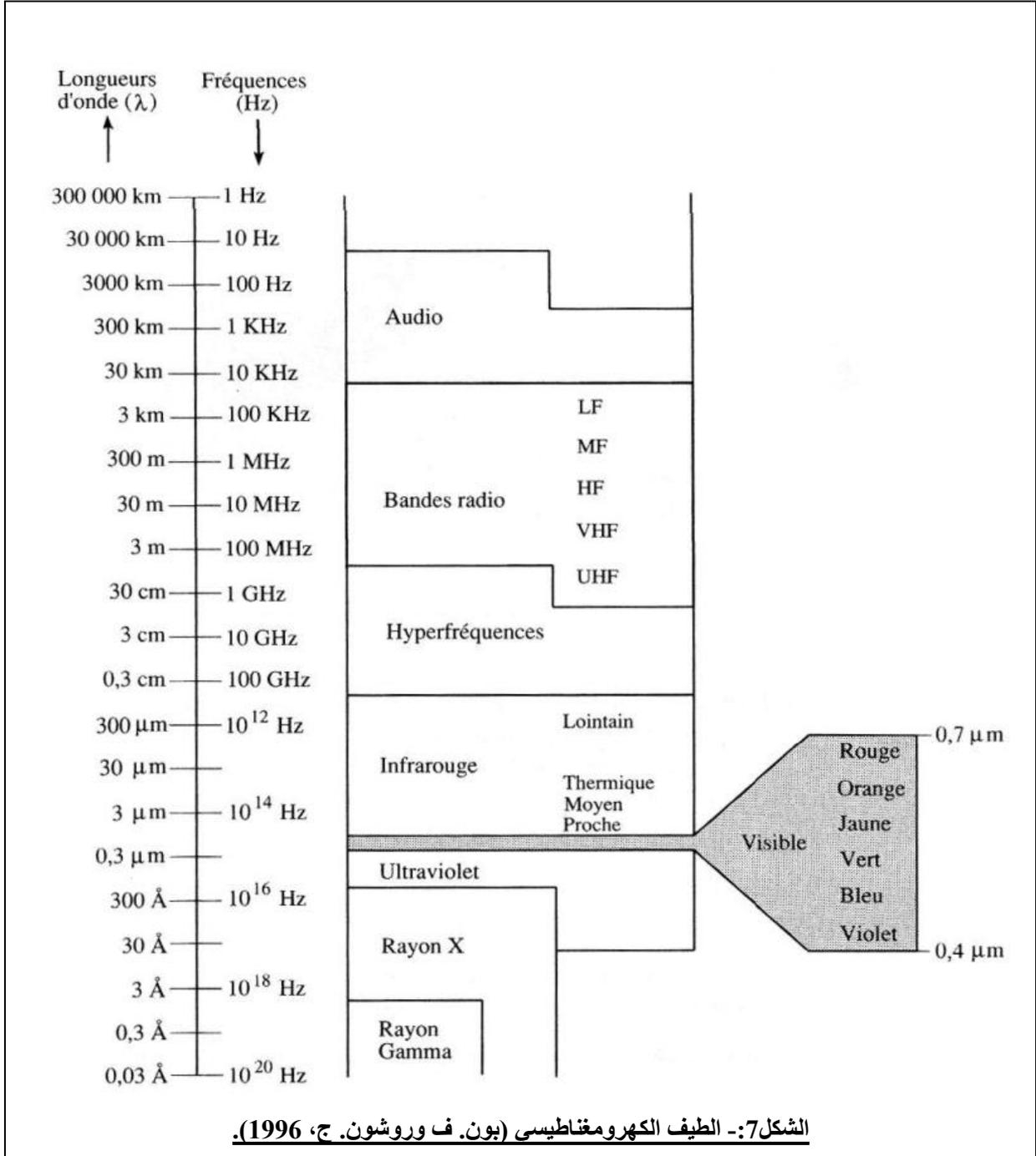
7- يجب دائما أن نستذكر أن أطوال الموجات هاته لا يتم تطبيقها إلا في الهواء أو في الفراغ.



وهكذا نفهم أن بالإمكان تفكيك كل إشعاع كهرومغناطيسي، إلى موجات أولية نطلق عليها المكونات الطيفية لهذا الإشعاع. ويشير نعت هذه المكونات بالطيفية إلى كلمة الطيف الناتج عن مرور ضوء أبيض عبر موشور **Prisme** (الشكل6). وقد تم توسيع مفهوم الطيف هذا ليشمل كل الموجات الكهرومغناطيسية.



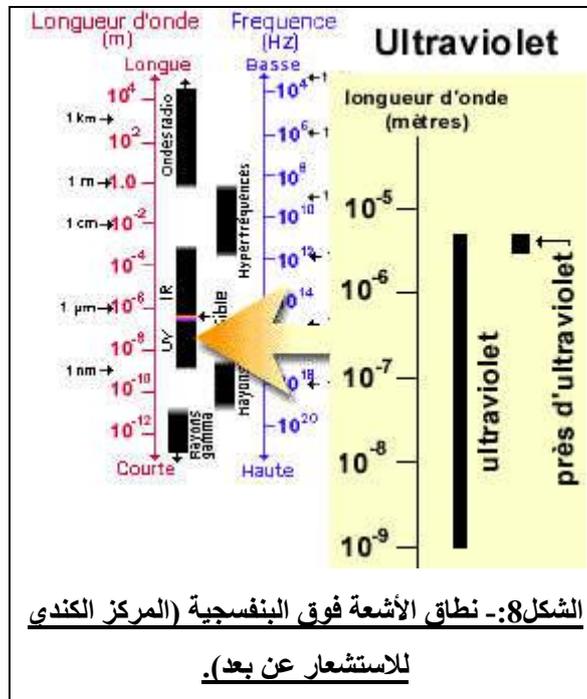
ويتحدد الطيف الكهرومغناطيسي من خلال توزيع الذبذبات (أو الترددات) ، وبالتالي من خلال أطوال الموجات، والتي من خلالها يتم ترتيب أنواع الإشعاع المختلفة (الشكل 7)8، حيث يمتد الطيف الكهرومغناطيسي من مجال الموجات القصيرة (من بينها أشعة غاما Les rayons gamma وأشعة إكس: et les rayons X) ، إلى مجال الموجات الطويلة (كموجات الراديو Ondes Radio والموجات الدقيقة أو الميكروموجات Mico-ondes).



8- لقد تم اعتماد مقياس لوغاريتمي للذبذبات وأطوال الموجات لإظهار أنواع الإشعاع المختلفة على الشكل 7.

- وتتمثل النطاقات الرئيسية للطيف الكهرومغناطيسي، التي يمكن أن نجري ضمنها القياسات المتعلقة بالاستشعار عن بعد، في ما يلي:
- نطاق الأشعة فوق البنفسجية **Ultraviolet**، واستعمالها في الاستشعار عن بعد نادر جدا؛
 - **النطاق المرئي Le visible** يمتد من **0.4** ميكرومتر إلى **0.7** ميكرومتر وغالبا ما يمكن تفكيكه إلى نطاقات جزئية أضيق؛
 - نطاق الأشعة تحت الحمراء **L'infrarouge**، ويمتد من **0.7** ميكرومتر إلى **100** ميكرومتر، ينقسم بدوره إلى نطاقات جزئية أضيق؛
 - نطاق الترددات العالية **Hyperfréquences** المعروفة أيضا بالموجات الدقيقة أو الميكروموجات، ويمتد من **1** ملمتر إلى **1** متر.

2.1- نطاق الأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet (الشكل 8).

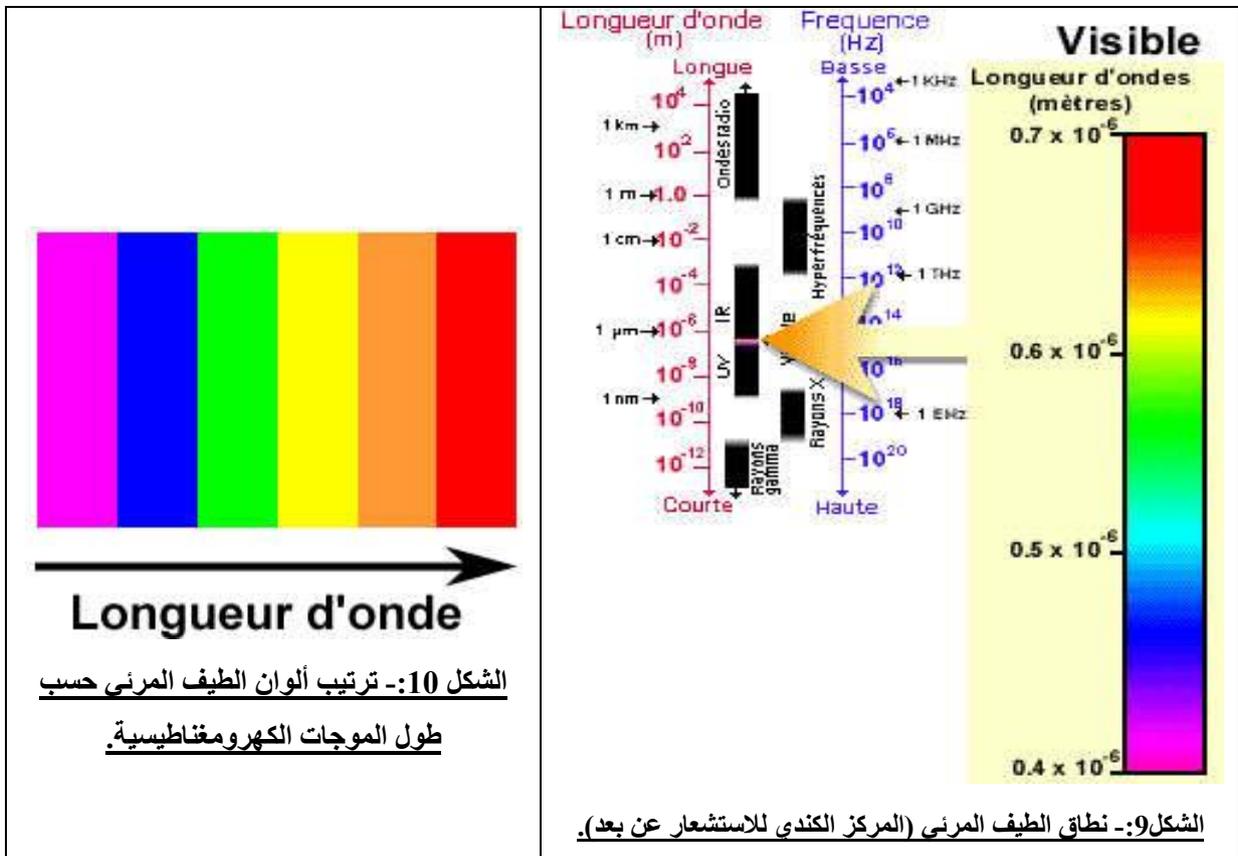


توجد أصغر الموجات المستعملة في مجال الاستشعار عن بعد في نطاق الأشعة فوق البنفسجية. إذ يوجد هذا الإشعاع بعد اللون البنفسجي من الجزء المرئي من الطيف

الكهرومغناطيسي. وبعض مواد سطح الأرض (المعادن والصخور على وجه الخصوص)، تصبح متألئة أو تنبعث منها أضواء مرئية عندما تتم إضاءتها بالإشعاع فوق البنفسجي.

22- نطاق الطيف المرئي *Spectre visible*

يوجد الضوء الذي تستطيع أعيننا مجردة أن ترصده وتراه، في ما يعرف بالطيف المرئي. وتجدر الإشارة إلى أن نطاق الطيف المرئي لا يمثل إلا جزءا صغيرا جدا من مجموع الطيف الكهرومغناطيسي (الشكل9)، وبذلك يكون الجزء الأكبر من الإشعاع الكهرومغناطيسي المحيط بنا، غير مرئي بالعين المجردة، لكنه ممكن الرصد من خلال آليات استشعار عن بعد معينة.



تمتد موجات الطيف المرئي من 0.4 ميكرومتر إلى 0.7 ميكرومتر. وتقابل أطول موجات الطيف المرئي اللون الأحمر، بينما تقابل أقصر موجات الطيف المرئي اللون البنفسجي (الشكل10).

وفيما يلي ترتيب موجات الطيف المرئي وما يقابلها من ألوان:

- البنفسجي: من 0.4 إلى 0.446 ميكرومتر؛
- الأزرق: من 0.446 إلى 0.5 ميكرومتر؛

- الأخضر: من 0.5 إلى 0.578 ميكرومتر؛

- الأصفر: من 0.578 إلى 0.592 ميكرومتر؛

- البرتقالي: 0.592 إلى 0.620 ميكرومتر؛

- الأحمر: من 0.620 إلى 0.7 ميكرومتر.

ويجب التأكيد على أن نطاق الطيف المرئي هو النطاق الوحيد الذي يمكن أن نربطه بمفهوم الألوان.

يمثل اللون الأزرق واللون الأخضر واللون الأحمر، الألوان الأولية (أو الأساسية) لألوان الطيف المرئي، إذ أن باقي الألوان يمكن تشكيلها من توليفة معينة من هذه الألوان الثلاثة، بينما لا يمكن تشكيل أي منها بمزج ألوان أخرى.

3.2- نطاق الأشعة تحت الحمراء *Infrarouge*

إذا فحصنا نطاق الأشعة تحت الحمراء، وجدنا أنه يمتد - بشكل تقريبي - من 7.0 ميكرومتر إلى 100 ميكرومتر، أي أنه يغطي مجالا يفوق مائة مرة المجال الذي يغطيه نطاق الطيف المرئي.

وتنقسم الأشعة تحت الحمراء إلى صنفين:

- الأشعة تحت الحمراء المنعكسة **IR Réfléchi**، ويشمل نطاقين جزئيين هما، مجال

الأشعة تحت الحمراء القريبة، ومجال الأشعة تحت الحمراء المتوسطة؛

- الأشعة تحت الحمراء المنبعثة **IR émis** (أو الحرارية⁹ **Thermique**)، ويوافق

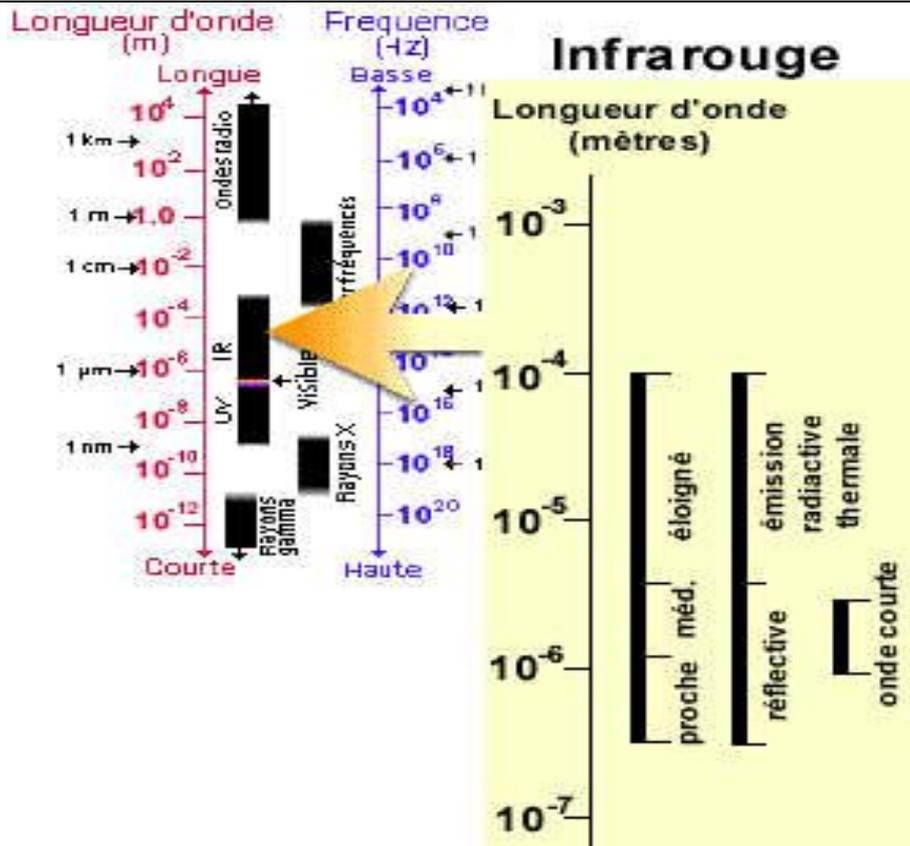
نطاقها الجزئي مجال الأشعة تحت الحمراء البعيدة (الشكل 11).

تستعمل الأشعة تحت الحمراء المنعكسة (القريبة والمتوسطة)، في ميدان الاستشعار

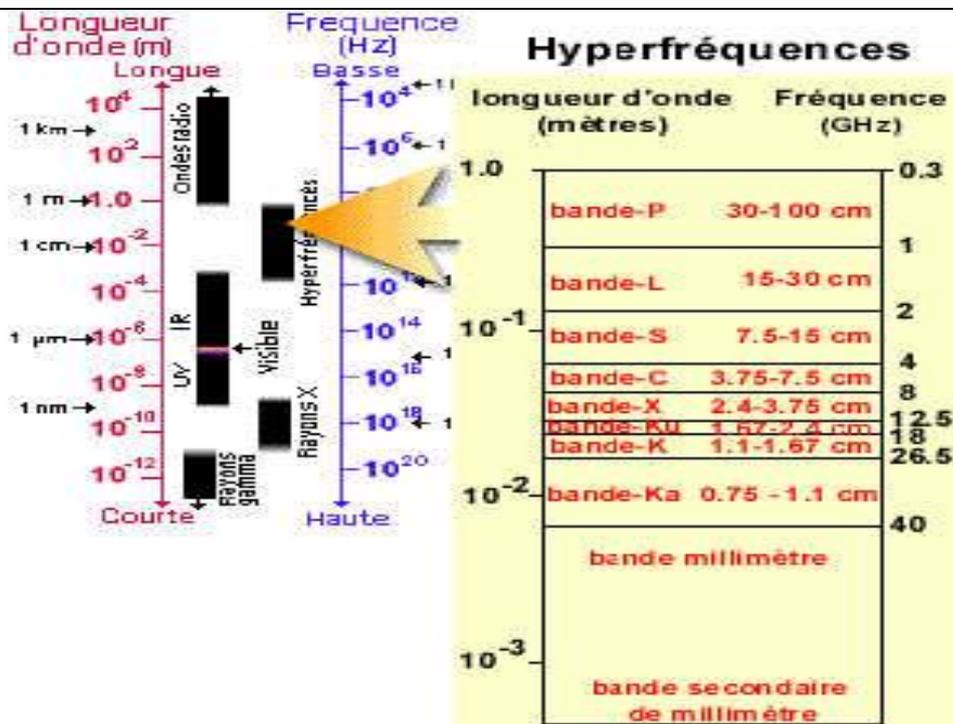
عن بعد، بنفس طريقة استعمال إشعاع نطاق الطيف المرئي، بينما تختلف الأشعة تحت

الحمراء الحرارية كثيرا عن أشعة الطيف المرئي وعن الأشعة تحت الحمراء المنعكسة.

9- تتمثل هذه الطاقة أساسا في الإشعاع المنبعث من سطح الأرض على شكل حرارة .



الشكل 11:- نطاق الأشعة تحت الحمراء (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).



الشكل 12:- نطاق الترددات العالية - أو الكبيرة - (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

4.2- نطاق الترددات الكبيرة Hyperfréquences (الشكل 12).

لقد بدأ نطاق الترددات الكبيرة (ذو الطبيعة الخاصة)، منذ وقت قريب، يكتسي أهمية بالغة في مجال الاستشعار عن بعد. و يضم هذا النطاق أطول الموجات المستخدمة في ميدان الاستشعار، ويمتد - تقريبا - من 1 مليمترا إلى غاية 1 متر، وتشتمل أقصر موجات هذا النطاق على خصائص شبيهة بخصائص الأشعة تحت الحمراء الحرارية، بينما تتميز أطول موجاته بخصائص شبيهة بخصائص موجات الراديو.

3- التعريف ببعض خصائص الموجات الكهرومغناطيسية.

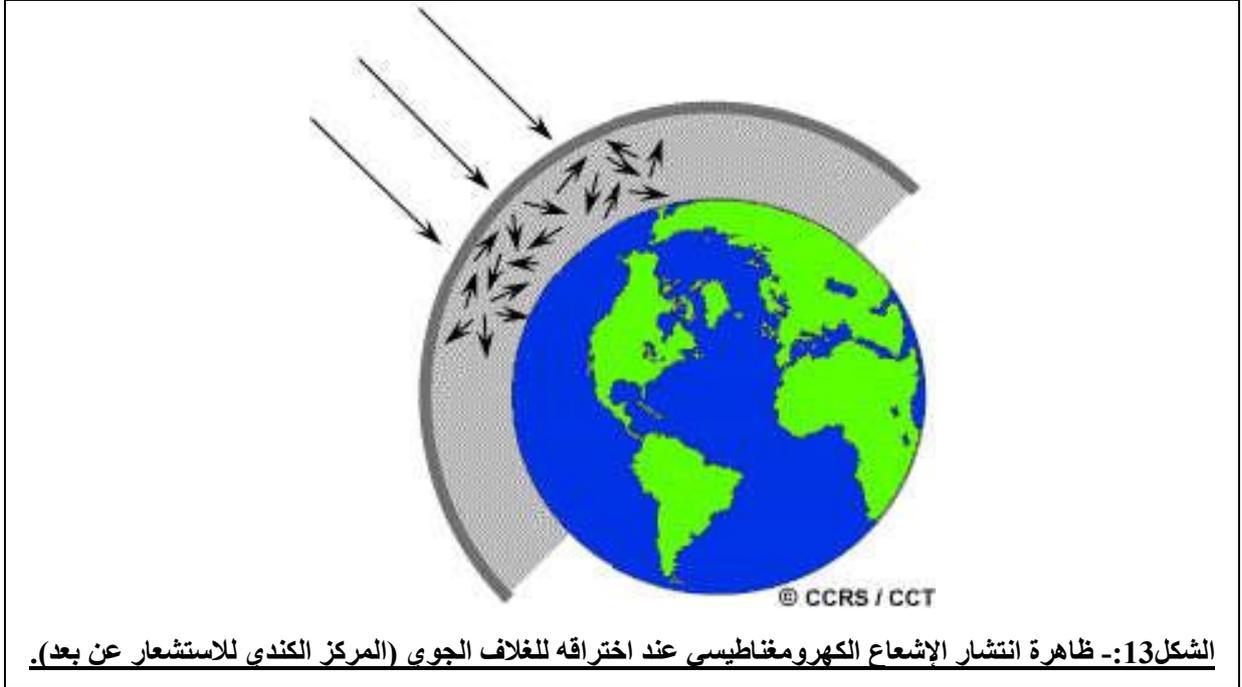
يعتبر الضوء جسما (يتمتع بخواص الأجسام)، عند تفاعله مع المادة، بمعنى أن الضوء ينقل طاقته إلى الأجسام عندما يصطدم بها. وعندما تحتك الطاقة الكهرومغناطيسية بالمادة (غازية كانت أم سائلة أم صلبة) تحدث عدة تفاعلات¹⁰ بين هذه الطاقة والبيئة، فينتج عن هذا التفاعل (سواء كان على سطح المادة أو داخلها)، تغيير في طبيعة الإشعاعات الداخلة والتي تشمل حجم الطاقة واتجاه وطول الموجات، والاستقطاب، والمظهر La Phase (أنظر أبو راضي. ف، 2002). ومن بين التفاعلات (أو الخصائص) الكثيرة للموجات الكهرومغناطيسية، نجد ما هو أساسي لفهم مبادئ الاستشعار عن بعد: كالانعكاس Réflexion والامتصاص Absorption والانتقال Transmission؛ بالإضافة إلى غيرها من الخصائص كالانعراج Diffraction والاستقطاب Polarisation والتداخل Interférence ومفعول دوبلر Effet Doppler والتي تكتسي أهمية بالغة بالنسبة للاستشعار الراداري على وجه الخصوص (أنظر بوشان. ت، 2001). ويمكن تقسيم هذه التفاعلات إلى قسمين: تفاعلات مع الغلاف الجوي وتفاعلات مع المادة الأرضية.

¹⁰- تعتبر هذه التفاعلات من خصائص الموجات الكهرومغناطيسية.

1.3- تفاعل الموجات الكهرومغناطيسية مع الغلاف الجوي:

قبل أن يبلغ الإشعاع المستخدم في الاستشعار عن بعد سطح الأرض، يتوجب عليه اختراق سمك معين من الغلاف الجوي. ويمكن للجسيمات Particules والغازات المتواجدة في الغلاف الجوي أن تغير اتجاه الإشعاع الوارد Incident أو أن توقفه، وذلك بفعل آليتين هما الانتشار Diffusion والامتصاص Absorption :

- الانتشار (أو الانتثار): ويحدث ذلك عند تفاعل الإشعاع الوارد مع الجسيمات أو الغازات ذات الجزيئات الكبيرة (Grosses molécules) المتواجدة داخل الغلاف الجوي، حيث تؤدي هذه الجزيئات إلى تغيير الاتجاه الأصلي للإشعاع الوارد (الشكل 13).



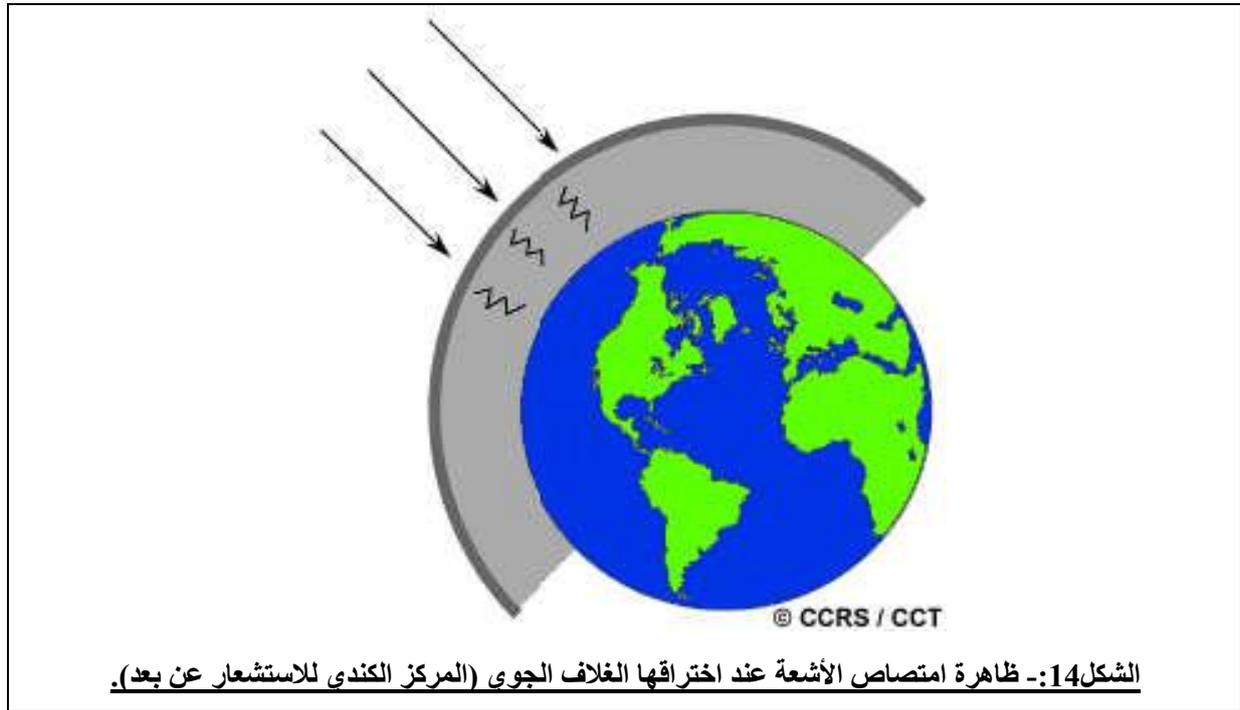
ويرتبط مستوى الانتشار بمجموعة من العوامل كطول الموجة وكثافة الجزيئات وسمك الغلاف الجوي الذي يتعين على الإشعاع الوارد اختراقه. بالنسبة للضوء، فإن الانتشار يكون أقوى في حالة الموجات القصيرة (اللون الأزرق)، منه في حالة الموجات الطويلة (اللون الأحمر): لذلك تظهر لنا السماء زرقاء اللون، بينما تظهر سواد اللون عندما لا يحدث الانتشار. وتقدر نسبة الإشعاع الشمسي الذي يتعرض للانتشار عندما يصل إلى

الغلاف الجوي الأرضي بحوالي 25 % يصل ثلثاها إلى سطح الأرض على شكل إشعاع منتشر¹¹.

يكون انتشار الإشعاع، في حالة غلاف جوي مشبع بالرطوبة ومحمل بالغبار الجوي Aérosols، أقوى من انتشاره في حالة غلاف جوي جاف وناصح.

وتكتسي ظواهر انتشار الإشعاع الكهرومغناطيسي أهمية كبيرة في مجال الاستشعار عن بعد، لذلك فهي تحتاج إلى تطبيق طرق خاصة للتصحيح في كثير من الحالات. إذ يتمثل انتشار الإشعاع الوافد، في زيادة في الإشعاع في كل الاتجاهات، إلا في اتجاه انتشار الإشعاع حيث يعرف، بالمقابل، خفوتا Atténuation قد يصل إلى الاختفاء التام¹² Extinction.

- الامتصاص (الشكل 14): تتم هذه العملية عندما تقوم جزيئات الغلاف الجوي الكبيرة (الأوزون، ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء)، بامتصاص الطاقة ذات الموجات المختلفة الطول:

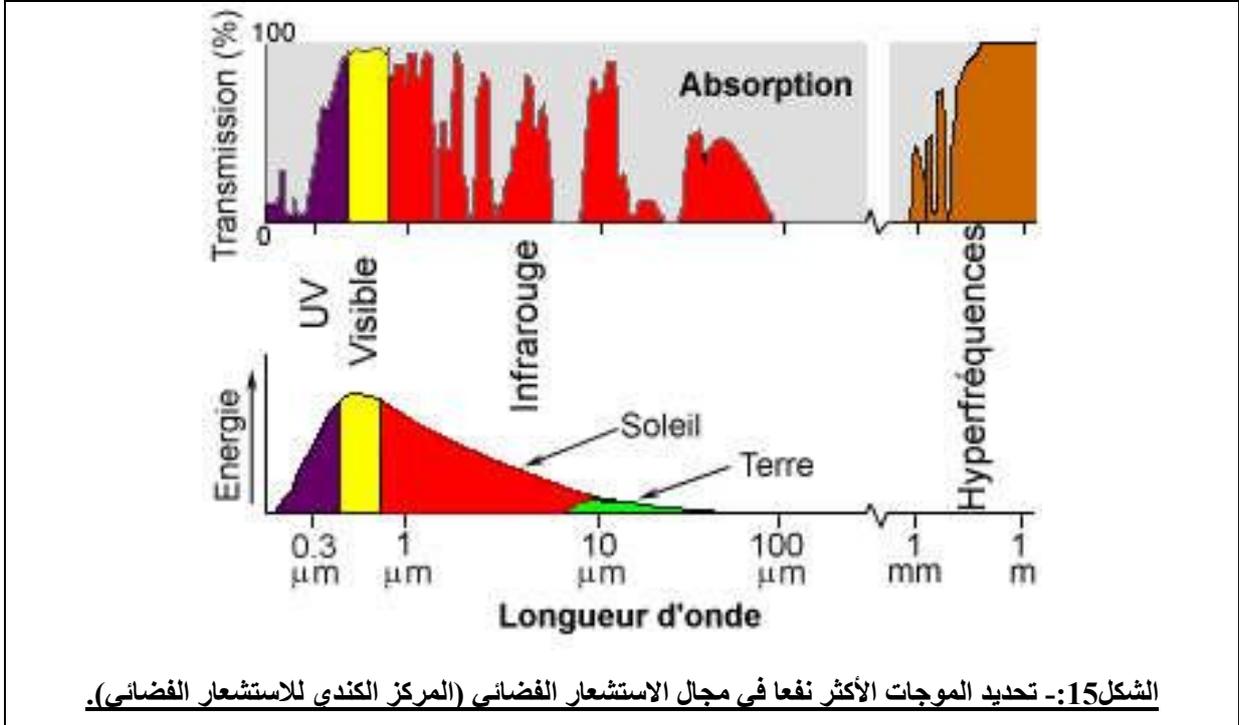


¹¹- بسبب انتشار الموجات الكهرومغناطيسية فإن مناطق الظل لا تكون سوداء بشكل تام.
¹²- هذا الاختفاء مختلف عن امتصاص الإشعاع بواسطة جسم أسود الذي يؤدي إلى تحول الطاقة الكهربائية إلى حرارة (= فقدان للطاقة في كل الاتجاهات).

*/- تقوم طبقة الأوزون بامتصاص الأشعة فوق البنفسجية الضارة للأحياء، ولولا هذه الطبقة الحامية في الغلاف الجوي لاحتترقت جلودنا عندما تتعرض لأشعة الشمس؛

*/- أما ثاني أكسيد الكربون، فإنه بالرغم من مساهمته في انبعاث غازات الدفيئة Effet de serres، فإنه يمتص كثيرا من الإشعاع في نطاق الأشعة تحت الحمراء ويقوم بحبس الحرارة داخل الغلاف الجوي؛

*/- يمتص بخار الماء المتواجد في الغلاف الجوي جزءا لا بأس به من الإشعاع الوارد في كل من نطاق الأشعة تحت الحمراء الطويلة الموجات ونطاق الترددات العالية القصيرة الموجات (بين 22 ميكرومتر و 1 متر). كما أن تواجد الماء في الجزء السفلي من الغلاف الجوي يختلف بشكل كبير من مكان إلى آخر، ومن وقت لآخر من أوقات السنة. فلو أخذنا كتلة هوائية فوق منطقة صحراوية، سنجد بها كميات ضئيلة من بخار الماء قادرة على امتصاص الطاقة؛ بينما تحتوى الكتل الهوائية التي تعلق المناطق المدارية كميات كبيرة جدا من بخار الماء.



بما أن هاته الغازات وهاته الجسيمات تقوم بامتصاص الطاقة الكهرومغناطيسية في مناطق خاصة من الطيف الكهرومغناطيسي، فإنها تؤثر في اختيار طول الموجات التي تستخدم في الاستشعار الفضائي.

هناك مناطق من الطيف لا تتأثر كثيرا بعملية الامتصاص، وهي بالتالي نافعة في الاستشعار عن بعد، وتسمى هذه المناطق النوافذ الجوية Fenêtres atmosphériques، وبعقد مقارنة بين خصائص مصدري الطاقة الأكثر شيوعا (الشمس والأرض)، وبين النوافذ الجوية المتوفرة، يمكن أن نحدد أطوال الموجات الأكثر نفعاً في الاستشعار عن بعد (الشكل 15):

/*- يوافق نطاق الطيف المرئي، إحدى النوافذ الجوية كما يوافق مستوى أقصى للطاقة الشمسية؛

/*- توافق الطاقة الحرارية المنبعثة من سطح الأرض، نافذة توجد بحوالي 10 ملليمتر داخل نطاق الأشعة تحت الحمراء الحرارية؛

/*- في نطاق الترددات العالية توجد نافذة كبيرة، توافق الموجات التي يفوق طولها 1 ملليمتر.

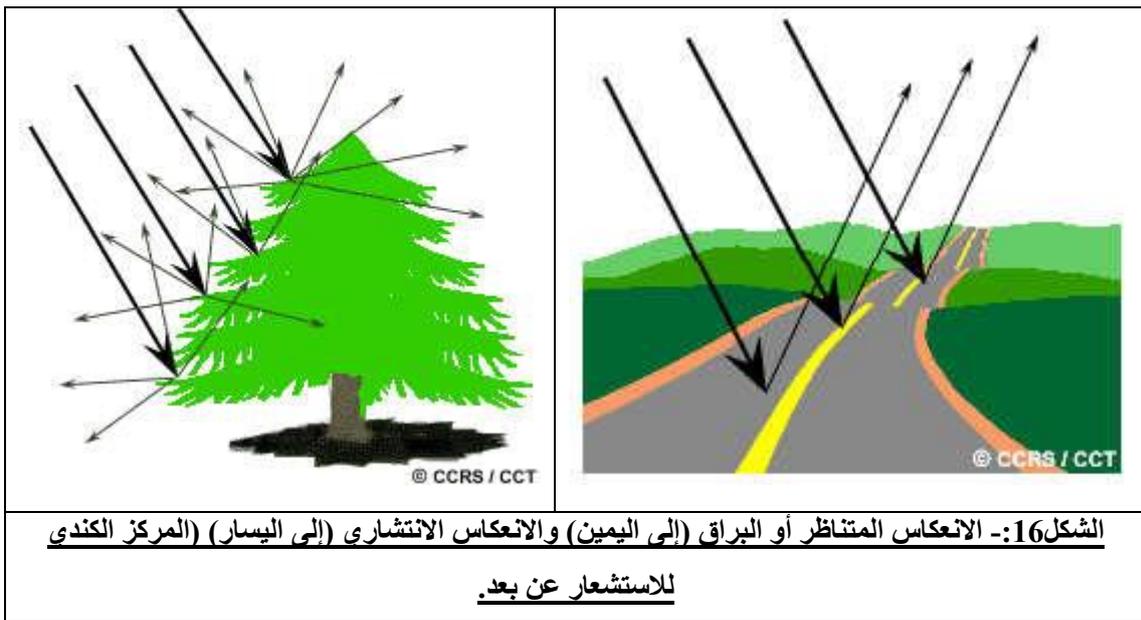
2.3- تفاعل الموجات الكهرومغناطيسية مع المادة الأرضية:

بعد أن تعرفنا على الكيفية التي ترحل من خلالها الطاقة الكهرومغناطيسية من مصدرها نحو سطح الأرض، سنرى ما يحصل للإشعاع عندما يبلغ سطح الأرض (أي عندما لا يتعرض للامتصاص أو الانتشار داخل الغلاف الجوي)، حيث تحدث مجموعة من التفاعلات بين الموجات الكهرومغناطيسية وبين المادة. وتتمثل أهم هذه التفاعلات في ما يلي (بون. ف وروشون. ج، 1996؛ أبو راضي. ف، 2002):

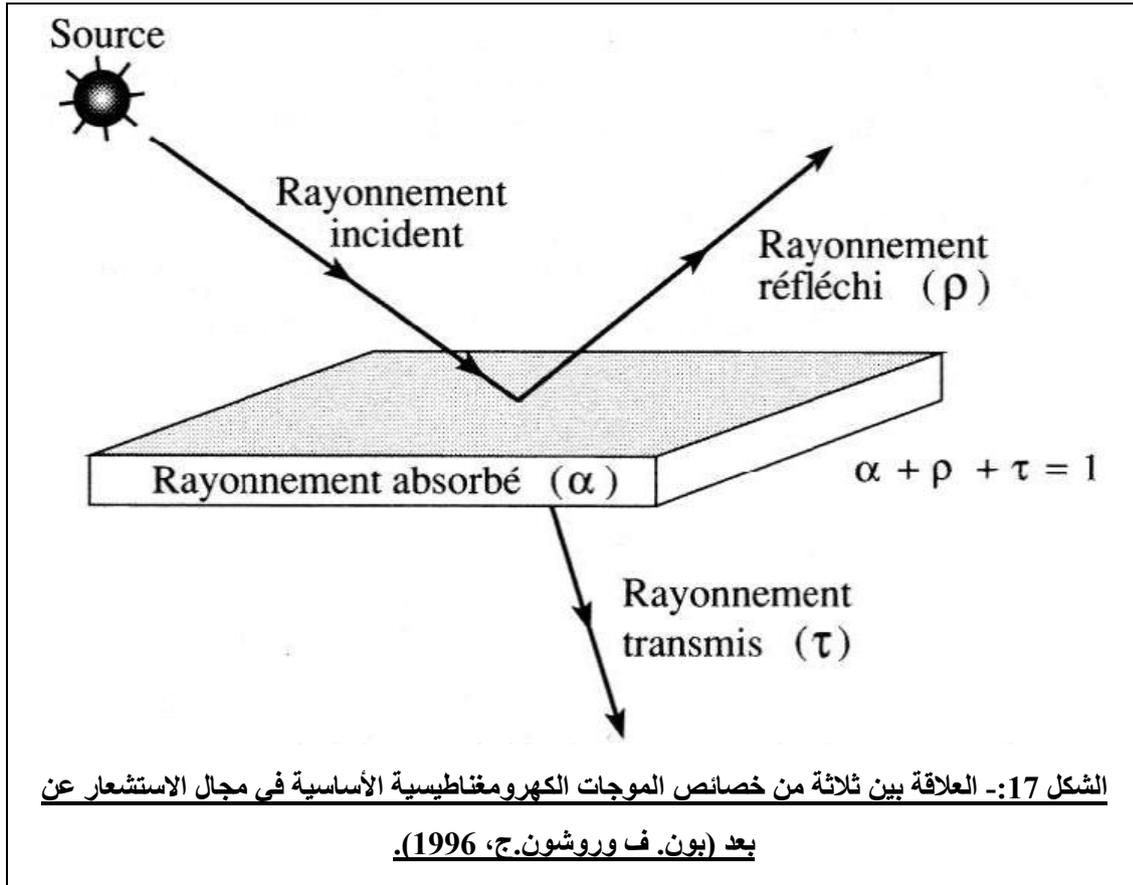
- الانبعاث Emission: حيث إن لكل جسم تتجاوز حرارته الترموديناميكية (أي حركية جزيئاته Agitation moléculaire)، 273°C (وهو ما يعادل 0°K)، القدرة على أن يصدر أو أن يبعث إشعاعاً كهرومغناطيسياً، يتميز بموجات تنتشر حسب خط مستقيم ما دام مؤشر انكسار الوسط الذي تنتشر فيه الموجات المنبعثة لم يتغير؛

- الامتصاص **Absorption**: يستطيع كل جسم يستقبل سطحه إشعاعا كهرومغناطيسيا، أن يمتص جزءا من هذا الإشعاع . حيث يعمل الجزء الممتص، على رفع الحرارة الداخلية للجسم الذي يقوم بعملية الامتصاص. وتسمى النسبة الحاصلة بين الطاقة الممتصة والطاقة الواردة، مؤشر الامتصاص **Coefficient d'absorption (Absorptance)** ؛

- الانعكاس **Réflexion**: يستطيع كل جسم يستقبل كمية معينة من الطاقة الإشعاعية، قادمة من مصدر خارجي، أن يعكس جزءا من هذه الطاقة الوافدة. وتعرف النسبة الحاصلة بين الطاقة الوافدة والطاقة المنعكسة بمؤشر الانعكاس **Coefficient de réflexion (Réflectance)**. ويعني هذا أن الإشعاع (جزء منه) يعود أو يرتد دون أن يتأثر بالمادة العاكسة، ويتخذ الإشعاع المنعكس أشكالا مختلفة تحدد العلاقة بين خشونة السطح وطول الموجة، فعندما يكون السطح ناعما كالماء أو بعض أنواع الصخور فإنه يتصرف كما لو كان مرآة، فينعكس الإشعاع في اتجاه واحد فنتحدث حينها عن الانعكاس البراق أو المتناظر **Réflexion spéculaire**، الأمر الذي يقلل من إمكانية التمييز بين الظاهرات؛ أما عندما يكون السطح خشنا فإن الانعكاس يتم بنفس الدرجة في جميع الاتجاهات ويسمى انعكاسا انتشاريا **Réflexion diffuse** (الشكل 16)؛



- **التوصيل أو النقل Transmission:** ويقصد به مرور الإشعاع من خلال الجسم أو المادة، حيث يستطيع كل جسم مستقبل لكمية معينة من الطاقة الإشعاعية أن ينقل جزءا منها. ويطلق على النسبة بين الطاقة المنقولة والطاقة الوافدة مؤشر التوصيل $\text{coefficient de Transmission (Transmittance)}$ ويوضح الشكل 17 العلاقات القائمة بين الامتصاص والانعكاس والتوصيل؛



- **التداخل Interférence:** ويحدث عندما يكون الحقل المغناطيسي في مكان ما ناتج عن إسهام مصادر متعددة لكنها "منسجمة" فيما بينها cohérentes ؛
- **الانعراج Diffraction:** هو تغيير اتجاه انتشار الإشعاع عندما يصطدم بحاجز أو يخترق ثقباً مثلاً، فهو يمثل مفعولاً لجوانب الأجسام، حيث يتعرض الإشعاع الذي يصطدم بجانب جسم معين للانعراج الجزئي داخل منطقة ظل الجسم (الشكل 18). وتحد ظاهرة الانعراج - المرتبطة ارتباطاً وثيقاً بظاهرة التداخل - من دقة تركيز

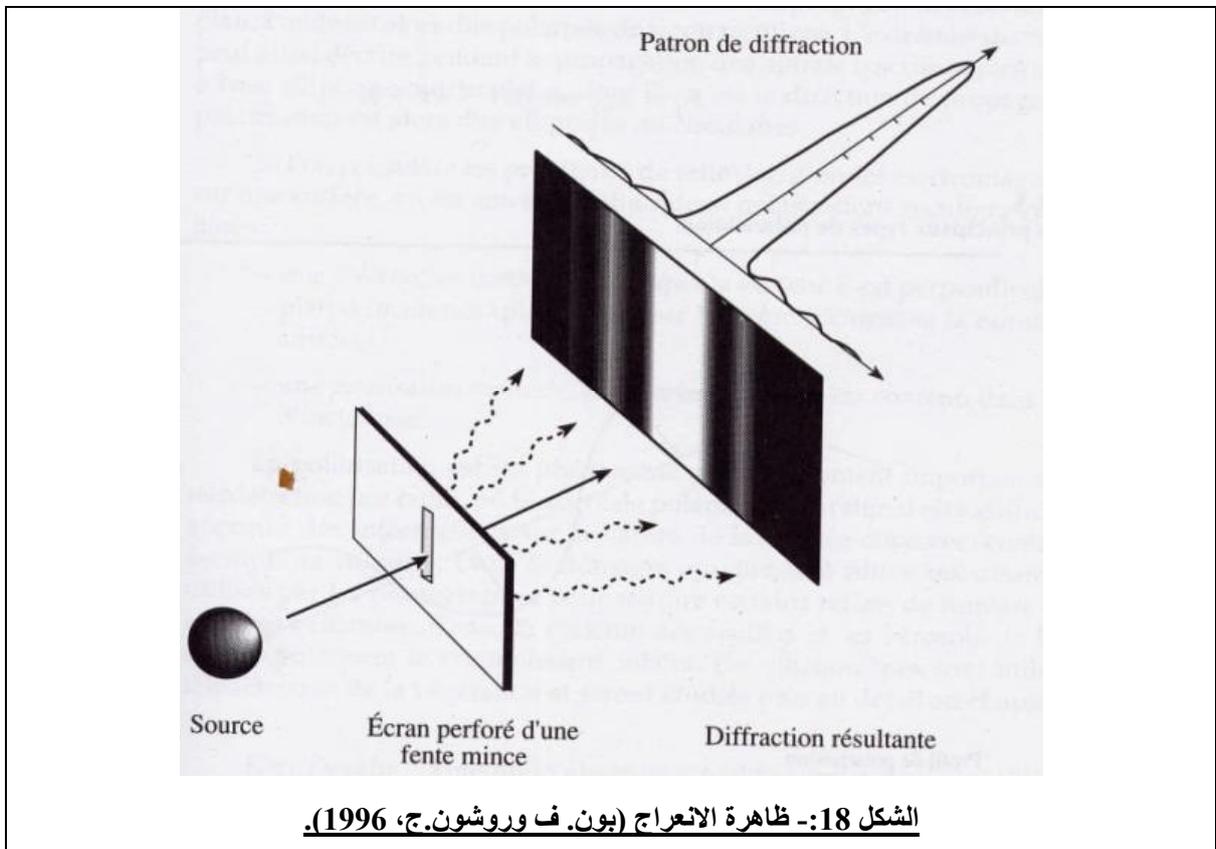
Résolution المجسات. كما أنها تكون مصحوبة بتشتت طيفي عندما لا يكون

مصدر الإشعاع أحادي اللون Monochromatique؛

- الانكسار Réfraction: وهي تغيير مسار الموجة الكهرومغناطيسية عندما تمر من وسط إلى وسط مختلف؛

- الاستقطاب Polarisation: وتهم تبدل سطح تذبذب الموجة بواسطة صفحة الماء أو أوراق الأشجار أو الغبار الجوي. وهي ظاهرة ذات أهمية كبيرة في مجال الاستشعار الراداري؛

- مفعول دوبلر Effet Doppler: وهو التأثير الذي تتعرض له الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من مركبة أو عربة متنقلة، فتصل إلى محطة الاستقبال الثابتة بفارق تردد معين Décalage de fréquence. ويعود ذلك إلى الحركة النسبية بين مصدر الإشعاع ومحطة الاستقبال. وقد يغير هذا التردد الظاهر (تردد دوبلر) من لون الجسم المتحرك الذي يراه ملاحظ ثابت. ولمفعول دوبلر تطبيق هام في الاستشعار الراداري؛



خلاصة

تمتاز الموجات الكهرومغناطيسية بخصائص متعددة، بعضها أساسي لفهم المبادئ الأساسية للاستشعار الفضائي. كالانعكاس والامتصاص والتوصيل والانتشار والانبعاش. وبعضها الآخر ذو أهمية كبيرة في مجال الاستشعار الراداري، كالانعراج والتداخل والاستقطاب ومفعول دوبلر.

توزيع الطاقة الكهرومغناطيسية (أبو راضي، ف، 2002).

إن زيادة الموجات القصيرة بفعل ارتفاع درجة الحرارة يجعل كل المواد تشع طاقة كهرومغناطيسية، فالجسم الحار (كالشمس) يشع إشعاعات سريعة وبترددات عالية وذبذبات كبيرة وموجات قصيرة. ويمكن بسهولة استشعار هذه الموجات ذات الطاقة العالية عن بعد، نتيجة لذلك. بينما نجد أن الأجسام الباردة (كالأرض) تشع طاقة كهرومغناطيسية ببطء وبموجات طويلة وترددات منخفضة أو بذبذبات صغيرة، فتكون بذلك الطاقة الكهرومغناطيسية للموجات ضعيفة، يصعب استشعارها عن بعد.

ومن المعروف أن كل مادة أو جسم على سطح الأرض، تزيد درجة حرارته عن الصفر، يصدر إشعاعات كهرومغناطيسية (منبعثة أو منعكسة) بصفة مستمرة وبكميات تختلف باختلاف درجة حرارته.

ويمكن القول إن الأجسام السوداء (التي تمتص كل الطاقة التي تسقط عليها ثم تبتث أو تبعث أكبر قدر من هذه الطاقة في جميع الموجات)، تتميز - في درجة حرارة الشمس: 5727 درجة مئوية أو 6000 درجة كلفن - بالمميزات التالية:

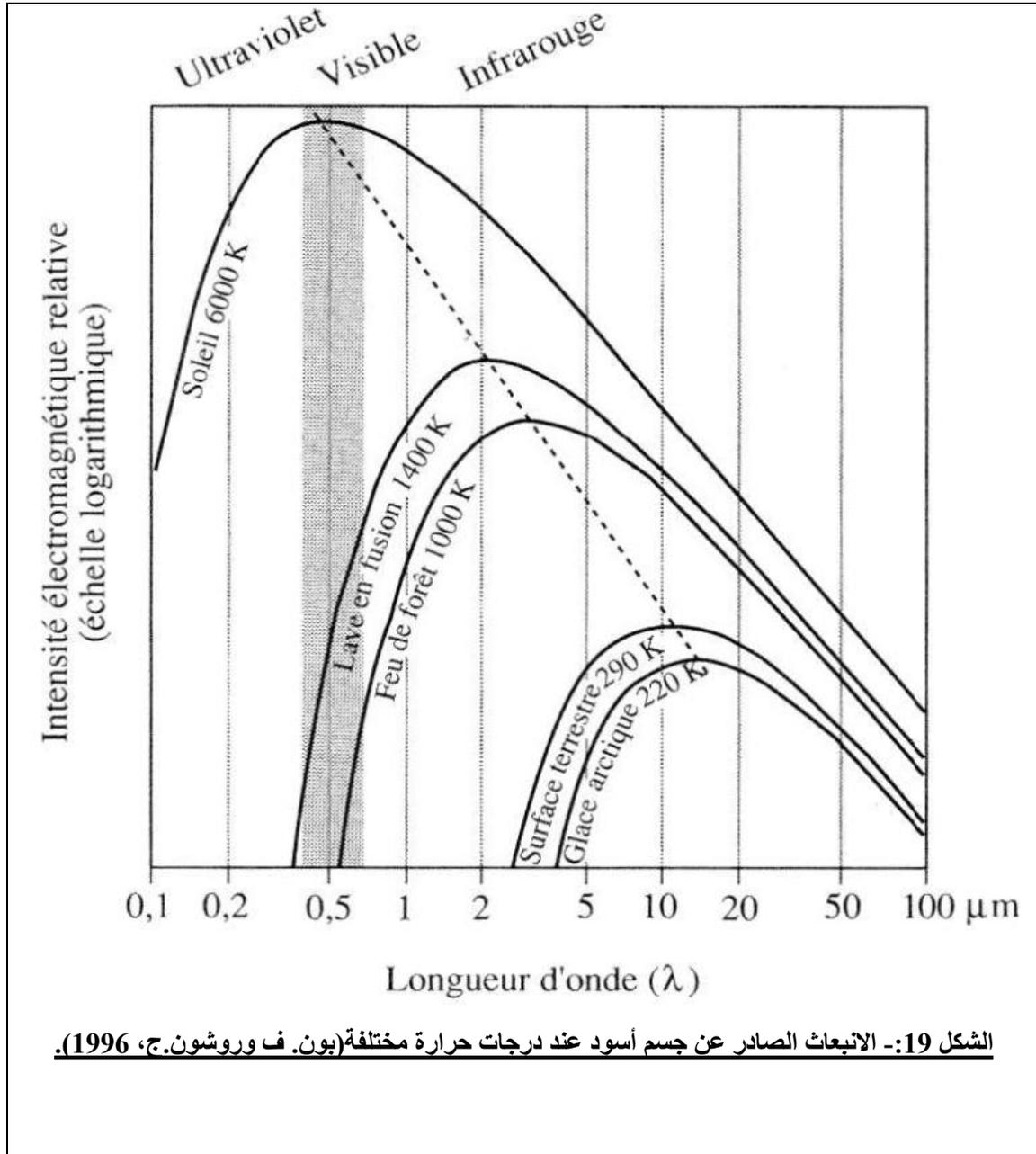
*/- إشعاعات خارجة عالية ذات موجات قصيرة في النطاق المرئي من الطيف

الكهرومغناطيسي؛

*/- إشعاعات عالية في الموجات الطويلة في نطاق الأشعة تحت الحمراء من الطيف

الكهرومغناطيسي. وهذا يفسر لماذا تشع الشمس موجات مرئية وحرارية بشكل قوي بينما يشع سطح الأرض (وهو من الأجسام الحقيقية التي ينبعث منها جزء من الطاقة) الموجات في نطاق الأشعة تحت الحمراء الحرارية بشكل ضعيف.

إن الإشعاع المنبعث من الأجسام السوداء لا يتم بشكل موحد في جميع الترددات، بل إنه يتغير داخل الطيف الكهرومغناطيسي حسب عدد من العناصر من أهمها درجة حرارة الجسم. ويبين الشكل 19 تغير الانبعاث الصادر من الأجسام السوداء عند درجات حرارة متنوعة.



الشكل 19:- الانبعاث الصادر عن جسم أسود عند درجات حرارة مختلفة (بون. ف وروشون. ج، 1996).

الفصل الثالث:

تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع الغلاف الجوي ومع سطح الأرض

أو بصمات الطيف الكهرومغناطيسي Signatures spectrales.

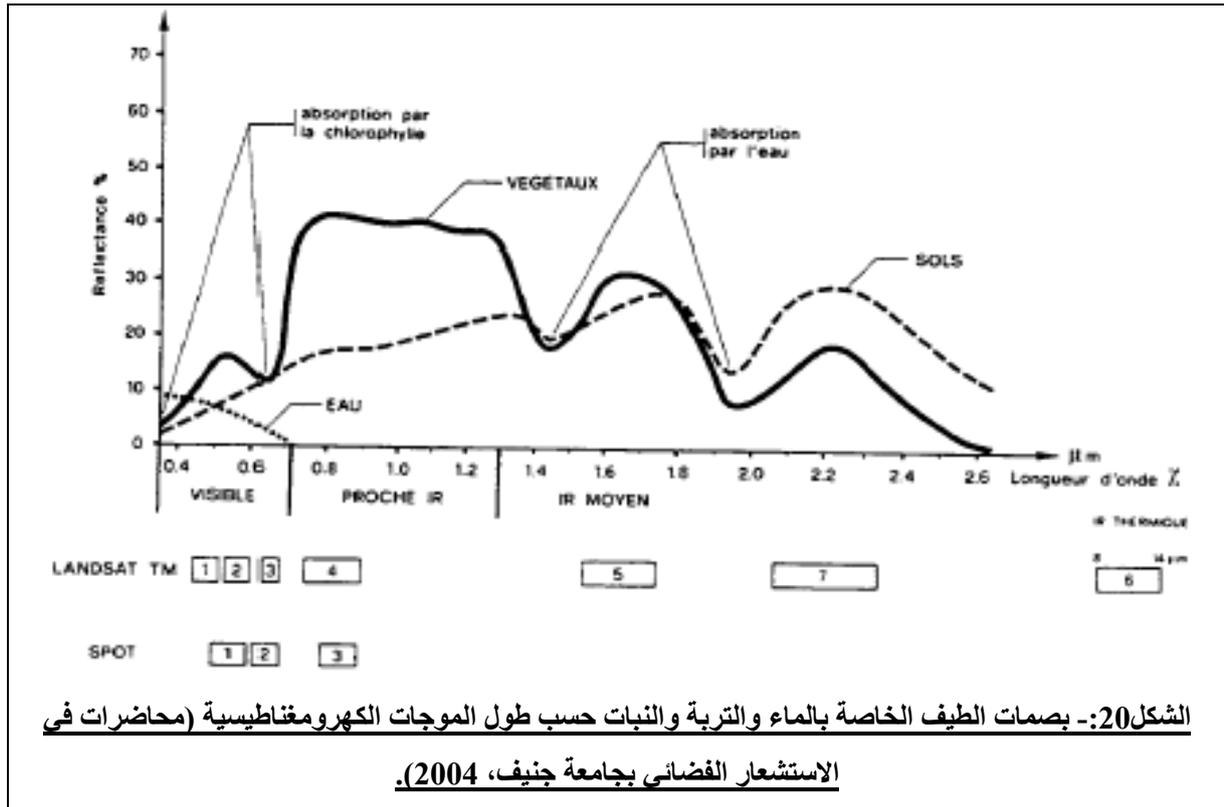
مدخل.

لفهم مخزون المعلومات الذي تحمله الموجات الكهرومغناطيسية بعد رصدها بواسطة أنظمة الاستشعار على سطح الأرض، يجب معرفة آليات التفاعل بين الإشعاع وبين السطح الذي تتم ملاحظته، حتى يتسنى التفسير الصحيح للإشارة التي يستقبلها جهاز اللاتقاط (أو اللاقط Capteur).

وسنحاول في هذا الفصل أن نعرض للموضوع حسب نطاقات الطيف الكهرومغناطيسي، نظرا لاختلاف الظواهر الفيزيائية على سطح الأرض، في الظروف الأكثر شيوعا، باختلاف النطاق المعتبر من الطيف الكهرومغناطيسي: الانعكاس في النطاق المرئي ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة؛ الانبعاث في نطاق الأشعة تحت الحمراء الحرارية؛ الانتشار العكسي والانبعاث في نطاق الترددات العالية.

تعريف.

المقصود ببصمات الطيف الأشكال المتعددة التي يمكن أن يتخذها انبعاث أو انعكاس الموجات الكهرومغناطيسية عند مستوى سطح الأرض فهي بالتالي قوة انعكاس (انعكاسية) أو قوة انبعاث (انبعاثية) الأجسام، حسب طول الموجات. ويتم تمثيل بصمات الطيف من خلال منحنيات تبين العلاقة القائمة بين مؤشر الانعكاس من جهة (محور الأرتايب) وبين طول الموجات الكهرومغناطيسية من جهة أخرى (محور الأفاصيل). ويوضح الشكل 20 نسبة انعكاسية النباتات والماء والترربة، حسب طول الموجات.



وقبل المرور إلى الحديث عن بصمات الطيف بشيء من التفصيل، لا بأس من القيام بفحص سريع لتبادلات الطاقة التي تحدث على سطح الأرض، لأن انبعاث الإشعاع الكهرومغناطيسي وانعكاسه جزء لا يتجزأ من هذه التبادلات.

تبادلات الطاقة على سطح الأرض.

يمكن اعتبار سطح الأرض بمثابة حد فيزيائي، يفصل بين الغلاف الصخري المتمثل في الصخور الصلبة والتكوينات السطحية من جهة، وبين الغلاف الجوي المتكون من غازات متنوعة وجسيمات متحركة من جهة أخرى.

كما أن غالبية الغلاف الحيوي (نبات، حيوان وإنسان)، تتواجد على بضعة أمتار فقط فوق أو تحت هذا السطح، وتمثل بيئة هشة مرتبطة بشكل قوي بتفاعلات السطح الطاقائية، من خلال السلاسل الغذائية (أساس كل أشكال الحياة على الأرض)، والتي ليس لها من مصدر طاقة سوى الشمس، حيث تستعمل الطاقة الشمسية للقيام بالعديد من العمليات

والتفاعلات بين المكونات المختلفة لهذه الأغلفة المتماسة فيما بينها(الغلاف الصخري والغلاف الجوي والغلاف الحيوي).

في مجال الاستشعار عن بعد، يستخدم الإشعاع الشمسي مصدرا رئيسا لإضاءة سطح الأرض. وتدعونا تفاعلات الإشعاع الشمسي مع سطح الأرض، للحديث عن مفهومين هامين هما: **الإشعاع الخالص Rayonnement net**، و**حصيلة الطاقة Bilan d'énergie** عند سطح الأرض.

1- مفهوم الإشعاع الخالص.

يتحدد الإشعاع الخالص في كمية الطاقة الإشعاعية المتوفرة على سطح الأرض، والتي يمكن تحويلها إلى أشكال أخرى من الطاقة، من خلال مختلف آليات السطح الفيزيائية أو الحيوية. وعادة ما يتم التعبير عنها بالصيغة التالية:

$$R_N = R_S (1-\alpha) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}$$

حيث يمثل:

R_N : الإشعاع الخالص (W/m^2)؛

R_S : إشعاع الشمس الوارد الشامل (المباشر والمنتشر) ذو الموجات القصيرة (من 0.3 إلى 3 ميكرومتر) (W/m^2)؛

α : معيار الانعكاس **Albedo** وهي قدرة السطح على عكس الإشعاع الساقط عليه ؛

$R_{L\downarrow}$: الإشعاع الحراري النازل الطويل الموجات (من 3 إلى 15 ميكرومتر في الغالب)، والمنبعث من الغلاف الجوي، بخاصة من السحب (W/m^2)؛

$R_{L\uparrow}$: الإشعاع الحراري الصاعد الطويل الموجات ، المنبعث من سطح الأرض في نفس طول موجات الإشعاع النازل (W/m^2).

وقد اقتبس الرمز R_S و R_L من الكلمتين الإنجليزيتين Shortwave أي الموجة القصيرة و Longwave أي الموجة الطويلة، لكون معظم الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض، يتموضع ضمن الموجات القصيرة لنطاق الطيف المرئي ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة، بينما يوجد معظم الإشعاع الحراري المنبعث، بين 8 و 14 ميكرومتر. ومع

ذلك فالإشعاع الحراري حاضر ويمكن قياسه انطلاقا من 3.5 ميكرومتر بالرغم من كون كميات الطاقة المنبعثة تكون أضعف.

في الليل عند غياب الإشعاع الشمسي تصبح كتابة صيغة الإشعاع الخالص على النحو التالي:

$$R_N = R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}$$

وعادة ما يكون الإشعاع الخالص سالبا أثناء الليل، خصوصا عندما تكون السماء صافية، الأمر الذي يسرع من وتيرة برودة سطح الأرض.

ويرتبط الإشعاع المنبعث بدرجة حرارة السطح، التي تتميز بتأثيرها الواضح على الإشعاع الخالص المتوفر على السطح بخصوص تبادلات الطاقة. هذه التبادلات هي التي تحكم المناخ والدورة المائية والسلسلات الغذائية للأنظمة البيئية.

2- حصيلة الطاقة عند سطح الأرض.

يتم صرف الطاقة الخالصة التي تصل إلى السطح بشكل كامل للقيام بمهام متنوعة، حيث لا يمكن – تبعا للمبدأ الأول من مبادئ الدينامية الحرارية Thermodynamique – أن تتراكم الطاقة في نقطة ما: فمجموع الطاقات الوافدة يساوي مجموع الطاقات المصروفة. ويقوم جزء من هذه الطاقة بتسخين الأرض Sol من خلال التوصيل Conduction، ويقوم جزء ثان بتغيير الغلاف الجوي بواسطة عملية الحمل Convection، بينما يقوم جزء ثالث بتبخير الماء، ويبقى جزء رابع وأخير يقل في الغالب بكثير عن الأجزاء الأخرى، للمساهمة في الآليات الفوتوكيميائية للتمثيل اليخضوري Assimilation chlorophyllienne عند النباتات.

وتكتب حصيلة الطاقة عادة على الشكل التالي:

$$R_N + LE + G + H + s = 0$$

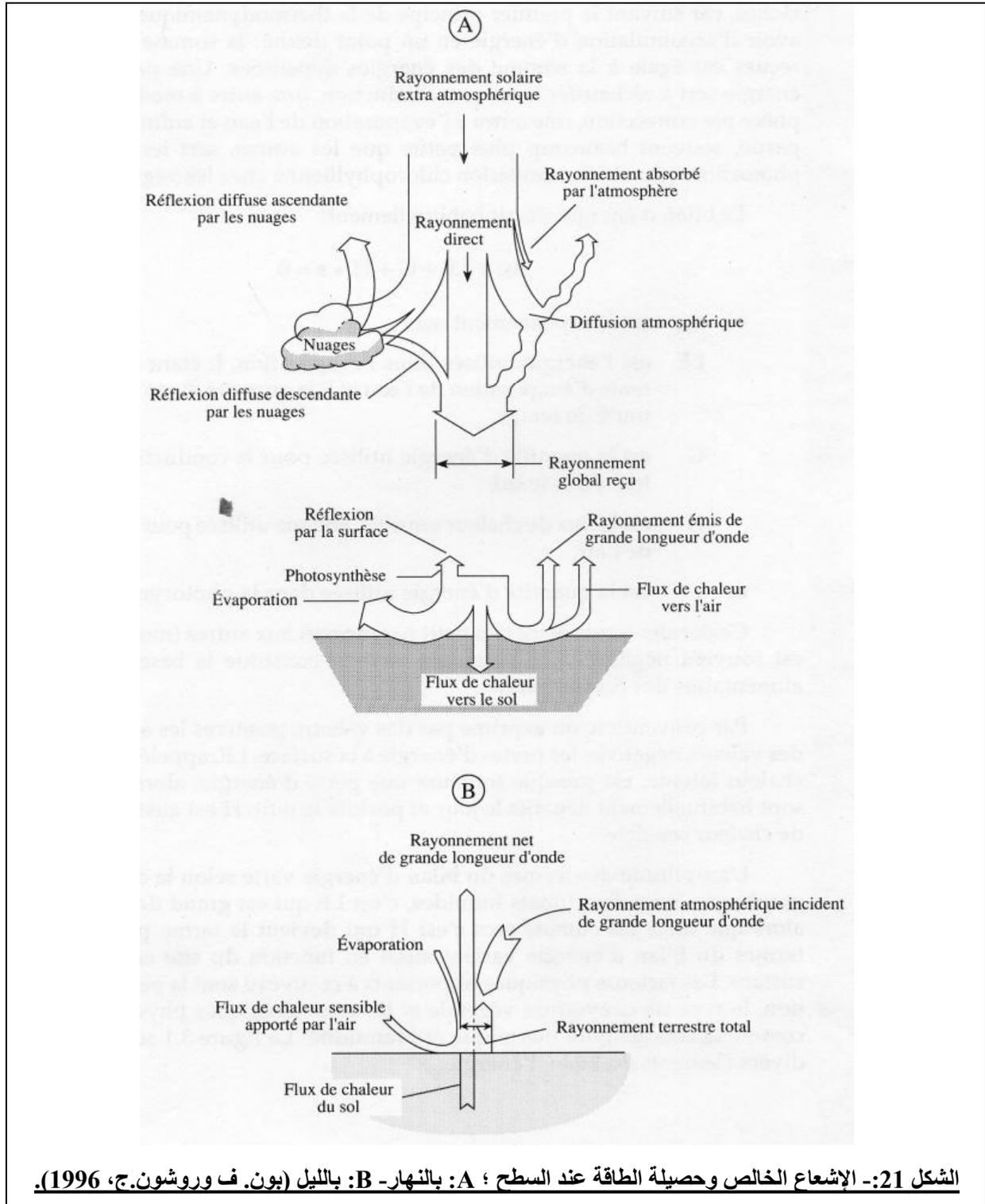
حيث: R_N : هي الإشعاع الخالص؛

LE : الطاقة المستعملة في التبخير وتسمى أيضا تدفق الحرارة الكامنة، حيث L هي

الحرارة الكامنة اللازمة لتبخير الماء و E هي كمية الماء المتبخر خلال الوحدة الزمنية؛

G : كمية الطاقة المستعملة لتوصيل الحرارة إلى الأرض؛

H : تدفق الحرارة الحساسة، وهي الطاقة المستعملة لحمل التيار الهوائي؛
s : كمية الطاقة المستعملة في عملية التمثيل الضوئي Photosynthèse. غالبا ما يكون هذا العامل الأخير أصغر بكثير من العناصر الأخرى (أقل من 1%)، لذلك عادة ما يتم إهماله في علم المناخ، بالرغم من كونه يمثل قاعدة السلسلات الغذائية للأنظمة البيئية.



الشكل 21:- الإشعاع الخالص وحصيلة الطاقة عند السطح ؛ A: بالنهار- B: بالليل (بون. ف وروشون.ج، 1996).

في الاصطلاح، يتم التعبير عن الإمداد بالطاقة بواسطة قيم موجبة بينما تمثل القيم السالبة فقدان الطاقة عند السطح. حيث يكون تدفق الحرارة الكامنة LE في الغالب الأعم عبارة عن فقدان للطاقة؛ أما G و H فعادة ما يكونان سالبين في النهار وموجبيين في الليل. يتغير مدى عناصر حصة الطاقة، تبعاً للمجال الجغرافي: ففي مناطق المناخ الرطب تكون LE أكبر من G و H بينما تصبح H العنصر الأساسي في مناطق المناخ الجاف. كذلك تتغير عناصر حصة الطاقة، تبعاً لموقع وطبيعة السطح. وتتمثل أهم العوامل الفيزيائية بهذا الخصوص في: الانحدار والتعرض للشمس ونوع الغطاء النباتي والخصائص الفيزيائية للتربة كالتوصيل الحراري والرطوبة. ويعطي الشكل 21 صورة عن مختلف عناصر حصة الطاقة.

بصمات الطيف Signatures spectrales.

جرت العادة، في مجال الاستشعار عن بعد، أن يتم تمييز السطوح الخاضعة للمراقبة والملاحظة، بواسطة سبع تأشيريات (أو توقيعات أو بصمات Signatures) هي:

- البصمة بواسطة قياس قوة الإشارة المنبعثة أو المنعكسة؛
- بصمة الطيف، المتعلقة باللون بالمفهوم الواسع؛
- البصمة الفضائية التي تعبر عن أشكال الأجسام وترتيبها؛
- البصمة الزاوية المرتبطة بتباين خواص السطح والغلاف الجوي؛
- البصمة الزمنية المرتبطة بالتغيرات التي تطرأ على السطح كنمو النباتات مثلاً؛
- البصمة من خلال استقطاب الإشارة، والتي تعرف تطبيقاتها خاصة في مجال الرادار؛
- البصمة بواسطة قياس مظهر الإشارة (Phase du signal)، والمستعملة أيضاً في مجال الاستشعار الراداري.

تعتمد دراسة بصمات الطيف على دراسة عناصر حصة الطاقة عند السطح. وتستعمل أغلب الملاحظات التي تتم في النطاق المرئي ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة، ظاهرة عكس السطح للإشعاع الشمسي، بينما في النطاق الحراري ونطاق الترددات العالية السالبة Passives، فإن ظاهرة الانبعاث الطبيعي من السطح هي التي تسود. بيد أنه

من الممكن إجراء عمليات استشعار موجب في مختلف نطاقات الطيف، من خلال إضاءة صناعية للهدف بواسطة إشعاع منبعث من اللاقط (Capteur) أو من مصدر ضوء مجاور له (مثل الرادار في نطاق الترددات العالية والليدار Lidar في النطاق المرئي ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة).

تؤثر العديد من عناصر الوسط الفيزيائي في عكس السطح للإشعاع الشمسي. وترتبط هذه العناصر بألوان الأجسام بالمفهوم الواسع، وبالشكل الهندسي للسطح وبالنشاط الحيوي في حالة سطح نباتي.

1- المظهر الطيفي ضمن نطاق الأشعة فوق البنفسجية والنطاق المرئي ونطاق

الأشعة تحت الحمراء القريبة.

في هذا المجال الطيفي، والذي عادة ما يحدد امتداده من 0.3 إلى 3 ميكرومتر، تمثل ظاهرة الانعكاس، الظاهرة السائدة بالنسبة للاستشعار عن بعد، وتستبعد بالتالي كل مظاهر الانبعاث في هذه الترددات، باستثناء حالة البراكين النشطة التي يمكن أن تبلغ خلالها حرارة السطح درجات حرارة عالية من قبيل الألف درجة مئوية، وهي حالة جد نادرة. يمكن جمع الأسطح الخاضعة لعملية الاستشعار عن بعد، في ثلاثة مجموعات رئيسية: الأسطح المعدنية كالصخور والتربة، والأسطح النباتية، والأسطح المائية.

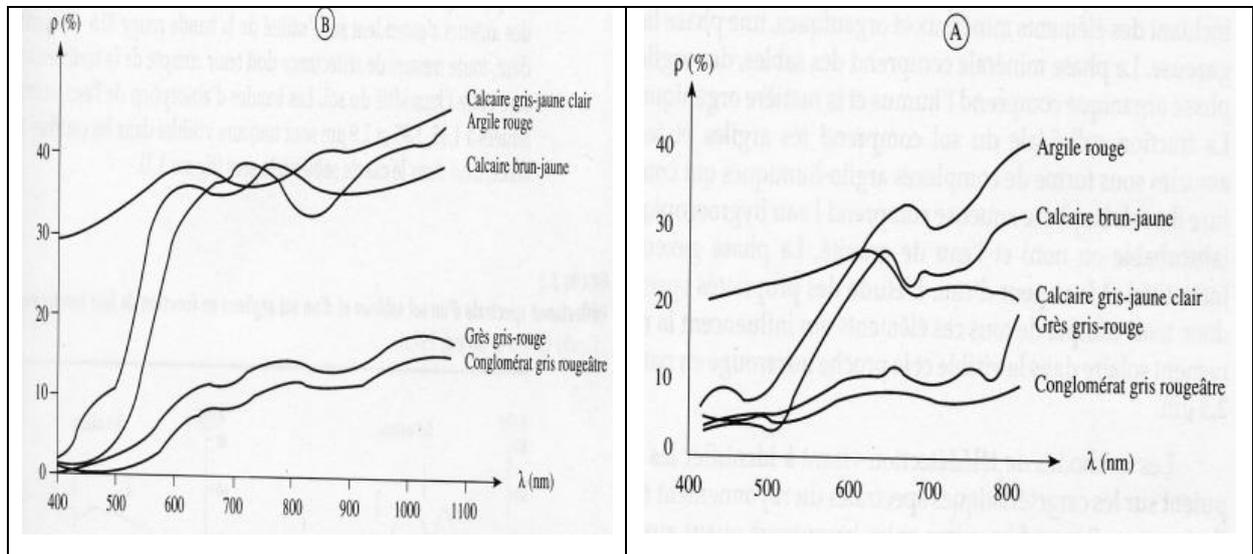
أ- الصخور والمعادن.

يرتبط السلوك الطيفي للسطوح المعدنية والصخرية (وهي خليط من المعادن)، بتركيبته الفيزيائية والكيميائية. ويتم عادة تحديد الخصائص الطيفية للمعادن في المختبر بواسطة جهاز لقياس الطيف Spectroradiomètre. وتتعلق الظواهر الفيزيائية التي تؤثر في شكل أطيف الانعكاسية، بالانتقالات الإلكترونية وباهتزازات الأيونات.

إن تواجد أيونات الحديد، والماء وأيونات الأحماض المائية Hydroxydes بالإضافة إلى التركيبة الكيميائية للمعادن المعتبرة (المعادن السيليكاتية Silicates والمعادن الكربوناتية Carbonates)، تعطي للمعادن والصخور خصائص طيفية مميزة. وتظهر

العناصر المرتبطة بالمعادن والصخور تباينات انعكاسية واضحة داخل النطاق المرئي ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة، إلا أن هذه التباينات تعود أيضا إلى حالة إعداد العينة وإلى قد العناصر والحبيبات Granulométrie. حيث ترتفع الانعكاسية في جميع أحزمة الطيف عندما يرتفع قد الحبيبات. كما يترجم تواجد الأيونات الحديدية Ions ferreux بأحزمة امتصاص خاصة بين 1.0 و 1.1 ميكرومتر وبين 1.8 و 1.9 ميكرومتر. ويبين الشكل 22 أطيف الانعكاسية لبعض الصخور المعروفة في الظروف الطبيعية من جهة وداخل المختبر من جهة أخرى.

وتجدر الإشارة إلى صعوبة الرصد المباشر، في الطبيعة، للمعادن التي لم تتعرض لتأثير العوامل الخارجية تحت الظروف المعتادة للحصول على المعطيات في مجال الاستشعار عن بعد، لأن الأسطح المكشوفة نادرة جدا بحيث نقوم في أغلب الأوقات برصد التربة التي تشكلت انطلاقا من القاعدة الصخرية المعتبرة. كما أن المناطق الصحراوية هي الأخرى تعرف تكون طلاء تجوية Patine d'altération يغير ظروف الملاحظة مقارنة بظروف ملاحظة العينات في المختبر.



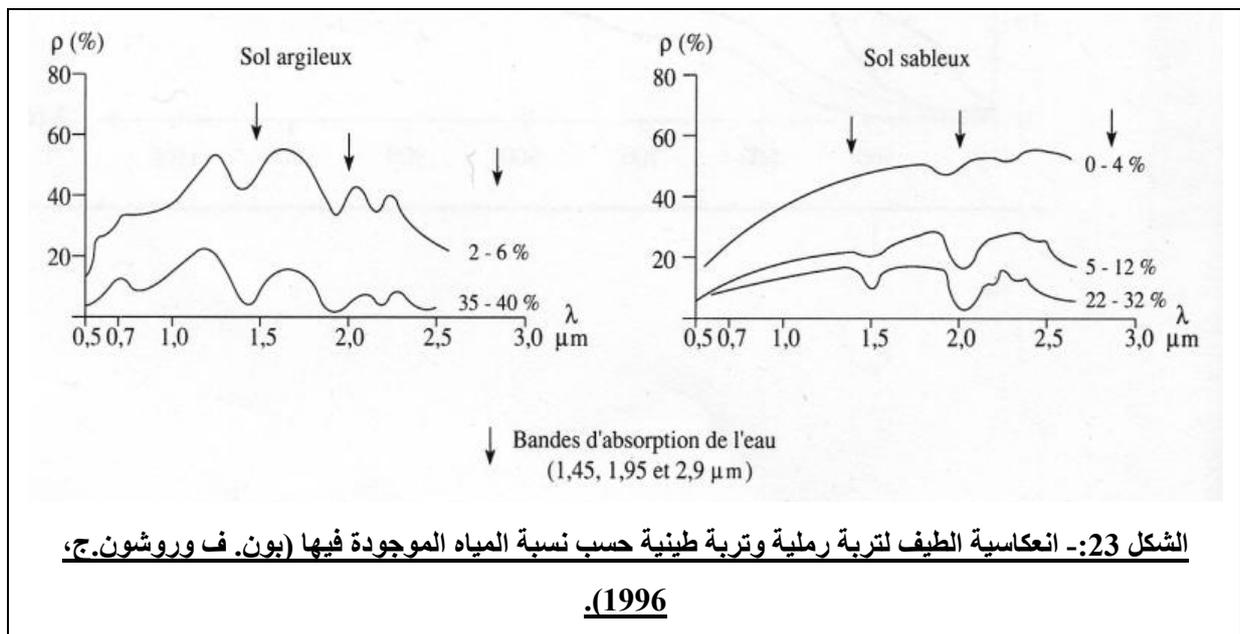
الشكل 22:- أنعكاسيات الأطياف لعدد من الصخور المعروفة ؛ A: من الطائرة - B: في المختبر (يون. ف وروشون.ج،

(1996).

ب- التربات.

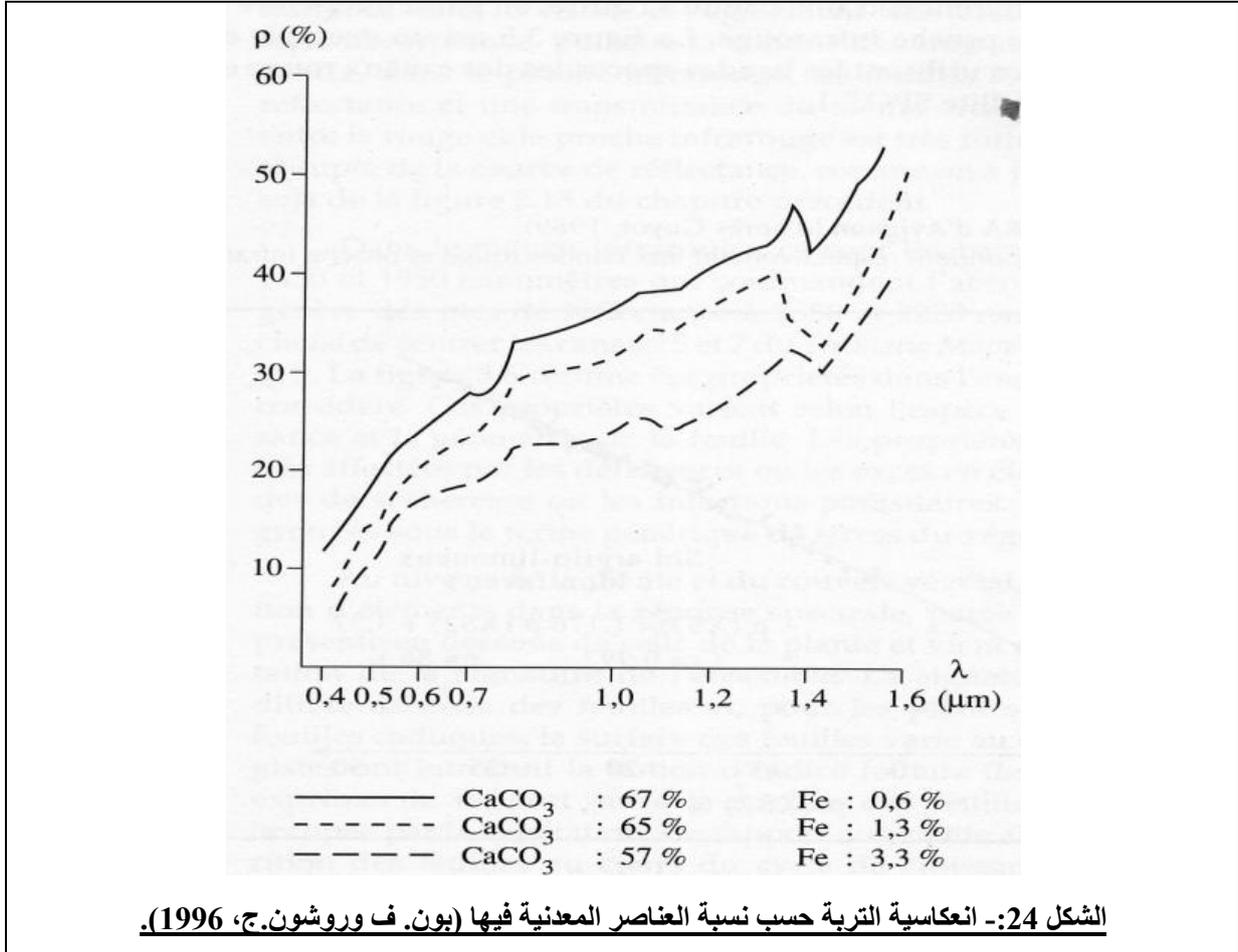
تمثل التربات وسطا معقدا غير متجانس. فهو يشتمل على قسم Phase صلب، يضم العناصر المعدنية والعضوية، وقسم سائل، وقسم غازي. ويضم الجزء المعدني الرمل

والطين والغرين، في حين يضم الجزء العضوي الذبال والمواد العضوية غير المتحللة. كما يضم القسم المائي أنواعا مختلفة من المياه. أما القسم الغازي فيضم الهواء المتواجد ضمن الفراغات بالإضافة إلى بخار الماء. وبالتالي يجب أن تأخذ دراسة الخصائص الطيفية للتربة، بعين الاعتبار، كل هذه العناصر التي تؤثر في انعكاسية الإشعاع الشمسي في النطاق المرئي وفي نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة بخاصة بالنسبة للترددات المنحصرة بين 0.5 و 2.5 ميكرومتر.



ترتكز طرائق الاستشعار عن بعد الهادفة إلى تحديد التربة على الخصائص الطيفية للإشعاع الذي تعكسه هذه التربة. وليس هناك من إجماع بين الباحثين حول الأشرطة (أو الأحزمة) الطيفية *Bandes spectrales* الأكثر ملائمة لتحديد التربة. فحسب شوكلي وزملاؤه Shockley & al (1962)، فإن قياس الانعكاسية عند 1.4، 1.75، 1.94، 2.25، 4.0، و4.5 ميكرومتر، قد يمكن من تحديد غالبية أصناف التربة بنسبة احتمال تفوق 95%. بينما يرى آخرون (كوندي Condit، 1970)، أن أطوال الموجات الأكثر ملائمة هي 0.45، 0.54، 0.64، 0.74، و0.86 ميكرومتر. وتقترب هذه القيم الأخيرة من القنوات المستعملة على الأقمار لاندسات، بالرغم من كون أحزمة لاندسات أكبر بكثير، حيث يغطي كل حزام حوالي 0.1 ميكرومتر. إلا أن أغلب الباحثين والمؤلفين يتفقون على أهمية

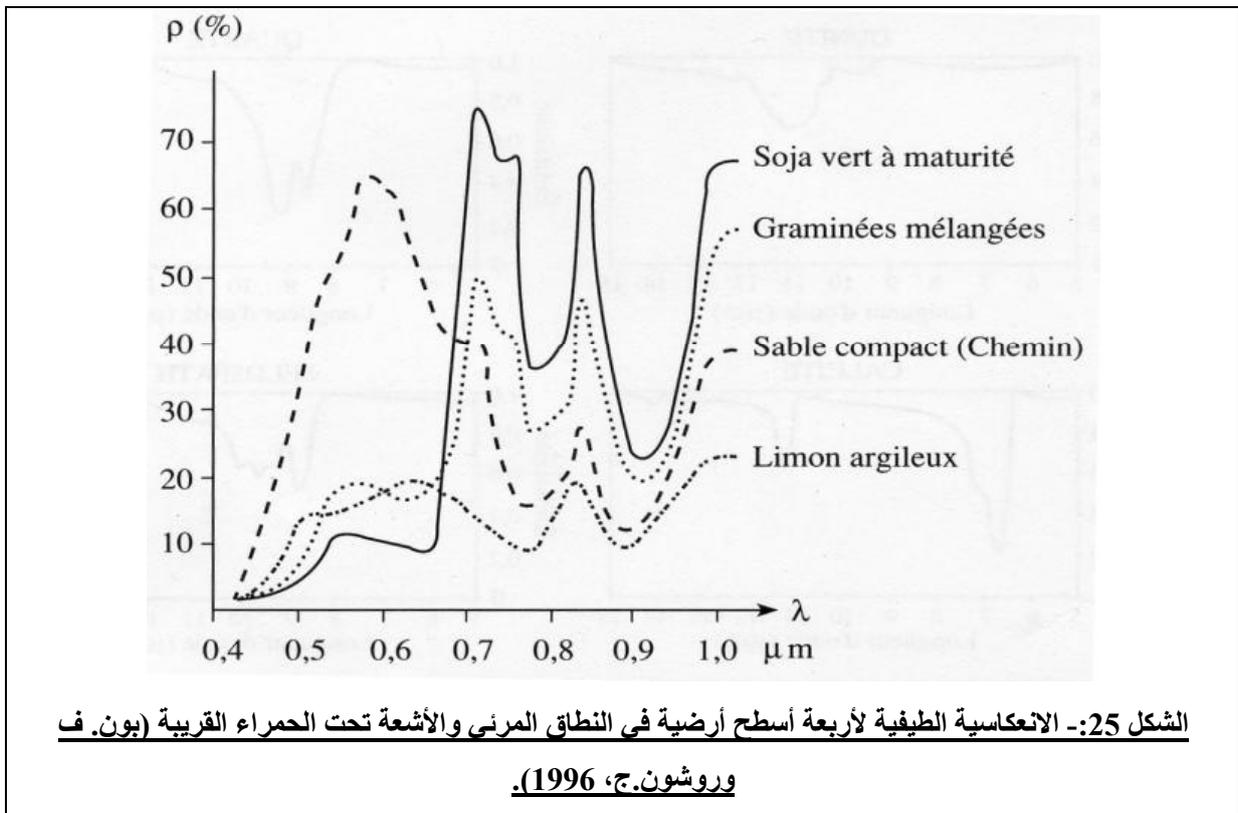
الحزام الأحمر (0.6 – 0.7 ميكرومتر). ومع ذلك يجب أن يأخذ كل قياس للانعكاسية بعين الاعتبار، نسيج التربة وبنيتها ورطوبتها. تظهر أحزمة امتصاص الماء بخاصة تلك المتواجدة عند 1.45، 1.95 و 2.9 ميكرومتر، على منحنيات الانعكاسية إلا في حالة الرمال الجافة جدا (الشكل 23).



لكن الملاحظ أن هناك فرقا بين القياسات التي تمت في الميدان وبين تلك التي أجريت في المختبر. ففي الميدان تظهر انعكاسية الرمل أعلى من انعكاسية الطين، بينما نسجل العكس داخل المختبر. ويمكن أن يرجع ذلك إلى كون حالة الطين الذي يظهر في الميدان على شكل مجموعات Agrégats تخلق خشونة ظاهرة Rugosité apparente أعلى من خشونة الرمل. وبالتالي تكون الحالة البنيوية للتربة أهم من نسيجها (جيرار وجيرار، 1975). هذه العناصر كلها تدعو إلى الحذر في حالة استغلال القياسات المخبرية في تفسير ظاهرة ميدانية انطلاقا من مرئية فضائية.

إن نسبة العناصر المعدنية داخل التربة تؤثر في بصمات الأطياف. ويبين الشكل 24 منحنيات الانعكاسية لنفس الصنف من التربة لكنه يحتوي على نسب مختلفة من كاربونات الحديد. كما أن نسبة العناصر المعدنية تضاف إليها نسبة المواد العضوية (الذبال)، تؤثر على اللون وعلى الحرارة الخاصة وعلى القدرة على الاحتفاظ بالأشياء Capacité de rétention وعلى قدرة الكاتيونات على التبادل وعلى بنية مقاومة التعرية.

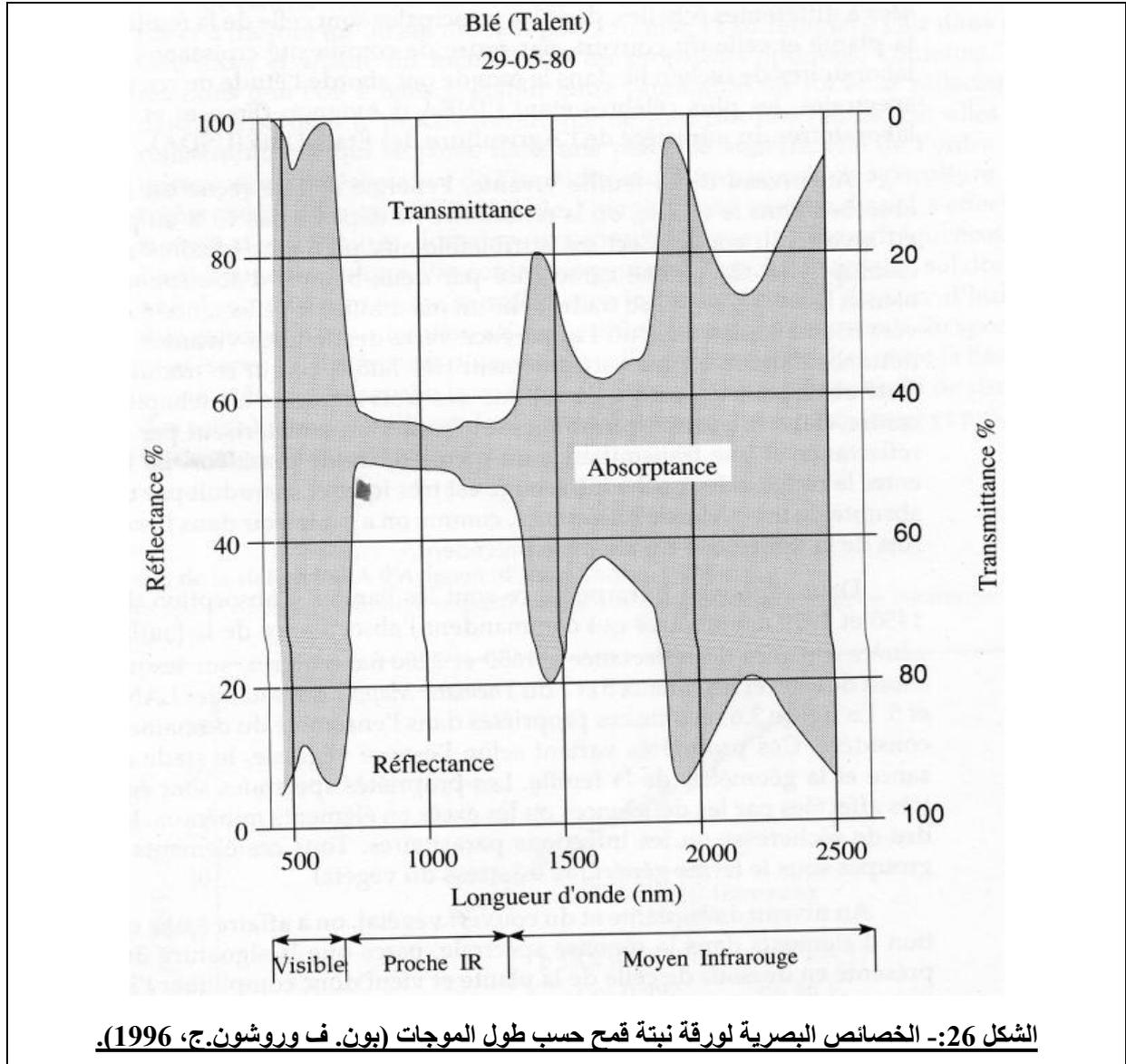
ج- النباتات



يختلف السلوك الطيفي للنباتات نسبيا عن سلوك التربات وسلوك الصخور. لكون النباتات تعتبر وسطا مركبا ومعقدا يتغير مع الزمن، وتختلف الخصائص الطيفية حسب الفصول وحسب أطوار نمو النبتة. وقد أجريت دراسة الخصائص الطيفية للنباتات على مستويات أهمها - حسب درجة التعقيد تصاعديا - الدراسة على مستوى الورقة وعلى مستوى النبتة ثم على مستوى الغطاء:

- على مستوى الورقة الحية، يتم امتصاص الطاقة الشمسية الوافدة بقوة ضمن النطاق المرئي، حيث لا تتجاوز الانعكاسية 15% خصوصا في نطاق اللون الأحمر. ويعود ذلك إلى الصبغات الورقية كالكليخضور Chlorophylle الذي يمتاز بوجود حزامين للامتصاص في الأزرق والأحمر، الأمر الذي يترجم بانعكاسية قصوى في الأخضر (0.550 ميكرومتر)، لذلك تبدو الأوراق الحية خضراء اللون. كما تكون التوصيلية Transmittance ضعيفة جدا في النطاق المرئي، وهذا يفسر قوة الامتصاصية (لأن مجموع الامتصاصية والانعكاسية والتوصيلية يساوي 1)؛
- في نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة، تتميز الأوراق بانعكاسية عالية وتوصيلية من نفس المستوى. ويتم الانتقال من اللون الأحمر إلى نطاق الأشعة تحت الحمراء بقوة تتميز بانحدار قوي لمنحنى الانعكاسية كما هو مبين في الشكل 25 بالنسبة للصويا Soja؛
- في نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة، تتحكم أحزمة الامتصاص الخاصة بالماء (1.45 و 1.95 ميكرومتر) في امتصاصية الأوراق فينتج عن ذلك قمتين على منحنى الانعكاسية عند 1.65 و 2.20 ميكرومتر والذين تم اختيارهما لتركيز القناتين 5 و 7 للاقط الخرائط الموضوعاتية Thematic Mapper للقمرين الصناعيين لاندسات4 ولاندسات5 عليهما. ويلخص الشكل 26 هذه الخصائص في مجموع هذا المجال الطيفي. وتختلف هذه الخصائص حسب، نوع النبات و طور النمو والشكل الهندسي للورقة. كما تتأثر هذه الخصائص كثيرا بالنقص أو الزيادة في العناصر المعدنية، وبفترات الجفاف أو بالإصابة بالطفيليات؛
- على مستوى النبتة والغطاء النباتي، نشهد تضافر مجموعة من العناصر في الإجابة الطيفية لأن التأشير الأرضية تتم أسفل من النبتة وتزيد من تعقيد العملية التفسيرية لبصمة الجميع. كما تختلف بصمة الجذع والجذور عن بصمة الأوراق، وبالنسبة للنباتات السنوية والأشجار التي تعرف تساقطا لأوراقها، فإن مساحة الأوراق تختلف من وقت لآخر خلال نفس العام. وقد أدخل علماء الأحياء مفهوم مؤشر الإبراق Indice foliaire للتعبير عن النسبة بين مساحة الورقة ومساحة الميدان الذي تغطيه

النباتات. حيث تزداد قيمة هذه النسبة مع زيادة ظهور الأوراق في إطار دورة النمو، وتؤثر بالتالي على طيف انعكاسية النبتة. يعتبر مؤشر الإبراق مؤشرا على نمو النباتات، لذلك غالبا ما يستعمل في المجال الزراعي للتنبؤ بالمحاصيل؛



- بما أن الأوراق الحية تمتص الأحمر وتعكس الأشعة تحت الحمراء القريبة، فقد طور كثير من الباحثين مؤشرات تجمع، على درجات مختلفة، بين انعكاسية الأشعة الحمراء والأشعة تحت الحمراء، لقياس كمية النباتات فوق ميدان معين، ومحاولة الحصول على مؤشر إبراق تقريبي. وتمثل النسبة بين الأشعة تحت الحمراء والأشعة الحمراء أبسط هذه المؤشرات والذي يدعي في بعض الأحيان مؤشر الكتلة الحية

Indice de Biomasse أو مؤشر النباتات Indice de végétation، وهو مؤشر جد حساس للظروف المحلية، كلون التربة (أو الأرض Sol) على وجه الخصوص. لذلك غالبا ما يتم استعمال مؤشرات نباتات تسعى إلى الحد من تأثير التربة (أو الأرض)، من خلال تحويلات رياضية معينة. وقد تم تطوير عدد كبير من هذه المؤشرات انطلاقا من قيم رقمية لمرئيات توفرها الأقمار الصناعية التي تقوم بمراقبة كوكب الأرض. وتمثل دراسة الخصائص الطيفية للنباتات حاليا، قطاعا نشطا جدا، بسبب ظهور أجهزة حديثة لقياس الطيف Spectromètres imageurs، وهي جيل جديد من أجهزة الالتقاط التي من شأنها الاستفادة من الثروة المعلوماتية التي توفرها الدقة الطيفية الكبيرة Résolution spectrale بالنسبة للتحليل النباتي، بخاصة على مستوى الأمراض والأشكال المختلفة للإجهاد Stress؛

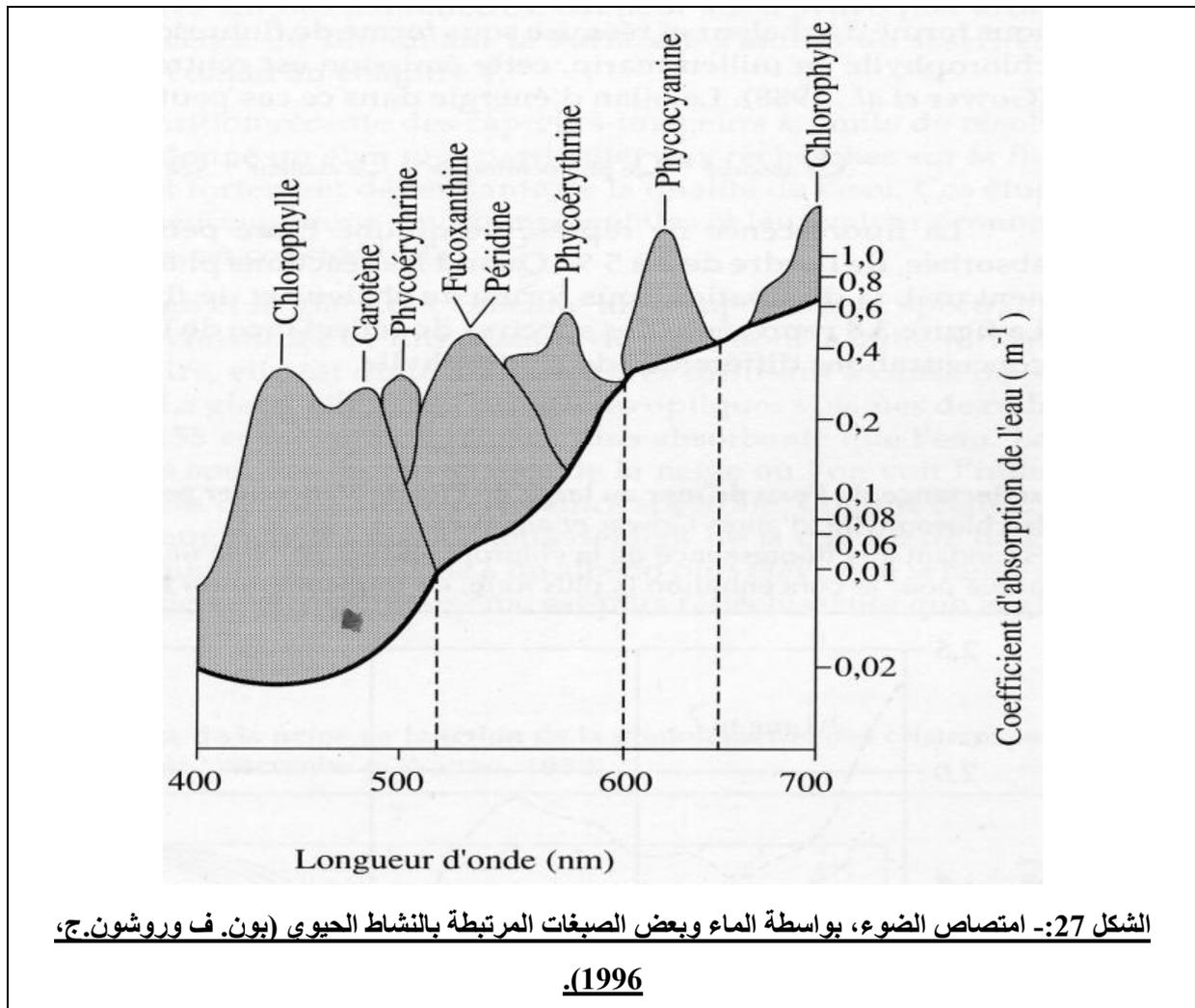
- تهتم الدراسات الحديثة، على التحليل المفصل لمنحنى الانعكاسية الطيفية، بالخصوص على مستوى شكل الانتقال بين الأشعة الحمراء والأشعة ما تحت الحمراء، وعلى مستوى انتقاله حسب ظروف الإجهاد أو نسبة اليخضور. بينما تهتم دراسات حديثة أخرى، في النطاق المرئي ونطاق الأشعة تحت الحمراء الحديثة، بدراسة "تضوء" (فلورة Fluorescence) واستقطاب الغطاء النباتي.

د- الماء والثلج والجليد.

تتميز الخصائص البصرية للماء بشكل كبير حسب الحالة التي يكون عليها (الماء السائل أو الماء في الحالة الصلبة).

*/- سنبدأ أولا بالخصائص الطيفية المتعلقة بالماء السائل. حيث تتحدد بصمة الماء من خلال بصمة جزيئات الماء (الماء الخالص)، وبصمة المكونات الذائبة أو العالقة، كالجسيمات أو الطحالب أو المواد العضوية. ويتعرض جزء من الإشعاع الشمسي، الذي يصل إلى سطح الماء، للانعكاس بشكل متناظر، بينما يتعرض الجزء الآخر للانكسار فيدخل داخل الكتلة المائية، حيث يتعرض جزئيا للامتصاص والانتشار. ويخفت الإشعاع المنكسر تدريجيا مع زيادة العمق بشكل أسي Exponentiel.

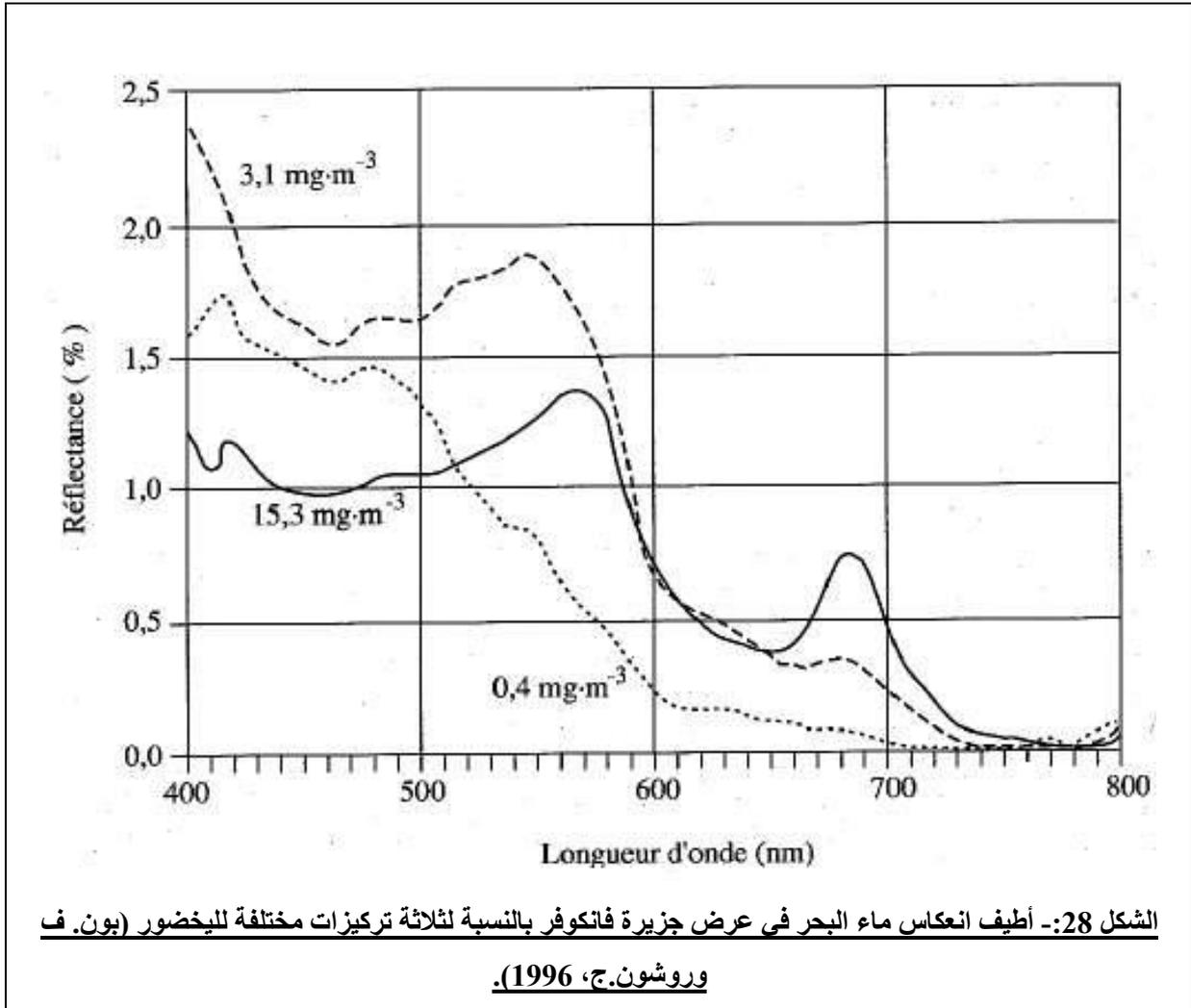
ويكتسي الجزء المتعرض للانتشار أهمية بالنسبة للموجات التي يقل طولها عن 5.0 ميكرومتر، الأمر الذي يفسر اللون الأزرق للماء الخالص.



يمثل الشكل 27 التغيير الطيفي لامتناس الماء في النطاق المرئي، مع تراكم لأحزمة امتصاص بعض الصبغات pigments الشائعة، والمرتبطة بالنشاط الحيوي للماء. ويمكن إجمال العناصر التي تتدخل أكثر في الخصائص البصرية للماء في: اليخضور، يضاف إليه البلاكتون النباتي Phytoplankton؛ الجسيمات غير اليخضورية كالمواد المعدنية العالقة والمادة العضوية الذائبة المسماة أيضا المادة الصفراء.

لقد تم الاشتغال على أحزمة طيفية ذات دلالة لبعض الصبغات كاليخضور الذي يشتمل على قمتي امتصاص عند 0.43 و 0.68 ميكرومتر، بنفس الطريقة التي تم من خلالها تطوير مؤشرات للنباتات فيما يتعلق بمعطيات استشعار المسطحات الأرضية. حيث تم وضع

عدة مؤشرات لقياس تركيز اليخضور ونسبة المواد العالقة داخل الكتلة المائية، من خلال الانتشار المعاكس *Rétrodiffusion* للضوء بواسطة الماء. وهي عملية نمذجة غير بسيطة، لأن الإشارة التي يستقبلها اللاقط فوق السطح المائي، تصدر عن مصادر متعددة: الإشعاع الذي تعكسه صفحة الماء، الإشعاع الذي تعيد كتلة الماء نشره، الإشعاع المنعكس على القعر، بعد ما قامت كتلة الماء بتوصيله والذي يتعرض لتوصيل جديد باتجاه اللاقط.



يعتبر "التضوء" هو الآخر ظاهرة نشطة مرتبطة بالنشاط اليخضوري للبلانكتون النباتي. وتستعمل الطاقة الضوئية الممتصة من طرف صبغات التمثل الضوئي، في التفاعلات الفوتوكيميائية للتمثل الضوئي حيث يتم إصدار عنصر الأكسجين وتثبيت عنصر الكربون، كما يتم توزيع هذه الطاقة على شكل حرارة أو تتم إعادة انبعاثها على شكل

"تضوء". ويتمركز هذا الانبعاث بالنسبة لليخضور في الوسط البحري حول 0.685 ميكرومتر (الشكل 28).

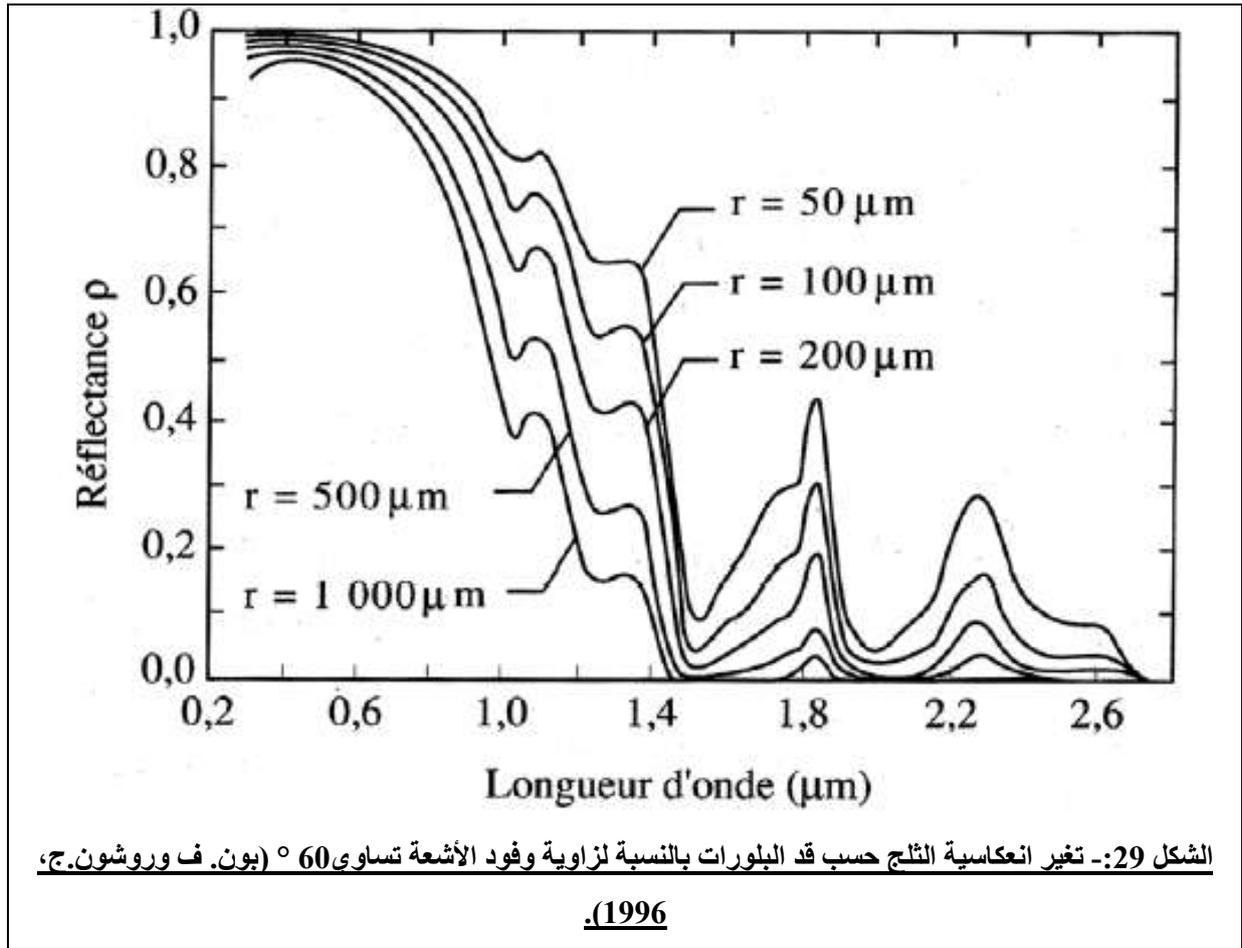
إن "التضوء" لا يمثل إلا جزءا يسيرا من الطاقة الممتصة (في حدود 2 إلى 5%). وعندما لا تعمل التفاعلات الفوتوكيميائية بشكل جيد، يرتفع توزيع الطاقة، على شكل حرارة أو على شكل "تضوء".

ويمكن بالتالي استخدام "التضوء" كمؤشر على النشاط الفوتوكيميائي، من خلال مقارنة الانعكاس في نطاق اللون الأزرق، الذي يشير إلى الكمية الإجمالية لليخضور، بالتضوء ضمن حزام ضيق متمركز حول طول الموجات 0.685 ميكرومتر.

كما أنه بالإمكان القيام بتحفيز عملية التضوء اصطناعيا من خلال إضاءة السطح بواسطة جهاز ليزر.

وقد أعطى ظهور أجهزة الالتقاط التصويرية Capteurs-imageurs حديثا دفعة خاصة للأبحاث المتعلقة بالتضوء، والمرتبطة بشكل كبير بجودة المياه. وتحتل هذه الدراسات موقعا مركزيا في الانشغالات البيئية، كما أن قيمتها الاقتصادية في مجال الصيد البحري ذات أهمية كبيرة.

*/- لكل من الثلج والجليد سلوك طيفي خاص. فالثلج يتكون من بلورات دقيقة من الجليد يتراوح قدها بين 50 ميكرومتر و 1 ميلمتر، فهو يشكل بالتالي وسطا جد ناشر للإشعاع، بسبب بنيته الحبيبية. أما الخصائص لبصرية للجليد فقريبة من خصائص الماء السائل، باستثناء المجال المحصور بين 1.55 و 1.75 ميكرومتر. ويبين الشكل 29 أطياف انعكاسية الثلج، حيث يظهر تأثير حجم أو قد البلورات على الانعكاسية الطيفية. وبما أن حجم البلورات يتجه باتجاه الزيادة مع شيخوخة الطبقة الثلجية، فإن معيار الانعكاس (الألبيدو) يكون أقوى في حالة طبقة ثلجية طرية، منه في حالة طبقة حبيبية أو في حالة ثلج حبيبي La neige de névé التي تكون بدورها أكثر انعكاسية من الجليد.



وكما هي الحال بالنسبة للغطاء النباتي، فإن نسبة الغطاء الثلجي تؤثر في انعكاسية السطح. ويصعب في بعض الحالات التمييز بين الثلج وبين السحب في مرئية فضائية، لكون الاثنين لهما بصمتين طيفيتين متقاربتين في النطاق المرئي ونطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة إلى غاية 1.1 ميكرومتر. لكن يمكن التمييز بين الثلج وبين سحب "السيروس" Cirrus المتكونة من بلورات جليدية ضمن نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة بين 1.55 و 1.75 ميكرومتر، لكون بلورات هذه السحب أصغر من بلورات الثلج، الأمر الذي يجعل لها انعكاسية أكبر. ونفس الأمر ينطبق على السحب الركامية Cumulus والسحب الطباقية Stratus، الأكثر سمكا والتي تتوفر على قطيرات مائية ذات انعكاسية أعلى من انعكاسية الجليد في نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة.

لقد أصبح الاعتراف بدور الثلج والجليد في التغيرات المناخية على صعيد الكوكب يتزايد أكثر فأكثر. حيث أصبح موضوع دراسات خاصة ضمن برامج دولية لدراسة

التغيرات على المستوى العالمي. فالغلاف الجليدي يمثل في نفس الوقت شاهدا متميزا على التطورات المناخية ومثبنا Tampon طاقيا وحراريا بواسطة الحرارة الكامنة لذوبان الجليد.

2- نطاق الأشعة تحت الحمراء الحرارية.

لفهم آليات التفاعل بين السطح وبين الإشعاع تحت الأحمر الحراري، تجب معرفة دلالة حرارة السطح والتغيرات الطيفية للانبعائية ودور عامل الزمن في تغيرات الحرارة.

أ- دلالة درجات حرارة السطح الأرضي.

بالنسبة للاستشعار الحراري، يتم قياس الإشعاع الحراري الصاعد. ونستطيع استنتاج حرارة جسم أسود وحرارة للسطح، في حالة معرفتنا بالانبعائية. تنتج حرارة السطح المرصودة من خلال القياس الحراري Thermographie ، عن مجموعة من تبادلات الطاقة تحدث فوق وتحت السطح الأرضي. وعادة ما تقترب من حرارة الهواء المجاور للسطح، و توحى الفروق الدقيقة بين هاتين الحرارتين بالظروف المائية والحيوية قريبا من السطح. حيث يرصد اللاقط، فوق سطح مكسو بالنباتات، إشارة هي خليط من الانبعاث الصادر عن الأوراق والانبعاث الصادر عن التربة. وفي الجو الصحو عادة ما يكون سطح التربة المستقبل لأشعة الشمس أسخن من الهواء أثناء النهار، لكنه يصبح أبرد من الهواء طيلة الليل، نتيجة لفرق الطاقة المشعة باتجاه سماء صافية.

وانطلاقا من العلاقات والصيغ الرياضية التي تسمح بمقارنة تطور حرارة السطح وحرارة الهواء حسب الظروف المناخية. يمكن القول، عموما، إن الفرق بين الحراريتين يتغير بشكل خطي مع الإشعاع وفي اتجاه معاكس للقيمة المطلقة للننتج Evapotranspiration (التي تكون سالبة أثناء النهار). أي أن من شأن تبخر قوي أن يخفض حرارة السطح مقارنة بحرارة الهواء. كما يتغير الفرق بين حرارة السطح وبين حرارة الهواء، في عكس اتجاه سرعة الرياح ودرجة الحرارة المحيطة. حيث أن فارق الحرارة – في حالة قيمة ثابتة للتبخر – سيكون أضعف في حالة طقس عاصف منه في حالة

طقس هادئ. كما أن أوراق غطاء نباتي تعتبر مبخرا فعالا، تبقى حرارته، على العموم، أقل من حرارة التربة المكشوفة وقريبة من حرارة الهواء.

وبالتالي فلو قمنا بعكس المثال انطلاقا من قياسات حرارة السطح بواسطة الأقمار الصناعية، فإنه بالإمكان التوصل إلى تقييم التبخر والحرارة "الحساسية" Chaleur sensible، الأمر الذي يسمح بتعميم عدد من المتغيرات المؤثرة في المحصلة المائية على الصعيد الإقليمي.

تعتبر حرارة الأوراق أيضا مؤشرا على نسبة الماء المتواجد في الجذور، وهي نسبة تتحكم في وتيرة التبخر وتتحكم بالتالي في وتيرة تبرد الأوراق. وقد تمت معاينة وجود علاقة تناسبية في وسط النهار، بين الفارق الموجود بين حرارة الأوراق وحرارة الهواء، وبين نسبة المياه المتواجدة في الجذور. ويمكن بالتالي استخدام هذا الفرق بين الحرارتين في بعض الحالات لتقييم رطوبة التربة، خصوصا في المناطق شبه الجافة بالنسبة لزراعات مسقية كاسية للتربة. أما في حالة تغطية متوسطة للسطح، فإننا نلاحظ حرارة متوسطة بين حرارة التربة المكشوفة، وبين حرارة أوراق النباتات.

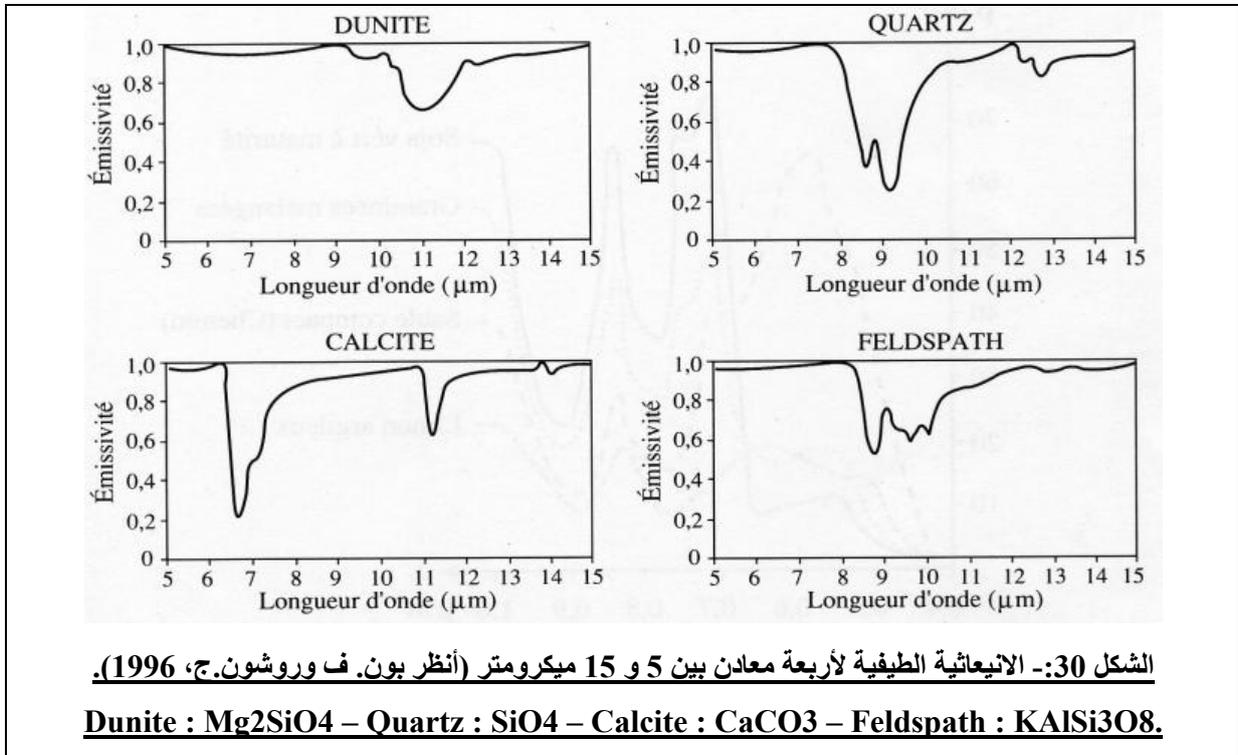
وتنعكس هذه الظواهر أثناء الليل، بسبب فقد السطح الأرضي للطاقة، بحيث يكون الإشعاع الخالص سالبا.

لقد بدأت دراسة المسطحات المائية بواسطة القياسات الحرارية منذ فترة طويلة. حيث يسهل قياس درجة حرارة سطح مائي لكون انبعاثية الماء قريبة من 1. وتمثل درجة حرارة السطح المائي مؤشرا جيدا بالنسبة للتيارات المائية، لكون اختلاط الكتل المائية المختلفة الحرارة يتم ببطء شديد. وبالتالي نستطيع من خلال تتبع فروق حرارة السطح، أن نتتبع بشكل جيد حركات الكتل المائية، التي لا نبصرها بالعين المجردة أو في مجالات طيفية أخرى.

ومن بين التطبيقات العملية في الوسط المائي يمكن أن نذكر التتبع الفضائي للتدفقات Effluents الصناعية الساخنة، خصوصا تدفقات المياه الصادرة عن المنشآت النووية، أو الدراسات المتعلقة بالدينامية النهرية في سافلة نقط التقاء الأنهار، خصوصا منها ما يهتم بدراسة مشاكل التلوث والتهئية. بالإضافة إلى تتبع حرارة الكتل المائية المحيطية بواسطة الأقمار الصناعية في مجال الصيد البحري، الذي يسمح بتحديد مواقع جبهات

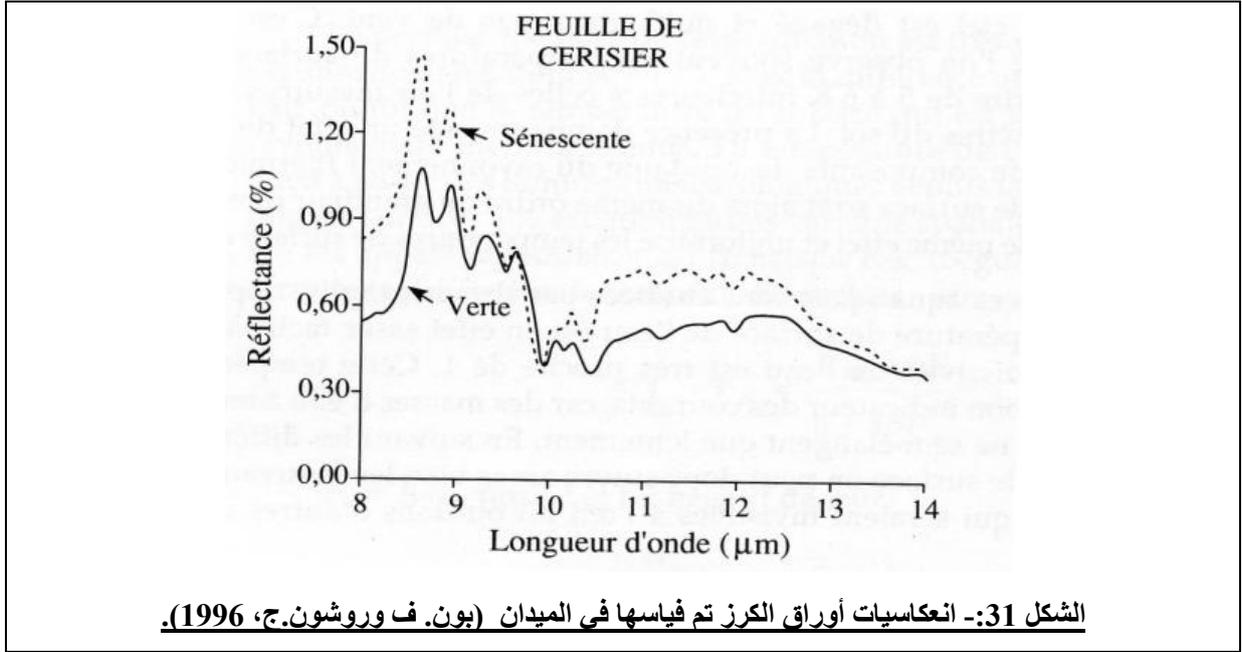
التماس بين الكتل المائية الغنية بالبلانكتون وبالأسماك. وتحديد أماكن الأعاصير القوية. وتكون النتائج أفضل عندما نقرن بين المعطيات الحرارية بالمعطيات المحصل عليها ضمن النطاق المرئي، خصوصا عند استعمال أحزمة حساسة لتضوء اليخضور. تعتبر حرارة سطح المحيطات ذات أهمية كبيرة بالنسبة لدراسة الطقس والمناخ، بسبب الدور الذي تلعبه في عملية التبخر وفي تكون الأعاصير. لذلك فإن لتتبعها من خلال عملية الاستشعار عن بعد، أهمية كبيرة في دراسة التغيرات المناخية.

ب- التغيرات الطيفية للانبعائية.

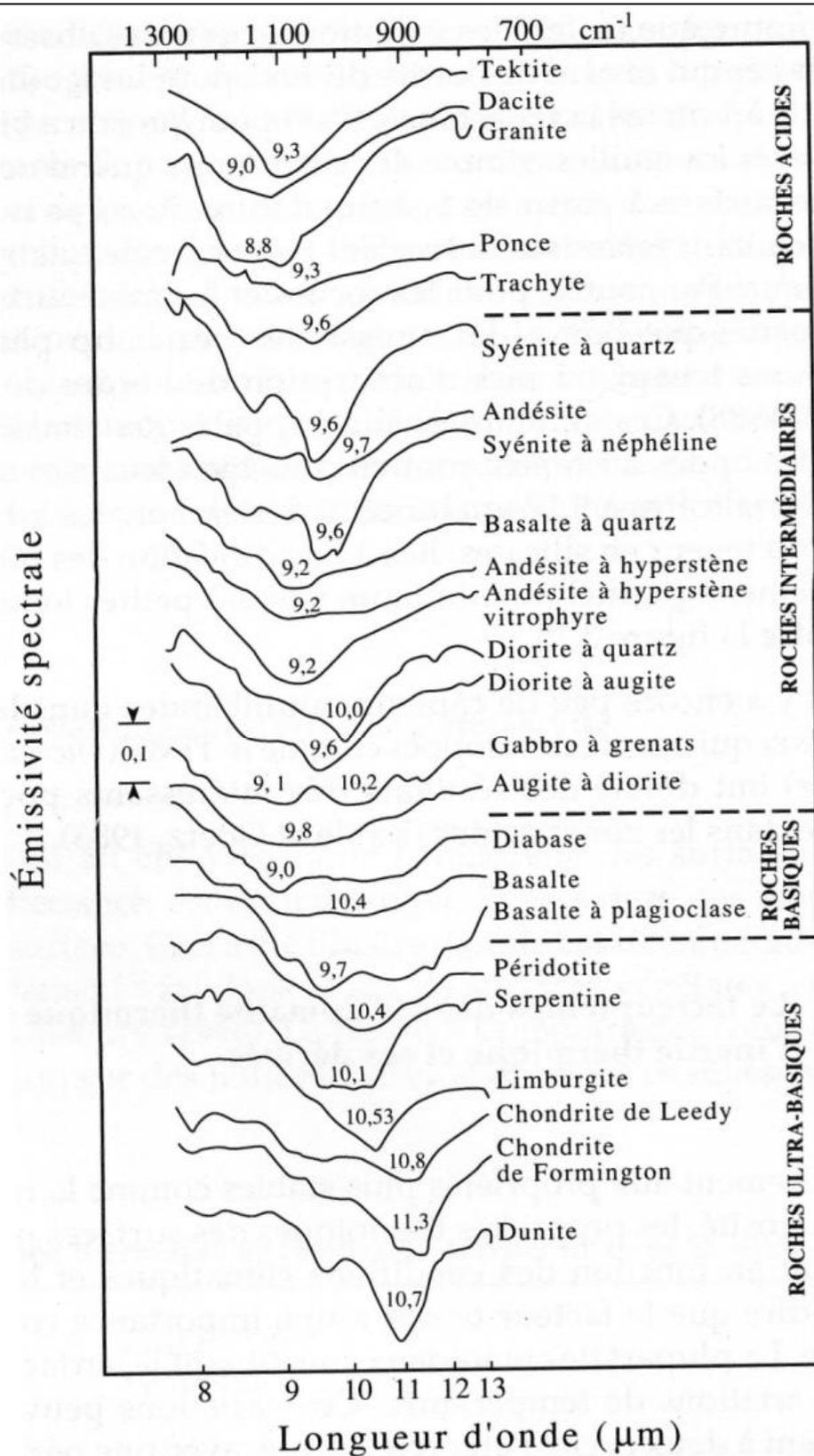


تعتبر انبعائية المسطحات الطبيعية، مثلها مثل الانعكاسية، خاصية مميزة لطبيعة المواد المكونة لهذا السطح. يبين الشكل 30 صفة هذا الأمر بالنسبة لعدد من المعادن. وقد بين سليبوري Slibury (1986)، أن الأمر يصح كذلك بالنسبة للأسطح النباتية. ويبين الشكل 31 منحنيات الانعكاسية بين 8 و 14 ميكرومتر على أوراق خضراء وأوراق ذابلة لشجرة الكرز. حيث يتضح أن انبعائية أوراق النباتات في نطاق الأشعة تحت الحمراء الحرارية غالبا ما تكون في حدود 99%. بينما يختلف الأمر بالنسبة للصخور والمعادن

التي تتميز بانبعائية متنوعة، تتميز بوجود قيم انبعائية دنيا محلية (أو قمم امتصاصية) في حدود 0.5 في بعض الحالات. والتي تعرف بالموجات في حالة استراحة، وهي مناطق محددة طيفيا بشكل جيد (9.17 ميكرومتر بالنسبة للسيليكات و 11.40 ميكرومتر بالنسبة للكربونات). ويبين الشكل 32 أن الزيادة في نسبة السيليكات المرتبطة بزيادة حمضية الصخور، تترجم بانتقال تدريجي لهذه القيمة الدنيا باتجاه الموجات القصيرة.



إن عدد أجهزة الالتقاط المتعددة الأحزمة ما زال ضعيفا بالنسبة للمجال الحراري، لكن تلك التي تم تطويرها حتى الآن، كالماسح الحراري المتعدد الأطياف للأشعة تحت الحمراء (TIMS (Thermal Infrared Multispectral Scanner) قد أعطت نتائج هامة جدا فيما يتعلق بالتمييز بين الصخور في المناطق الجافة.



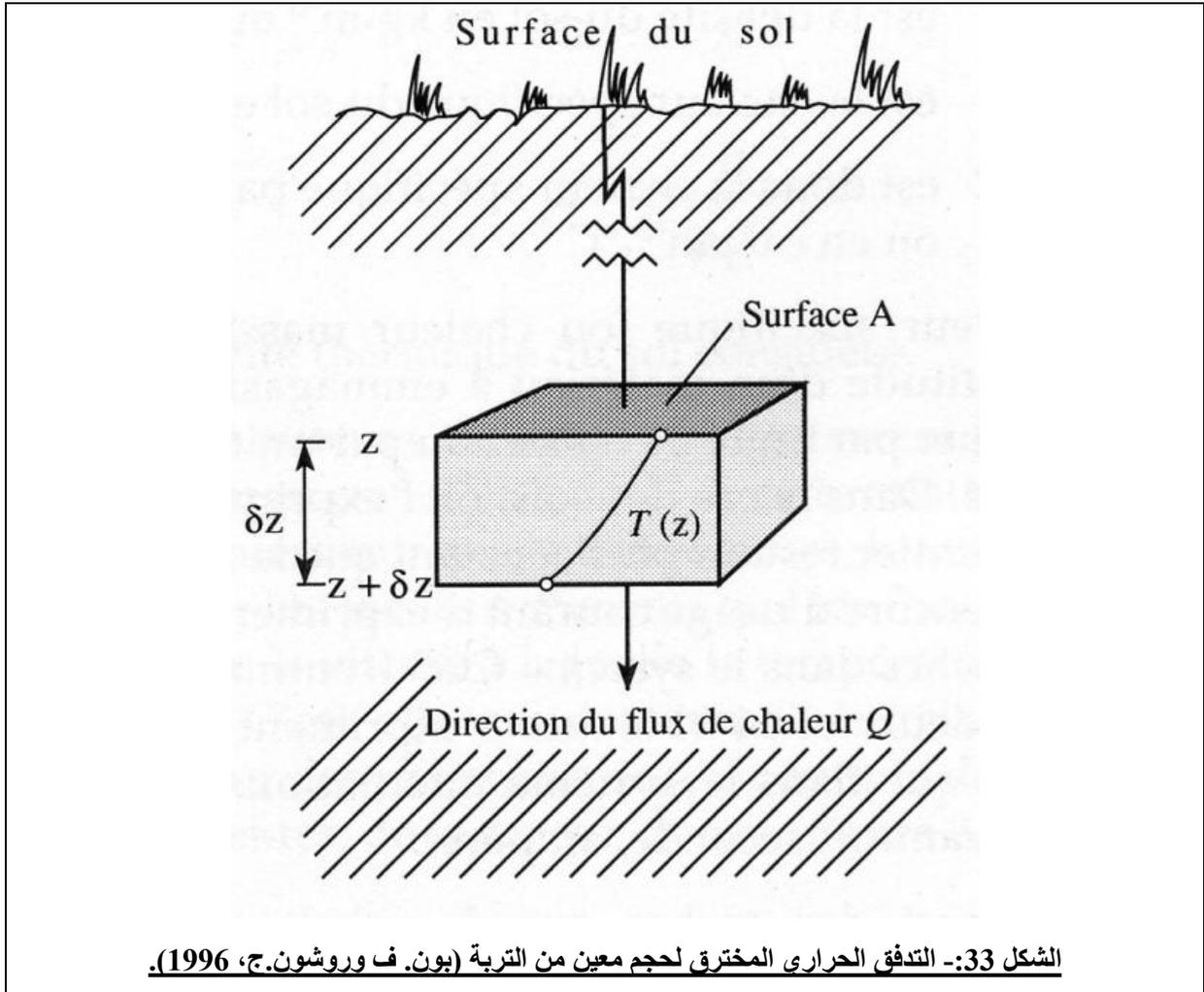
الشكل 32:- الانبعاثية الطيفية للصخور حسب نسبة السيلييس (SiO₂) (بون. ف وروشون. ج، 1996).

ج- عامل الزمن في المجال الحراري: السكون (أو القصور) الحراري وما

ينحدر عنه.

على العكس من الخصائص البصرية الأكثر ثباتا واستقرارا كالانعكاسية والانبعاثية وخشونة السطح فإن الخصائص الحرارية للأسطح الطبيعية تتغير باستمرار تبعا للظروف المناخية والمائية للحظة، أي أن لعامل الزمن أهمية كبيرة في عملية التمثيل البياني للحرارة Thermographie. وتخضع أغلب المواد المكونة لسطح الأرض لتغيرات حرارية، يمكن ردها بالأساس إلى حلقتيين أو دورتيين Cycles : حلقة نهائية Diurne (24 ساعة = T) ودورة سنوية (365 يوما = T).

وهكذا تصبح معرفة الخصائص الحرارية للمواد الأرضية، ضرورية لفهم كيف أن درجات حرارة السطح، تمثل مؤشرات على ظروف الوسط، غير منظورة بالعين المجردة، كرتوبة التربة أو المعدنية (أو العيدانية Minéralogie).



الشكل 33:- التدفق الحراري المخترق لحجم معين من التربة (بون. ف وروشون.ج، 1996).

تكتسي الخصائص الحرارية للتربات والصخور أهمية كبيرة في مجال الاستشعار الفضائي لكونها تحكم حرارة السطح الذي يتم رصده عن بعد، كما أنها تمثل مؤشرات على مظاهر فيزيائية أخرى كنسبة الماء أو المعدنية. وسنعرض في فقرات هذا المقطع أهم العناصر Paramètres الحرارية للتربات انطلاقاً من تحليل التدفق الحراري عمودياً، مع افتراض أن التبادلات الحرارية إنما تتم عمودياً بواسطة الحمل ودون أن تصحب ذلك حركات الماء.

لو أخذنا حجماً معيناً من التربة (الشكل 33) له مساحة أفقية معينة A وسمكاً معيناً δz ويتواجد عند عمق معين z ، فإن كمية ما من الطاقة Q ستخترق هذا الجزء من التربة خلال زمن معين t ، الأمر الذي يترجم إلى تدفق للطاقة: نازل أثناء فترات تسخين التربة وصاعد أثناء فترات تبريدها. وتتم انتقالات الطاقة في عكس اتجاه التغيرات الحرارية، إذ تنتقل الطاقة من الأوساط الأكثر سخونة نحو الأوساط الأقل سخونة (أو من الأوساط الساخنة نحو الأوساط الباردة).

يمكن التعبير على التدفق الحراري dQ/dt الذي يخترق المساحة A من خلال الصيغة التالية¹³:

$$dQ/dt = - k A (\delta T/\delta z)$$

حيث تمثل:

- T حرارة التربة؛

- z عمق الجزء الترابي تحت السطح الأرضي؛

- k و الموصلية الحرارية للتربة المعتبرة ووحدة قياسها $W/m/K$ أو $cal/cm/^\circ C/s$.

وتوضح العلامة السالبة، أن التدفق الحراري يتم دائماً في عكس اتجاه التغيرات الحرارية. وتعتبر الموصلية الحرارية عن كفاءة جسم معين لنقل الطاقة الحرارية بواسطة الحمل. فلو أخذنا نقطتين بينهما فارق حرارة قار بالنسبة لجسمين مختلفين فإن الجسم الذي

¹³- هذه المعادلات التي صيغت بالنسبة للتربة تصلح أيضاً في حالة الصخور.

يتمتع بموصلية حرارية أكبر سيقوم بنقل كمية أكبر من الطاقة الحرارية من نقطة إلى أخرى في نفس المدة الزمنية.

وتراوح قيمة موصلية مواد سطح الأرض حوالي 2.5 W/m/K أو 0.006 cal/cm/s/°C، مع تغيرات قد تصل إلى 200% حسب طبيعة هذه المواد. وتقل موصلية مواد سطح الأرض بدرجتين عن موصلية المعادن (كالنحاس).

ويعمل فارق الطاقة، بين الطاقة الحرارية الداخلة في العنصر الترابي (ذو الحجم δz) عند العمق z وبين الطاقة الحرارية الخارجة من هذا العنصر الترابي عند العمق $z + \delta z$ ، على تغيير الطاقة الداخلية للحجم الترابي المعني. ويمكن كتابة ذلك رياضياً على الشكل التالي:

$$(dQ/dt)_z - (dQ/dt)_{z+\delta z} = \rho_b C A \delta z (\delta T/\delta t)$$

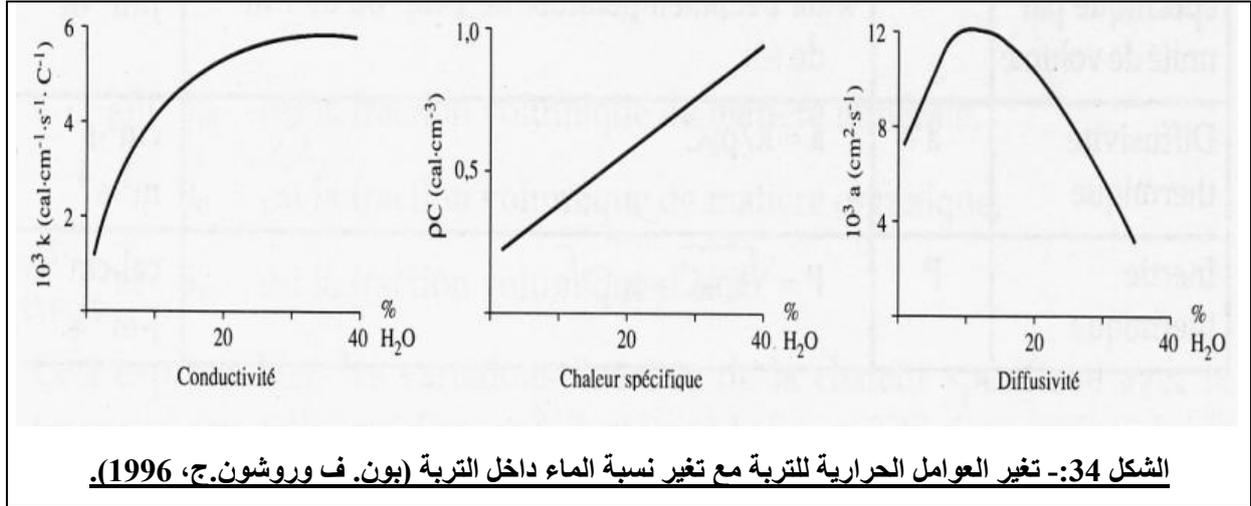
حيث تمثل:

- ρ_b كثافة التربة (Kg/m^3 أو g/cm^3)؛
- C الحرارة الخاصة للتربة (J/Kg/K أو $\text{cal/g/}^\circ\text{C}$)؛
- $\rho_b C$ و الحرارة الخاصة بالنسبة لوحدة الحجم ($\text{Kg/m}^3/\text{K}$ أو $\text{g/cm}^3/^\circ\text{C}$).

وتعبر الحرارة الخاصة (أو الحرارة الكتلية *Chaleur massique* أو الكفاءة الحرارية *Capacité calorifique*) عن أهلية وقدرة *Aptitude* المادة على خزن الطاقة الحرارية. وعادة ما تقاس في حالة التربة قياساً إلى الحجم. وتتغير حرارة التربة الخاصة بشكل مباشر مع تغير نسبة الماء فيها.

كما تعبر الانتشارية الحرارية (a diffusivité¹⁴) عن السرعة التي تستطيع من خلالها الحرارة من تغيير الداخل لجسم معين. وهي التي تتحكم في العلاقة بين الحرارة والزمن والعمق للتغيرات والتبدلات الحرارية التي تتم داخل التربة، وترتبط، مثلها مثل الخصائص الحرارية السابقة بنسبة الماء المتواجد داخل التربة (الشكل 34).

$$. a = k/ \rho_b C. - 14$$



يشكل القصور الحراري P Inertie thermique عاملا آخر، يميز الخصائص الحرارية. وهو يعبر عن مقاومة المادة لتغيرات الحرارة ويتمثل في الصيغة التالية:

$$P = (k \rho_b C)^{1/2} = \rho_b C (a)^{1/2}$$

وهو يمثل الاستجابة الحرارية للمادة نتيجة لتغيرات الحرارة. ويتحكم في درجات الحرارة التي يمكن أن يبلغها سطح التربة تحت تأثير التغيرات النهارية والسنوية لحرارة الهواء. وتتميز المواد ذات القصور الحراري العالي بمدى حراري عند السطح أضعف منه بالنسبة للمواد ذات القصور الحراري المنخفض.

وتتجلى فائدة القصور الحراري بالنسبة للاستشعار عن بعد في كونها تمكن، من خلال تغير حرارة السطح، من رصد عناصر تركيبة التربة أو الصخور التي لا يمكن رؤيتها بشكل مباشر ضمن المجالات الطيفية الأخرى.

تتحكم هذه العناصر الحرارية المختلفة (الموصلية الحرارية، الحرارة الخاصة، الانتشارية، القصور الحراري)، في تخفيف وتقليل Amortissement، تغيرات الحرارة حسب العمق وكذا سرعة ولوج الموجة الحرارية داخل التربة.

ويؤثر وجود أو غياب الغطاء النباتي في العمق الذي تخف عنده الموجة الحرارية Profondeur d'Amortissement : حيث يمكن، تحت غطاء نباتي عشبي، أن يخف المدى الحراري النهاري عند 20 سنتمتر داخل التربة، بينما يبقى هذا المدى محسوسا تحت

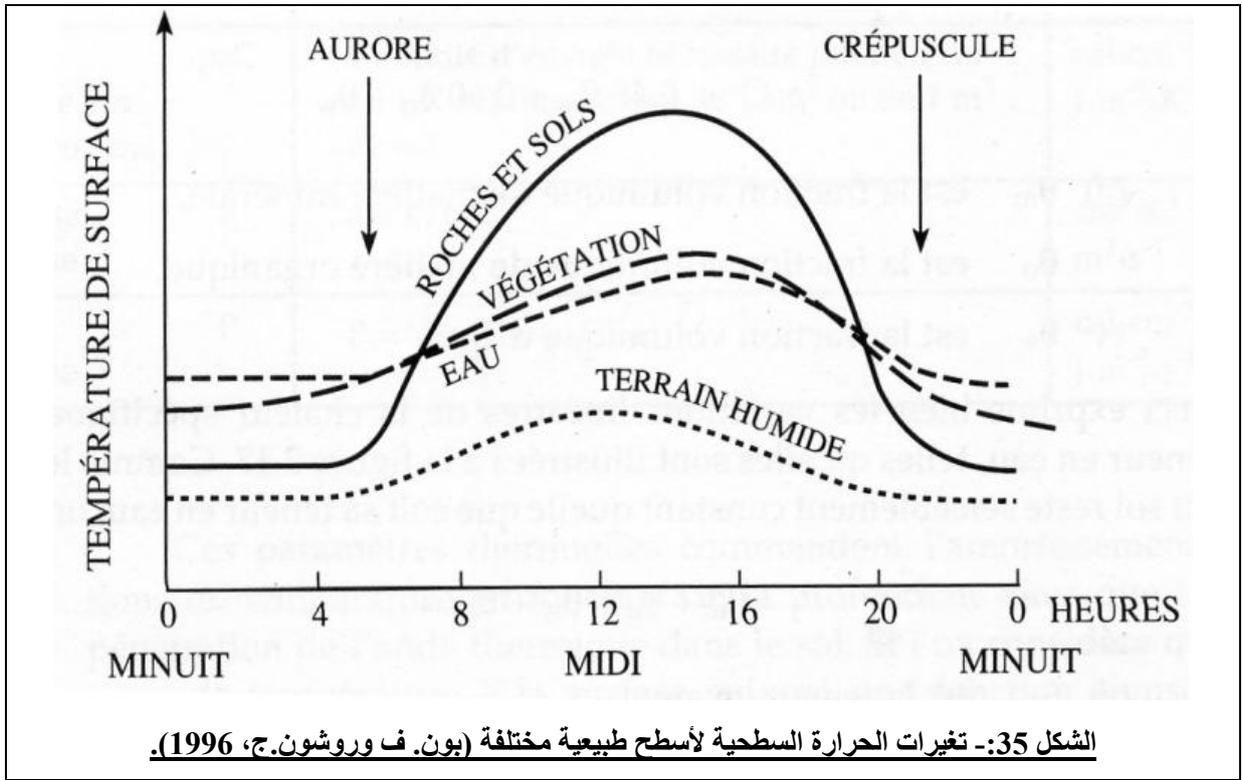
تربة مكشوفة، عند عمق 30 سنتيمتر. ويعود ذلك إلى قيام الغطاء النباتي بدور عازل حراري، يساعد على تقليل التغيرات الحرارية للسطح.

وتتغير الحرارة الخاصة حسب نسيج التربة وبنيتها ونسبة المواد العضوية فيها، كما تتغير بشكل خطي حسب نسبة الماء المتواجد داخل التربة (الشكل 34). وبما أن حجم التربة يبقى نسبيا ثابتا بغض النظر عن نسبة الماء الموجود فيها، فإن الماء يحل محل الهواء الموجود في الفراغات عندما تصبح التربة رطبة، وبالمقابل يحل الهواء الداخلي Air interstitiel محل الماء عندما تجف التربة. وبالتالي ستكون الموصلية والحرارة الخاصة أعلى في حالة تربة رطبة منها في حالة تربة جافة، لأن الهواء يمثل عازلا حراريا جيدا، بينما يمثل الماء مجمعا جيدا للحرارة. وبالتالي ترتبط التباينات الحرارية، التي تتم ملاحظتها على التمثيل البياني للحرارة، مباشرة بالقصور الحراري للأسطح المرصودة.

وتبقى كل هذه العلاقات صحيحة عند افتراض أن التبادلات الحرارية داخل التربة تتم أساسا بواسطة عملية الحمل، وهي فرضية صحيحة في حالة التربة والصخور التي تقل فيها الرطوبة عن كفاءة إمساك الماء *Capacité de rétention*. أما في الحالة الأخرى عندما تتجاوز الرطوبة كفاءة إمساك الماء تصبح التبادلات الحرارية مصحوبة بحركات للماء، فينتج عن ذلك زيادة كبيرة في سرعة التسخين والتبريد. لذلك يجب الانتباه إلى الظروف العامة للرطوبة، إذا أردنا تطبيق حساب للخصائص الحرارية على أساس الصيغ المذكورة أعلاه.

إن فرضية التبادلات التوصيلية *Echanges conductifs* لا تبقى مقبولة في حالة الماء السائل الذي يتميز، بالرغم من تقارب قيمة قصوره الحراري من قيمة القصور الحراري للصخور، بمدى حراري ضعيف جدا عند السطح. ويعود ذلك إلى حركات الحمل الناشئة عن التباينات الحرارية داخل المستويات المائية، التي تطال مستويات أكثر عمقا، وتؤثر على البحيرات والأنهار التي تتصرف كمخزونات للطاقة الحرارية بسبب العمق وبسبب الوزن الهام للماء المشترك في تبادلات الطاقة. وتبين التمثيلات البيانية الليلية

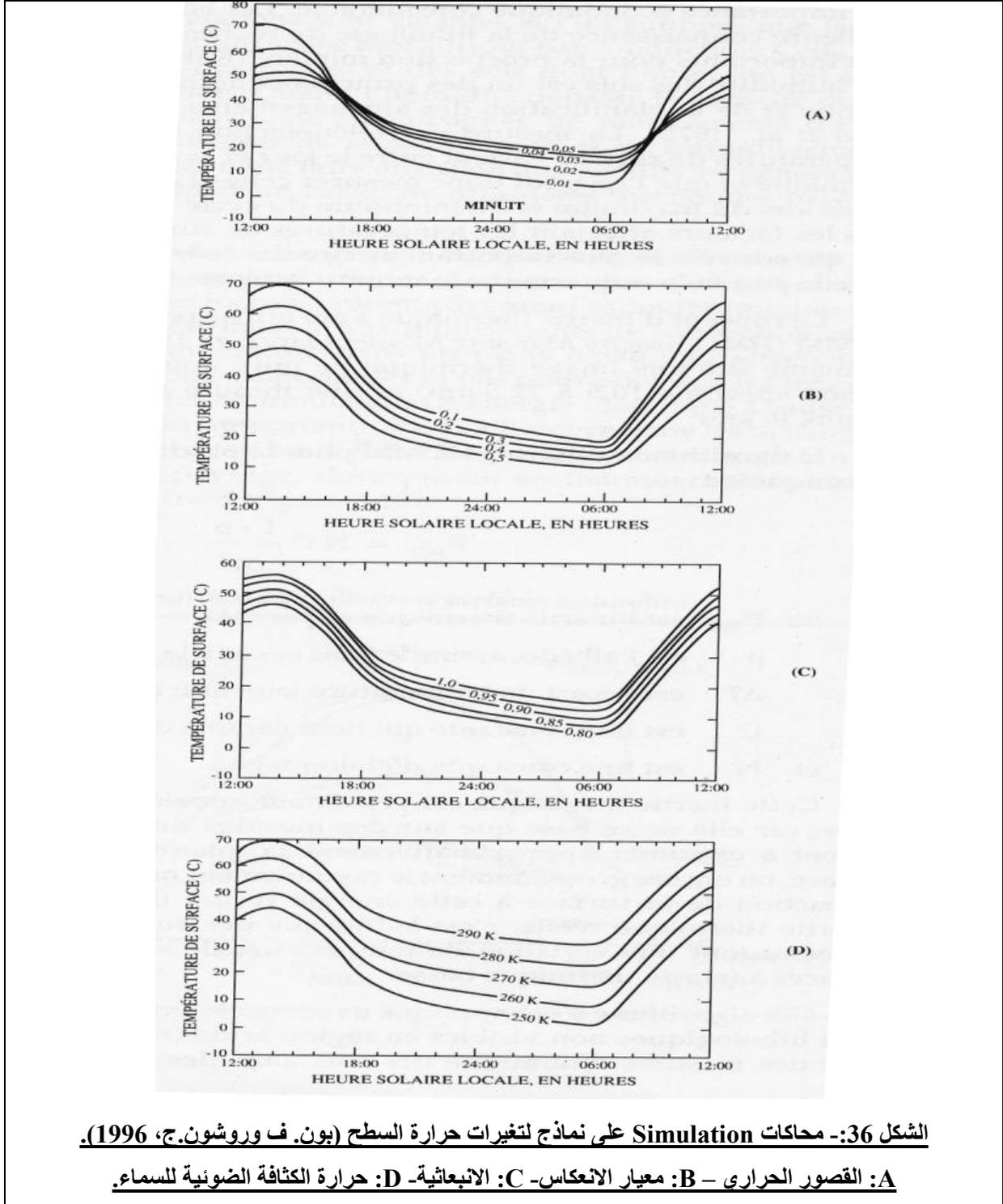
للحرارة، في أغلب الحالات، أن الماء هو أسخن عناصر المشهد بينما تبين التمثيلات البيانية النهارية للحرارة أن الماء هو أبرد هذه العناصر (الشكل 35).



لقد شد مبدأ القصور الحراري انتباه الباحثين في مجال الاستشعار عن بعد منذ سنوات عديدة، إذ فتح الطريق أمام أول المقاربات التي مكنت الاستشعار عن بعد أن يستخرج من البيئة معلومة غير منظورة بالعين المجردة، ذات قيمة اقتصادية عالية، لكون الفوائد الاقتصادية لمعرفة أفضل للصخرة الخاصة بالصخور ذات المظاهر المتشابهة، لها قيمتها الكبيرة بالنسبة للتنقيب عن المعادن. وتشكل معرفة رطوبة التربة واحدا من أكبر التحديات التي تواجه النمذجة الهيدرولوجية والتخطيط لمشاريع التهيئة الزراعية أو للسقى. وتعتمد القياسات في مجال الاستشعار عن بعد على ارتباط تغير حرارة السطح بين الليل والنهار بالقصور الحراري الذي يمكن قياسه انطلاقا من التمثيلات البيانية للحرارة المسجلة عند القيم القصوى والقيم الدنيا للدورة الحرارية. ويبين الشكل 36 أن القصور الحراري هو الذي يقوم بأكثر الأدوار فيما يخص التباين الحراري بين الليل وبين النهار.

وقد استعملت الوكالة الفضائية الأمريكية "ناسا" مبدأ القصور الحراري للقمر الصناعي (Heat Capacity Mapping Mission) HCMM الذي أطلق سنة 1978.

وكان هذا القمر يأخذ لنفس الموقع مرئية حرارية ليلية وأخرى نهائية (في الحزام الطيفي الممتد بين 10.5 و 12.5 ميكرومتر، كما يأخذ قياسا للانعكاسية بالنهار بين 0.5 و 1.1 ميكرومتر



وقد مكن تطبيق مبدأ القصور الحراري في الاستشعار عن بعد من رصد تباينات صخرية غير منظورة، في المناطق الجافة، كما تم تطبيقه لإجراء قياسات لرطوبة التربة

في زراعات مسقية بالمناطق الصحراوية. لكن تواجد غطاء نباتي في المناطق الرطبة يحجب بنسبة كبيرة حرارة التربة؛ كما أن ارتفاع الغطاء النباتي يدخل عاملا هندسيا في..... يؤثر في منحني حرارة الهواء بحيث لا تتم التبادلات الحرارية داخل التربة فقط من خلال عملية الحمل. لذلك فإن المقاربات التي تستخدم القصور الحراري النهاري لدراسة رطوبة التربة تعطي نتائج جيدة في المناطق الجافة وشبه الجافة، لكن فاعليتها تكون أقل في المناطق الرطبة.

إن السلوك الحراري يمكن أن يفصح عن التركيبة الداخلية للمواد الموجودة تحت السطح الأرضي من خلال القصور الحراري والخصائص المصاحبة له. وهو من الاهتمامات الرئيسية للاستشعار عن بعد بواسطة المجسات التي يفوق طول موجاتها طول موجات النطاق المرئي ومجال الأشعة تحت الحمراء القريبة. وهو اهتمام يجد ما يسوغه أيضا في مجال الترددات العالية.

3- في مجال الترددات العالية.

نفرق عادة، في نطاق الترددات العالية، بين المجال السالب حيث يتم تسجيل الانبعاث الطبيعي للأسطح المستهدفة، وبين المجال الفعال (أو الموجب)، حيث تتم إضاءة السطح بواسطة الرادار.

في مجال الترددات العالية السالبة نقوم أساسا بدراسة ظواهر الانبعاث، التي تشبه تجلياتها والفيزياء المنضوية تحتها بشكل كبير ما تتم ملاحظته في المجال الحراري. بينما نقوم في مجال الترددات العالية الفعالة، بدراسة الانتشار المعاكس للإشارة التي يبعثها الرادار على السطح المدروس. ونظرا لاختلاف تجليات الانتشار المعاكس والفيزياء التابعة عن تلك الملحوظة في المجال السالب، فسنعرض لكل مجال من هذين المجالين في فقرة على حدة.

أ- مجال الترددات العالية السالبة.

تتميز الانبعاثية في هذا المجال بتغيرات ذات حساسية أكبر بكثير منها في المجال الحراري. الأمر الذي يفرض تفسير المعطيات الحرارية بالاعتماد أساساً على تغيرات الحرارة. أما في مجال الترددات العالية فستعتمد التفسيرات أولاً على تغيرات الانبعاثية. كما تتميز الانبعاثية بتعقيد أكبر في مجال الترددات العالية منها في المجال الحراري، وترتبط بدرجة الحرارة وبثابت العازل الكهربائي $\text{Constante diélectrique}$ للوسط، بالإضافة إلى زاوية الاستهداف لجهاز قياس الراديو (الراديوميتر Radiomètre).

*/- الانبعاث من التربة.

على عكس المجال الحراري حيث تتحكم حرارة قشرة دقيقة في حدود الميكرومتر في انبعاثية السطح، تتدخل في مجال الترددات العالية طبقة أكثر سمكاً، لأن أطوال الموجات تراوح بضعة سنتيمترات. وبالتالي فإن المعلومة التي نحصل عليها عن التربة من خلال تحليل بعثها لترددات عالية، تتعلق بطبقة يتناسب سمكها مع مقدار طول الموجة المستعملة. يمثل ثابت العازل الكهربائي قياساً لاستجابة المادة لحقل كهربائي كالموجة الكهرومغناطيسية. ويرتبط بتوزيع الشحنات الكهربائية داخل الوسط المعبر. فبالنسبة للتربة، يرتبط ثابت العازل الكهربائي بنسبة الماء المتواجد داخل التربة الذي يبرز عدم تماثل في الشحنات الكهربائية على المستوى الجزيئي Moléculaire بحيث يتصرف كل جزيء كثنائي قطب كهربائي. ويتفاعل هذا السلوك الكهرومغناطيسي الخاص للماء مع الإشعاع العالي التردد فيؤثر في انتشار Propagation الموجات وفي انبعاثها. ويمثل التباين الهام الموجود بين ثابت العازل الكهربائي الخاص بالماء وبين ذلك الخاص بالتربة، أساس التطبيقات الاستشعارية في مجال الترددات العالية لدراسة رطوبة التربة.

ويبين الجدول 2 الأجزاء الحقيقية والمتخيلة لثابت العازل الكهربائي بالإضافة إلى قيمة الانبعاثية بالنسبة لعدد من الأسطح الطبيعية، حسب قيمة التردد.

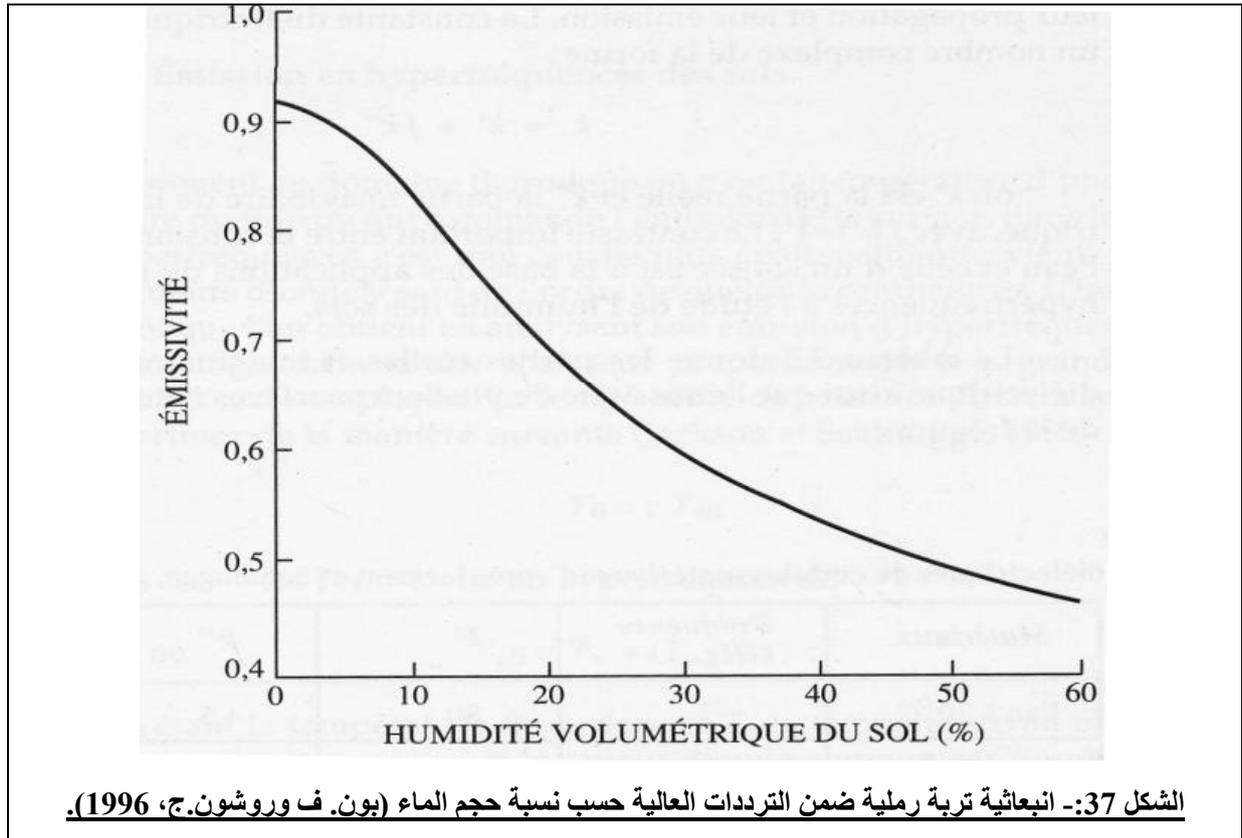
الانبعاثية ϵ	ثابت العزل الكهربائي المتخيل K''	ثابت العزل الكهربائي الحقيقي K'	التردد GHz	المادة
0.36	4.5	80	1	الماء عند 20°C
0.39	40	35	20	الماء عند 20°C
0.94	0	2.8	1.4	ترربة جافة
0.59	4.8	19.6	1.4	ترربة رطبة
0.88	0.03	4.4	10	أعبل (جرانيت)
0.77	0.03	8.5	14	كلس

الجدول 2:- قيم ثابت العازل الكهربائي الحقيقي والمتخيل وقيم الانبعاثية لعدد من الأسطح الطبيعية حسب التردد (بون).

ف وروشون، ج، 1996).

يتحكم الجزء الحقيقي في سرعة انتشار الموجة الكهرومغناطيسية داخل التربة. بينما يتحكم الجزء المتخيل في فقدان الطاقة، أي في امتصاص التربة للموجة. وينخفض الجزء الحقيقي لثابت العازل الكهربائي عندما ترتفع درجة الحرارة، لذلك ترتبط الانبعاثية في مجال الترددات العالية بعامل الحرارة. في حالة الماء، تؤثر الملوحة بشكل ضعيف على الجزء الحقيقي لكن تأثيرها يكون كبيراً على الجزء المتخيل. ويبين الشكل 37 الانبعاثية التي تم حسابها نظرياً انطلاقاً من الرطوبة الحجمية للتربة بالنسبة لموجة طولها 21 سنتيمتر.

ويتضح أن الانبعاثية – على عكس ما هو حاصل في المجال الحراري – تتغير في عكس اتجاه نسبة الماء فكلما زادت نسبة الماء داخل التربة كلما قلت الانبعاثية، أي أن التربة الرطبة ستبعث أشعة أقل من التربة الجافة عند نفس درجة الحرارة. وتترجم هذه التغيرات في الانبعاثية، بتغيرات هامة لحرارة الكثافة الضوئية في الترددات العالية.



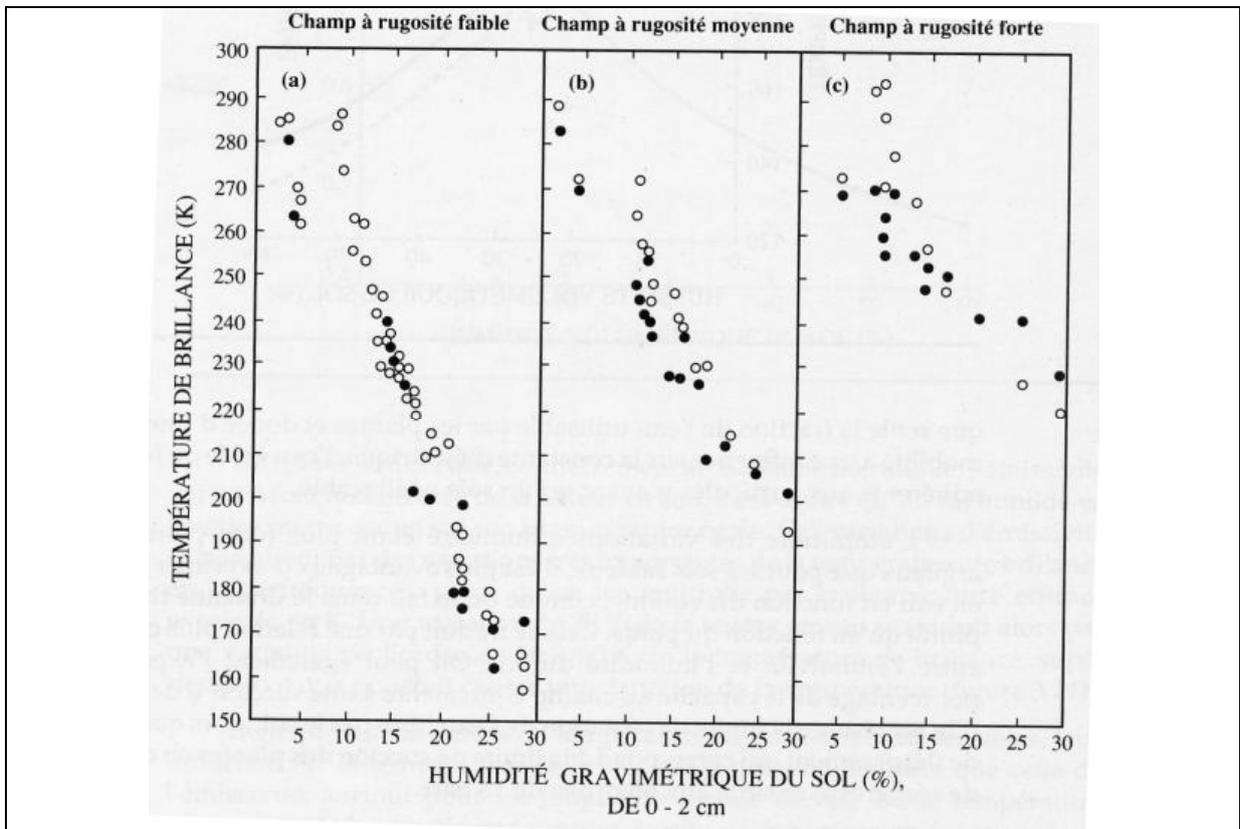
تؤثر خشونة التربة أيضا في الانبعاثية ضمن مجال الترددات العالية، حيث تؤثر تغيرات الخشونة على التربة الرطبة أكثر مما تفعل بالنسبة للتربة الجافة، وذلك من خلال رفع أكبر لحرارة الكثافة الضوئية: ويبين الشكل 38 أن تغيرات الخشونة تكون أكثر حساسية في حالة التربات الرطبة منها في حالة التربات الجافة.

تمثل الترددات العالية السالبة في الوقت الراهن أفضل وسيلة لقياس رطوبة التربة بواسطة الاستشعار عن بعد، لأنها تمكن من رصد ما يجري على سمك معين من الميدان ولكونها أقل حساسية من الترددات العالية الفعالة بخصوص تغيرات خشونة السطح. وتتمثل الترددات الأكثر ملائمة في الترددات الأكبر التي يصل طول موجاتها 20 سنتيمتر فأكثر.

*/- الانبعاث من النباتات.

هناك أعمال قليلة حول الخصائص الطيفية للنبات ضمن نطاق الترددات العالية الفعالة، بسبب اعتبار انبعاثية النبات في مجال الترددات العالية مساوية ل1 ولكون الإشارة التي يرصدها المجس تدمج إشارة التربة وإشارة النبات. ويؤثر وجود النباتات على انبعاثية

الموجات الدقيقة Micro-ondes للتربة من خلال امتصاصها لهذه الموجات بشكل جزئي، وإضافة انبعائيتها الخاصة إلى الإشارة التي يقوم المجس برصدها. وبالتالي فإننا نقوم بقياس انبعائية تأليفية Emissivité combinée تتألف من انبعائية التربة وانبعائية النبات، وترتبط بالتالي بانبعائية التربة وبتوصيلية النبات وانعكاسيته. ويرتبط هذان العنصران الأخيران بالكتلة الحيوية Biomasse، وبرطوبة النبتة وشكلها، وبطول الموجة، بالإضافة إلى زاوية التصوير. وبالتالي فإن تواجد الغطاء النباتي يزيد من قيمة انبعائية التربة ضمن الترددات العالية، من خلال إضافة انبعات يقترب من انبعات تربة أكثر جفافاً.



الشكل 38:- العلاقة بين حرارة الكثافة الضوئية ورطوبة التربة في حالة ثلاثة درجات مختلفة لخشونة السطح (بون. ف

وروشون. ج، 1996).

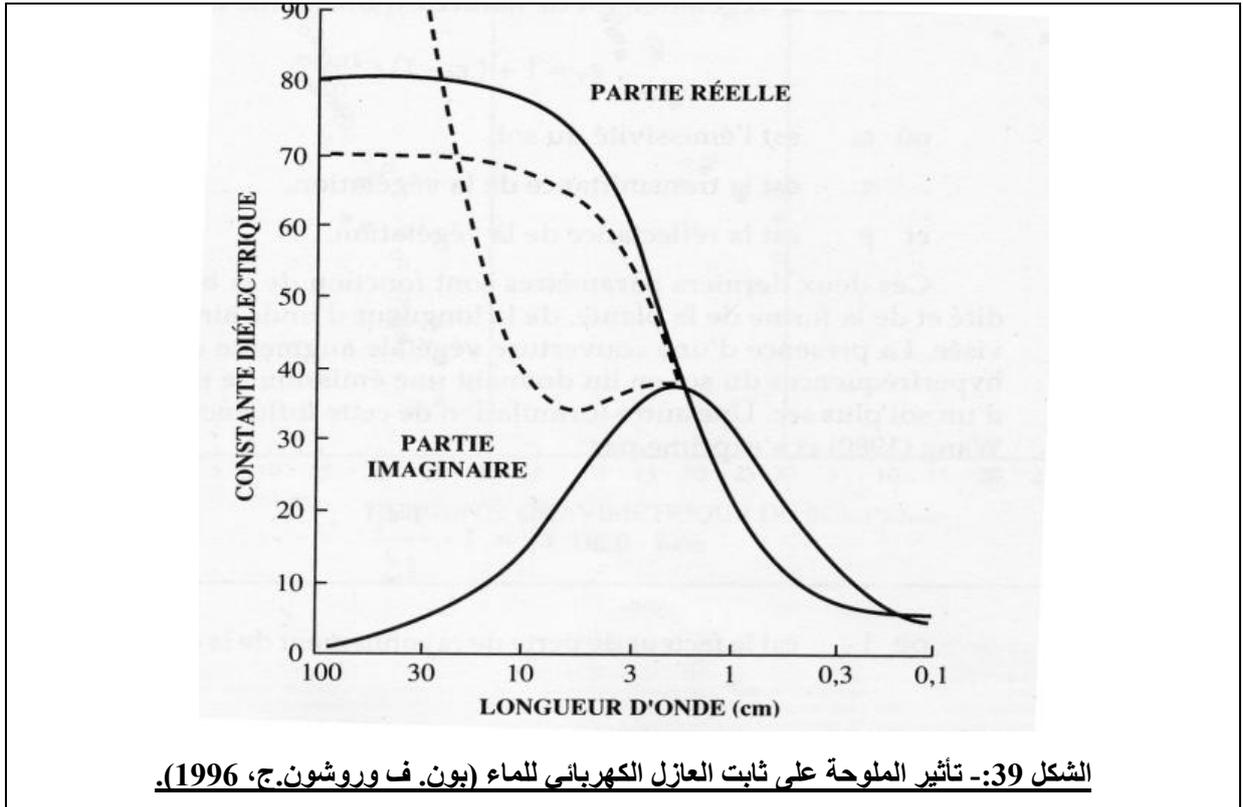
تشير النقط إلى القيم المحصل عليها من خلال القياسات والدوائر إلى القيم التي تم حسابها.

كما أن لزاوية التصوير من جهة واستقطاب الإشارة من جهة أخرى تأثير كبير على حرارة الكثافة الضوئية المنبعثة من السطح سواء أكان هذا السطح مكشوفاً أو كانت تكسوه

النباتات. ففي حالة استقطاب عمودي، تزداد حرارة الكثافة الضوئية مع ارتفاع زاوية التصويب، بينما تنخفض في حالة استقطاب أفقي.

*-الانبعاث من الماء والتلج والجليد.

تختلف بصمة كل من الماء والتلج والجليد في نطاق الترددات العالية حسب الحالة الفيزيائية وحسب التركيبة الفيزيائية والكيميائية: حيث تقوم الملوحة في حالة الماء السائل بدور مهم، من خلال ثابت العازل الكهربائي. ويبين الشكل 39 تأثير الملوحة على ثابت العازل الكهربائي للماء، ونلاحظ أن الملوحة لا تؤثر بنفس الكيفية على الجزء الحقيقي وعلى الجزء المتخيل لهذا الثابت خصوصا عند الترددات المنخفضة بهذا المجال كحزام L (21 سنتمتر).



تضاف تأثيرات الملوحة إلى تأثيرات حرارة الماء. فبالنسبة للماء النقي، فإن رفع الحرارة من 0 إلى 20°C يؤدي إلى زيادة قيمة الجزء الحقيقي لثابت العازل الكهربائي بـ 20 وحدة بالنسبة للترددات التي تفوق 2GHz وخفضها بـ 10 وحدات بالنسبة للترددات

التي تقل عن 2GHz. يظهر تأثير الحرارة أيضا على الجزء المتخيل حيث توجد نقطتي تقاطع على المنحنى، فيؤدي رفع درجة الحرارة، بين هاتين النقطتين، إلى خفض الجزء المتخيل لثابت العازل الكهربائي. بينما يؤدي ذلك خارج المجال المحصور بين نقطتي التقاطع، إلى زيادته. وتعمل الملوحة على تحريك نقطة التقاطع السفلية باتجاه الترددات الأعلى.

بالتالي فالعلاقة بين الحرارة والملوحة وثابت العازل الكهربائي علاقة معقدة وهي تؤثر في انبعاثية الماء وتؤثر بالتالي على تفسير المعطيات المتعلقة بهذه الترددات العالية المنبعثة من السطح المائي.

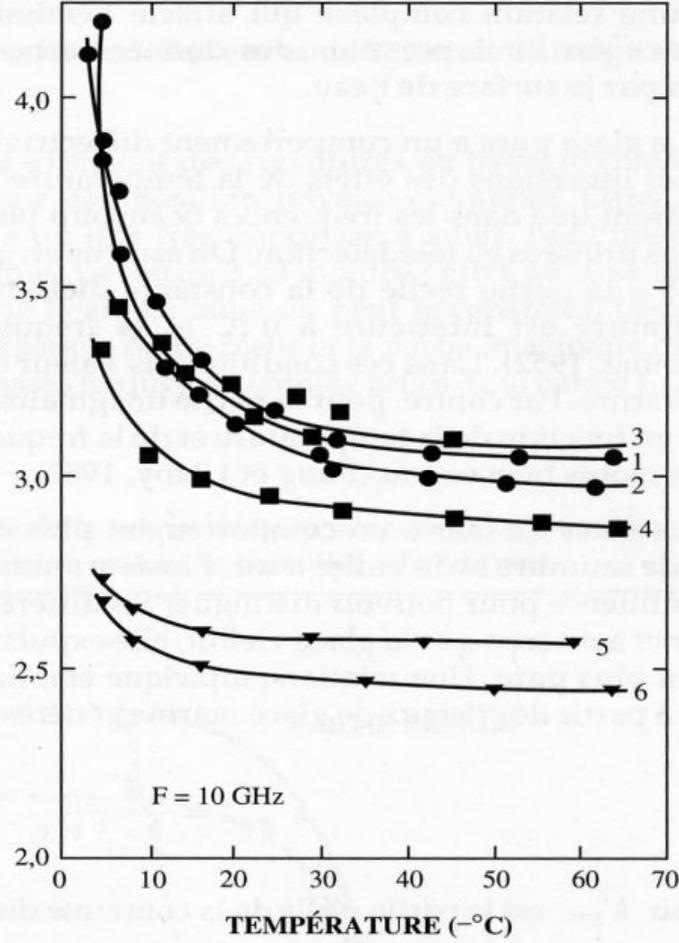
يتمتع الجليد النقي بسلوك مماثل لسلوك الماء، لكن انقلاب التأثير المذكور في الفقرات السابقة، لا يحصل إلا عند ترددات الطيف المنخفضة جدا، والتي لا تستعمل في عملية الاستشعار عن بعد. وترتبط قيمة ثابت العازل الحقيقية، عند درجة حرارة أصغر من 0°C وبالنسبة لترددات أعلى من 10 MHz ، بدرجة الحرارة. أما بالنسبة للجزء المتخيل فهناك تغيرات هامة حسب الحرارة والتردد، لكن المعرفة بالظاهرة ما تزال ضعيفة.

تكسب الأملاح و فقاعات الهواء لجليد البحار سلوكا معقدا. وقد حاول عدد من الباحثين تكميم هذه التأثير بهدف التمييز بين أنواع الجليد البحري المختلفة. ويظهر أنه كلما تقادم الجليد البحري إلا وقام بطرد الأملاح كي يصبح نقيا أكثر فأكثر.

ويبين الشكل 40 العلاقة بين الجزء الحقيقي لثابت العازل الكهربائي لأصناف مختلفة من الجليد، وبين درجة الحرارة. فجليد عال الملوحة أي قليل السمك حديث العهد سيتميز بقيمة عالية للجزء الحقيقي لثابت العازل الكهربائي، الأمر الذي يترجم بانعكاسية أكبر وانبعاثية أقل، مقارنة بجليد قديم وأقل ملوحة. أما الجزء المتخيل لثابت العازل الكهربائي فليس له إلا تأثير ضعيف في هذه الحالة.

تكفي تغيرات الانبعاثية في هذه الحالة للتمييز بين أصناف مختلفة من جليد البحار على مرئيات سطح البحر ضمن مجال الترددات العالية عموما (السالبة أو الفعالة).

PARTIE RÉELLE DE LA CONSTANCE DIÉLECTRIQUE
DE LA GLACE DE MER k' si



الشكل 40: - تغير الجزء الحقيقي لثابت العزل الكهربائي لجليد البحر حسب الملوحة والكثافة ودرجة الحرارة (بون. ف

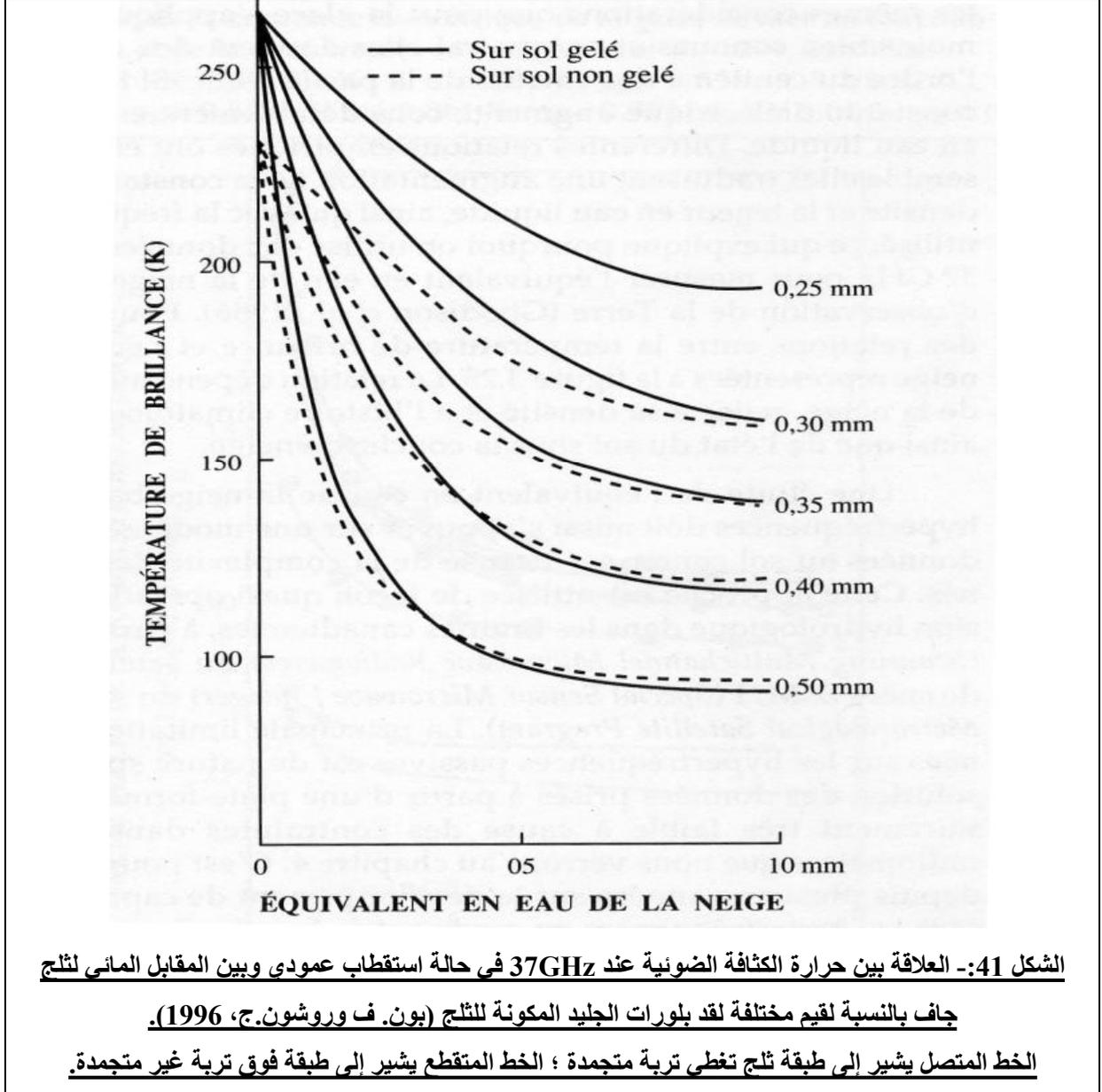
وروشون. ج، 1996).

1: م=0.44%، ك=-0.836 2: م=0.32%، ك=-0.836 3: م=0.32%، ك=-0.878 4: م=0.46%، ك=-0.896

5: م=0.061%، ك=-0.771 6: م=0.07%، ك=-0.770

يمتاز الثلج هو الآخر بخصائص عازل الكهرباء، هامة، حيث يرتبط ثابت عزل الكهرباء بنسبة الماء السائل: إذ يرتبط ثابت العزل الكهربائي لثلج جاف مكون أساسا من بلورات جليدية ومن هواء بكثافته الخاصة وبثابت العازل الكهربائي للجليد، فيرتفع الجزء الحقيقي لهذا الثابت مع زيادة الكثافة. أما الجزء المتخيل فيخضع لنفس الاعتبارات التي رأيناها بخصوص الجليد. أما الثلج المبلول فيعرف ارتفاعا هاما لقيمة ثابت العازل الكهربائي مع زيادة نسبة الماء السائل، حيث يرتفع، بشكل عام، ثابت العازل الكهربائي مع زيادة الكثافة ونسبة الماء السائل وكذا تردد الإشعاع المستخدم. الأمر الذي يفسر لماذا

تستعمل معطيات ضمن ترددات عالية عند 37 GHz لقياس المقابل المائي للثلج انطلاقا من الأقمار الصناعية المخصصة لمراقبة كوكب الأرض، من خلال العلاقة القائمة بين حرارة الكثافة الضوئية والمقابل المائي للثلج (الشكل 41).



الشكل 41:- العلاقة بين حرارة الكثافة الضوئية عند 37GHz في حالة استقطاب عمودي وبين المقابل المائي لثلج جاف بالنسبة لقيم مختلفة لقد بلورات الجليد المكونة للثلج (بون. ف وروشون.ج، 1996).
الخط المتصل يشير إلى طبقة ثلج تغطي تربة متجمدة ؛ الخط المتقطع يشير إلى طبقة فوق تربة غير متجمدة.

من المفروض أيضا أن تركز دراسة المقابل المائي للثلج التي تعتمد المرئيات ضمن نطاق الترددات العالية، على نمذجة للمناخ ولمعطيات التربة المصاحبة له، بسبب تعقد الظواهر المعنية.

وتجدر الإشارة إلى أن محدودية استعمال المعطيات ضمن الترددات العالية السالبة، ذات طبيعة فضائية: حيث تتسم دقة Résolution المعطيات التي يتم أخذها انطلاقاً من محطة فضائية بالضعف الكبير بسبب العوائق المرتبطة ببناء أجهزة القياس. لذلك فقد تم منذ سنوات عدة التركيز على تطوير مرصد الأقمار الصناعية التي تستخدم الترددات العالية الفعالة، لكون الطاقات الأقوى المصاحبة لهذه الترددات تعطي نسبة أفضل بين الإشارة والصوت Bruit، وحد أفضل للدقة Résolution الفضائية.

ب- مجال الترددات العالية الفعالة.

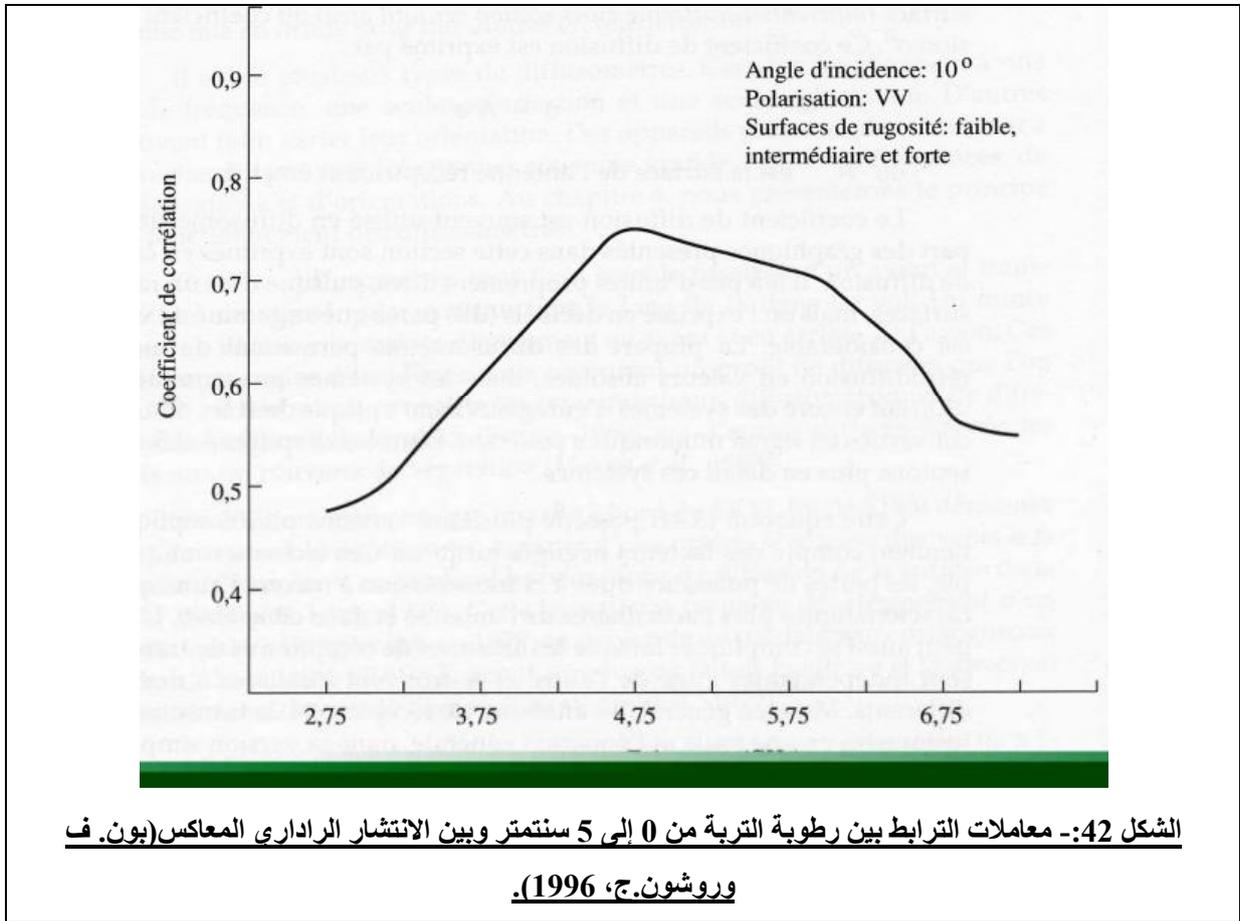
تتفاعل الأسطح الأرضية والمائية مع نبضات Impulsions الرادار، من خلال عدد من الخصائص التي ترتبط عادة بسلسلتين من العوامل: عوامل هندسية كزاوية وفود الإشعاع وخشونة السطح، وعوامل العزل الكهربائي Diélectriques مرتبطة بطبيعة المواد المكونة للسطح. كل هذه العوامل تؤثر في انتشار الموجة المستقبلية من طرف السطح الملاحظ. في ميدان الاستشعار الفضائي، خصوصاً ضمن نطاق الترددات العالية، يمثل الانتشار تفاعلاً ينشأ معلومات كثيرة عن السطح المدروس. فعندما تواجه موجة كهرومغناطيسية حداً فاصلاً بين وسطين شبه لانهايين Semi-infini، فإن جزءاً من الطاقة الواردة يتعرض للانتشار باتجاه الخلف، والباقي يتم توصيله إلى داخل الوسط السفلي. ويمثل تحليل الإشارة المعكوسة الانتشار باتجاه مصدر الإشعاع، قاعدة الاستشعار الراداري.

*/- قياس الانتشار.

يمثل جهاز قياس الانتشار Diffusomètre نظاماً يقوم بقياس كمي للانتشار الناتج عن الميدان حسب زاوية ورود الإشعاع. وبالتالي فكل جهاز رادار يقوم بقياس الانتشار والانعكاس بالنسبة للأسطح أو الأحجام، يمكن أن يحمل اسم جهاز أو آلة قياس الانتشار. ويمكن أن تكون هذه الآلات مثبتة إذا أردنا القيام بدراسات تجريبية على الأرض، أو تكون محمولة في الفضاء أو موضوعة في مدار معين عندما نريد القيام بدراسات استشعارية.

*- تطبيقات قياس الانتشار.

توصل فريق بحث من جامعة كانساس Kansas بالولايات المتحدة الأمريكية من خلال قياسات انتشارية على تربة مكشوفة، إلى انتقاء الترددات الملائمة لرصد رطوبة التربة. وقد تم تمثيل معاملات الترابط Coefficients de corrélation المحصل عليها بين الانتشار المعاكس وبين الرطوبة، حسب تردد الإشعاع المستخدم (الشكل 42): حيث يظهر من خلال المنحنى الناتج وجود معامل ارتباط أقصى يبلغ 0.8 عند تردد بقيمة 4.75 GHz. وتبقى نسبة هذا المعامل فوق 70% بالنسبة للترددات المحصورة بين 4.50 GHz و 6.00 GHz.

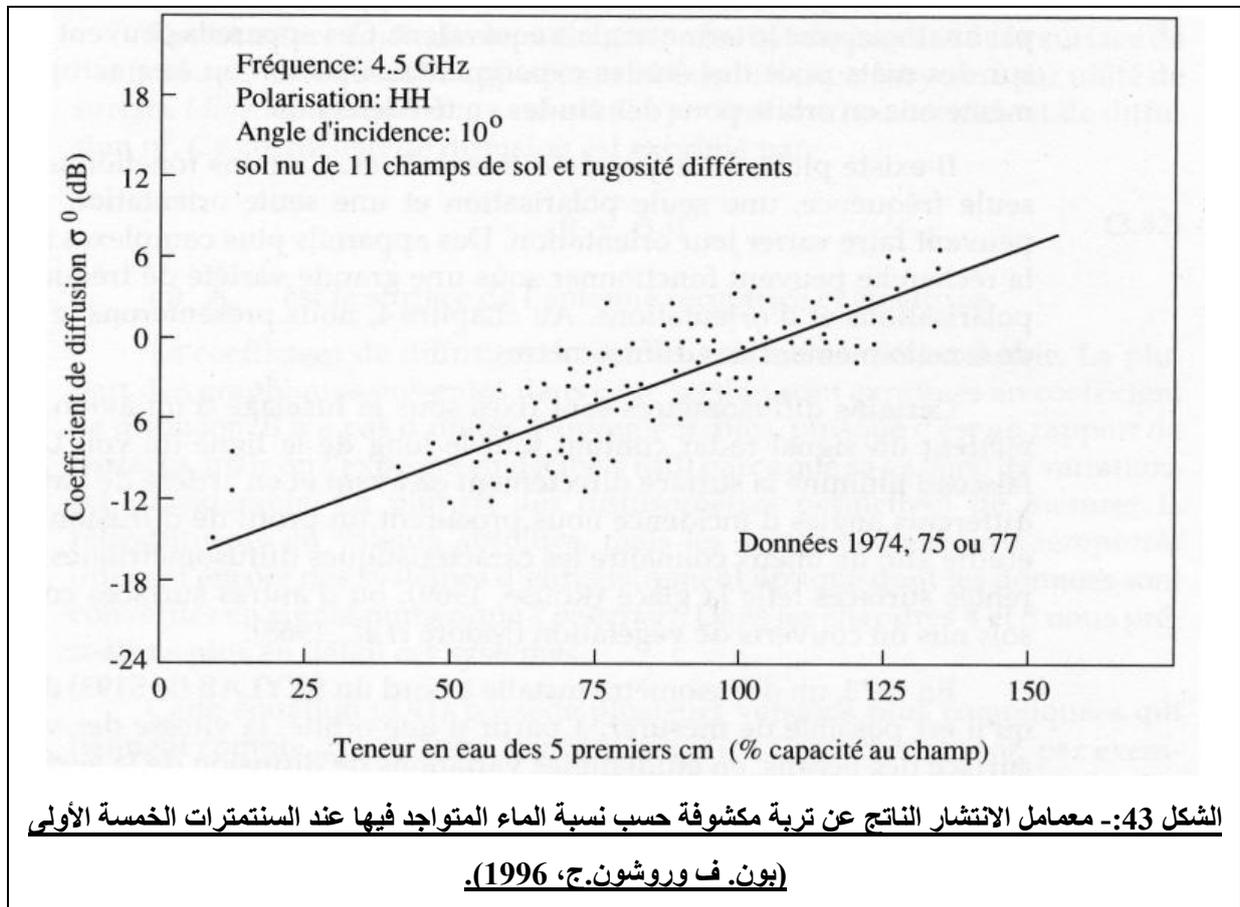


يبدو وضع خريطة لرطوبة التربة، ممكنا من الناحية النظرية، تحت ظروف معينة. وتمكن جل النماذج النظرية من التوصل إلى تعبيرات عن معامل الانتشار تتناسب مباشرة مع الانعكاس المنتشر. الذي يتحدد مقداره من خلال زاوية ورود الأشعة، ومن خلال ثابت العازل الكهربائي لسطح التربة المتعلق بدوره بنسبة الماء الموجود فيها (أو صنف التربة).

بالتالي من المفروض، بالنسبة لسطح معين، أن يتغير معامل الانتشار حسب نسبة الماء بنفس الكيفية التي يتغير من خلالها الانعكاس المنتشر حسب نفس العنصر.

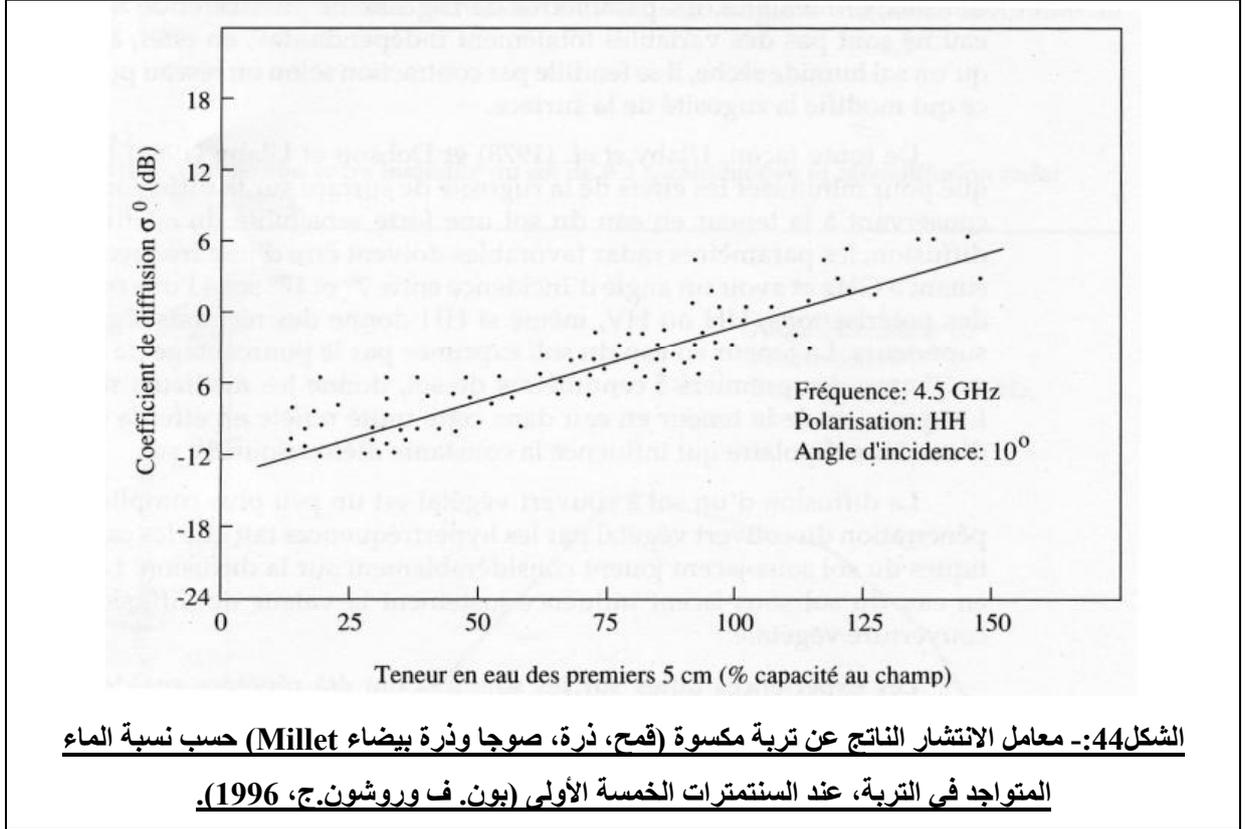
لا يصح هذا الاستنتاج، تجريبياً، إلا بشكل جزئي، لكون الانتشار الناتج عن تربة مكشوفة، يأتي من سطح التربة من جهة، ومن حجم معين لهذه التربة من جهة أخرى. بالإضافة إلى كون خشونة السطح ونسبة الماء يمثلان متغيرين غير منفصلين بشكل تام، تحت ظروف التجارب.

ويبين الشكل 43 وجود ترابط قوي بين رطوبة التربة عند السنتمترات الخمسة الأولى وبين الانتشار الراداري المعاكس عند 4.5 GHz، الموافق بشكل تقريبي للحزام C للقمرين الصناعيين ERS-1 و RADARSAT.



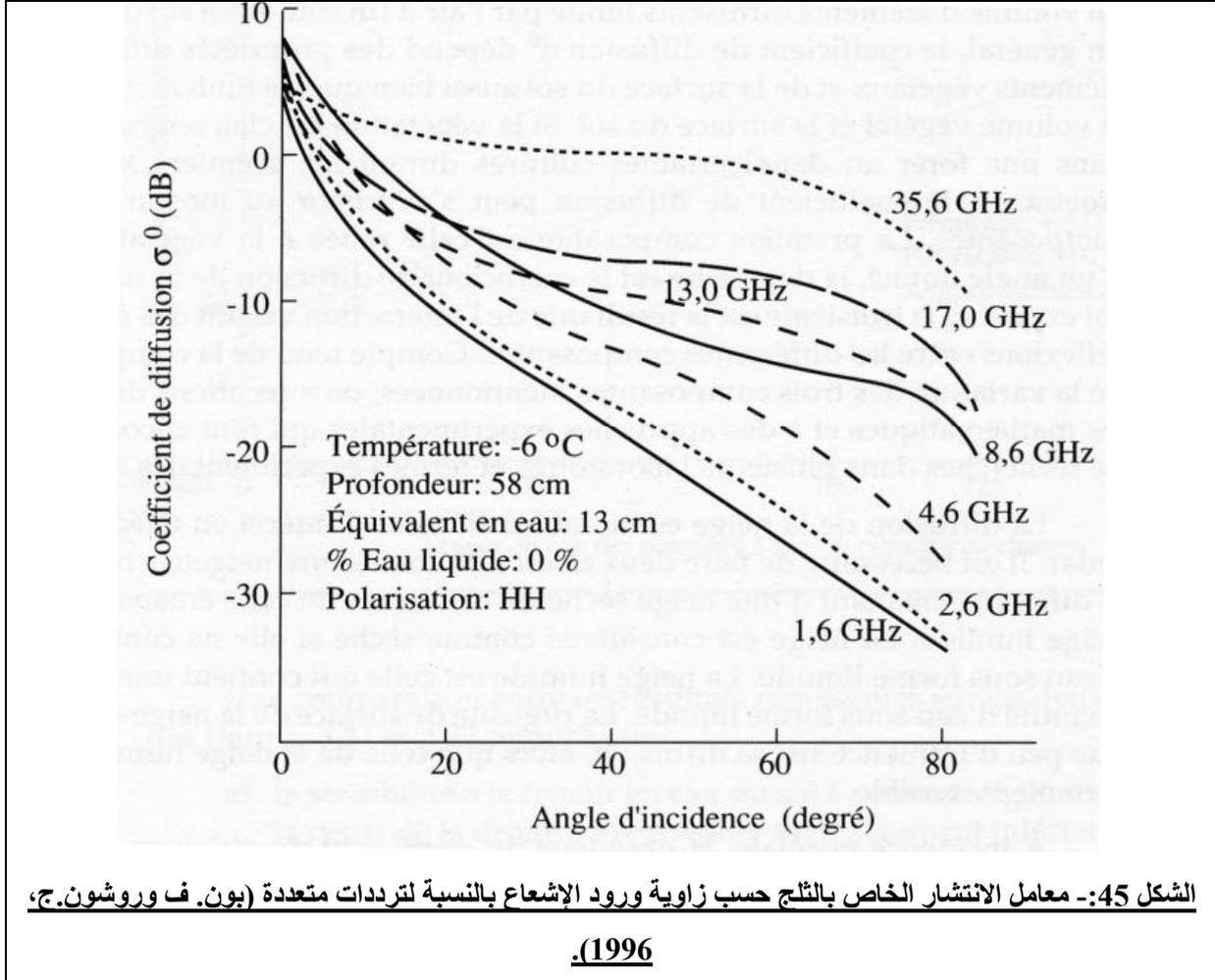
أما الانتشار الناتج عن سطح مكسو بغطاء نباتي، فهو أكثر تعقيداً، لأن اختراق الترددات العالية للغطاء النباتي يجعل مميزات التربة السفلية تؤثر بشكل كبير على الانتشار. فنسبة الماء داخل التربة السفلية تؤثر في قيمة الانتشار الناتج عن الغطاء النباتي.

إن التجارب التي أجريت على تربات مكشوفة، قد تمت إعادتها على تربات مكسوة بغطاء نباتي . فتم التوصل إلى استنتاجات جد متشابهة.
 بشكل عام يعمل تواجد الغطاء النباتي على رفع خشونة السطح. ويبين الشكل 44 أن العلاقة بين رطوبة التربة وبين الانتشار تبقى ذات دلالة بالرغم من وجود غطاء نباتي.



يشكل الانتشار الناتج عن الثلج عنصرا آخر له أهميته في ميدان الاستشعار الراداري. ومن المفروض التمييز بين فئتين من الأغذية الثلجية، لكون الانتشار الصادر عن ثلج جاف، يختلف عن الانتشار الصادر عن ثلج رطب. ويكون تأثير خشونة سطح ثلج جاف في الانتشار ضعيفا. بينما تؤثر خشونة أسطح الثلوج الرطبة في الانتشار بشكل كبير. يزداد الانتشار الناتج عن السطح الثلجي مع ارتفاع سمك الثلج وارتفاع التردد المستعمل: ويبين الشكل 45 نتائج إحدى الدراسات بخصوص تغير الانتشار بالنسبة لغطاء ثلجي جاف يبلغ سمكه 58 سنتمتر، حسب زاوية ورود الإشعاع، في حالة سبعة ترددات مختلفة: حيث ينخفض الانتشار بشكل تناسبي مع زاوية ورود الإشعاع بالنسبة لأصغر تردد. ويوحى الشكل العام لمختلف المنحنيات، بتراجع تأثير زاوية ورود الإشعاع كلما زادت قيمة

التردد. بينما يبين المنحنى الخاص بتردد 35.6 GHz أن الانتشار شبه قار কিفما كانت قيمة زاوية ورود الإشعاع، الأمر الذي يفسر استخدام هذه الترددات العالية ضمن نطاق الترددات العالية بنوعيه من أجل وضع خرائط للثلج.



يمثل الانتشار الناتج عن جليد البحار واحدة من أهم المظاهر الرئيسية في الاستشعار الراداري لبحار القطب الشمالي. يتميز جليد البحار عن الجليد النقي بوجود الأملاح. ترتبط خصائص جليد البحار منذ تكونه بالعوامل التالية: ملوحة مياه البحر الأصلي، درجة حرارة الجليد، الضغط والمسامية. كما تتحدد بنية الجليد من خلال: سرعة تكونه، عمره، وغيرها من العوامل المرتبطة بتاريخ الجليد. ويختلف جليد البحر عن جليد الماء العذب، لاشتماله على ملوثات Impuretés على شكل تضمنات Inclusions لأملاح سائلة. وتقل ملوحة جليد البحر، دائما، عن ملوحة ماء البحر الأصلي، لكون جزء من الأملاح المحصورة داخل البلورات الجليدية يسيل خلال عملية التجمد.

يبدأ جليد البحر في الذوبان خلال فصلي الربيع والصيف ، وينتج عن هذا الذوبان المستمر حدوث ثقب وممرات يسيل من خلالها ماء السطح. يتعرض جليد السنة الأولى للذوبان بشكل أسرع من الجليد الأكثر عمرا، لكونه أكثر ملوحة. ولا يتجاوز هذا الجليد الطري أبدا مترين أثناء فصل الشتاء الأول. تتغير منحنيات الملوحة والحرارة مع عمق الجليد (أو سمكه). وتتبدل هذه الخصائص الفيزيائية بشكل ملحوظ مع تقادم الجليد، الأمر الذي يؤدي إلى تغير الخصائص الكهربائية. كما تعمل سرعة واتجاه الرياح والتيارات المائية، وعدد دورات الجمد والذوبان، وأهمية طبقة الثلج التي تغطي السطح، وعوامل غيرها كثيرة، على تغيير سمك الجليد وخشونة سطحه.

لقد أظهرت جل الأعمال المنجزة على معطيات الجليد البحري الرادارية، أن تغير الإشارة يسمح بتمييز الماء الحر، والجليد الطري ذو الخشونة المرتفعة والمنخفضة، والجليد القديم، بالإضافة إلى مظاهر جليدية أخرى هامة، كالشقوق والانكسارات. حيث يرجع الجليد القديم إشارة أكثر قوة من الإشارة التي يردها الجليد الطري، كيفما كانت زاوية ورود الإشعاع.

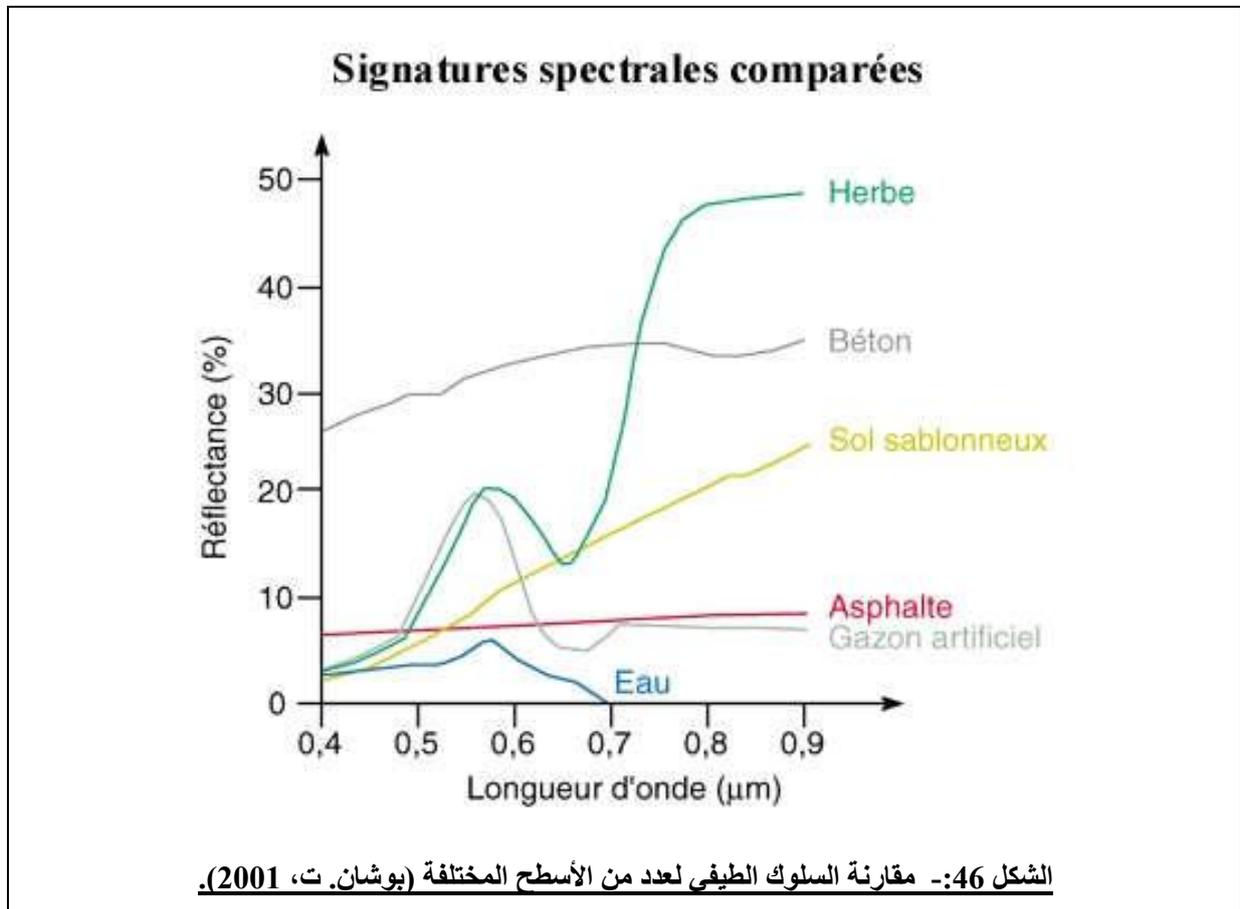
يوفر الإشعاع الراداري ضمن الترددات العالية الفعالة معلومات عن البيئة، ذات طبيعة مختلفة عما اعتدنا رؤيته ضمن نطاقات طيفية أخرى، لكنها توحى بظواهر أكثر تعقيدا، مرتبطة أيضا بطبيعة الأجسام الملاحظة بدل ارتباطها بطبيعة السطح.

4- تحليل مقارن (الشكل 46).

يبين الشكل 46 مجالين هامين لدراسة النباتات: و يوافق المجال الأول حزام اللون الأخضر، حيث يعكس اليخضور اللون الأخضر بشكل كبير. بالرغم من ضعف الانعكاسية (20% على الأكثر)، التي تبقى قريبة من انعكاسية بعض التربات. بينما يطابق المجال الثاني مجال الأشعة تحت الحمراء القريبة، حيث تتناسب انعكاسية النباتات مع النشاط اليخضوري. وغالبا ما تكون الانعكاسية قوية (في حدود 50%)، باستثناء الصمغيات Résineux، والأوراق الذابلة، والنباتات المريضة أو النباتات أثناء النضج. فيسهل بالتالي

عزل الأسطح النباتية عن باقي المشهد، لكون إجابتها الطيفية تبقى عالية مقارنة بمتوسط الانعكاسية. كما يظهر بوضوح أن الماء هو العنصر الذي يتميز بأضعف انعكاسية، من النطاق المرئي وحتى نطاق الأشعة تحت الحمراء. لذلك فإن المسطحات المائية والشبكة الهيدروغرافية تنفصل بشكل واضح عن البيئة المحيطة بها ضمن نطاق الأشعة تحت الحمراء، حيث يكون الامتصاص شبه تام.

يصبح التحليل أكثر تعقيدا عندما يتعلق الأمر بدراسة أسطح لا تغطيها المياه تماما، كما هي حالة التربة المشبعة ماء، أو تلك المغطاة بقشرة دقيقة من الماء، وتربة المناطق الرطبة المكسوة بالنباتات. في مثل هذه الحالات تكون الاستجابة الطيفية مركبة، ويسعى الماء دائما إلى خفض انعكاسية الأوساط التي تتواجد فيها.



يوضح الشكل 46 أيضا الارتباط الكبير الموجود بين الاستجابة الطيفية للأسطح المعدنية وتركيباتها الفيزيائية والكيميائية. فانعكاسية الخرسانة تفوق بحوالي ثلاث مرات انعكاسية الأسفلت، وهو أمر راجع جزئيا إلى تلون هذه الأسطح. من المهم أيضا أن نسجل

ثبات الاستجابة الطيفية بين 0.4 ملم و 1 ملم. ويسمح الفارق المهم ضمن النطاق المرئي، بين بصمة الطيف الخاصة بالخرسانة وبين تلك الخاصة بالنبات، بالتمييز بشكل جيد بين هذين الصنفين من الأسطح.

كما يتضح أيضا أن تمييز تربة مرملة (ذات سلوك طيفي قريب من سلوك التربة الطينية من النطاق المرئي إلى نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة) داخل محيطها، يتم في نطاق الأشعة تحت الحمراء بشكل أفضل، منه ضمن النطاق المرئي. وحدها الموجات ذات الطول الموافق ل"الأخضر" تسمح، بفضل الصبغة الخضراء لليخضور، بتمييز واضح ضمن النطاق المرئي. وعلى العكس فإن النشاط اليخضوري للنبات سيتسبب في انعكاسية أكبر من انعكاسية التربات ضمن الأشعة تحت الحمراء.

في الأخير، نشير إلى أن الحد الفاصل بين التربة والماء يصبح أكثر وضوحا، كلما زاد طول الموجة. إلا أن رطوبة تربة ما ونسبة الماء فيها تؤدي إلى خفض الاستجابة الطيفية بشكل كبير، دون أن تصل الامتصاصية إلى مستوى امتصاصية سطح مائي.

الفصل الرابع: أجهزة الالتقاط Capteurs والمنصات Plates-formes.

1- أجهزة الالتقاط.

أ- تعريف.

اللاقط Capteur: هو "الآلة التي تستقبل الطاقة المشعة القادمة من الهدف، فتصدر إشارة كهربائية موافقة قابلة للقياس".

اللاقط المصور Capteur imageur: هو "اللاقط الذي يلتقط معطيات ثنائية الأبعاد للميدان المستهدف ويخزنها في ذاكرته بطريقة تمكن من استعادة صور هذا الميدان".
يتمثل دور أجهزة الالتقاط في تحويل خصائص الإشعاع الكهرومغناطيسي إلى معلومات يمكن إدراكها من خلال التحليل الإنساني أو الآلي.

كيفما كان النطاق أو المجال الطيفي، يفضل عند الحديث عن أجهزة الالتقاط¹⁵، التمييز بين الصنف السالب الذي يقوم بتسجيل الطاقة الطبيعية (المنعكسة أو المنبعثة)، القادمة من السطح الأرضي، وبين الصنف النشط أو الموجب، حيث تتم، اصطناعيا، إضاءة الأجسام المراد دراستها، قبل تسجيل الطاقة التي ترجعها هذه الأجسام نحو اللاقط.
من بين أجهزة الالتقاط السالبة، نذكر: الأنظمة التصويرية، أجهزة قياس الراديو Radiomètres، أجهزة المسح Balayeurs أو Scanners كالماسح الحراري والماسح البصري. تمتد هذه الأجهزة على العموم من نطاق الأشعة فوق البنفسجية إلى الأشعة تحت الحمراء البعيدة.

كما تمثل أجهزة قياس الانتشار والرادارات وأجهزة الليدار، نماذج لأجهزة الالتقاط النشطة (أو الفعالة). وهناك حوالي عشرة أحزمة طيفية رادارية، عادة ما يتم استغلالها، وهي ممتدة من 0.3 GHz إلى 40 GHz.

¹⁵- للاطلاع بشيء من التفصيل على أجهزة الالتقاط يرجع إلى الفصل 4 من كتاب « Précis de télédetection » لبون. ف و روشون. ج . الجزء الأول.

أ- العناصر الأساسية لجهاز الالتقاط.

يشتمل جهاز الالتقاط، كيفما كانت طبيعته (سالب أو نشط)، على ثلاثة عناصر أساسية هي (الشكل 47، الشكل 48، الشكل 49):

- نظام بصري، يتحكم في حدود درجة التباين (أو الدقة) الفضائي *Résolution spatiale*، ويحدد الخصائص الهندسية (الحجم، الشكل) والبصرية للمرئية، وزاوية التقاط الصورة؛
- مصفاة طيفية، تتحكم في المجال الطيفي للقياس، وتحدد منطقة أو مناطق درجة التباين الطيفي، التي سيتم ضمنها تسجيل الطاقة الوافدة إلى اللاقط؛
- مستشعر أو مجس (Détecteur)، الذي يتحكم في حدود، درجة التباين الراديومتري ودرجة التباين الطيفي، ويقوم بتحويل الإشارة الفيزيائية الواردة إلى معطيات من نوع مختلف يمكن أن نقوم بتحليلها رياضياً أو أن تدركها عين الإنسان.

2- المنصات (الجدول 4).

لتسجيل الطاقة المنعكسة أو المنبعثة من سطح أو هدف معين بشكل جيد، يجب تثبيت جهاز الالتقاط على منصة بعيدة عن هذا السطح أو الهدف الملاحظ. وتنقسم المنصات الحاملة لأجهزة الالتقاط إلى منصات قريبة من السطح، إما على الأرض (المنصات الأرضية) أو في الهواء (المنصات الجوية)؛ ومنصات خارج الغلاف الجوي (المنصات الفضائية) (الجدول 4):

Type de plates-formes	Orbite	Altitude
terrestres	-	quelques mètres
aériennes (avion, ballon)	-	jusqu'à 6'000 m, voire 12'000 m (40 km pour les ballons)
spatiales	circulaire	en général 700-900 km
	héliosynchrone	obligatoirement 300 – 1'500 km
	géostationnaire	36'000 km

- المنصات الأرضية (الشكل 50): وتستعمل عادة لتسجيل معلومات تفصيلية عن السطح، تتم مقارنتها بعد ذلك مع المعلومات التي التقطت عبر الطائرة أو القمر الصناعي. كما تستعمل المنصات الأرضية في بعض الحالات لمعرفة خصائص الأهداف الأرضية التي تمت مراقبتها من خلال أجهزة التقاط أخرى، بشكل أفضل، بهدف تحسن فهم المعلومات التي توفرها المرئية؛

- المنصات الجوية (الشكل 51): وتتمثل في البالونات، والطائرات التي تمكن من بلوغ ارتفاعات تصل إلى 15 كلم. وتستعمل الطائرات بشكل كبير، فهي تسهل جمع المعلومات والحصول على صور تفصيلية للسطح، تماما في الوقت وفي المكان المرغوبين. لكن قد تشوش الظروف المناخية على تصاميم الطيران، كما أن تكلفة هذه المهمات تصبح باهظة على المدى البعيد؛



الشكل 51:- منصة استشعار جوية (المركز الكندي للاستشعار الفضائي).



الشكل 50:- منصة استشعار أرضية (المركز الكندي للاستشعار الفضائي).

- المنصات الفضائية (الشكل 52): حيث تتم عملية الاستشعار عن بعد خارج الغلاف الجوي، أحيانا بواسطة المركبات الفضائية لكنها ننم في الغالب من خلال الأقمار الصناعية، والتي تمثل أجساما تدور في فلك كوكب الأرض. وتعتبر الأقمار الصناعية أهم وسائل الاستشعار عن بعد، لأن الصورة الفضائية تؤخذ على بعد كبير فهي تغطي مساحة واسعة، مما يسهل دراسة المناطق الجبلية والأراضي الصحراوية التي يصعب الوصول إليها عادة، أو التيارات المحيطية التي لا يمكن دراسة أي جزء

منها بمعزل عن باقي الأجزاء. بالإضافة إلى عدم تأثرها بتبدل الأحوال الجوية، الأمر الذي يجعلها أكثر ثباتاً. كما أنه يمكن التحكم في الأقمار الصناعية ومعرفة موقعها على نحو من الدقة، يفوق التحكم في الطائرات العادية أو تحديد موقعها.



تسمح المنصات الفضائية، بفضل مداراتها، من القيام بتغطية متكررة ومتصلة لسطح الأرض. ويتم تصنيف الأقمار الصناعية حسب الارتفاع الذي توجد عنده وأيضا حسب نوع المدار الذي تسير فيه.

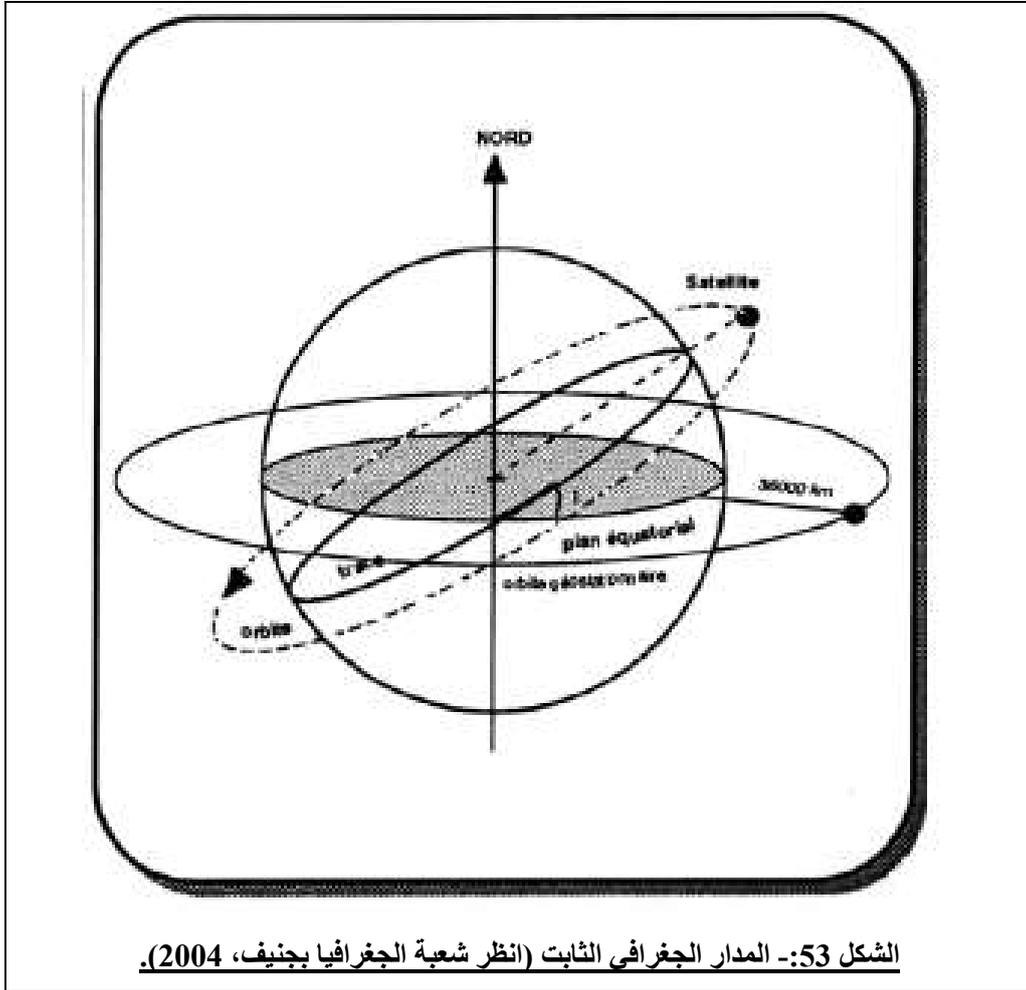
3- مدارات الأقمار الصناعية الاستشعارية.

يمثل المدار مسار القمر الصناعي حول كوكب الأرض، ويتوقف ارتفاع المدار أو بعده على طبيعة المهمة و السرعة التي يراد أن يدور به القمر حول الأرض. وكلما كان المدار قريبا من الأرض، كانت سرعة القمر الصناعي أكبر من السرعة المدارية. ويمكن التمييز بين ثلاثة أصناف من الأقمار الصناعية ذات الأهمية الاستشعارية حسب مداراتها هي:

أ- المدار المتزامن مع الشمس *Orbite héliosynchrone*

نتحدث عن المدار المتزامن مع الشمس عندما يبقى سطح المدار Plan de l'orbite ثابتا بالنسبة لسطح مدار الأرض حول الشمس، بحيث يمر القمر الصناعي كل يوم فوق نفس المنطقة عند نفس الساعة المحلية. لذلك يتمتع هذا المدار بأهمية خاصة في استشعار الموارد الطبيعية. ويحصر ارتفاع الأقمار الصناعية الموضوعة في مثل هذا المدار بين 300 كلم و 1500 كلم؛

ب- المدار الجغرافي الثابت *Orbite Géostationnaire*

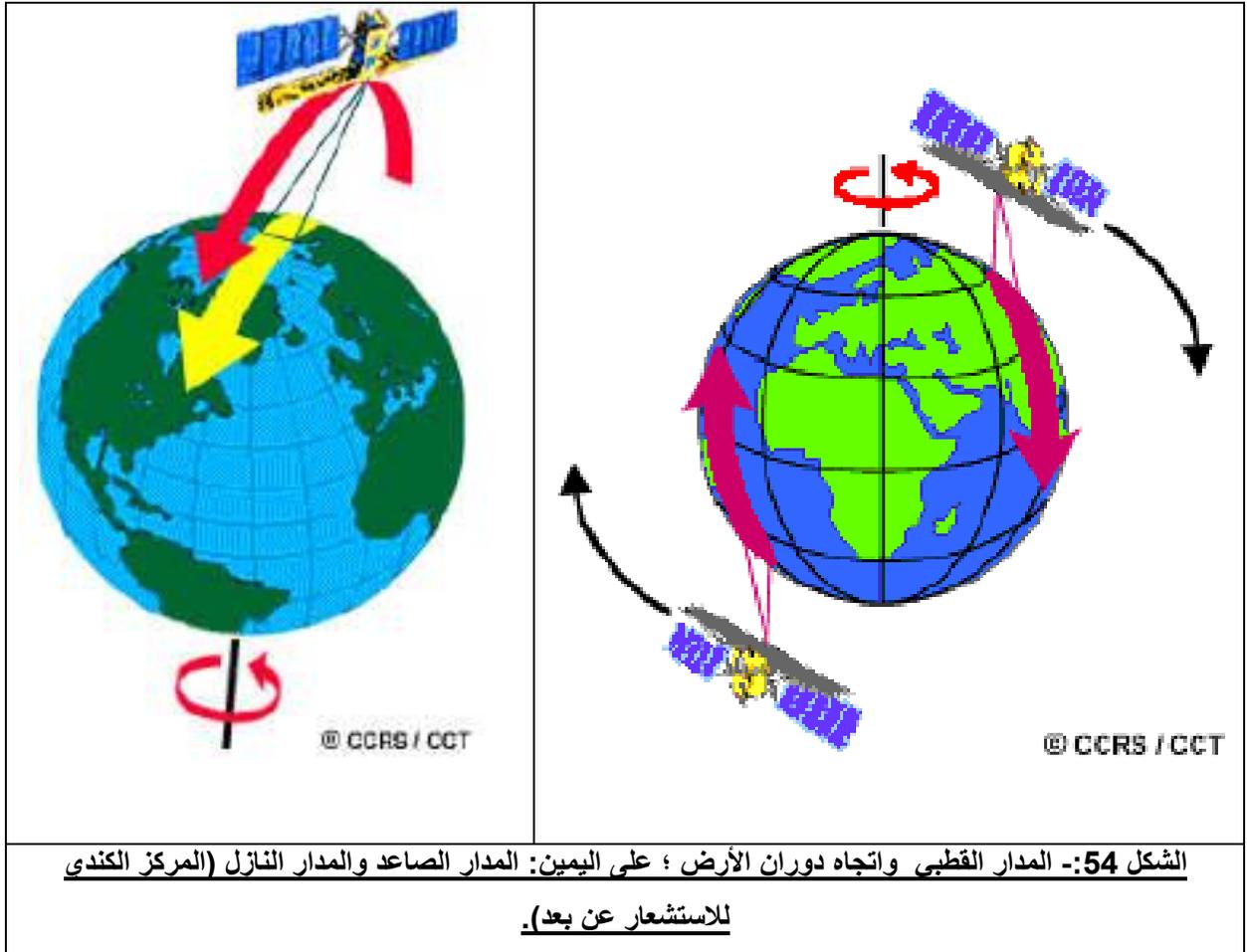


في هذه الحالة يبقى القمر الصناعي دائما فوق نقطة ثابتة من سطح الأرض (على ارتفاع 36000 كلم فوق خط الاستواء)، فهو بالتالي مدار استوائي (لكون سطح مداره يطابق السطح الاستوائي) ودائري بالضرورة.

ضمن هذا المدار، الذي يسمح بمراقبة نفس المنطقة (بين خطي العرض 81.3° شمالاً وجنوباً)، توضع الأقمار الصناعية المستعملة في مجال الاتصالات اللاسلكية وفي مجال الأرصاد الجوية.

ج- المدار القطبي *Orbite Quasi Polaire*

وهو مدار متوسط الارتفاع حول الأرض، وتوضع فيه الأقمار الصناعية المستخدمة للاستشعار والمسح الفضائي لكوكب الأرض كله (باستثناء القطبين). ويدور القمر في المدار القطبي من الجنوب نحو الشمال، بينما تدور الأرض تحتها من الغرب إلى الشرق (الشكل 54).



لأغلب الأقمار الموضوعة في مدارات قطبية، مدار متزامن مع الشمس، وبذلك تستطيع هذه الأقمار دائماً مراقبة كل منطقة من مناطق العالم في نفس الساعة الشمسية

المحلية. فبالنسبة لخط عرض معين، تكون وضعية الشمس دائما متماثلة عندما يمر قمر صناعي فوق منطقة معينة خلال فصل معين. وبذلك تؤمن خاصية مدار القمر هذه، ظروف إضاءة متشابهة عندما نقوم بجمع معطيات خاصة بفصل معين على مدى سنوات عديدة، أو بالنسبة لمنطقة معينة على مدى عدة أيام. وهو عامل مهم عندما نقوم بمقارنة مرئيتين متتاليتين أو عندما نقوم بإنجاز فسيفساء *mosaïque* انطلاقا من مرئيات متقابلة. لأن هذه المرئيات لا تحتاج إلى تصحيح يأخذ بعين الاعتبار إضاءة الشمس.

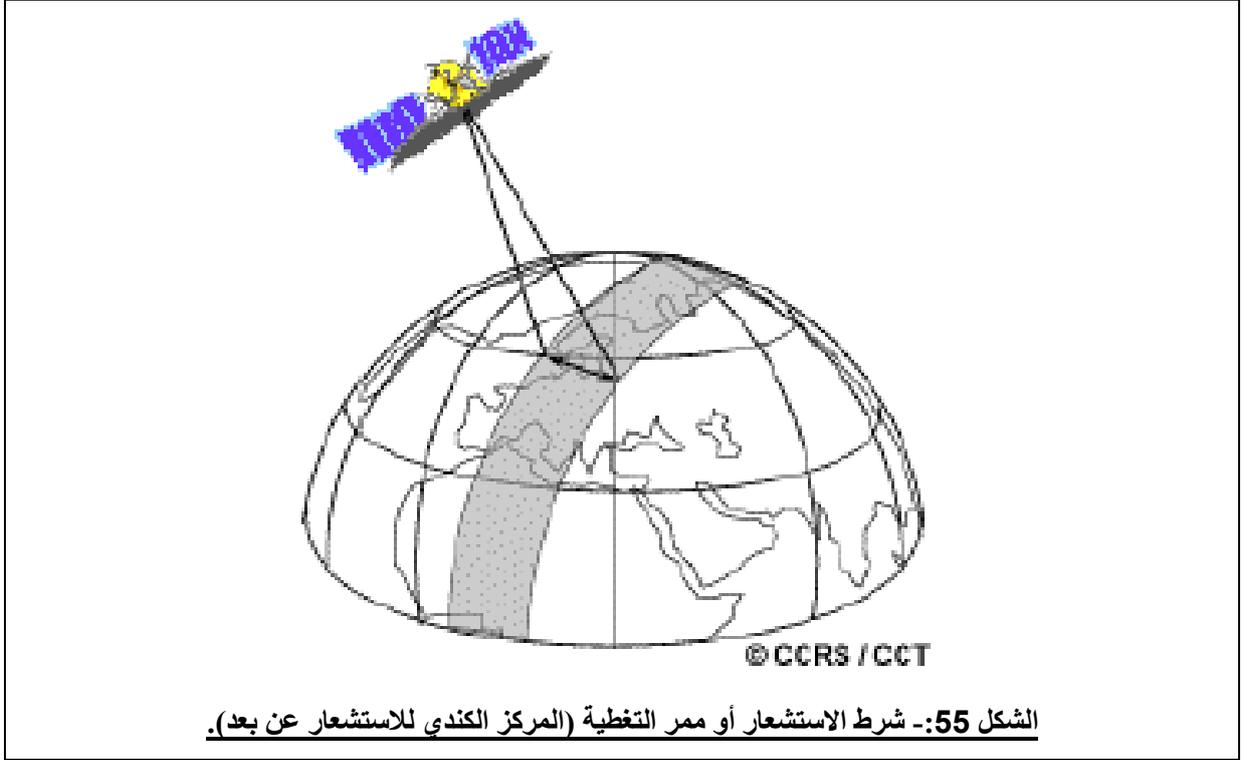
ويشكل المدار القطبي المدار المفضل لأقمار مراقبة الأرض كالقمر سبوت والقمر لاندسات. كما أن أغلب منصات الأقمار الصناعية توضع حاليا في مدار قطبي، حيث تتحرك باتجاه الشمال من إحدى جهتي كوكب الأرض وباتجاه الجنوب في الجهة الثانية من المدار. فنتحدث بالتالي عن المدار الصاعد وعن المدار النازل. وعندما يكون المدار أيضا متزامنا مع الشمس، فإن المدار الصاعد للقمر الصناعي سيوافق الجهة المظللة من الأرض؛ بينما يوافق المدار النازل الجهة التي تضيئها الشمس. لذلك فإن أجهزة الالتقاط التي تسجل الطاقة التي تعكسها الأرض، لن تحصل على المعلومات إلا خلال المدار النازل. أما أجهزة الالتقاط النشطة والتي تمتلك مصدر إضاءة خاص بها أو السالبة التي تقوم بتسجيل الطاقة المنبعثة من الكوكب (الطاقة الحرارية تحت الحمراء مثلا)، فتستطيع جمع المعطيات سواء خلال المدار الصاعد أو خلال المدار النازل.

د- ملحوظة.

تقع معظم أراضي روسيا ودول الاتحاد السوفييتي سابقا في شمال النصف الشمالي للكرة الرضية، ولذلك يصعب رصدها من أقمار المدار الجغرافي الثابت التقليدي الموضوع فوق خط الاستواء، وللتغلب على هذه الصعوبة تستخدم روسيا مدارا ببيضاويا بحيث يكون القمر بعيدا من الأرض (وبالتالي أبطأ) عندما يكون فوق الأراضي الروسية، بينما يكون قريبا من الأرض فيمر سريعا فوق بقية العالم.

4- شريط الاستشعار *La fauchée*.

عندما يسير قمر صناعي ضمن مداره حول الأرض، يقوم اللاقط "بمراقبة" جزء معين من السطح، يسمى ممر التغطية Couloir-couvert أو شريط الاستشعار Fauchée، يمتد عرضه بالنسبة للمنصات الفضائية من 10 إلى 100 كلم (الشكل 55).

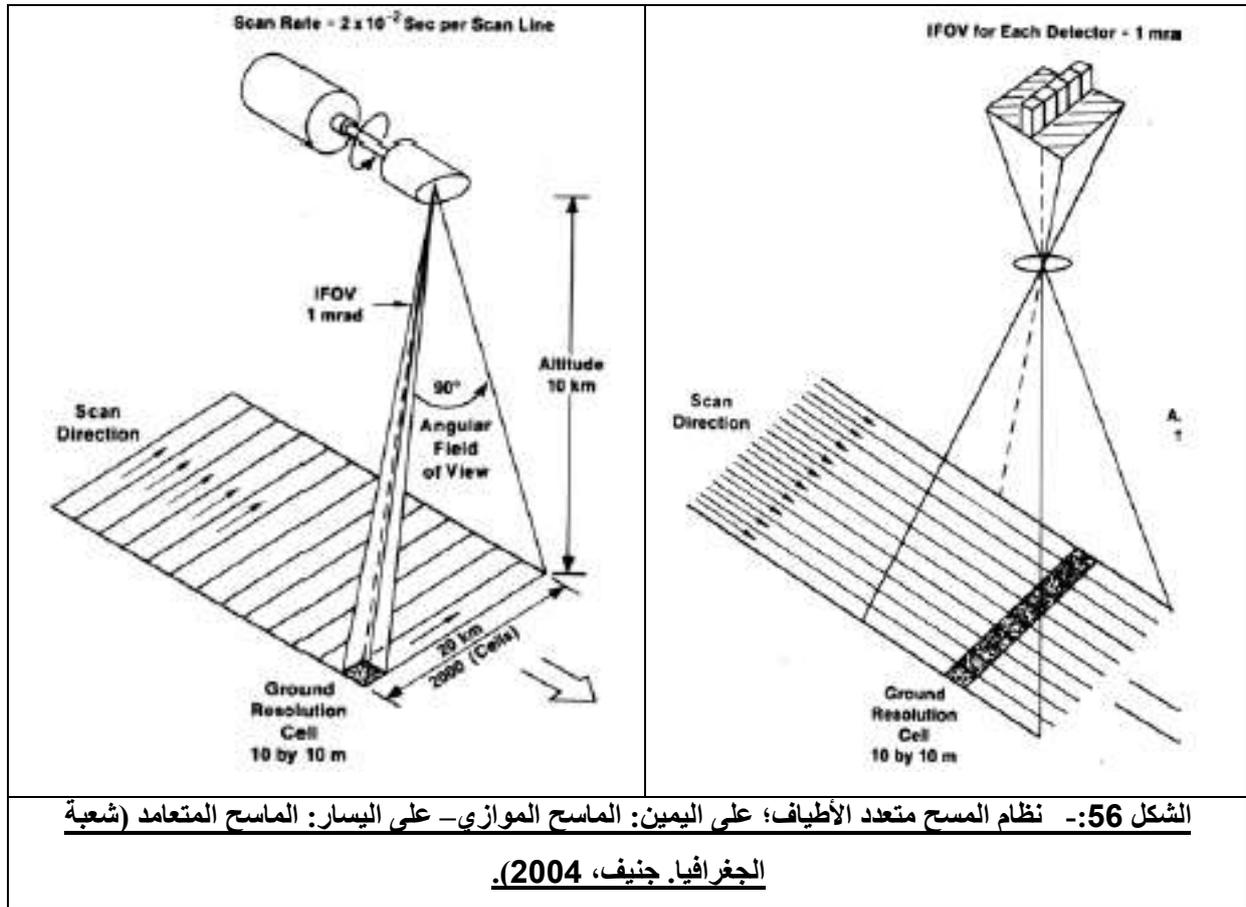


5- المسح المتعدد الأطياف Balayage multispectral.

على عكس آلات التصوير، تتحصل الكثير من أجهزة الالتقاط الإلكترونية على المعطيات من خلال استعمال نظام مسح *Systeme à balayage*، يستخدم لاقطاً ذو حقل رؤية لحظي (CVI) ضيق، لكنه يقوم بمسح السطح بطريقة تمكنه من إنتاج مرئية ذات بعدين للسطح الأرضي. ويمكن استخدام أنظمة المسح على منصات جوية أو فضائية، حيث تشتغل هذه الأنظمة بنفس الطريقة.

نتحدث عن الماسح المتعدد الأطياف، عندما يقوم نظام المسح باستخدام أطوال موجات متعددة للحصول على المعطيات. ويتم المسح بطريقتين أساسيتين هما: المسح الموازي، عندما يكون اتجاه مسار ممر التغطية (أو شريط الاستشعار) متوازيًا مع اتجاه

المسح؛ والمسح المتعامد، عندما يكون اتجاه مسار ممر التغطية (أو شريط الاستشعار) متعامدا مع اتجاه المسح (الشكل 56).



6- خصائص المعطيات المحصل عليها.

أ- درجات تباين المرئيات الفضائية.

تتميز المعطيات التي تمكن العملية الاستشعارية من الحصول عليها، بالخصائص و المميزات التالية:

- درجة التباين الفضائي أو الهندسي: وتتمثل في المساحة على الأرض لعنصر المرئية الأساسي (أو البيكسل Pixel)، وفي امتداد المرئية؛
- درجة التباين الطيفي: وتتمثل في عرض الحزام الطيفي المرصود؛
- درجة التباين الزمني: وتتمثل في الفارق الزمني بين عمليات أخذ الصور لنفس المكان، وترتبط بمدار القمر الصناعي؛

- درجة التباين الراديومترية ودرجة التباين الرقمي.

***/- درجة التباين الفضائي أو الهندسي.**

مساحة "المسرح"	درجة التباين في الصف المتعدد الأطياف multispectral	درجة التباين في الصف غير الملون panchromatique	القمر الصناعي
10 x 10 km	4 متر	1 متر	إيكونوس IKONOS
60 x 60 km	20 متر	10 متر	سبوت SPOT
180 x 180 km	30 متر	-	لاندسات LANDSAT
2500 x 2500 km	1,1 كلم	-	نوا NOAA

الجدول 5: درجة التباين (أو الدقة) الفضائي لأهم أقمار مراقبة كوكب الأرض (بوشان، ت، 2001).

تمثل درجة التباين الفضائي أو الهندسي، أصغر مسافة (بالمتر أو الكيلومتر) تمكن من التمييز بين جسمين متجاورين. وبالتالي لن تمكن درجة تباين "خشنة"، تبلغ عدة مئات من الأمتار إلى عدة كيلومترات، من تمييز الأجسام الفضائية الصغيرة (كالبنائيات، والمساحات الزراعية الصغيرة). بعكس درجة التباين الدقيقة (= درجة تباين عالية)، البالغة بضع عشرات من الأمتار إلى متر واحد، والتي تسمح بالتعرف على شبكات المواصلات الدقيقة (كالطرق والممرات...) على سبيل المثال. وعندما نقول إن درجة التباين الفضائي لمرئية ما تبلغ 20 متراً، فهذا يعني أن كل عنصر أساسي في المرئية (البيكسل¹⁶ Pixel) يمثل مساحة على الأرض تبلغ (20 * 20) متر مربع. وإذا كانت دقة المرئية تزداد مع زيادة درجة التباين الفضائي حيث تسمح بتمييز الأجسام الصغيرة الحجم، فإنها تتطلب زيادة

¹⁶- كلمة بيكسل Pixel، كلمة اختزالية لمصطلح Picture element الإنجليزي والذي يعني العنصر الأساسي للصورة أو الرسم.

في الحجم المعلوماتي Taille informatique (المعبر عنه بالأوكتي Octets)، الأمر الذي يبطأ من سرعة المعالجات، فتصبح الحاجة ماسة إلى أجهزة معالجة (حواسيب مثلا) جد متطورة. كما أن زيادة درجة التباين الفضائي تؤدي بالضرورة إلى خفض مساحة الجزء الأرضي الذي تتم مراقبته ويتم تسجيل المعطيات بخصوصه (= "المسرح" Scène).

لا معنى للتسابق نحو الوصول إلى أعلى درجة تباين (أصغر قيمة)، لأن اختيار درجة التباين يجب أن يتم حسب الإشكالية الدقيقة للبحث والدراسة. فمن غير المنطقي القيام بدراسة الغطاء النباتي لمجموع قارة إفريقيا مثلا من خلال مرئيات إيكونوس IKONOS، أو دراسة المراكز داخل الأوساط الحضرية من خلال مرئيات نوا NOAA (الجدول 5). بالإضافة إلى كون ثمن المرئية الفضائية يزداد مع زيادة درجة تباينها. وبالتالي يجب تكيف اختيارات درجة التباين الفضائي مع إشكالية البحث وليس العكس (أنظر بوشان. ت، 2001).

*/- درجة التباين الطيفي.

تصف درجة التباين الطيفي قدرة اللاقط على استغلال نوافذ طول موجات، صغيرة فالماء والنبات مثلا لا يحتاجان لدرجة تباين طيفي دقيقة، بعكس المعادن والصخور التي تتطلب درجة تباين طيفي أكبر بكثير، حتى يتسنى التمييز بين مختلف المعادن.

وتقل قيمة المرئيات غير الملونة (الأسود والرمادي فقط Panchromatiques)، من الناحية الموضوعاتية مقارنة مع المرئيات متعددة الأطياف Multispectrales. حيث يفضل أن تكون هناك ثلاثة أحزمة طيفية: الخضرة والأزرق والأحمر، على أن يكون هناك حزام واحد في النطاق المرئي. وهناك أجهزة التقاط على درجة عالية من الإتقان والتطوير (أجهزة الالتقاط العالية الطيف Capteurs Hyperspectraux تسمح برصد مئات الأحزمة الطيفية).

*- درجة التباين الراديومتري ودرجة التباين الرقمي.

تصف درجة التباين الراديومتري لنظام استشعار عن بعد معين، قدرته على التعرف على الفروق الصغيرة والدقيقة داخل الطيف الكهرومغناطيسي. وكلما كانت درجة التباين الطيفي دقيقة، كلما زادت حساسية اللاقط تجاه فروق الدقيقة في قوة الطاقة المستقبلة.

ترتبط درجة التباين الرقمي ارتباطا وثيقا بدرجة التباين الراديومتري. حيث يتم تحويل كل كمية طاقة تم قياسها (بالكيلوجول) إلى حساب رقمي أو قيمة راديومترية. وكلما كان مجال الحسابات الرقمية ممتدا كلما كان التباين الرقمي كبيرا. ويغطي مجال الحسابات الرقمية الممكن في أغلب المرئيات، 256 قيمة راديومترية : ويبين الشكل 57 ثلاثة مرئيات (لنفس المساحة) تم ترميزها تباعا في 2 بايت Bites (4 قيم ممكنة) و3 بايت (8 قيم ممكنة)، و8 بايت (256 قيمة ممكنة). وكلما كان التباين الرقمي كبيرا كلما تحسنت الجودة الموضوعاتية للمرئية.



الشكل 57:- مرئيات لنفس المساحة بدرجات تباين مختلفة، من اليمين إلى اليسار: 2 بايت (4 قيم راديومترية)؛ 3 بايت (8 قيم راديومترية)؛ 8 بايت (256 قيمة راديومترية) (بوشان. ت، 2001).

*- درجة التباين الزمني.

بالإضافة إلى التباين الفضائي والتباين الطيفي والتباين الراديومتري، يشكل التباين الزمني مفهوما آخر له أهميته في مجال الاستشعار الفضائي. حيث تتميز القمار الصناعية بدورات (تبلغ عموما بضعة أيام)، تمثل الزمن الذي يستغرقه القمر الصناعي للقيام بحلقة مدارية كاملة، والعودة من جديد لمراقبة نفس "المسرح" من نفس النقطة في الفضاء. فتكون

بالتالي درجة التباين الزمني مساوية لهذه الدورة. لكن بعض مناطق العالم تعرف مراقبة أكثر ترددا من غيرها نتيجة للتداخل والتراكب بين ممرات التغطية المتجاورة، وتكبر مناطق التداخل هاته أكثر فأكثر كلما اقتربنا من القطبين.

لبعض الأقمار الصناعية القدرة على تصويب أجهزة الالتقاط الخاصة بها باتجاه نفس النقطة، بالنسبة لمختلف المرات التي يمر خلالها القمر الصناعي، لذلك ترتبط درجة التباين الزمني الفعلية للقمر الصناعي بعوامل متنوعة كمساحة منطقة التراكب بين ممرات التغطية المتجاورة، وقدرة القمر وأجهزة الالتقاط الخاصة به، والموقع من خطوط العرض. وتمثل قدرة الأقمار الصناعية على جمع المعلومات عن نفس المنطقة بشكل دوري، إحدى محاسن الاستشعار الفضائي. لأن الخصائص الطيفية للمنطقة المراقبة قد تتغير مع الزمن، وتمكن مقارنة المرئيات متعددة الأزمان من رصد هذه التغيرات. والقدرة على رصد التحولات التي تطرأ على النباتات أثناء دورات نموها مثلا، ترتبط بوتيرة جمع المعطيات.

وبالتالي يمكن تتبع التحولات التي تقع على سطح الأرض، من خلال جمع المعطيات بشكل دوري وبصفة مستمرة، سواء كانت هذه التحولات طبيعية (كنمو النبات أو تطور فيضان) أو من كسب الإنسان (كنمو المراكز الحضرية أو قطع الغابات).

يكتسي عامل الزمن أهمية استثنائية كبيرة في كثير من الحالات نذكر منها:

/*- بقاء غطاء السحب (تحت المدارين مثلا)، الأمر الذي يحد من الأوقات الممكنة أثناءها مراقبة سطح الأرض؛

/*- الرغبة في مراقبة الظواهر القصيرة الأمد (الفيضانات، سيلان المحروقات ...)

/*- دراسة تطور امتداد الأمراض التي تصيب الغابات من سنة إلى أخرى والتي تحتاج إلى مرئيات متعددة الأزمان Multitemporelles ؛

ب- المرئيات الفضائية les images satellitaires

رغم قلة الأقمار الصناعية التي تم تصميمها لالتقاط صور فوتوغرافية، كسلسلة الأقمار كوسموس Kosmos التي أنتجها الاتحاد السوفييتي السابق، فإنه كثيرا ما يتم

استعمال مصطلح "الصورة الفضائية" "Photo satellite" للإشارة إلى المرئيات التي تأخذها الأقمار الصناعية المداراتية، بالرغم من أن الفرق بينهما كبير جدا.

إن المرئية ليست صورة، وتلتقط غالبية الأقمار الصناعية مرئيات – وليس صوراً- لسطح الأرض: فالمرئية تكون على شكل رقمي بينما تكون الصورة على شكل ورقي.

والمرئية الفضائية عبارة عن مجموعة من العناصر (Matrice de pixels)، حيث يمثل عنصر المرئية الأساسي (البيكسل)، أصغر مساحة متجانسة مكونة للمرئية التي تم تسجيلها. ويبين الشكل 58 مفهوم المرئية الفضائية شكلاً ومضموناً:

- يمثل الشكل الموجود على اليسار مرئية من 25 عنصر أساسي (أي أن كل جانب من جوانبها يتشكل من 5 عناصر أي 5 أسطر و 5 أعمدة). ويتوافق كل عنصر مع قيمة راديومترية تمثل معدل القياسات الراديومترية التي أجريت على المساحة التي يمثلها العنصر في الميدان؛

- أما الشكل الموجود في الوسط فيبين العلاقة بين شكل العنصر (هندسته) وبين مضمونه (قيمه الراديومترية)؛

- أما الشكل الموجود إلى اليسار فيبين الرموز الاصطلاحية التي تعطى للقيم الراديومترية المختلفة: حيث يتم ترميز أعلى القيم باللون الأبيض وأضعف القيم باللون الأسود، ينتج عنه درجات لونية رمادية مختلفة. فيتم بالتالي إعطاء كل عنصر أساسي للمرئية درجة لونية (بين الأبيض والأسود)، حسب القيمة الراديومترية الخاصة به. المر الذي يشكل في النهاية مرئية فضائية.

					12	104	54	75	1						
					87	201	153	89	12						
					23	57	49	33	47						
					205	198	157	53	39						
					28	14	7	5	1						

الشكل 58:- المرئية الفضائية، الشكل والمضمون (بوشان، ت، 2001).

وتتميز كل مرئية فضائية، بدرجات تباين فضائي وطيفي ورااديومتري، خاصة بها، تصف درجة التباين – في أنظمة القياس المختلفة - قدرة جهاز القياس على التمييز بين جسمين أو قيمتين متقاربتين فيما بينها. كما تشير في حالة المرئية الفضائية، إلى القدرة على التمييز بين نقطتين متجاورتين.

7- الأقمار الصناعية.

أ- أقمار الرصد الجوي.

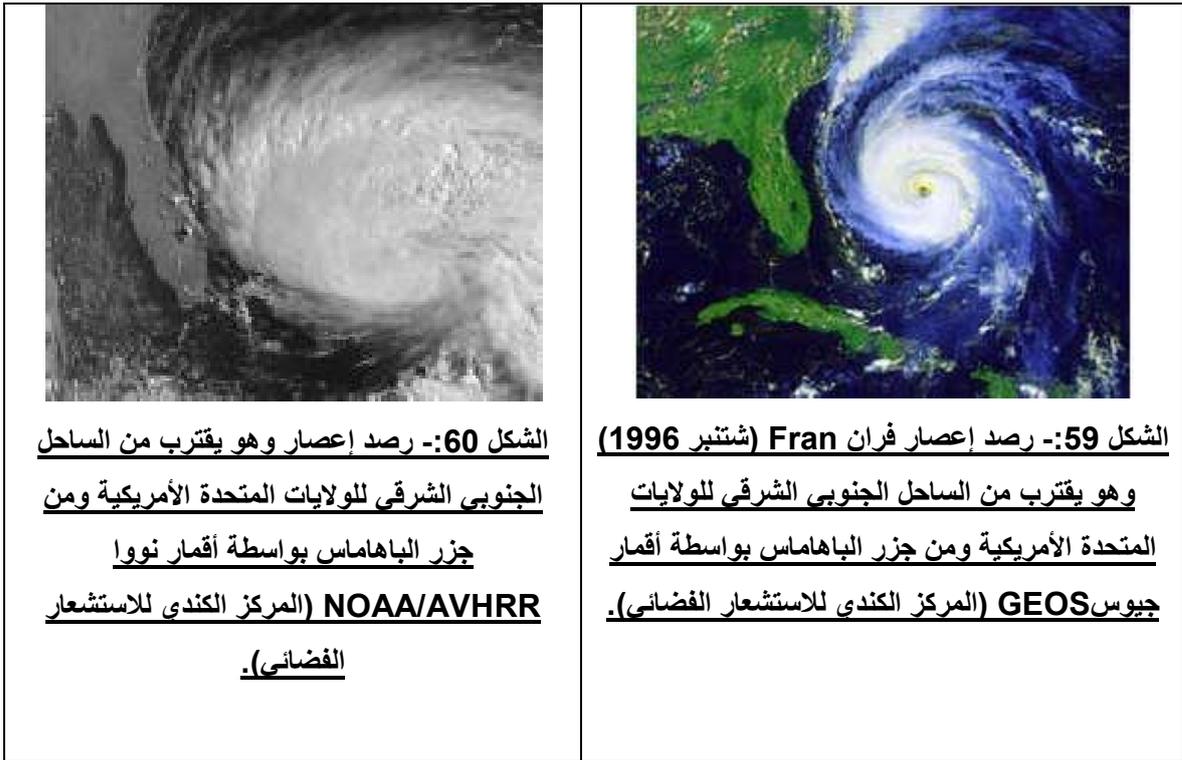
تمثل متابعة حالة الجو وعمليات التنبؤ بها، أول الاستخدامات المدنية (غير العسكرية) للاستشعار عن بعد. وكان القمر تيروس 1 (Television and InfraRed Observation Satellite)، والذي أطلقته الولايات المتحدة الأمريكية سنة 1960 تلتها خلال السنوات الخمس الموالية، أقمار صناعية عديدة. تميزت كل هذه الأقمار بمدارات قطبية مزمنة للشمس. الأمر الذي يمكن من القيام بتغطية متكررة للأنظمة الجوية العالمية. في سنة 1966 أطلقت وكالة الفضاء الأمريكية "ناسا" القمر الصناعي ذو المدار الجغرافي الثابت أتس-1 (ATS-1 : Application Technology Satellite)، الذي قوم بالإمداد بمرئيات نصف أرضية لسطح الأرض وللسحب كل 30 دقيقة. فأصبح بالإمكان - لأول مرة- متابعة تطور وحركة الأنظمة الجوية بصفة متصلة. وتستخدم حاليا كثير من البلدان أقمار الرصد الجوي لمراقبة الظروف المناخية حول الأرض. وتستعمل هذه الأقمار – في الغالب- أجهزة التقاط ذات تباين فضائي خشن (مقارنة مع أنظمة مراقبة كوكب الأرض)، وتغطي مساحات شاسعة من سطح الأرض؛ بينما توفر درجة التباين الزمني العالية، مراقبة متكررة لسطح الأرض وللرطوبة الجوية وغطاء السحب، الأمر الذي يسمح بمتابعة الظروف المناخية والتنبؤ بها على صعيد الكوكب ككل. ومن أهم أنظمة الرصد الجوي نجد:

*/- أقمار جيوس (GEOS Geostationary Operational)

(Environmental Satellite).

تم تصميمها لتخلف سلسلة الأقمار أتس، بواسطة وكالة الأبحاث الفضائي "ناسا" لصالح الإدارة الوطنية للأجواء والمحيطات NOAA بهدف تزويد المصلحة الوطنية

للأرصاد الجوية بالولايات المتحدة الأمريكية بمرئيات كبيرة التردد وذات مقاييس صغيرة عن سطح الأرض وغطائه السحابي بهدف مراقبة حالة الطقس والتنبؤ بها. وتشكل هذه الأقمار شبكة عالمية من أقمار الرصد الجوي، مصطفة حول الأرض على خطوط طول تفصل بينها 70° ، بهدف الحصول على تغطية شبه كاملة للكوكب: حيث يمكن قمرين جيوس موضوعين في مدار جغرافي ثابت على ارتفاع 36000 كلم فوق خط الاستواء، أحدهما موضوع عند خط طول 75° غرب خط غرينتش، والثاني عند خط طول 135° غرب خط غرينتش، لوحدتهما من تغطية منطقة تمتد من خط الطول 20° غرب خط غرينتش إلى خط الطول 165° شرق خط غرينتش. وتظهر على الشكل 59 مرئية فضائية تغطي جزءا من جنوب شرق الولايات المتحدة الأمريكية والمناطق المحيطة المقابلة لها، وهي مناطق تشهد نمو وتطور عواصف وأعاصير جد قوية.



وقد تم إطلاق جيلين من أقمار جيوس بهدف قياس الإشعاع المنعكس، من أجل التعرف على درجة حرارة الجو، و الرياح والرطوبة و الغطاء السحابي:
 - الجيل الأول ويمتد من 1975 (جيوس- 1) إلى 1992 (جيوس-7) وهو جيل من الأقمار لا يسمح برصد كوكب الأرض إلا في 5% من الوقت؛

- الجيل الثاني والذي ظهر مع جيوس-8 الذي أطلق سنة 1994 والذي يسمح بمراقبة الأرض بشكل شبه مستمر، حيث أصبح بالإمكان التقاط المرئيات كل 15 دقيقة.

لقد تم تزويد أقمار الجيل الثاني بأجهزة تصوير وأجهزة سبر Sondage منفصلة عن بعضها، ويحتوي جهاز التصوير L'imageur على خمسة أحزمة طيفية تلتقط الإشعاع الشمسي المرئي وتحت الأحمر (الجدول 6). وتصل درجة التباين الراديومتري بالنسبة للمعطيات التصويرية 10 أوكتي بحيث يمكن نقلها مباشرة إلى الشاشات وإلى المستعملين لها على الأرض. ويبين الجدول 6 مختلف هذه الأحزمة وتباينها الفضائي بالإضافة إلى عدد من استخداماتها في مجال الرصد الجوي.

Bande	Domaine spectral (microns)	Résolution spatiale	Application
1	0,52 - 0,72 (visible)	1 km	Nuages, pollution, identification de tempêtes sévères
2	3,78 - 4,03 (proche IR)	4 km	Identification de la brume durant la nuit, différenciation des nuages de pluie et de neige ou glace durant le jour; détection de feux et d'éruptions volcaniques, détermination de la température de la surface des océans durant la nuit
3	6,47 - 7,02 (vapeur d'eau au niveau supérieur)	4 km	évaluation de l'advection et du contenu en humidité des couches atmosphériques intermédiaires. Suivi du mouvement des masses atmosphériques intermédiaires. Suivi du mouvement des masses atmosphériques
4	10,2 - 11,2 (IR à longue longueur d'onde)	4 km	identification des vents qui entraînent les nuages, les tempêtes sévères, la pluie torrentielle
5	11,5 - 12,5 (fenêtre de l'IR qui est sensible à la vapeur d'eau)	4 km	identification de l'humidité dans la couche inférieure de l'atmosphère, détermination de la température de la surface des océans, détection de poussière et de cendre volcanique dans l'atmosphère

أما المسبار الجوي ذو القنوات التسعة عشر (19) فيقيس الإشعاع المنبعث ضمن 18 حزاما تحت أحمر حراري، ويقيس الإشعاع المنعكس ضمن قناة مرئية واحدة (1). مع درجة تباين فضائي تبلغ 8 كلم ودرجة تباين راديومتري تبلغ 13 أوكتي.

***- أقمار نوا NOAA/AVHRR (الشكل 60).**

تستخدم الإدارة الوطنية للأجواء والمحيطات NOAA سلسلة أخرى من الأقمار للرصد الجوي ولإستخدامات أخرى تدعى أقمار نوا NOAA، موضوعة في مدارات قطبية مزامن للشمس، على ارتفاع يتراوح بين 830 كلم و 870 كلم فوق سطح الأرض، تنتمي إلى سلسلة الأقمار تيروس المتقدمة (التي تعود إلى بداية الستينيات من القرن

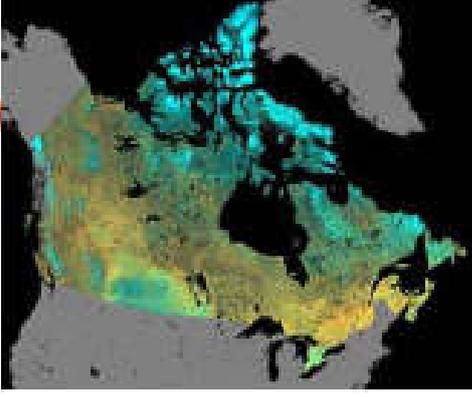
العشرين). وهي تقوم بتكميل المعلومات التي توفرها القمار ذات المدارات الجغرافية الثابتة (كأقمار جيوس). فيشتغل القمران، اللذان يوفر كل واحد منهما تغطية تامة لكوكب الأرض، معا لتأمين تحيين Mise à jour للمعطيات عن كل مناطق العالم كل ستة ساعات على الأقل.

يوجد على متن الأقمار نواو اللاقط الأولى (Advanced very high AVHRR Resolution Radiometer) والذي يستخدم للرصد الجوي ولمراقبة سطح الأرض (مقاييس صغيرة). ويلتقط جهاز AVHRR الإشعاع الكهرومغناطيسي ضمن النطاق المرئي والأشعة تت الحمراء القريبة والمتوسطة والحرارية. ويبلغ عرض شريط الاستشعار 3000 كلم. ويبين الجدول 7 أحزمة جهاز الالتقاط AVHRR مع طول الموجات ودرجات التباين الفضائي والتطبيقات العامة، الموافقة لها

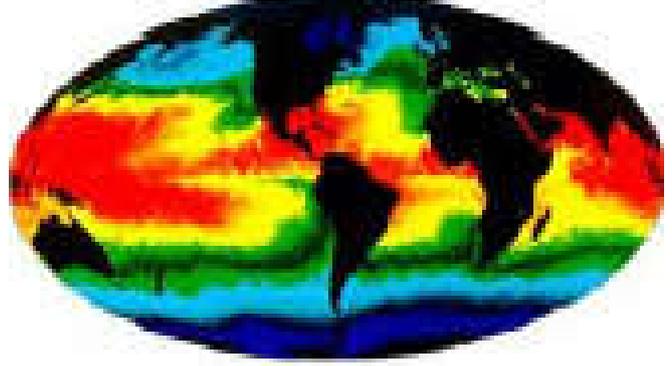
Bande	Domaine spectral (µm)	Résolution spatiale	Application
1	0,58 - 0,68 (rouge)	1,1 km	surveillance des nuages, de la neige et de la glace
2	0,725 - 1,1 (proche IR)	1,1 km	surveillance de l'eau, de la végétation, et de l'agricole
3	3,55 - 3,93 (IR moyen)	1,1 km	température de la surface des océans, volcans, feux de forêts
4	10,3 - 11,3 (IR thermique)	1,1 km	température de la surface des océans, humidité du sol
5	11,5 - 12,5 (IR thermique)	1 km	température de la surface des océans, humidité du sol

الجدول 7:- الأحزمة الطيفية الخاصة بأقمار NOAA/AVHRR.

بالرغم من كون المعطيات التي توفرها أقمار نواو تستعمل بهدف متابعة والتنبؤ بالأنظمة الجوية فإن اللاقط AVHRR مصمم أيضا لمراقبة ومتابعة كوكب الأرض، لكن بدرجة تباين فضائي أخشن من تلك الخاصة بأجهزة الالتقاط الخاصة بمراقبة كوكب الأرض. وتستعمل أقمار نواو، في هذا المجال، بالأساس لمتابعة ظواهر إقليمية ذات مقاييس صغيرة: كوضع خرائط لحرارة سطح المحيطات (الشكل 61) ولمراقبة الحالة الصحية للنباتات الطبيعية والزراعية، ويبين الشكل 62 خريطة لمتابعة الحالة الصحية لمحصول الحبوب بكندا أثناء مختلف مراحل نمو النبات



الشكل 62:- مراقبة الحالة الصحية لمحصول الحبوب بكندا (المركز الكندي للاستشعار الفضائي).



الشكل 61:- مراقبة حرارة سطح المحيطات بواسطة أقمار نونا (المركز الكندي للاستشعار الفضائي).

*- أقمار أخرى للرصد الجوي.

تستغل الولايات المتحدة الأمريكية سلسلة أخرى من أقمار "دمسب" DMSP (Defence Meteorological Satellite Program)، لمراقبة الحالة الجوية. وتمكن أجهزة الالتقاط OLS التي زودت بها أقمار "دمسب" ذات المدار القطبي من القيام بتغطيتين في اليوم، بشرط استشعار يبلغ 3000 كلم ودرجة التباين فضائي تبلغ 7.2 كلم. واللاقط OLS حزامين طيفيين كبيرين: حزام يمتد من النطاق المرئي إلى الأشعة تحت الحمراء القريبة (من 0.4 ميكرومتر إلى 1.1 ميكرومتر)، وحزام ثان ضمن الأشعة تحت الحمراء الحرارية (من 10.0 ميكرومتر إلى 13.4 ميكرومتر). ويمكن هذا اللاقط من الحصول على مرئيات مسائية ضمن النطاق المرئي في ظروف إضاءة ضعيفة جدا، الأمر الذي يسمح بالحصول على مرئيات مثيرة جدا تسمح باستشعار مظاهر التلوث في المراكز الحضرية الكبيرة.

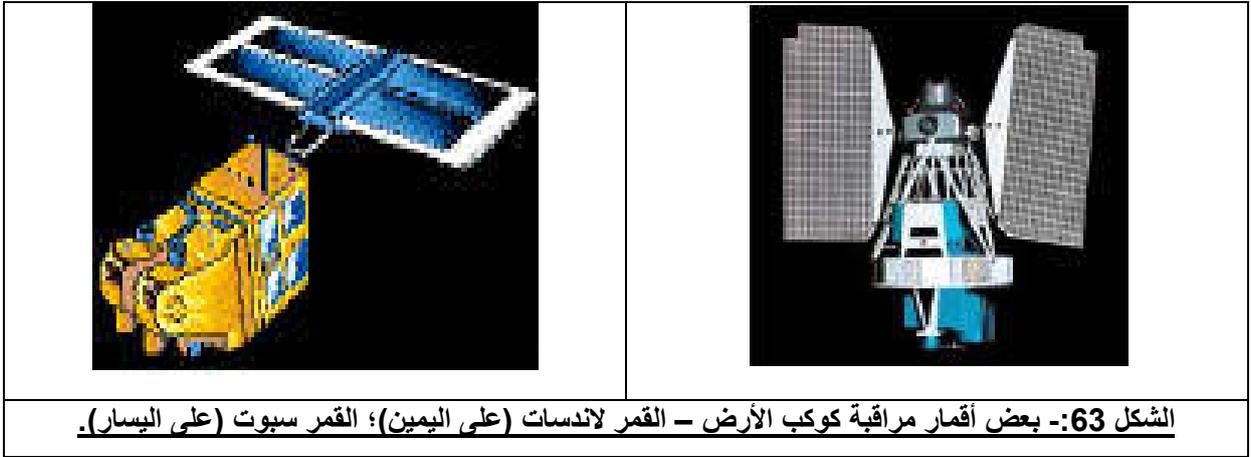
توجد في الفضاء الخارجي للأرض أقمار أخرى للرصد الجوي نذكر من بينها:

- سلسلة الأقمار "جمس" GMS التابعة لدولة اليابان، وتتوفر على حزامين: ويمتد الأول من 0.5 إلى 0.75 ميكرومتر (بدرجة تباين فضائي تبلغ 1.25 كلم. بينما يمتد الثاني من 10.5 إلى 12.5 ميكرومتر (بدرجة تباين فضائي يبلغ 5 كلم)؛
- وأقمار ميتيوسات Météosat التابعة للمجموعة الأوروبية، وتتوفر على ثلاثة أحزمة: يمتد الأول من 0.4 إلى 1.1 ميكرومتر (بدرجة تباين فضائي تساوي 2.5

كلم)، ويمتد الثاني ضمن الأشعة تحت الحمراء المتوسطة من 5.7 إلى 7.1 ميكرومتر (بدرجة تباين تساوي 5 كلم)، بينما يمتد الثالث ضمن الأشعة تحت الحمراء الحرارية من 10.5 إلى 12.5 ميكرومتر (بدرجة تباين فضائي تبلغ 5 كلم).

ب- أقمار مراقبة كوكب الأرض.

*/- أقمار لاندسات (الشكل 63).



بالرغم من استخدام العديد من أقمار الرصد الجوي أيضا لمراقبة كوكب الأرض، فإنها لم تصمم لوضع خرائط دقيقة ومفصلة لسطح الأرض.

وكان القمر لاندسات-1 أول قمر أطلق لمراقبة كوكب الأرض (سنة 1972). وقد أطلق بهدف اختبار جدوى منصة متعددة الأطياف غير مأهولة لمراقبة الأرض. وقد مكن برنامج لاندسات من الحصول على معطيات عن جميع جهات العالم. وقد بدأ تسويق معطيات هذا البرنامج ابتداء من سنة 1985، حتى يتسنى للمستخدمين المدنيين من استثمار معطياته.

لقد مكن الامتداد الزمني لبرنامج لاندسات من جمع أرشيف كبير الحجم من المعطيات عن الموارد الأرضية الأمر الذي يسمح بمراقبة طويلة الأمد.

لقد تم وضع جميع أقمار لاندسات في مدار قطبي مزامن للشمس. على ارتفاع 900 كلم ، مع تكرارية تبلغ 18 يوما بالنسبة للأجيال الثلاثة الأولى (لاندسات-1 إلى لاندسات-3) بينما وضعت الأجيال الأخيرة على ارتفاع 700 كلم مع تكرارية تبلغ 16 يوما. تمر كل أقمار لاندسات من خط الاستواء صباحا للاستفادة من ظروف الإضاءة المثلى. وتحمل هذه الأقمار عدة أجهزة التقاط تتميز كلها بشريط استشعار تبلغ 185 كلم: ***/- أنظمة كاميرات RBV (Return Beam Vidicon)؛**

***/- نظام المسح المتعدد الأطياف MSS (Multi spectral scanner)،** ويقوم بالتقاط الإشعاع الكهرومغناطيسي لسطح الأرض ضمن أربعة أحزمة يتمتع كل واحد منها بدرجة تباين فضائي تبلغ 60 متر x 80 متر، ودرجة تباين راديومتري من 6 أوكتي أو 64 قيمة رقمية. كما يستخدم في عملية التقاط الإشعاع، ماسحا ميكانيكيا يستخدم مرآة متأرجحة، الأمر الذي يسمح باستقبال 6 خطوط مسح في نفس الوقت. ويبين الجدول 8 المجالات الطيفية للماسح المتعدد الأطياف؛

Bandes		Longueurs d'ondes (microns)
Landsat 1,2,3	Landsat 4,5	
MSS 4	MSS 1	0,5 - 0,6 (vert)
MSS 5	MSS 2	0,6 - 0,7 (rouge)
MSS 6	MSS 3	0,7 - 0,8 (proche infrarouge)
MSS 7	MSS 4	0,8 - 1,1 (proche infrarouge)

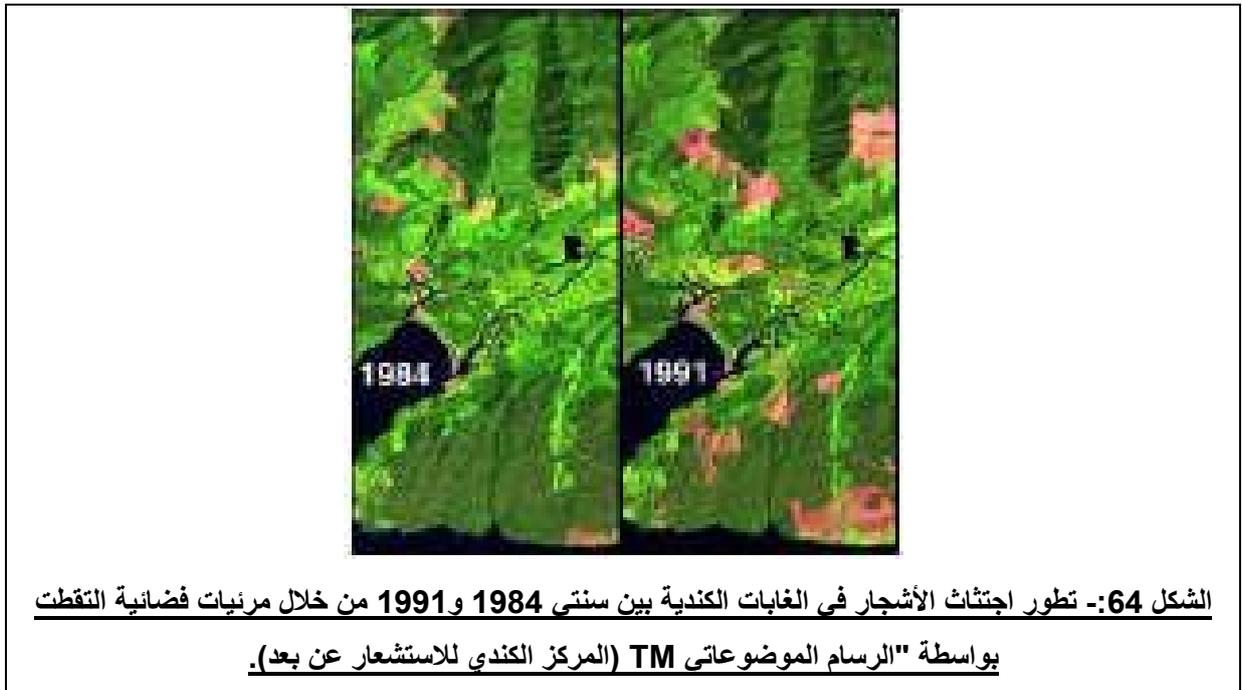
الجدول 8:- أحزمة الماسح المتعدد الأطياف MSS.

***/- ثم بعد ذلك جاء الماسح الموضوعاتي TM (Thematic Mapper) مع الجيل الرابع من أقمار لاندسات، عندها كفت منذ 1982 عمليات التغطية بواسطة الماسح المتعدد الأطياف. بعد أن رافقت اللاقط الجديد عدة تحسينات تتمثل في : تباين فضائي وراديومتري أفضل؛ أشرطة طيفية أضيق، مع سبعة أشرطة مقابل أربعة بالنسبة للماسح متعدد الأطياف؛ وزيادة عدد المجسات بالنسبة لكل شريط (16 مجس أو جهاز رصد بالنسبة للأشرطة غير الحرارية مقابل ستة مجسات في حالة الماسح المتعدد الأطياف). وتبلغ حدود درجة التباين الفضائي ل "لرسام الموضوعاتي" TM 30 مترا بالنسبة لجميع الأشرطة، باستثناء شريط الأشعة تحت الحمراء الحرارية حيث تبلغ 120 مترا. كما يتم تسجيل الأشرطة جميعها على امتداد 256 قيمة رقمية (8 أوكتي)، ويبين الجدول 9 درجة التباين الطيفي لجميع أشرطة "الرسام الموضوعاتي" وعدد من التطبيقات الاستشعارية الخاصة بها.**

Bandes	Domaine spectral (microns)	Application
TM 1	0,45 - 0,52 (bleu)	discrimination entre le sol et la végétation, bathymétrie/cartographie côtière; identification des traits culturels et urbains
TM 2	0,52 - 0,60 (vert)	cartographie de la végétation verte (mesure le sommet de réflectance); identification des traits culturels et urbains
TM 3	0,63 - 0,69 (rouge)	discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles; (absorption de chlorophylle); identification des traits culturels et urbains
TM 4	0,76 - 0,90 (proche IR)	identification des types de végétation et de plantes; santé et contenu de la masse biologique; délimitation des étendues d'eau; humidité dans le sol
TM 5	1,55 - 1,75 (IR de courte longueur d'onde)	sensible à l'humidité dans le sol et les plantes; discrimination entre la neige et les nuages
TM 6	10,4 - 12,5 (IR thermique)	discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol relié au rayonnement thermique; cartographie thermique
TM 7	2,08 - 2,35 (IR de courte longueur d'onde)	discrimination entre les minéraux et les types de roches; sensible au taux d'humidité dans la végétation

الجدول 9:- أشرطة الرسام الموضوعاتي TM وعدد من التطبيقات الاستشعارية الموافقة لها.

تستعمل معطيات الماسع المتعدد الأطياف MSS والرسام الموضوعاتي TM، في العديد من التطبيقات الاستشعارية، كإدارة الموارد الطبيعية، ووضع الخرائط، ومراقبة البيئة ورصد التغيرات (يبين الشكل 64 كيف يمكن متابعة التغيرات التي تطال الغابات بسبب الاجتثاث واقتلاع الأشجار من خلال مقارنة مرئيات لاندسات تعود لفترات زمنية مختلفة).



الشكل 64:- تطور اجتثاث الأشجار في الغابات الكندية بين سنتي 1984 و1991 من خلال مرئيات فضائية التقطت بواسطة "الرسام الموضوعاتي TM (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

*/- أقمار سبوت Spot (الشكل 63).

تتمثل أقمار سبوت (SPOT) Système Pour l'Observation de la Terre، في سلسلة من أقمار مراقبة الأرض التي تم تصميمها وإطلاقها من طرف المركز الوطني للدراسات الفضائية بفرنسا (CNES)، بمساعدة كل من بلجيكا والسويد. وقد تم إطلاق القمر سبوت-1 سنة 1986 تبعه بعد ذلك إطلاق أقمار أخرى كل ثلاثة أو أربعة سنوات. وتدور كل هذه الأقمار في مدار قطبي مزامن للشمس على ارتفاع 830 كلم، الأمر الذي يخول لها تكرارية تبلغ 26 يوما. وتمر هذه الأقمار فوق خط الاستواء عند الساعة العاشرة والنصف بالتوقيت المحلي (10h30). لقد تم تصميم أقمار سبوت للحصول على معطيات استشعارية لأهداف تجارية، وتضم كلها ماسحين متعددي الأشرطة HRV (Haute Résolution Visible)، يستطيع كل واحد منهما التقاط المعطيات غير الملونة¹⁷ Panchromatique (ضمن شريط واحد)، حسب درجة تباين فضائي تبلغ 10 أمتار، والنقاط المعطيات متعددة الأشرطة¹⁸ Multibandes (ضمن ثلاثة أشرطة)، حسب درجة تباين فضائي تبلغ 20 مترا (الجدول 10). ويبلغ شريط الاستشعار في كلتا الحالتين 60 كلم.

Mode / bande	Domaine spectral (microns)
Panchromatique (PLA)	0,51 - 0,73 (bleu-vert-rouge)
Multispectrale (MLA)	
Bande 1	0,50 - 0,59 (green)
Bande 2	0,61 - 0,68 (red)
Bande 3	0,79 - 0,89 (proche infrarouge)

الجدول 10:- خصائص الماسحين HRV الخاصين بأقمار سبوت.

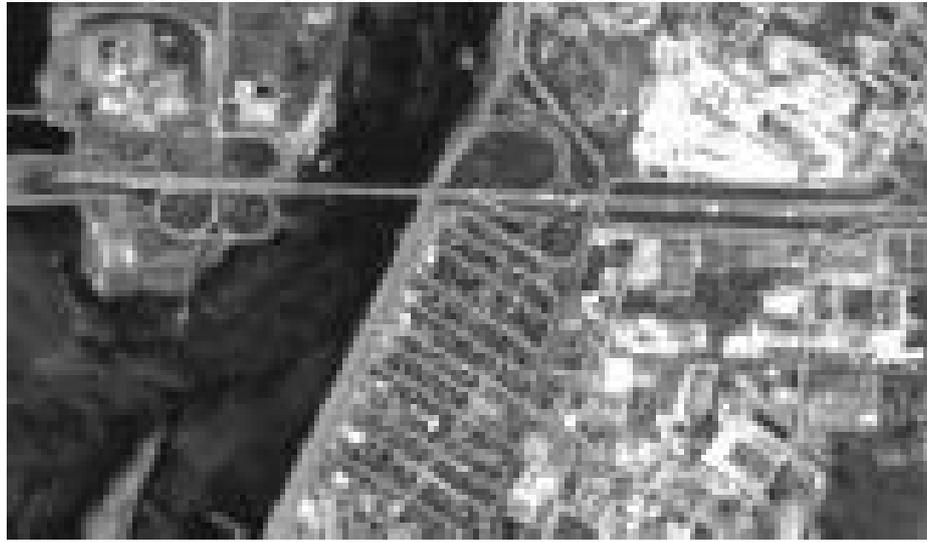
تفيد أقمار سبوت في التطبيقات التي تتطلب درجة تباين فضائية جيدة (كدراسة الأوساط الحضرية (الشكل 65)). وتجمع بين إيجابيات أثمان في المتناول، وإمكانية الحصول على معطيات فضائية في الوقت المثالي.

وهناك تطبيقات عديدة لأقمار سبوت في المجالات التي تتطلب مرئيات كثيرة التردد، كالدراسات الغابوية والزراعية. وقد كان الحصول على مرئيات

¹⁷- يمكن استخدام الشريط غير الملون لتحسين تفاصيل المعطيات المتعددة الأطياف.

¹⁸- تفيد معطيات هذه الأشرطة الثلاثة المتعددة الأطياف لعرض المرئيات ذات الألوان الكاذبة Fausses-couleurs.

Stéréoscopiques دورا هماما في التطبيقات الخرائطية وفي إعداد النماذج الرقمية
للميدان MNT.



مرنية فضائية بواسطة قمر سبوت لمجال حضري (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

Indian Remote Sensing) IRS القمر الصناعي الهندي ***/-**
(satellite)

Capteur	Domaine spectral (microns)	Résolution spatiale	Largeur de la fauchée	Répétitivité (à l'équateur)
PAN	0,5 - 0,75	5,8 m	70 km	24 jours
LISS-II				
Vert	0,52 - 0,59	23 m	142 km	24 jours
Rouge	0,62 - 0,68	23 m	142 km	24 jours
Proche IR	0,77 - 0,86	23 m	142 km	24 jours
IR moyen	1,55 - 1,70	70 m	148 km	24 jours
WIFS				
Rouge	0,62 - 0,68	188 m	774 km	5 jours
Proche IR	0,77 - 0,86	188 m	774 km	5 jours

الجدول 11:- أجهزة الالتقاط الخاصة بالقمر الهندي IRS.

وهي أقمار تجمع بين خصائص أجهزة الالتقاط MSS و TM الخاصة بأقمار لاندسات، وبين خصائص الاقط HRV الخاص بأقمار سبوت. ويحتوي الجيل الثالث من هذه الأقمار IRS-1C على ثلاثة أجهزة التقاط (أنظر الجدول 11):
*/- كاميرا عالية التباين البانكروماتي بشريط واحد (PAN)، وتسمح المعطيات العالية التباين بتطبيقات استشعارية متعددة: كالتصاميم الحضرية ووضع الخرائط؛

/*- اللاقط LISS-III (Linear Imaging Selfscanning Sensor)، ذو الأربعة
أشرطة بدرجة تباين متوسطة. وتفيد الأشرطة الأربعة للاقط LISS-III في تمييز
النباتات، ووضع الخرائط الأرضية، وفي إدارة الموارد الطبيعية؛
/*- اللاقط ذو الشريطين، WIFS (Wide Field of View)، بدرجة تباين ضعيفة.
وتستعمل درجة تباينه الفضائي والتغطية الخاصة به، من أجل مراقبة ومتابعة النباتات
على المستوى الإقليمي.

ج- أقمار المراقبة البحرية.

تغطي البحار والمحيطات أكثر من ثلثي مساحة الأرض، وتقوم بدور هام في النظام
المناخي للكوكب. كما تضم أنواعا من الأحياء وموارد طبيعية متنوعة ذات حساسية كبيرة
تجاه التلوث وتجاه أخطار أخرى يسببها الإنسان.
يمكن استخدام أقمار الرصد الجوي وأقمار مراقبة الأرض، لمتابعة ومراقبة البحار
والمحيطات. لكن هناك أنظمة أقمار صناعية وأجهزة التقاط صممت خصيصا لمراقبة
المحيطات.

/*- القمر Nimbus-7.

في سنة 1978 تم إطلاق Nimbus-7 والمزود باللاقط CZCS (Costal Zone Colour Scanner)، والذي يعد أول لاقط أعد خصيصا لمراقبة المحيطات
والامتدادات المائية. ويهدف هذا الجهاز بالأساس إلى مراقبة لون وحرارة المحيطات، في
المناطق الساحلية على وجه الخصوص (الشكل 65). و تم التمكن - بفضل درجة التباين
الفضائي والطيفي الخاصة به- من رصد الملوثات داخل الطبقات العلوية للمحيط، ومن
تحديد طبيعة المواد العالقة في المياه.

وضع القمر Nimbus-7 في مدار قطبي مزامن للشمس على ارتفاع 955 كلم.
ويمر بخط الاستواء عند منتصف النهار أثناء صعوده، وعند منتصف الليل أثناء نزوله.
وتمكن دورة تردد القمر الصناعي من القيام بتغطية شاملة للأرض كل ستة أيام (كل 83

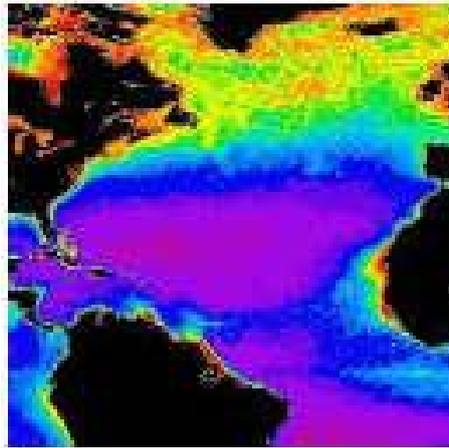
مدارا). يضم لاقط CZCS ستة أشرطة طيفية ضمن النطاق المرئي، والأشعة تحت الحمراء القريبة والحرارية. يستقبل كل شريط منها المعطيات بدرجة تباين فضائي تبلغ 825 مترا. على امتداد شريط استشعار يبلغ 1566 كلم. ويبين الجدول 12 أطوال الموجات ، والعنصر الأولي الذي يتم قياسه، بالنسبة لكل شريط.

Bandes	Domaine spectral (microns)	Paramètre primaire mesuré
1	0,43 - 0,45	Absorption de chlorophylle
2	0,51 - 0,53	Absorption de chlorophylle
3	0,54 - 0,56	Gelbstoffe (substance jaune)
4	0,66 - 0,68	Concentration de chlorophylle
5	0,70 - 0,80	végétation de surface
6	10,5 - 12,50	température de surface

الجدول 12:- الأحزمة الطيفية الخاصة باللاقط CZCS.

ويظهر من الجدول 12 أن الأشرطة الأربعة الأولى ضيقة، وقد تم تحسينها للقيام بالتمييز الدقيق لتباينات انعكاسية الماء الناتجة عن تركيزات البلانكتون النباتي والأجزاء الأخرى العالقة في الماء.

بالإضافة إلى رصد النباتات على سطح الماء، يستعمل الشريط 5 للتمييز بين الماء وبين الأرض قبل معالجة أشرطة المعلومات الأخرى. وقد توقف هذا اللاقط عن العمل سنة 1986.



الشكل 65:- مرئية التقطت بواسطة القمر Nimbus-7 (المزود باللاقط CZCS)، تميز بين الماء واليابسة وتوضح التباينات في ألوان البحار والمحيطات (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

*/- القمر موس (Marine Observation Satellite) MOS

لقد تم إطلاق القمر الصناعي MOS-1 في فبراير 1987 من طرف اليابان، ثم تبعه MOS-1b، في فبراير 1990.

تحمل هذه أقمار موس، ثلاثة أجهزة التقاط هي :

*/- جهاز قياس الراديو Radiomètre إلكتروني متعدد الأطياف للمسح الذاتي **MESSR** (Multispectral Electronic Self Scanning Radiometer)، يضم أربعة أشرطة (الجدول 13)؛

*/- جهاز قياس راديو ضمن النطاق المرئي والأشعة تحت الحمراء الحرارية **VTIR** بأربعة أشرطة (الجدول 13)؛

*/- وجهاز قياس راديو ميكرو- موجات للمسح **MSR** بشريطين اثنين.

Capteur	Domaine spectral (microns)	Résolution spatiale	Largeur de la fauchée
MESSR	0,51 - 0,59	50 m	100 km
	0,61 - 0,69	50 m	100 km
	0,72 - 0,80	50 m	100 km
	0,80 - 1,10	50 m	100 km
VTIR	0,50 - 0,70	900 m	1500 km
	6,0 - 7,0	2700 m	1500 km
	10,5 - 11,5	2700 m	1500 km
	11,5 - 12,5	2700 m	1500 km

الشكل 13:- جهازي الالتقاط MESSR و VTIR الخاصة بأقمار MOS.

لأشرطة MESSR مجال شبيهه بالماسح المتعدد الأطياف MSS الخاص بأقمار لاندسات، فهي بالتالي نافعة للتطبيقات الأرضية، بالإضافة إلى الملاحظات والمراقبات البحرية.

تدور أقمار موس حول الأرض في مدارات مرتفعة بحوالي 900 كلم، ولها دورة تردد تبلغ 17 يوماً.

*/- أقمار النجم البحري Sea Star أو أقمار SeaWifs (Sea-

Viewing Wide-Field-of-View).

تحمل أقمار نجم البحر Sea Star لاقطا متميزا هو اللاقط SeaWifs الذي صمم من أجل مراقبة المحيطات. ويضم 8 أشرطة طيفية ضيقة (أنظر الجدول 14)، معدة خصيصا لرصد ومتابعة ظواهر محيطية متنوعة: إنتاج المحيطات الأولي، تأثير المحيطات على العمليات المناخية (تخزين الحرارة وتكون الغبار الجوي)، متابعة دورات الكربون والكبريت والأزوت. ويبلغ ارتفاع مدار هذه الأقمار 705 كلم، كما أن الوقت الثابت لمرور القمر فوق خط الاستواء هو منتصف النهار. وقد تم الجمع بين التباين الفضائي وعرض شريط الاستشعار بطريقتين:

- /*- طريقة بدرجة تباين فضائي تبلغ 1.1 كلم مع شريط استشعار يساوي 2800 كلم؛
- /*- طريقة تباين فضائي تبلغ 4.5 كلم مع شريط استشعار يساوي 1500 كلم.

Bandes	Domaine spectral (microns)
1	0,402 - 0,422
2	0,433 - 0,453
3	0,480 - 0,500
4	0,500 - 0,520
5	0,545 - 0,565
6	0,660 - 0,680
7	0,745 - 0,785
8	0,845 - 0,885

الجدول 14:- الأشرطة الطيفية للاقط SeaWifs.

تكتسي أقمار المراقبة البحرية هذه أهمية كبيرة بالنسبة لمراقبة تلوث المحيطات ومراقبة حالتها الصحية على المستوى العالمي والإقليمي. كما تساعد الباحثين على فهم تأثير المحيطات على الأنظمة المناخية للكوكب.

الفصل الخامس: تحليل وتفسير المرئيات (من المرئية إلى الخريطة).

1- مدخل.

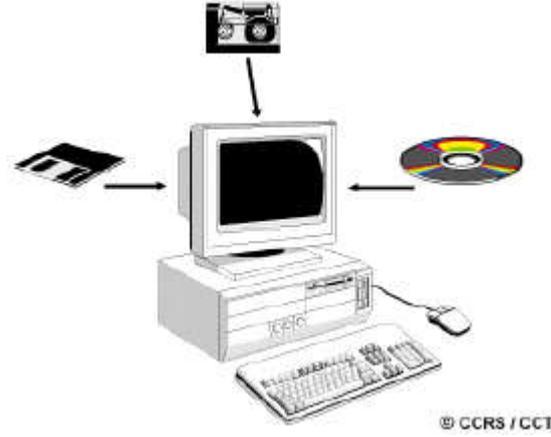
تستوجب الاستفادة من معطيات الاستشعار عن بعد، أن نكون قادرين على استخراج المعلومة المعبرة من المرئية الفضائية – وهي المرحلة السادسة من مراحل العملية الاستشعارية التي أشرنا إليها في الفصل الأول -. وتهدف عملية تفسير وتحليل المرئية الفضائية إلى التعرف داخل هذه الأخيرة، على أهداف مختلفة والقيام بقياسها، من أجل استخراج معلومة مفيدة. ويتمثل الهدف المستشعر عن بعد في كل بنية أو جسم يمكن ملاحظته داخل المرئية الفضائية:

/*- ويمكن أن يكون الهدف، نقطة أو خطا أو سطحا، أي أن الهدف يمكن أن يظهر أشكالاً متنوعة؛

/*- يجب أن يكون الهدف واضحا: أي أن يكون مميزا عن البنيات المجاورة له.

عادة ما يتم التعرف على الأهداف وتفسيرها أثناء العملية الاستشعارية، بواسطة العين، أي من خلال مفسر بشري. وتعرض المرئية، في كثير من الأحيان، على شكل فوتوغرافي، بمعزل عن نوع جهاز الالتقاط وعن الطريقة التي مكنت من الحصول على المعطيات. في هذه الحالة نستطيع القول، إن عرض المعطيات قد تم على شكل متماثل Analogique. لكن يمكن تمثيل المرئيات بواسطة جهاز حاسوب من خلال مجموعة من عناصر المرئية الأساسية (Matrice de pixels)، حيث يتم تمثيل كل عنصر برقم يعبر عن مستوى قوة هذا العنصر. فنقول في هذه الحالة إن عرض المعطيات قد تم على شكل رقمي. وفي هذه الحالة أيضا يمكن القيام بالعملية التفسيرية بالعين على شاشة الحاسوب. يمكن تمثيل كلا الصنفين من المعطيات (المتماثلة والرقمية)، إما بالأبيض والأسود (المرئيات غير الملونة) وإما بالتركيبيات الملونة من خلال دمج قنوات مختلفة أو أحزمة تمثل موجات مختلفة الطول.

2- المعالجة الرقمية للمرئيات (الشكل 1.5).



يتم اليوم تسجيل أغلب معطيات الاستشعار عن بعد على شكل رقمي، لذلك فإن كل التفسيرات والتحليلات، تقريبا، التي تخضع لها المرئية تتطلب جزءا رقميا من المعالجة. ويمكن أن نجمع عمليات معالجة المرئيات فيما يلي:

1- المعالجة القبلية؛

2- المعالجة الفعلية؛

3- إدماج المعطيات وتحليلها.

أ- المعالجات القبلية.

تتمثل المعالجات القبلية في العمليات التي تجرى على المرئيات بهدف تصحيحها وتحسينها هندسيا وموضوعاتيا، قبل المرور إلى مرحلة التحليل الرئيسي واستخراج المعلومة.

وتنقسم هذه العمليات إلى ثلاثة أصناف: التصحيحات الراديومترية؛ التصحيحات الهندسية؛ والتصحيحات الجوية.

*/- التصحيحات الراديومترية.

تتضمن تصحيح الأخطاء التي تطال المعطيات، الناتجة عن عدم انتظام جهاز الالتقاط (بسبب تقادم الجهاز أو بسبب عيوب في تصميم الجهاز أو بسبب اختلال طارئ

عليه)، أو عن الضجيج الناجم عنه أو عن الغلاف الجوي، أو بسبب تحويل المعطيات كي تمثل، بشكل دقيق، الإشعاع المنعكس أو المنبعث الذي يقيسه اللاقط.

تتمثل التصحيحات الراديومترية التي يتم تطبيقها على المرئيات في إعطاء كل عنصر أساسي من عناصر المرئية أقرب قيمة راديومترية ممكنة إلى القيمة التي قيست في الميدان.

وعادة ما تقوم المؤسسات الموزعة للمرئيات الفضائية بعملية المعالجة القبلية الراديومترية (محاولة مساواة حساسية أجهزة الاستشعار...)، لكن من الممكن القيام بهذه التصحيحات من خلال عمليات مطابقة.

*- التصحيحات الهندسية.

تخضع المرئيات الفضائية لتصحيحات هندسية بهدف الحد من التشوهات الهندسية التي حصلت أثناء عملية تسجيل المعطيات الخاصة بالهدف ("المسرح") والمتمثلة في:

- التشوهات الناجمة عن المحيط (انحناء كوكب الأرض، تغير قيمة ارتفاع السطح، الانكسار الجوي...);
- التشوهات الناتجة عن أنظمة القياس؛
- التشوهات الناجمة عن حركات المنصة.

تستخدم التصحيحات الهندسية أيضا للقيام بعملية إسناد المرئيات إلى معلم أرضي Géoreferencement أو بعمليات إسقاط Projections خاصة بها.

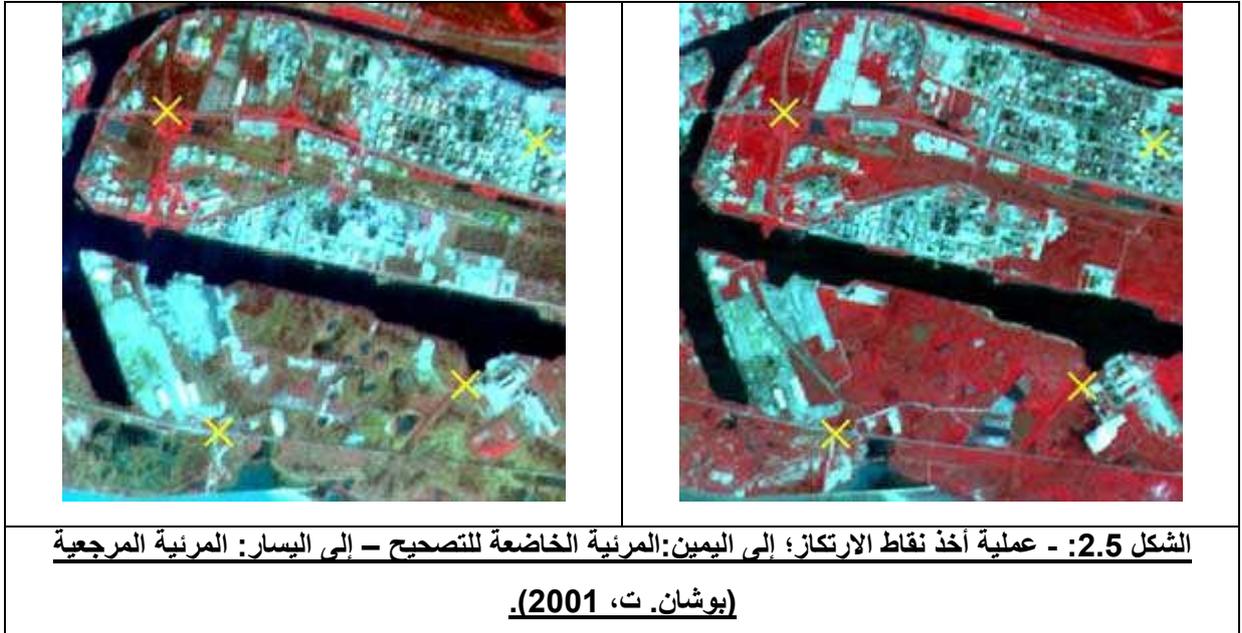
وهناك طريقتان لتصحيح العيوب الهندسية للمرئيات هما:

- طريقة نموذج دوران القمر الصناعي¹⁹ وتتمثل في تعديل المرئيات بعد تطبيق نموذج رياضي Model mathématique على العناصر الهندسية للمساحة المسجلة؛

¹⁹- كل قمر صناعي يمتلك نموذج دوران خاص به.

- الطريقة الحدودية (الكمية الجبرية) **Polynomiale** من خلال أخذ نقاط ارتكاز، وتتمثل في إيجاد الوضعيات الجديدة u و v لكل النقاط m و n للمرئية المتمثلة في الدالة $f(m,n)$ ، ضمن نظام إحداثيات مختلف تماما.

وتتمثل المرحلة الأولى في إيجاد نقاط الارتكاز (**Points de calage ou d'amer**) المشتركة بين المرئية المرجعية وبين المرئية الخاضعة للتصحيح. ويمكن أن تكون المصدر المرجعي عبارة عن مجموعة نقاط معروفة مسنودة إلى سطح مرجعي (نقاط جيوديزية، أو قياسات GPS...)، أو خريطة طبغرافية، أو مرئية فضائية مسنودة إلى سطح مرجعي أرضي (الشكل 2.5).



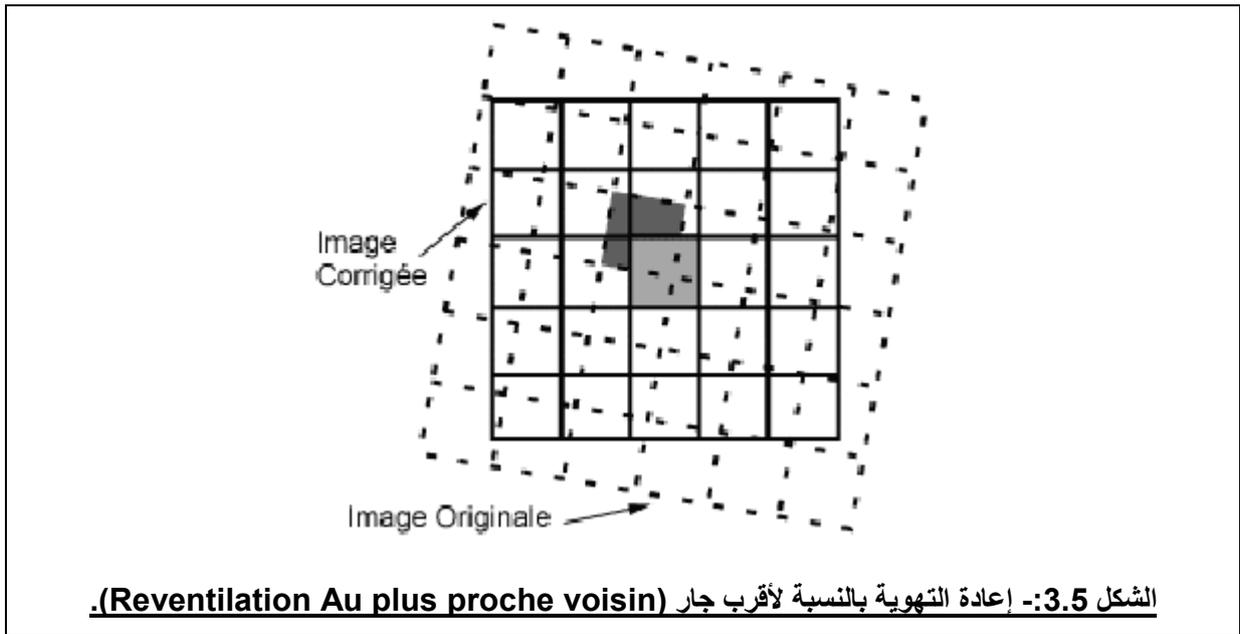
تتمثل المرحلة الثانية في حساب العلاقة بين النقاط الأصلية والنقاط المرجعية. وكلما زادت التشوهات كلما زادت الحاجة إلى استعمال نموذج تشوه ذو درجة عالية (أي استعمال حدودية **Polynôme** تشوه ذات درجة عالية)، وكلما كان عدد نقاط الارتكاز الضرورية مرتفعا. ويمكن حساب العدد الأدنى الضروري من نقاط الارتكاز N من خلال العلاقة الرياضية التالية:

$$N = ((T+1)(T+2))/2$$

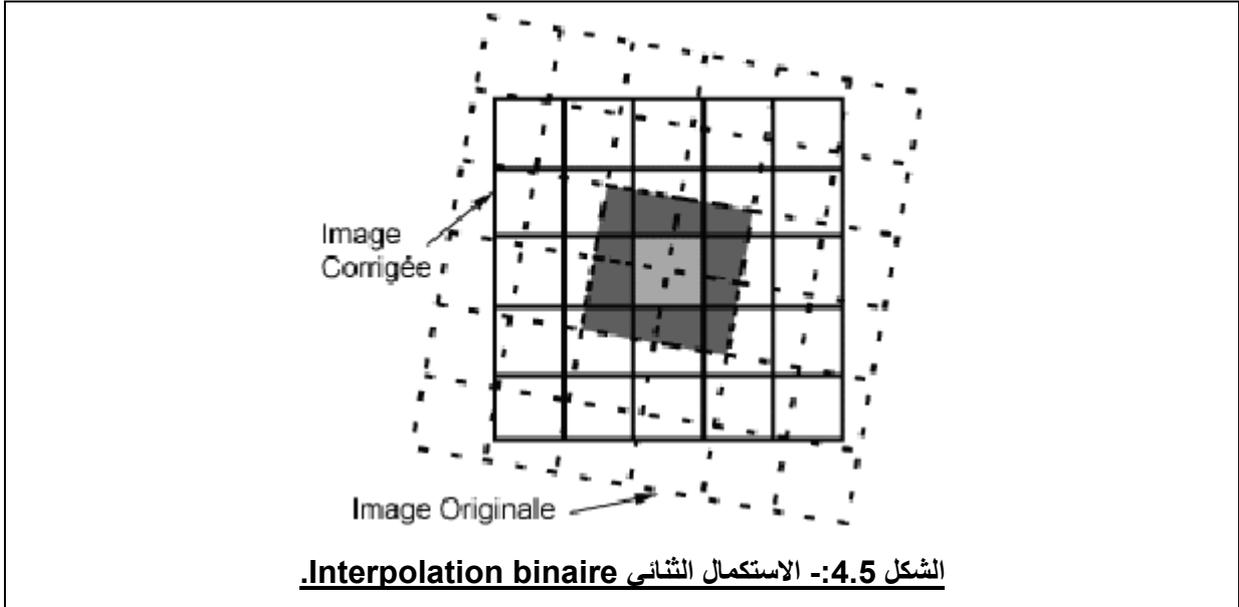
حيث تمثل T درجة التحويل المختارة (درجة الحدودية): فبالنسبة لحدودية من الدرجة الثانية، يجب إيجاد 6 نقاط ارتكاز على الأقل.

أما المرحلة الثالثة والأخيرة فتتمثل في تطبيق حدودية التشوه على المرئية الخاضعة للتصحيح من أجل التوصل إلى مرئية جديدة ضمن المرجع Référentiel الذي تم اختياره. وبما أن الشبكة القديمة والشبكة الجديدة لا تتطابقان، فإنه من الضروري تطبيق خوارزمية إعادة تهوية Algorithm de reventilation بهدف إعطاء كل عنصر أساسي جديد للمرئية المحصل عليها في النهاية، القيمة الممكنة الأقرب إلى المرئية القديمة. وتوجد ثلاثة طرق للقيام بهذه العملية:

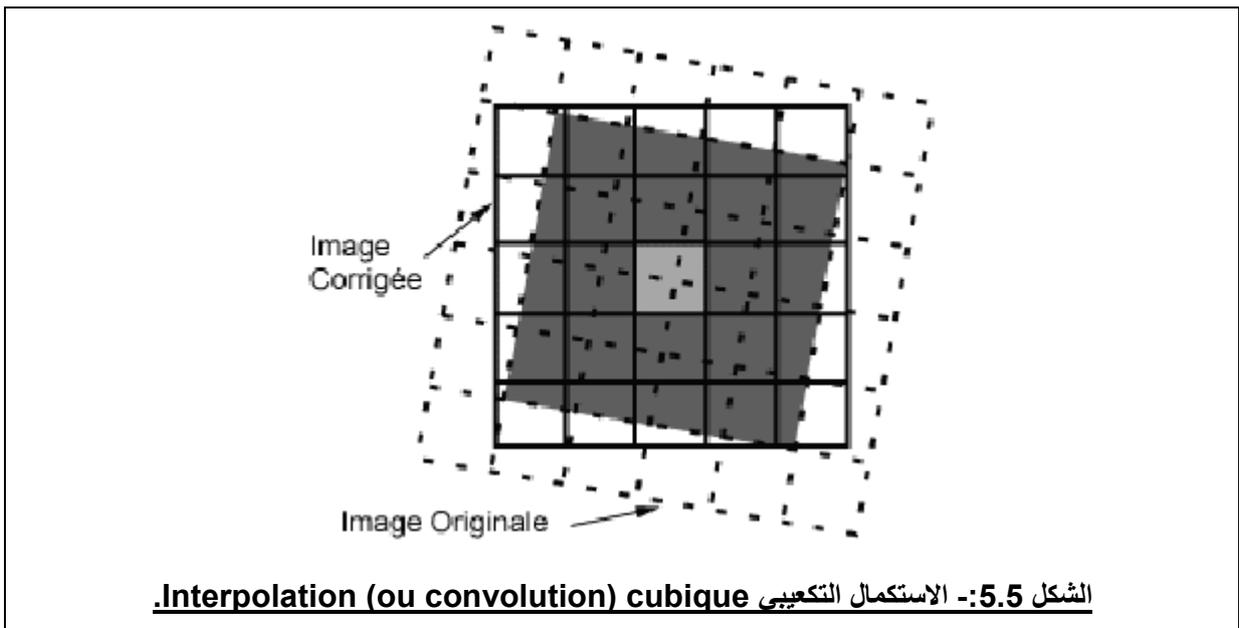
* إعادة التهوية بالنسبة لأقرب جار (Reventilation Au plus proche voisin)، والتي تخصص لكل عنصر أساسي في المرئية الجديدة العنصر الأساسي الأقرب في المرئية القديمة (الشكل 3.5). وهي طريقة جد سريعة، وتحتفظ بالقيم الراديومترية الأصلية، لكنها تعطي مردودا هندسيا سيئا (حيث يمكن أن ينتج عنها تكرار العناصر الأساسية للمرئية Duplication de pixel، أو فقدان بعض القيم)؛



* الاستكمال الثنائي Interpolation binaire (الشكل 4.5)، حيث تعطي لكل عنصر أساسي في المرئية الجديدة قيمة العناصر الأساسية الأربعة (4) الأقرب في المرئية الأصلية (2x2)، وهي طريقة أقل سرعة من الأولى وهي تغير من القيمة الأصلية للعناصر الأساسية في المرئية وتخلق قيمة جديدة على المرئية النهائية. ينتج عن هذا الطريقة مفعول صقل Lissage للمرئية، مع دقة فضائية مرضية؛



* الاستكمال التكعيبي Interpolation (ou convolution) cubique، حيث تعطي لكل عنصر أساسي في المرئية الجديدة قيمة العناصر الأساسية الستة عشر (16) الأقرب في المرئية الأصلية (4x4). وهي الطريقة الأقل سرعة، تعطي بدورها قيمة جديدة تماما تختلف عن القيم الأصلية، وينجم عنها صقل هام للمرئية، لكن المرئية الجديدة تمتاز بدقة فضائية كبيرة، فهي بالتالي صالحة بشكل كبير لتحليل الأشكال والبنى المختلفة.

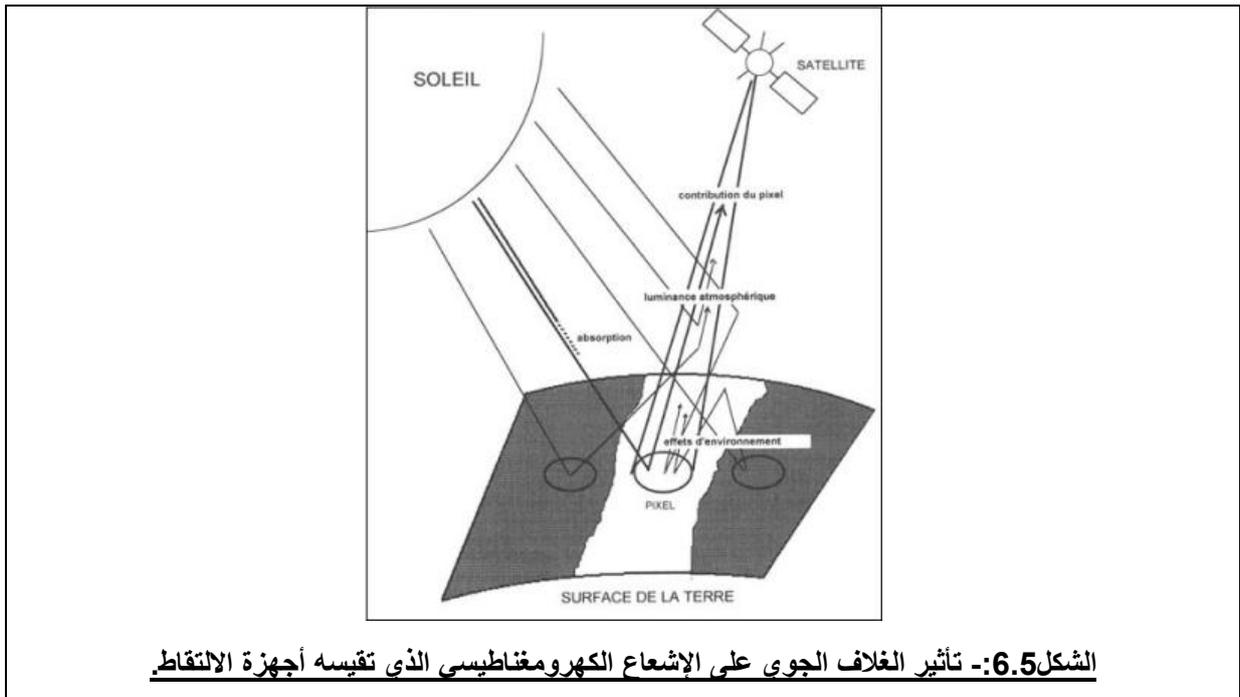


* في المناطق التي تعرف تغيرات كبيرة في ارتفاع السطح، يمكن القيام أيضا، بالإضافة إلى كل هذه العمليات، بتصحيح هندسي للمرئية يأخذ بعين الاعتبار عامل التضاريس. حيث يتم استعمال نماذج رقمية للارتفاع، تعمل على زيادة الدقة الفضائية للمرئية وهو ما يعبر عنه بـ"التصويب المستقيم Orthorectification".

وتوفر المؤسسات التي تقوم بتوزيع المرئيات الفضائية، معطيات ذات درجات دقة هندسية متنوعة، حيث يرتبط ثمن المرئية الفضائي بدرجة الدقة الهندسية الموفرة.

*- التصحيحات الجوية.

تخترق الإشارة الضوئية التي يقيسها اللاقط الغلاف الجوي مرتين (الشكل 5.6)، المرة الأولى من مصدر الضوء باتجاه الهدف، والمرة الثانية من الهدف الأرضي باتجاه جهاز الالتقاط. وفي كل مرة يخترق فيها الجو، يتعرض الإشعاع الكهرومغناطيسي لتغيرات ناتجة عن الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمكونين الأساسيين للغلاف الجوي (الغازات: الأكسجين والأوزون، وبخار الماء...؛ والمواد الجوية الطيارة Aérosols: الغبار والطلع...).



الشكل 6.5:- تأثير الغلاف الجوي على الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي تقيسه أجهزة الالتقاط.

إن إسهام الغلاف الجوي في القيمة الراديومترية لعنصر المرئية الأساسي قد يتجاوز 50% بالنسبة لبعض الموجات (طول الموجة)، كاللون الأزرق مثلا. الأمر الذي يستلزم في بعض الحالات القيام بتصحيحات جوية للمرئيات الفضائية، حسب الخصائص الموضوعاتية ومنطقة الدراسة وطريقة المعالجة المستعملة.

يستحيل إذن الحصول على الإسهام الفعلي للغلاف الجوي في قيمة العنصر الأساسي للمرئية، دون التوفر على المعطيات التي تصف الظروف المناخية السائدة أثناء تسجيل المرئية. وبالتالي فإن هذه التصحيحات ستتم من خلال عملية محاكاة Simulation، للتوصل في الأخير إلى أدق تقييم ممكن لحالة الغلاف الجوي عند التقاط المنظر.

وبعد التوصل إلى قيمة إسهام الغلاف الجوي، نكتفي بطرحها (عملية إنقاص) من القيمة الراديومترية لعناصر المرئية الأساسية.

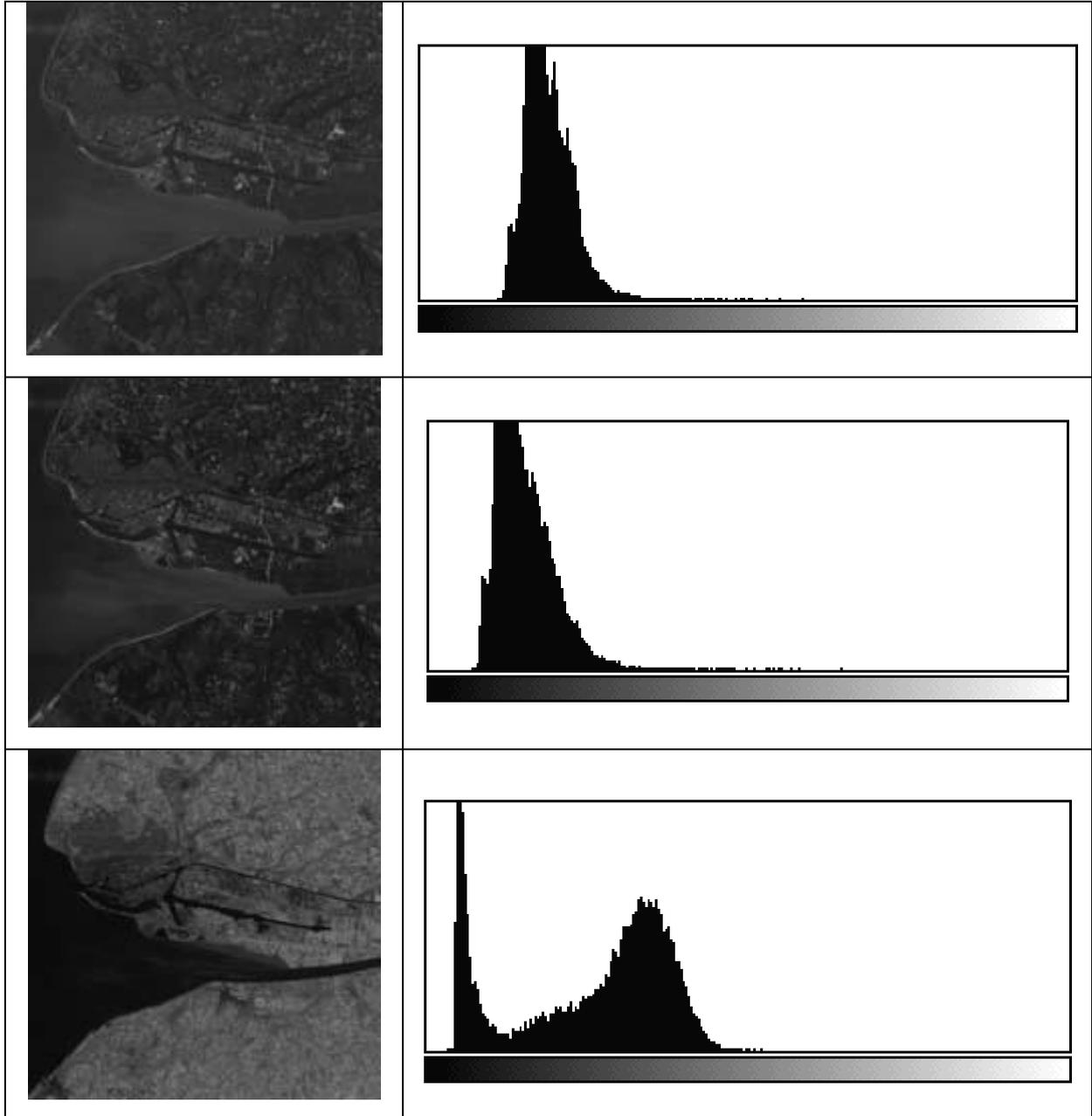
ب- المعالجات الفعلية.

*/- مظهر القنوات غير المعالجة Canaux bruts.

يمكن القول إن مظهر القنوات غير المعالجة غير مقروء تقريبا، إذا لم يتم القيام بتعديل التباينات. حيث يندر أن نجد قيمة عالية جدا، কিفما كان الحزام الطيفي. ففي النطاق المرئي، مثلا، تتواجد غالبية القيم بين 0 و 80 من مجال يمتد من 0 إلى 255. وتشير القيمة 0 (التي تم ترميزها باللون الأسود) إلى أن القمر الصناعي لم يسجل أية استجابة من السطح الأرضي. أما القيمة 255 (والتي تم ترميزها باللون الأبيض)، فتشير بالمقابل إلى عكس السطح الأرضي للإشعاع الكهرومغناطيسي كاملا. لكن الأسطح أو الأجسام الطبيعية التي يفوق معيار انعكاسها 50%، نادرة جدا (باستثناء الجلاذات، والأسطح المغطاة بالثلوج أو بعض التربات العارية ذات المعدنية العالية. لذلك فإن القنوات قبل المعالجة تظهر قاتمة جدا إلى سوداء في بعض الحالات.

ويبين الشكل 7.5 المرئيات التي تم استخراجها من القنوات غير المعالجة، لمرئية فضائية التقطها القمر الصناعي الفرنسي سبوت (السلسلة 1، و2، و3). وتمثل هذه القنوات

تباعاً: الأخضر والأحمر والأشعة تحت الحمراء القريبة. ويمثل المضلع البياني Histogramme عدد العناصر الأساسية للرؤية (محور الأرتايب) بالنسبة لكل قيمة راديومترية (محور الأفاصيل). ويظهر الوضوح النسبي لقناة الأشعة تحت الحمراء القريبة بينما لا يمكن استغلال قناة اللون الأحمر وقناة اللون الأخضر، على هذا الشكل.

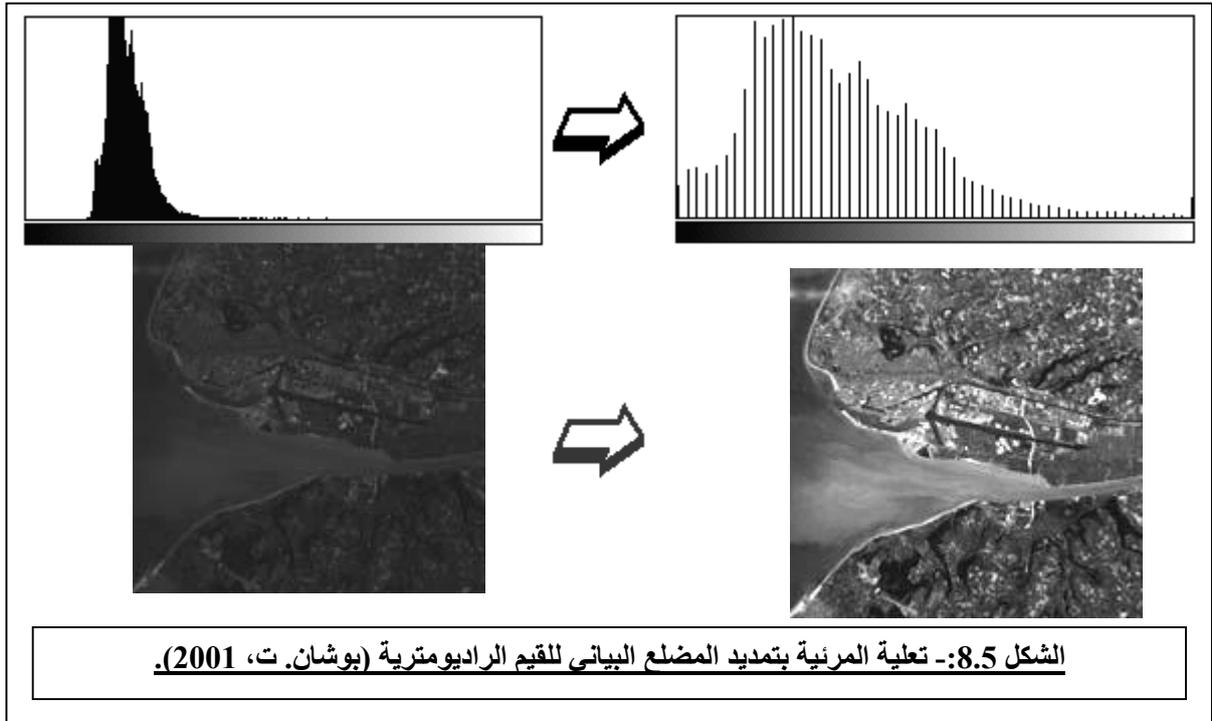


الشكل 7.5:- مظهر قنوات القمر سيوت (1 و 2 و 3) قبل المعالجة مع مبيان عناصر المرئية الأساسية حسب القيمة الراديومترية؛ في الأعلى: قناة الحزام الأخضر- في الوسط: قناة الحزام الأحمر- في الأسفل: قناة حزام الأشعة تحت الحمراء القريبة (بوشان. ت، 2001).

*/- تعليمة المرئيات Rehaussement d'images أو تمديد المبيان

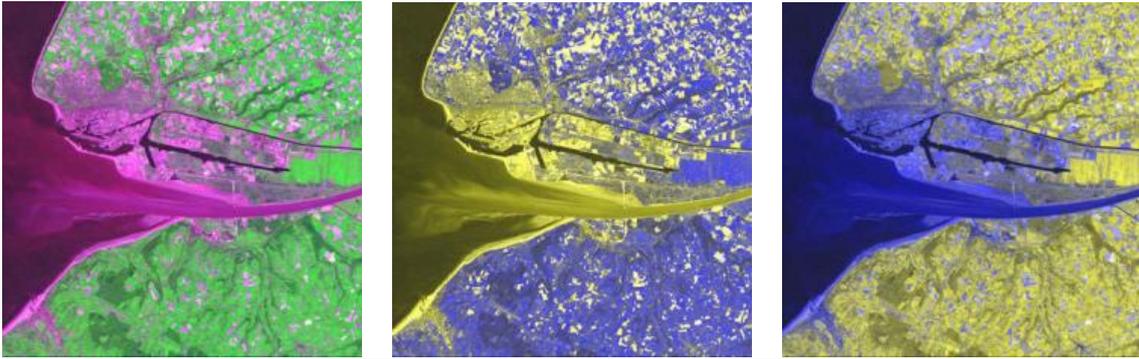
.Etallement d'histogramme

بالإضافة إلى كونها قاتمة اللون فإن درجة تباين القنوات غير المعالجة ضعيفة جدا. لذلك تكمن أول عملية معالجة في الرفع من درجة التباين، ويتم تمديد المضلع البياني بحيث يتم ترميز أعلى قياس عند القيمة الراديومترية 255 وأضعف قياس عند القيمة الراديومترية 0. فتصبح المرئيات المعالجة بهذه الطريقة أكثر وضوحا وأكثر تباينا وتمايزا (الشكل 8.5). الأمر الذي يحسن مظهر المرئية ويساعد بالتالي في عملية التفسير والتحليل البصري.

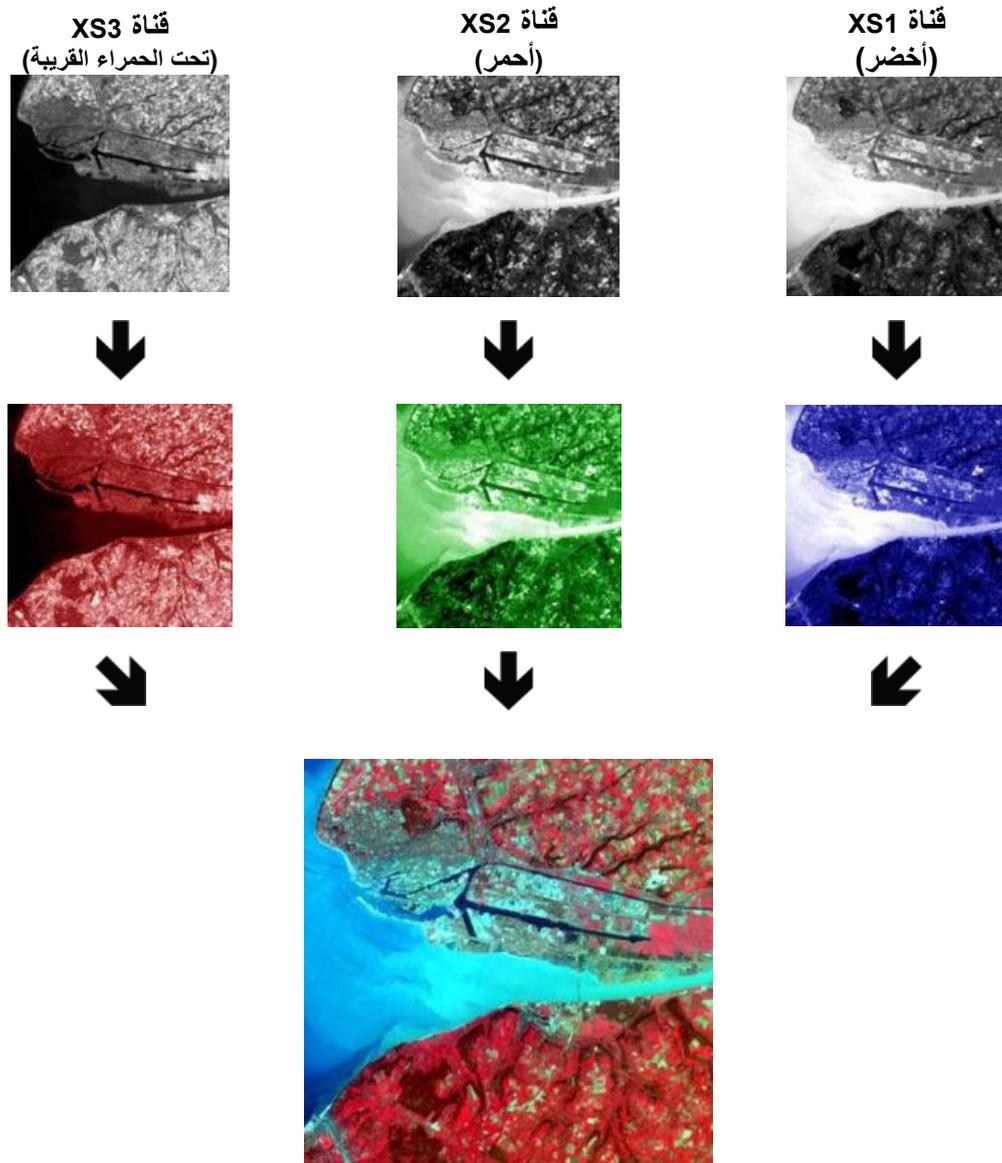


*/- التركيبية الملونة La Composition colorée (الشكل 10.5).

يتم ربط الألوان الأساسية الثلاثة (الأحمر والأخضر والأزرق)، بثلاثة قنوات للمرئية الفضائية. ويبين الشكل 9.5 ترميز القنوات الثلاثة لمرئية القمر الصناعي سبوت على الشكل التالي: القناة XS3 (التي تغطي حزاما ضمن الأشعة تحت الحمراء القريبة)، وتم ترميزها باللون الأحمر؛ القناة XS2 (التي تغطي الحزام الأحمر) وتم ترميزها باللون الأخضر؛ والقناة XS1 (التي تغطي الحزام الأخضر) وتم ترميزها باللون الأزرق.



الشكل 9.5:- أمثلة للتركيبة الملونة المشكلة انطلاقاً من نفس القنوات الثلاثة قبل المعالجة (بوشان. ت، 2001).



الشكل 10.5: - مبدأ إنجاز تركيبة ملونة (بوشان. ت، 2001).

وبترميز القنوات الثلاثة لمرئية القمر الصناعي سبوت مع الألوان الأساسية الثلاثة، نستطيع الحصول على 27 تركيبة ألوان مختلفة ($3^3 = 3 \times 3 \times 3 = 27$).

*/- المصافي Les filtres.

تعتبر المصافي تحليلات أحادية المتغير Univariée، أي أنها تمثل معالجات تهم قناة واحدة. وهي طريقة أخرى للمعالجة الرقمية التي تستعمل لتعلية المرئيات. ويتم تطبيق المصافي على المرئيات الفضائية إما بهدف الحصول على مرئية متجانسة (فنتحدث عن المصفاة الخافضة Filtre passe-bas)، أو من أجل الرفع من درجة التباينات والتمييزات داخل المرئية (= المصفاة الرافعة Filtre passe-haut). وبالتالي فإن المصافي تصمم لتقوم بإلغاء أو بإبراز بعض المميزات الخاصة للمرئية:

- تقوم المصفاة الخافضة (الشكل 11.5) بعملية صقل للمرئية الفضائية، فتسعى عملية التصفية إلى إلغاء عناصر المرئية الأساسية الشاذة والتي تمثل ضجيج المرئية أو عدم الانتظام المحلي.

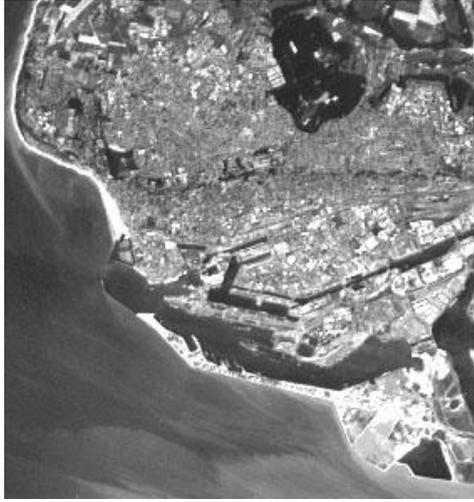
قد ينشأ عن مثل هذه المعالجة مفعول ضبابية، يقوى أو يضعف حسب عملية التحكم (Le réglage).

من الممكن صقل المرئية الفضائية من خلال إعطاء كل عنصر أساسي القيمة الراديومترية المتوسطة لمجموع قيم جيرانه. يمكن أن يتشكل الجوار من العناصر الأساسية المحاذية مباشرة (الشكل 11.5)، لكن يمكن أيضا الزيادة في الصقل من خلال تحديد شعاع من عنصرين أساسيين (فحصل على شبكة من 25 عنصر أساسي 5x5)، أو شعاع من ثلاثة عناصر أساسية (فحصل على شبكة من 49 عنصر أساسي 7x7). تكمن بالتالي عملية التصفية الفضائية في تحريك "نافذة" تتكون من بضعة عناصر أساسية (3x3 أو 5x5...) فوق كل عنصر أساسي من عناصر المرئية، وذلك على طول أعمدة وأسطر المرئية (الشكل 12.5).

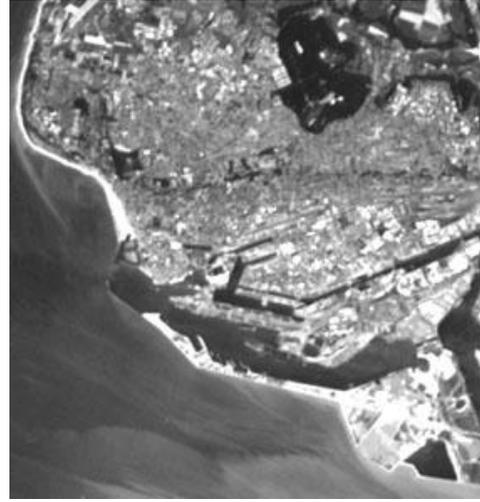
القناة الأصلية



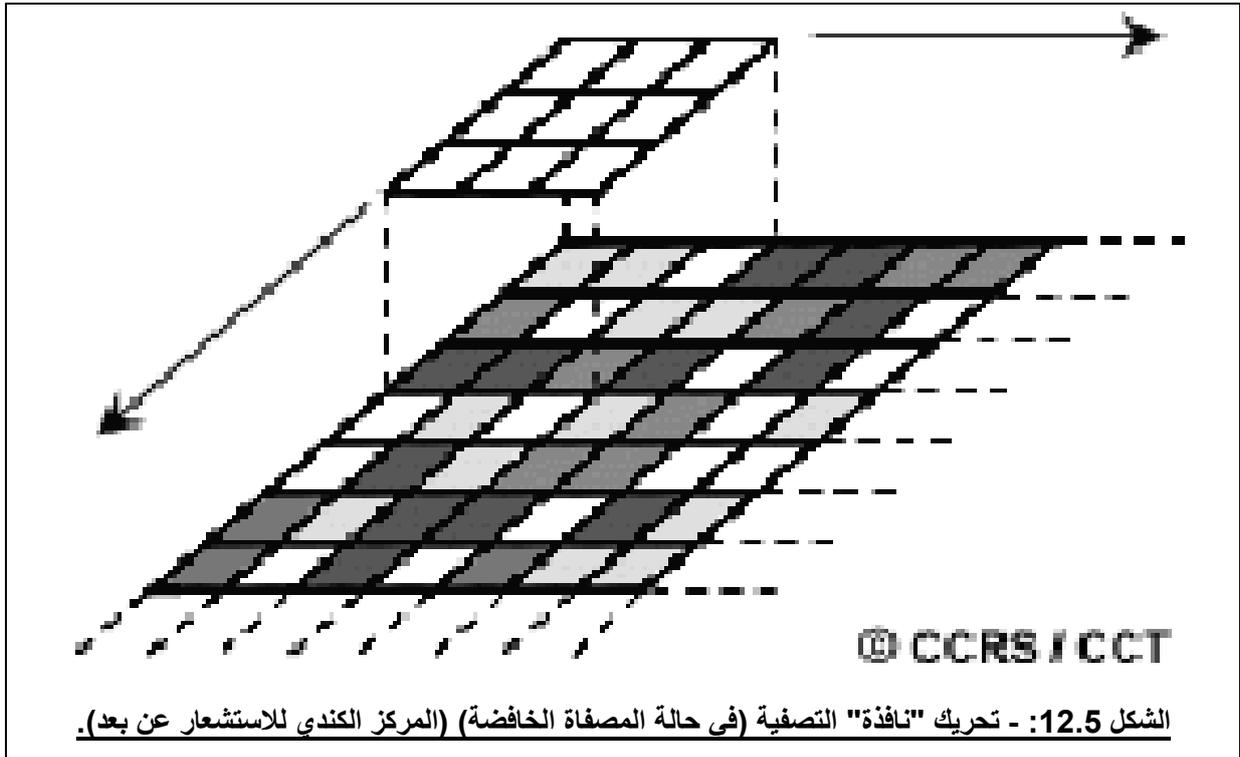
المرئية المصفاة (مصفاة خافضة)



1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9



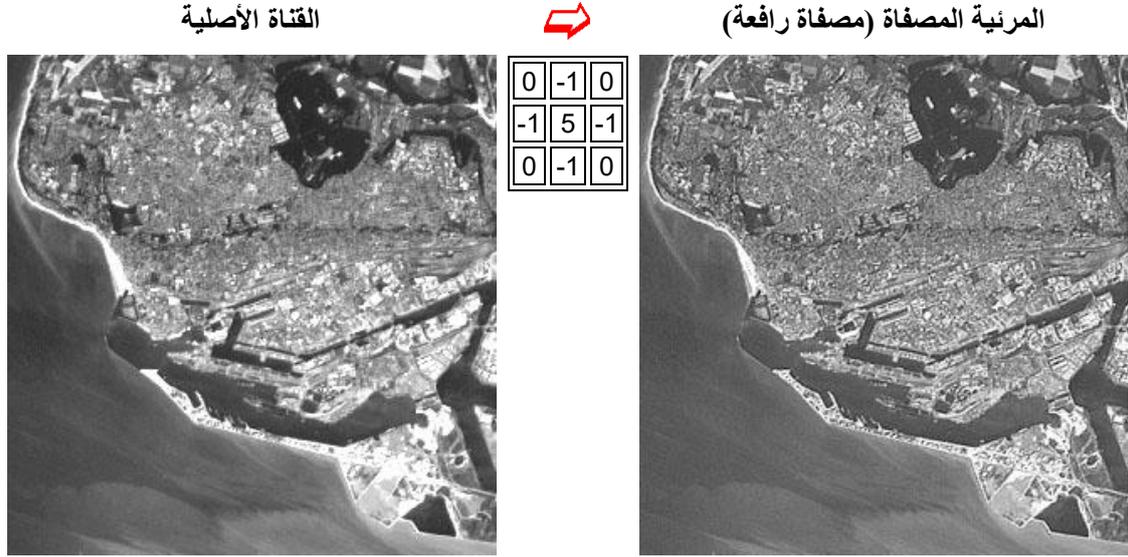
الشكل 11.5:- المصفاة الخافضة Filtre passe-bas (بوشان. ت، 2001).



الشكل 12.5:- تحريك "نافذة" التصفية (في حالة المصفاة الخافضة) (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

- بينما تقوم المصفاة الرافعة (الشكل 13.5) بإبراز بعض التفاصيل، كإبراز الحروف Arêtes والتعرف بالتالي بشكل أفضل على الأجسام الخطية (الشبكة المائية، شبكة الطرق، الانكسارات والفوالق...). ويمكن أن تتحدد المصفاة الرافعة مثلا من خلال

تطبيق مصفأة خافضة ثم طرح نتائج المرئية الأصلية منها، فينتج عن هذه العملية إنتاج مرئية جديدة تمت فيها توعية التفاصيل التي لها ترددات عالية.



الشكل 13.5:- المصفأة الرافعة Filtre passe-haut (بوشان. ت، 2001).

***/- المؤشرات Les indices**

تمثل المؤشرات تحليلات متعددة المتغيرات. حيث يتم إعداد المعالجات انطلاقاً من قنوات متعددة، تتمثل عادة في عمليات رياضية مختلفة التعقيد، تهدف إما إلى الحد من حجم المعلومات أو إلى إبراز مواضيع خاصة (النبات، التربة...).

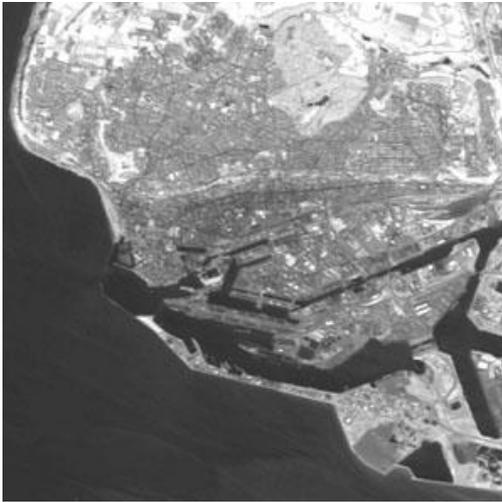
***/- مؤشر النبات المنضبط (Indice de végétation normalisé NDVI):**

ويتمثل في طرح من قناة الأشعة تحت الحمراء (حيث تكون انعكاسية النباتات عالية)، قناة اللون الأحمر (حيث تكون انعكاسية الأسطح المعدنية عالية). ويظهر على القناة الجديدة تدرجاً تصاعدياً للنشاط النباتي، يمتد من الأسود الذي يعني غياباً تاماً للنباتات، إلى الأبيض الذي يأخذ بعين الاعتبار نشاطاً يخضورياً عالياً جداً. يفرز تطبيق مؤشر النبات المنضبط NDVI مرئية جديدة، حيث تتراوح القيمة المطابقة لعناصر المرئية الأساسية ما بين 0 (تربة عارية) و 1 (تربة ذات تغطية نباتية قصوى). وبالتالي فإن تحليل الدرجات

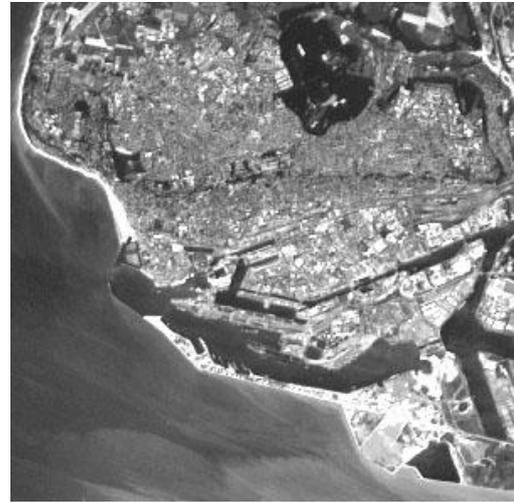
اللونية الممتدة بين هاتين القيمتين (النادرتين) هو الذي سيقدم للملاحظ معلومات عن كثافة الغطاء النباتي وكمية الكتلة الحيوية الخضراء (الشكل 14.5).

يتميز الغطاء النباتي الكثيف، باستجابة عالية ضمن مجال الأشعة تحت الحمراء القريبة (نشاط يخضوري عالي)، وباستجابة ضعيفة في مجال اللون الأحمر؛ بينما تكون الاستجابة معاكسة في حالة غطاء نباتي متفرق (حيث يكون تأثير الأسطح المعدنية أكبر من تأثير النشاط الـيخضوري). ويمكن الفرق المنضبط من إبراز هاتين الظاهرتين معا على نفس المرئية.

قناة الأشعة تحت الحمراء



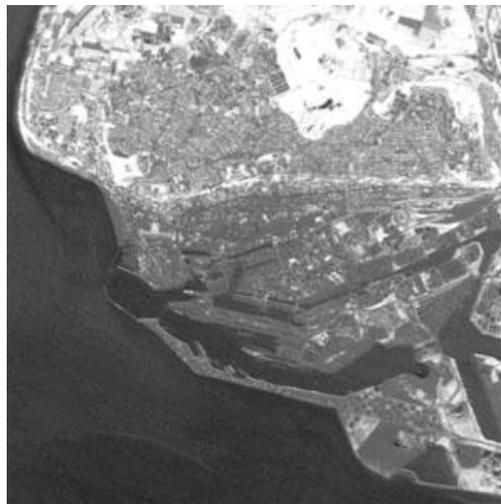
قناة اللون الأحمر



$$NDVI = [(infrarouge - rouge) / (infrarouge + rouge)]$$



مؤشر النبات المنضبط

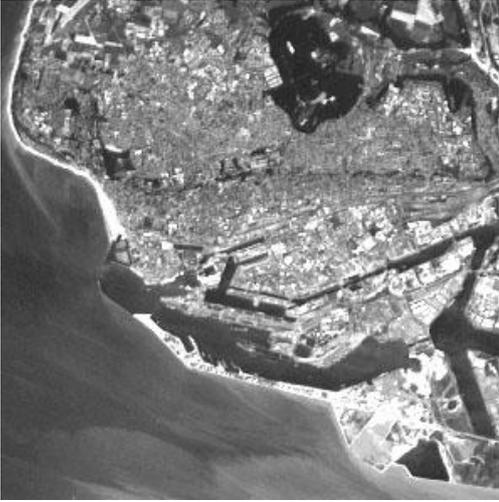


الشكل 14.5:- مؤشر النبات المنضبط (بوشان. ت، 2001).

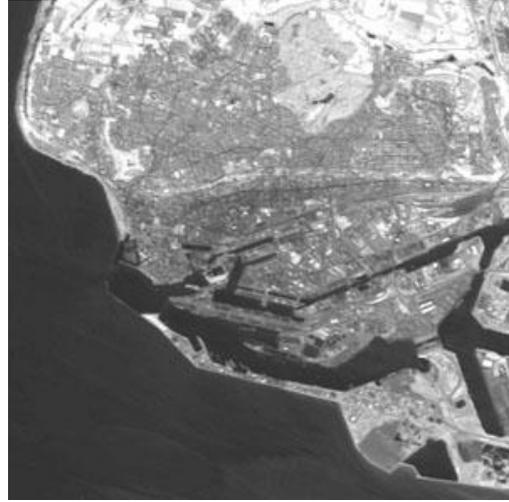
****/- مؤشر الكثافة الضوئية للتربة Indice de brillance des sols:**

يعرف تطبيقات في البحوث المندرجة ضمن مجال علم التربة ويأخذ بعين الاعتبار معيار انعكاس الأسطح الطبيعية المختلفة للفصل بين الغطاء النباتي وبين الامتدادات المعدنية (الشكل 15.5).

قناة اللون الأحمر



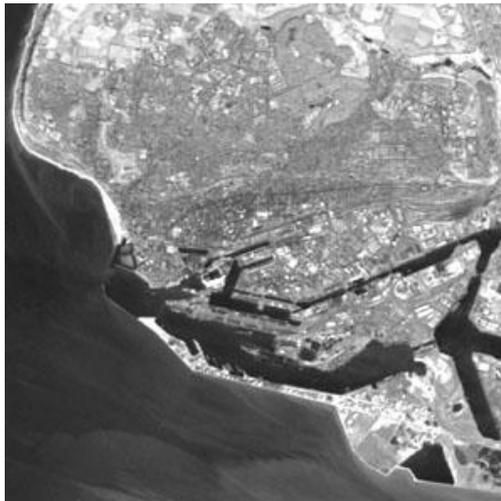
قناة الأشعة تحت الحمراء



$$IBS = \text{sqrt} [(rouge)^2 + (infrarouge)^2]$$



مؤشر الكثافة الضوئية للتربة

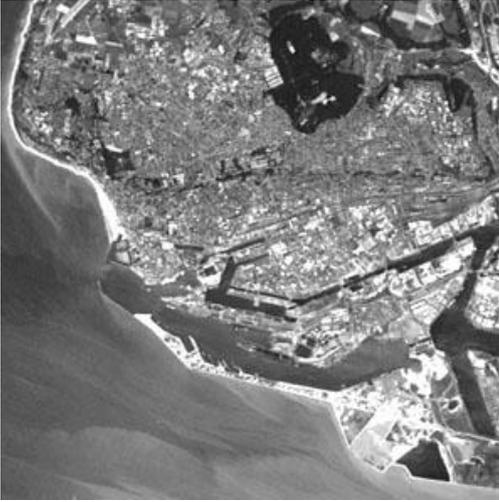


الشكل 15.5:- مؤشر الكثافة الضوئية للتربة (بوشان. ت، 2001).

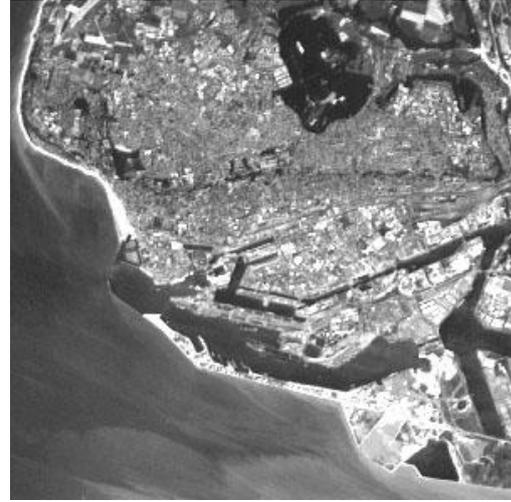
****مؤشر الذرع *Indice de cuirasse* :**

ويستجيب لنفس حاجات مؤشر الكثافة الضوئية للتربات، لكنه أكثر مردودية بالنسبة لإبراز تباينات الأراضي المبنية والتربات العارية.
عند تطبيق مؤشر الذرع، تظهر الأسطح النباتية والمائية سوداء اللون، بينما تظهر الأسطح المعدنية باللون الرمادي الفاتح أو باللون الأبيض.

قناة اللون الأخضر



قناة اللون الأحمر



$$IC = [(3 \times \text{vert}) - \text{rouge} - 100]$$



مؤشر الذرع



الشكل 16.5:- مؤشر الذرع (بوشان. ت، 2001).

*/- ملحوظة.

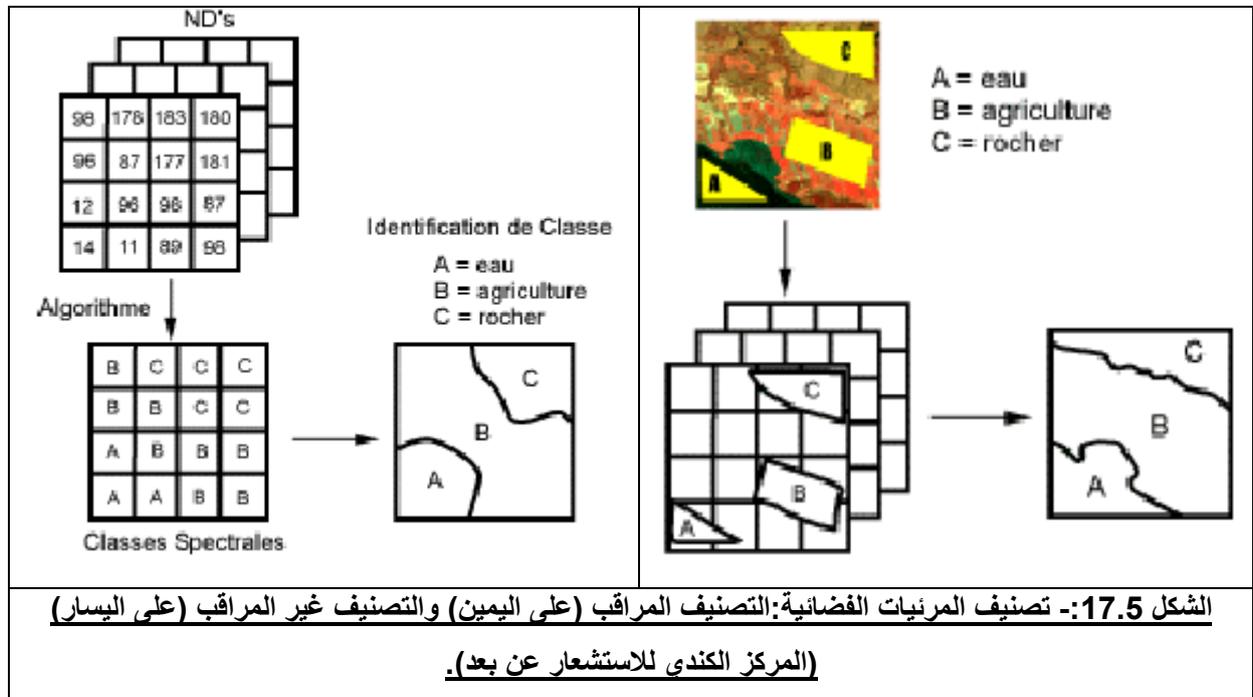
إن تحضير التركيبات الملونة من خلال دمج المصافي والمؤشرات، مع القنوات الأصلية، يمكن من رفع كبير للتباينات والتمييزات، كما يسمح بإبراز أمثل لعدد من المواضيع. وتمثل عمليات التصفية وإعداد المؤشرات، معالجات بسيطة وسهلة الإنجاز، تشتغل في أغلب الأوساط الخاضعة للملاحظة.

*/- تصنيف المرئيات.

تتمثل عملية تصنيف مرئية فضائية في مجال الاستشعار عن بعد في تعرف آلي على التظاهرات المختلفة للانعكاسية. حيث تقوم الخوارزمية المستعملة لتصنيف المرئية بتجميع العناصر الأساسية للمرئية حسب تجانسها وتمائلها. وهكذا نستطيع التعرف آليا على المواضيع المختلفة للمرئية (النبات، الماء، البنايات...). ويمكن القيام بعملية التصنيف على عدد كبير من القنوات، لكن سرعة المعالجة تقل مع زيادة عدد المعلومات المراد معالجتها. تتعدد طرق تصنيف المرئيات الفضائية، لكن يمكن تقسيمها إلى مجموعتين من التصنيفات، التصنيفات غير المراقبة والتصنيفات المراقبة (الشكل 17.5):

- التصنيفات المراقبة (أو الموجهة) (Classifications supervisées (dirigées) والتي تتم تحت إشراف المعالج أو المحلل، الذي يقوم بتحديد عينات جد متجانسة من المرئية، تعبر عن مختلف الأسطح (فئات من المعلومات)، وتشكل مجموعة من المعطيات التجريبية (ذات طبيعة فضائية أو موضوعاتية). حيث يركز اختيار المعطيات التجريبية على خبرة المعالج، وعلى معرفته بالمناطق الجغرافية وأنواع الأسطح الظاهرة على المرئية. وتستخدم المعلومات الرقمية المختلفة عن هذه المعطيات التجريبية كي يستطيع الحاسوب تحديد الفئات والتعرف بعد ذلك على المساحات التي تتمتع بخصائص مشابهة لكل فئة، فيستخدم الحاسوب برنامجا خاصا (خوارزمية (Algorithme) بهدف تحديد البصمة الرقمية لكل فئة. ويتمثل التصنيف المراقب إذن في مقارنة كل عنصر أساسي من عناصر المرئية بالفئات التي تم تحديدها، وربطه بالفئة التي يتم تحديدها كأقرب فئة إليه؛

- التصنيفات غير المراقبة Classifications non supervisées أي تلك التي تتم كليا بشكل آلي، حيث يتم تحديد الفئات الطيفية في البداية، من خلال الاعتماد على المعلومات الرقمية للمعطيات فقط. بعد ذلك يقوم المعالج بربط هذه الفئات الطيفية إلى فئات من المعلومات المفيدة (عند الإمكان). وتقوم برامج خاصة تعرف بخوارزميات التصنيف من أجل تحديد المجموعات الإحصائية الطبيعية (أو بنيات المعطيات). وعادة ما يقوم المعالج بتحديد عدد المجموعات أو الفئات التي سيتم تأسيسها انطلاقا من المعطيات، وبالتالي فإن تدخل الإنسان ليس غائبا تماما في هذا القسم من التصنيف، لكن في هذه الطريقة لا يتم تحديد مجموعة الفئات سلفا كما هي الحال في التصنيف المراقب.



الشكل 17.5:- تصنيف المرئيات الفضائية:التصنيف المراقب (على اليمين) والتصنيف غير المراقب (على اليسار)

(المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

الفصل السادس: تطبيقات.

1- مدخل.

أشرنا في الفقرات الخاصة بأجهزة الالتقاط، أن كل لاقط يتم تصميمه لأجل تطبيقات خاصة؛ وتحدد الأحزمة الطيفية التطبيقات التي يستخدم فيها اللاقط بصري، بينما تحدد زاوية الورود والتردد المستعمل استخدامات أجهزة الرادار. وتتطلب كل عملية استشعارية تطبيقية، تركيبة خاصة تتعلق بدرجات التباين الفضائي والزمني والطيفي. وغالبا ما يتعين استخدام عدة أجهزة التقاط لتلبية متطلبات تطبيق معين.

يحتوي كل حزام (أو شريط) من المعطيات يستقبله اللاقط، على معلومات هامة ووحيدة. ونعرف أن كل هدف يتفاعل بشكل مختلف حسب طول موجة الطاقة الوافدة، التي تتعرض للانعكاس أو الامتصاص أو الانتشار أو الانتقال ضمن نسب متنوعة. وبالتالي فإن مظهر الهدف المستشعر يمكن أن يتغير مع الزمن (بعد ثوان قليلة في بعض الحالات). لذلك تتطلب كثير من التطبيقات استخدام معلومات متنوعة المصدر الأمر الذي يمكن من التعرف على الهدف بشكل صحيح ويسمح بجمع معطيات دقيقة. ويمكن تشكيل المعطيات ودمجها لاستخراج أكبر حجم ممكن من المعطيات عن هدف معين أو عن منطقة معينة، من خلال عدة طرق نذكر من بينها:

/*- المعطيات متعددة الأطياف **Données Multispectrales**: حيث يهدف استعمال أحزمة طيفية متعددة إلى استغلال "مناظر" الهدف المختلفة لتسهيل تحديده والتعرف عليه؛

/*- معطيات أجهزة التقاط متعددة **Données Multicapteurs**: توفر أجهزة الالتقاط المختلفة معلومات مختلفة ومتكاملة، تسهل – إذا ما تم دمج بعضها ببعض- تفسير المرئيات وتصنيفها. فمثلا نستطيع دمج المعطيات التي توفرها أجهزة المرئيات غير الملونة ذات درجة تباين عالية بتلك التي توفرها المرئيات متعددة الأطياف ذات درجة تباين ضعيفة، كما نستطيع تركيب معطيات تم الحصول عليها من خلال عملية الاستشعار السالب بمعطيات الاستشعار الموجب. ومن أفضل الأمثلة في هذا الباب إدماج مرئيات اللاقط RSO (في مجال الاستشعار الراداري)، مع مرئيات متعددة الأطياف: حيث تضيف المرئية الأولى (RSO) المظهر التضاريسي للسطح إلى مرئية لا تتوفر عليه. بينما توفر المرئية الثانية

(متعددة الأطياف) المعلومة الطيفية الواضحة لتركيبية السطح الأرضي وغطائه النباتي. وكثيرا ما تستعمل مثل هذه المرئيات في ميدان الجيولوجيا: إذ يعبر المكون الطيفي عن الصخرة (التركيبية المعدنية)، بينما يعبر المكون الراداري عن البنية؛
/*- معطيات متعددة الأزمان **Données Multitemporelles**: تستخرج المعلومة متعددة الأزمان من المرئيات التي التقطت أثناء فترات زمنية مختلفة (تفصل بينها أيام أو أسابيع أو شهور أو سنوات). فمراقبة التحولات التي تطال الغطاء النباتي أو التوسع العمراني، ودراسة ظواهر متحركة (ديناميكية)، تتطلب مرئيات التقطت خلال فترات زمنية متباعدة. ومن بين الأمثلة على ذلك مراقبة التحولات التي تطرأ على النباتات خلال فصل النمو، الأمر الذي يتطلب الحصول على مرئيات على فترات متكررة طيلة طور النمو.
يتم الحصول على معلومات متعددة الأزمان، من خلال تفسير مرئيات استهدفت نفس المنطقة، لكن في أوقات متباينة. ويتحدد الفارق الزمني بين المرئيات المختلفة حسب طبيعة وموضوع الدراسة.

تطبيقات في مجال الاستشعار عن بعد.

تتنوع وتتعدد المجالات العلمية التي تستفيد من تقنيات الاستشعار عن بعد (أنظر الجدول 1) حيث تغطي تخصصات متنوعة في كثير من فروع المعرفة (العلوم التقنية، الهندسة الحضرية، العلوم الاجتماعية، الطب، علوم الأرض، علم الأحياء (الحيوانية والنباتية)، الزراعة، الهيدرولوجيا، المناخ والأرصاد الجوية، علم البحار...). ولا يتسع المجال في هذا الفصل لتغطية كل هذه المجالات، وسنكتفي بعرض عدد من الأمثلة التطبيقية للعملية الاستشعارية في عدد من الميادين العلمية.

أ- في المجال الزراعي.

تقوم الزراعة بدور أساسي في اقتصاد الدول المتقدمة والدول النامية، فهي قد تمثل صناعة مربحة لدولة قوية الاقتصاد أو إنتاجا أساسيا لسد الحاجيات الضرورية في بلد فقير. لذلك يحتاج كل منتج زراعي للمعلومات التي تفيده في إدارة زراعته بشكل فعال، وبرمجة

العمليات الزراعية المختلفة ومواجهة التقلبات المختلفة التي يمكن أن تهدد إنتاجه (الإصابة بالحشرات، تقلبات الجو، الجفاف، الخسائر المرتبطة بإجهاد النبات، والتي قد تؤثر في مردودية الأرض وخصائصها).

تسهم المرئيات الفضائية في تصنيف الزراعات وفي التأكد من سلامة صحة الإنتاج، وفي مراقبة طرق التدخل المختلفة.

من بين التطبيقات في مجال الزراعة نجد :

- تصنيف أنواع الزراعات؛
- تقييم الحالة الصحية للزراعات ؛
- تقدير المحصول النهائي للحصاد؛
- وضع خرائط لخصائص التربة؛
- خرائط لاستغلال الأراضي وإدارتها؛
- مراقبة احترام القوانين والاتفاقيات.

*- توزيع أصناف الزراعات.

إذا كانت مبادئ تحديد الزراعات متماثلة، فإن سلم الملاحظة في أوروبا وفي شرق آسيا يكون أصغر بكثير منه في شمال القارة الأمريكية، لأن مساحة الحقول في أوروبا وشرق آسيا تكون صغيرة. كما أن الغطاء السحابي في أوروبا وفي المناطق المدارية، تحد عادة من استخدام أجهزة الالتقاط البصرية ذات التباين العالي. في هذه المناطق تستخدم أجهزة الرادار العالية التباين بشكل أكبر. حيث لأوراق الزراعات المدارية الكبيرة بصمات رادارية خاصة، فأوراق أشجار الموز، على وجه الخصوص، تتميز بانتشار معاكس لامع (الشكل 1.6). كما تعتبر متابعة أطوار نمو الرز، تطبيقا ذا أهمية كبيرة في المناطق المدارية، خصوصا في البلدان الآسيوية. يتمتع جهاز الرادار بحساسية خاصة تجاه خشونة السطح، ويؤدي نمو مزارع الرز إلى تحولات كبيرة في قوة الإشارة المسجلة على المرئيات: فالأسطح الناعمة للمزارع الأرز التي كانت مغمورة بالمياه خلال فصل الربيع، تجعل التباين ضعيفا؛ بينما تعطي أوراق النباتات الناضجة انتشارا معاكسا عاليا.

*/-مراقبة الزراعات وتقييم الخسائر.

تضم النباتات في صحة جيدة كميات كبيرة من اليخضور. تعكس هذه اللون الأحمر والأزرق بشكل ضعيف ، بينما تعكس اللون الأخضر بشكل عال. أما الزراعات التي تعاني من الإجهاد أو التي تعرضت للإتلاف فإن كمية اليخضور فيها تضعف وتراجع، مما يؤدي إلى تراجع الإشعاع الأخضر المنعكس؛ في حين تحد التغيرات الداخلية لبنية النباتات من انعكاس الأشعة تحت الحمراء القريبة. يسمح هذا التراجع برصد حالات الإجهاد الذي تعاني منه النباتات بشكل سريع. ويمكن تحليل نسبة الأشعة تحت الحمراء المنعكسة مقارنة بالأشعة الحمراء (مؤشر النبات المنضبط NDVI) من القيام بقياس جيد لحالة النباتات الصحية: فالنباتات التي تكون في حالة صحية جيدة تعطي قيما عالية لمؤشر النبات المنضبط لأنها تعكس بشكل كبير الأشعة تحت الحمراء بينما لا تقوم – تقريبا- بعكس الأشعة الحمراء. ويشكل الفرق الذي يظهر بين الزراعات المسقية وغير المسقية مثلا جيدا في هذا الإطار (الشكل 2.6): حيث تظهر الزراعات المسقية بلون أخضر جيد في النطاق المرئي، في حين تمثل القطاعات الداكنة المراعي الجافة التي تحتوي على قليل من النبات؛ بينما تظهر في المرئية الملونة ضمن الأشعة تحت الحمراء (حيث تظهر الانعكاسية باللون الأحمر)، النباتات الجيدة الصحة بلون أحمر فاتح، في حين تبقى المراعي داكنة اللون.

*/- تحديد أنواع النباتات.

تعتمد الإدارات الغابوية المرثيات العالية الطيفية Hyperspectrales لتقييم عدد الجنوع بالنسبة لكل تجمع نباتي، ووضع خرائط لأنواع الأسطح المدروسة. وقد تم القيام بعملية التصنيف هذه، بالاعتماد على مرئية عالية الطيفية (بالوان كاذبة Fausses couleurs). التقطت في خريف 1995. وتضم خريطة تصنيف الغطاء النباتي الفئات التالية (الشكل 3.6):

الأخضر الداكن: صنوبريات conifères ؛ الأخضر: أغصان منخفضة؛ مدادي شاحب :
حصى؛ الأصفر: أوراق feuillus؛ البرتقالي: تربة جافة؛ الأحمر: تربة رطبة؛ أزرق
شاحب: ماء؛ أزرق داكن: ماء صافي أو عميق.

كما تضم المرئية عددا من المعلومات من بينها :

- مساحة التجمع النباتي (بالهكتار): 9.0؛
- العدد الإجمالي للأشجار: 520؛
- كثافة الأشجار (جذع/الهكتار). 12.46%.

ب- علوم الأرض (الجيولوجيا).

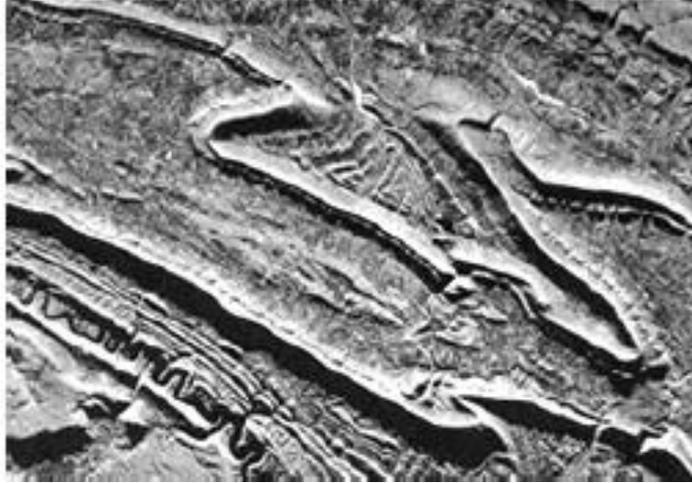
تمكن تقنية الاستشعار عن بعد من استخراج المعلومات بخصوص بنية سطح الأرض وتركيبته. وعادة ما تعتمد إلى جانب مصادر معلومات أخرى للقيام بقياسات تكميلية. فانطلاقا من الانعكاسية الطيفية، قد توفر المعطيات متعددة الأطياف معلومات عن تركيبية الصخور. وتزود أجهزة الرادار بمعلومات عن خشونة السطح وهندسته، وهي مفيدة جدا خصوصا إذا ما تم دمجها مع معطيات توفرها مصادر أخرى بهدف تمثيل التضاريس بشكل مفصل ودقيق.

■ ولا يقتصر الاستشعار الفضائي على التطبيقات الجيولوجية المباشرة، حيث يستعمل في مراحل إعداد التصاميم والإعداد اللوجستي، كتصميم طرق النفاذ في منطقة منجمية، وفي وضع الخرائط الأساسية التي سيتم إضافة المعطيات الجيولوجية فوقها. وفيما يلي لائحة بأهم التطبيقات الاستشعارية في مجال الجيولوجيا:

- خرائط التوضعات السطحية؛
- الخرائط الصخرية؛
- الخرائط البنائية؛
- التنقيب عن المقالع (الرمال والحصى) واستغلالها؛
- التنقيب المعدني؛
- التنقيب البترولي؛

- الجيولوجيا البيئية؛
- الجيولوجيا النباتية؛
- البنية التحتية الأساسية؛
- وضع خرائط ومتابعة نسب الترسيب؛
- وضع خرائط ومتابعة الظواهر الطبيعية (الزلازل والبراكين...)
- وضع خرائط المخاطر الجيولوجية؛
- وضع خرائط على مستوى الكوكب.

ويبين الشكل 4.6 مرئية سجلها اللاقط RSO (استشعار راداري) لبنية جيولوجية في بنسلفانيا بالولايات المتحدة الأمريكية، وتظهر البنية الجيولوجية (بنية مقعرة) بشكل واضح وجلي.



الشكل 4.6:- مرئية RSO لبنية جيولوجية مقعرة ببنسلفانيا (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

ج- هندسة المياه السطحية (الهيدرولوجيا).

نظرا لكون أغلب العمليات الهيدرولوجية، هي عمليات متحركة (ديناميكية) بصفة يومية وفصلية، فإنها تتطلب مراقبة وملاحظة متكررة. وتوفر العملية الاستشعارية مظهرا شاملا للتوزيع المكاني والحركي للعمليات الهيدرولوجية، وهو توزيع غير متوفر في الخرائط الأرضية. ويوفر جهاز الرادار بعدا جديدا للدراسات الهيدرولوجية، لأن لاقطا

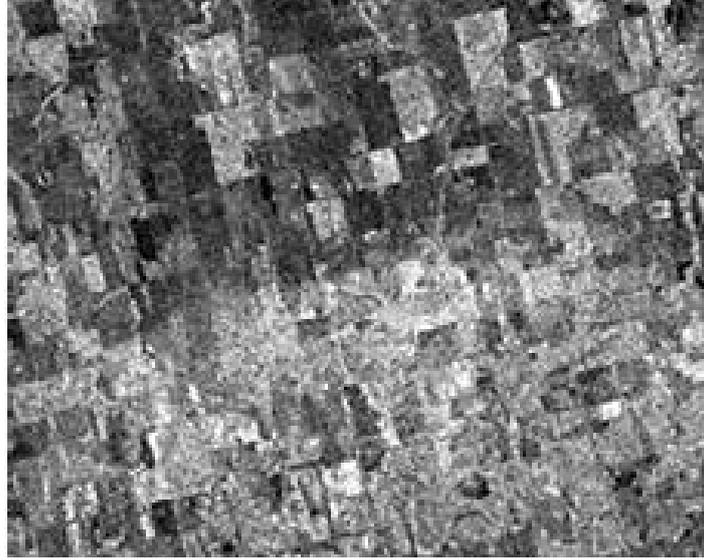
نشطاً يسمح بالحصول على المعلومات خلال الليل والنهار وحتى أثناء العواصف. ومن بين التطبيقات الاستشعارية في ميدان الهيدرولوجيا نذكر ما يلي:

- وضع خرائط المستنقعات ومتابعتها ؛
- تقييم رطوبة التربة؛
- وضع خرائط امتداد الأسطح الثلجية ومتابعتها ؛
- قياس سمك غطاء ثلجي؛
- تقييم كمية الماء الموجود في سطح ثلجي؛
- مراقبة الجليد النهري والبحيري؛
- مراقبة ووضع خرائط الفيضانات؛
- متابعة دينامية المثالج؛
- رصد التغيرات في الأنهار والدلتات؛
- وضع خرائط الأحواض النهرية ونمذجتها؛
- رصد التسرب من قنوات الري؛
- برمجة أوقات وساعات الري.

*- رصد رطوبة التربة.

تبين المرئية الرادارية (الشكل 5.6) والتي التقطت في 07 يوليو 1992 بواسطة القمر الصناعي إيرز-1 التابع لوكالة الفضاء الأوروبية. تأثير تساقط أمطار محلية مع انتشار معاكس للميكرو-موجات سجلها جهاز الالتقاط: حيث تظهر المناطق التي تلقت الأمطار حديثاً أكثر لمعانا (النصف السفلي)، بينما تظهر المناطق التي لم تتلق أية أمطار (النصف العلوي)، بمظهر قاتم وداكن. وذلك بسبب الفارق الناتج عن هطول المطار في قيمة ثابت العازل الكهربائي عند السطح، بين المناطق التي يغطيها النصف العلوي للمرئية وبين المناطق التي يغطيها النصف السفلي. لأن خصائص المواد، العازلة للكهرباء تؤثر في القدرة على امتصاص طاقة الميكرو- موجات. وتؤثر بالتالي في انتشار طاقة الميكرو- موجات بشكل كبير. وهناك علاقة تناسبية بين الانتشار المعاكس الراداري وبين قيمة ثابت

العازل الكهربائي: حيث تبلغ هذه القيمة من 03 إلى 08 بالنسبة للمواد الطبيعية الجافة، ويمكن أن تبلغ 80 بالنسبة لسطح مشبع بالماء. وبالتالي كلما كانت هذه القيمة منخفضة، كلما تعرضت الطاقة الوافدة للامتصاص، وكلما ظهر الهدف الأرضي على المرئية داكنا.



الشكل 5.6:- مرئية رادارية يمكن التمييز فيها بسهولة بين المناطق التي هطلت عليه أمطار محلية (النصف السفلي) وبين تلك التي لم تتلق أية أمطار (النصف العلوي) (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).

د- استخدام الأراضي.

نذكر في مجال استخدام الأراضي التطبيقات الاستشعارية التالية:

- تدبير الموارد الطبيعية؛
- حماية "المساكن" الطبيعية؛
- التمدد والتطور المدني (الحضري).
- تصميم المسارات واللوازم الخاصة بأنشطة البحث الزلزالي، واستخراج الموارد؛
- تحديد امتداد الخسائر (أعاصير، عواصف، براكين، زلازل، حرائق)؛
- تحديد الحدود القانونية لتقييم الضرائب والممتلكات؛
- رصد الأهداف – التعرف على مضامير الهبوط (المروحيات)، والطرق، والقناطر، والحد بين الماء واليابسة.

*- تحولات استخدام الأراضي (قروي/حضري).

توفر مرئية تحول استخدام الأرض (الشكل 6.6)، معلومات متعددة الأزمان، على شكل خريطة للتطور الحضري (المديني): حيث تمثل الألوان تغطية الأرض واستخدامها بالنسبة لسنتين مختلفتين، فاللون الأخضر يبين المناطق الحضرية لسنة 1973 واللون الوردي يشير إلى المناطق الحضرية لسنة 1985. ونستنتج من هذه المرئية بسهولة كبيرة التحول الهائل في تطور ونمو المناطق الحضرية الحالية وتحويل أراضي جديدة (كانت أراض ريفية)، إلى أراضي عمرانية لمؤسسات مختلفة خلال 12 سنة. تمتاز مثل هذه المعلومات بفائدة كبيرة، بالنسبة للمصالح والإدارات الحكومية التي تضطلع بمهام التصميم ومراقبة نمو وتطور المدن. بهدف القيام بدراسات تخص الحاجيات المستقبلية لمناطق مرشحة ومؤهلة للتوسع والنمو.

ه- رصد المحيطات ومراقبة السواحل.

بالإضافة إلى كونها تمثل مصدرا هاما للغذاء ومصدرا فيزيائيا وحيويا Biophysique هائلا، فإن المحيطات تستخدم في الملاحة ونقل الأشخاص والبضائع. وهي تكتسي أهمية كبيرة في تكون الأنظمة المناخية. كما تشكل عنصرا رئيسا في التوازن الهيدرولوجي لكوكب الأرض. وبالتالي فإن فهم دينامية المحيطات مهم جدا لتقييم مخزون الأسماك ولبرمجة مسارات السفن والتنبؤ بالتأثيرات الممكنة على التيارات الجوية Circulations atmosphériques لظواهر طبيعية كالأعاصير والعواصف. وللتخفيف من الآثار الكارثية للملاحة البحرية. وتمثل المناطق الساحلية مناطق ذات حساسية عالية تجاه التحولات البيئية الناتجة أن النمو الاقتصادي وعن التحولات التي تطال استخدام الأراضي. حيث تمثل السواحل مناطق ذات تنوع حيوي عالي وهي مرشحة للتمدين (60% من سكان الأرض يقطنون بمحاذاة المحيطات)، وبالتالي فإن السواحل تمثل المناطق التي تعرضت أكثر من غيرها لتأثير النشاط البشري. وتحتاج الوكالات والمصالح الحكومية التي تقوم بتتبع النشاط البشري في مناطقها الساحلية، لمصادر معلومات جديدة من أجل مراقبة التحولات التي تطرأ على المجال، كالتعرية الساحلية، وفقد "المساكن"

الطبيعية، والتمدين، والتلوث...ويمكن لتقنيات الاستشعار عن بعد من توفير معطيات تسمح بالقيام بتطبيقات متعددة كوضع خرائط لدينامية المحيطات، ومراقبة التحولات التي تحصل في المناطق الساحلية...

***/- ألوان المحيطات وتركيز اليخضور.**

يسهم تحليل ألوان المحيطات في تحديد حالتها الصحية من خلال قياس قوة النشاط الحيوي بواسطة وسائل بصرية. ويشكل البلاكتون النباتي حجرة زاوية في السلسلة الغذائية. يعتبر اليخضور الذي يقوم بامتصاص الضوء الأحمر(الأمر الذي يعطي اللون الأزرق-أخضر للمحيطات) بمثابة مؤشر جيد للحالة الصحية للمحيطات ولمستوى إنتاجها. وقد مكن وضع خرائط زمانية ومكانية للون المحيطات على المستوى الإقليمي وعلى المستوى العالمي من التوصل إلى تكوين صورة عن الخصائص والعمليات الأساسية للثروة الحيوية البحرية.

قد تساعد دراسة توزيع وفهم التحولات التي تطرأ على ألوان المحيطات، على إدارة مخزون السمك وغيرها من أشكال الحياة المائية، وعل تحديد الكميات المسموح به للصيد، وعلى مراقبة جودة المياه، وتسمح بالتالي بالتعرف على التلوث البشري والطبيعي (كتسرب النفط و تكاثر الطحالب)، الذي يضر بالزراعات البحرية وإنتاج فواكه البحر. ويبين الشكل 7.6 أن إنتاجية المحيطات تبدو أعلى، عموماً، في المناطق الساحلية، بسبب القرب من المناطق المزودة بالمواد الغذائية والتي تتوفر بها ظروف مواتية لحركة الغذاء وتراكمه.

***/- رصد تسرب المحروقات من الناقلات البحرية.**

تحدث المحروقات التي تفرغها الناقلات البحرية أضراراً جسيمة بالحياة البحرية، بالإضافة إلى إضرارها بالمحيط الطبيعي للحيوانات البرية وللإنسان. وتنتج أغلب الحالات عن تفريغ السفن والناقلات البحرية لمخزونها من المحروقات عند دخولها الموانئ وعند خروجها منها. بينما ينجم التفريغ الذي يهيم مساحات واسعة عن انقلاب الناقلات البحرية

النفطية أو اصطدامها مع الأرصفة البحرية الطبيعية أو مع غيرها من السفن. حيث تنتج عن هذه التدفقات أضراراً بيئية على امتدادات هائلة مما يجعلها تثير اهتمام وسائل الإعلام العالمية.

ومن الأمثلة على ذلك انقلاب ناقلة النفط الضخمة **Sea Empress** قرب مدينة ميلفورد هيفن ببلاد الغال، في 15 فبراير 1996، بعد اصطدامها بالصخور، حيث تدفقت 70000 طن من النفط الخام الخفيف وتم تفريقها في ظروف عاصفية باتجاه الجنوب. وبعد أسبوع عن التقطت مرئية RADARSAT (الشكل 8.6)، ويظهر بوضوح امتداد الفرشة البترولية، حيث تمثل "الألوان" الداكنة، المناطق التي يوجد بها البترول. فأمواج المحيطات تختفي نتيجة لوجود البترول الطافي على سطح الماء، ويظهر سطح أملس أكثر نعومة من الماء المحيط به. هذا السطح الناعم يظهر داكناً على مرئية رادار. وبالتالي فمن خلال استعمال مثل هذه المرئيات، يمكن تحديد موقع فرشة المحروقات وامتدادها ودرجة تفرقها.

و- علم الآثار.

*/- الكشف عن مدينة أرم ذات العماد الأثرية.

قال تعالى: (أَلَمْ نَرَكَيْفَ فَعَلَ رَبُّكَ بِعَادِ إِرْمَ ذَاتِ الْعِمَادِ الَّتِي لَمْ يُخْلَقْ مِثْلُهَا فِي الْبِلَادِ (سورة الفجر.)).

في بداية عام 1990 امتلأت الجرائد العالمية الكبرى بتقارير صحفية تعلن عن: " اكتشاف مدينة عربية خرافية مفقودة "، " اكتشاف مدينة عربية أسطورية "، " أسطورة الرمال (عبار) "،

والأمر الذي جعل ذلك الاكتشاف مثيراً للاهتمام هو الإشارة إلى تلك المدينة في القرآن الكريم. ومنذ ذلك الحين، فإن العديد من الناس؛ الذين كانوا يعتقدون أن "عاداً" التي روى عنها القرآن الكريم أسطورة وأنه لا يمكن اكتشاف مكانها، لم يستطيعوا إخفاء دهشتهم

أمام ذلك الاكتشاف، فاكشف تلك المدينة التي لم تُذكر إلا على أسنة البدو قد أثار اهتماماً وفضولاً كبيرين.

وكان نيكولاس كلاب, عالم الآثار الهادي, هو الذي اكتشف تلك المدينة الأسطورية التي ذُكرت في القرآن الكريم. ولأنه مغرم بكل ما هو عربي مع كونه منتجاً للأفلام الوثائقية الساحرة, فقد عثر على كتاب مثير جداً بينما هو يبحث حول التاريخ العربي, و عنوان ذلك الكتاب "أرابيا فيليكس" لمؤلفه "بيرترام توماس" الباحث الإنجليزي الذي ألفه عام 1932, و "أرابيا فيليكس" هو الاسم الروماني للجزء الجنوبي من شبه الجزيرة العربية و التي تضم اليمن والجزء الأكبر من عمان (الشكل 9.6).



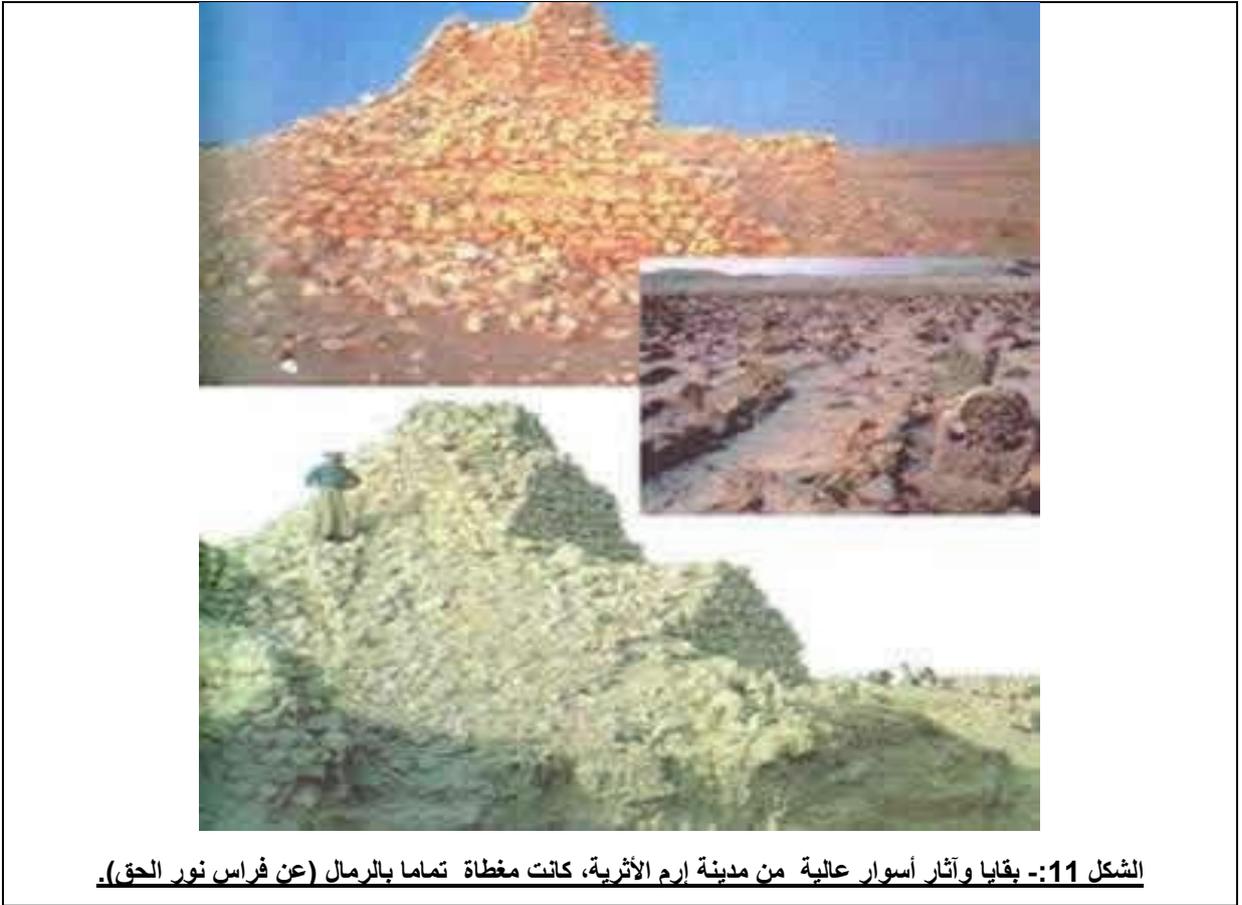
وبعد أن راجع "كلاب" ما كتبه الباحث الإنجليزي, اقتنع بوجود تلك المدينة المفقودة التي وصفها الكتاب و دون أن يضيع المزيد من الوقت بدأ بحثه.

استخدم "كلاب" طريقتين لإثبات وجود مدينة "عُبار":

أولاً: أنه عندما وجد أن الآثار التي ذكرها البدو موجودة بالفعل, قدم طلب للالتحاق بوكالة ناسا الفضائية ليتمكن من الحصول على صور لتلك المنطقة بالقمر الصناعي, وبعد عناء طويل, نجح في إقناع السلطات بأن يلتقط صوراً للمنطقة..

ثانياً: قام "كلاب" بدراسة المخطوطات و الخرائط القديمة بمكتبة "هانتينجتون" بولاية كاليفورنيا بهدف الحصول على خريطة للمنطقة. وبعد فترة قصيرة من البحث وجد واحدة,

وكانت خريطة رسمها "بطلمي" عام 200 ميلادية , وهو عالم جغرافي يوناني مصري. وتوضح الخريطة مكان مدينة قديمة اكتُشفت بالمنطقة و الطرق التي تؤدي إلى تلك المدينة. وفي الوقت نفسه, تلقى أخباراً بالتقاط وكالة ناسا الفضائية للمرئيات (الشكل 10.6) التي جعلت بعض آثار القوافل منظورة بعد أن كان من الصعب تمييزها بالعين المجردة و إنما فقط رؤيتها ككل من السماء. وبمقارنة تلك الصور بالخريطة القديمة التي حصل عليها, توصل "كلاب" أخيراً إلى النتيجة التي كان يبحث عنها؛ ألا وهي أن الآثار الموجودة في الخريطة القديمة تتطابق مع تلك الموجودة في الصور التي التقطها القمر الصناعي .



منذ اللحظة التي بدأت فيها بقايا المدينة في الظهور (الشكل 11), كان من الواضح أن تلك المدينة المحطمة تنتمي لقوم "عاد" ولعماد مدينة "إرم" التي ذُكرت في القرآن الكريم؛ حيث أن الأعمدة الضخمة التي أشار إليها القرآن بوجه خاص كانت من ضمن الأبنية التي كشفت عنها الرمال (الشكل 12.6).



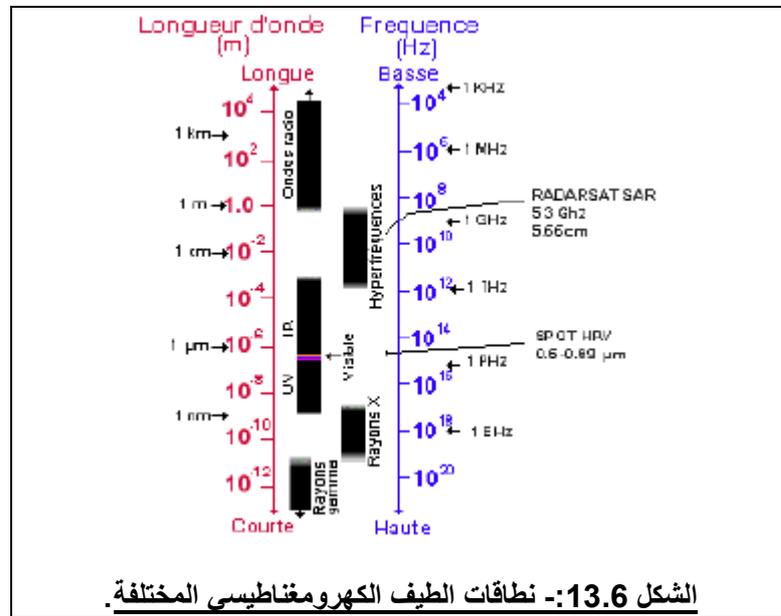
الشكل 12.6:- هذه الصورة هي لقلعة من قلاع إرم والتي تقع على عمق 10 أمتار تحت طبقات من الرمال الصحراوية والتي تتميز بأعمدتها الضخمة والتي تم تصويرها بواسطة أحد الأقمار الصناعية الأمريكية المتطورة(عن فراس نور الحق).

قال د. زارينزو هو أحد أعضاء فريق البحث و قائد عملية الحفر, إنه بما أن الأعمدة الضخمة تُعد من العلامات المميزة لمدينة "عُبار", وحيث أن مدينة "إرم" وُصفت في القرآن بأنها ذات العماد أي الأعمدة الضخمة, فإن ذلك يعد خير دليل على أن المدينة التي اكتُشفت هي مدينة "إرم" التي ذكرت في القرآن الكريم.

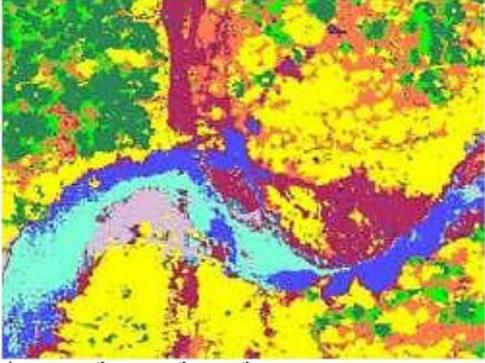
خلاصة

يعتبر الإيمان بعالم الغيب، عالم لا نراه بأعيننا المجردة، ولا ندركه بحواسنا، ركنا من أركان الإيمان وركيزة أساسية في بناء عقيدة الإنسان المسلم. وقد رأينا كيف أن النطاق المرئي الذي كان يمثل إلى وقت قريب عالم الشهادة الذي تدركه أعيننا المجردة. وبعد

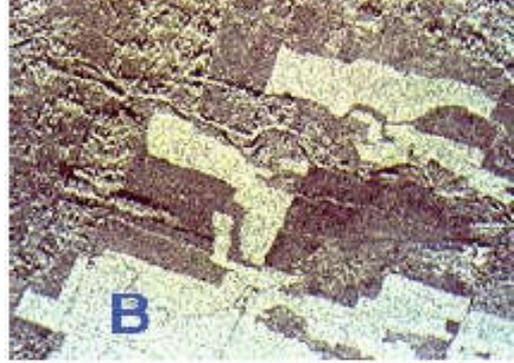
تطور العلم وتقدم الإنسان نحو كشف المجهول، تبين أن هذا العالم المشاهد لا يمثل في الحقيقة إلا جزءا يسيرا من نطاق الطيف الكهرومغناطيسي (الشكل 13.6)، والذي أصبح بالإمكان اليوم إدراجه ضمن عالم الشهادة بعد أن كانت أغلب مجالاته (أشعة غاما، الأشعة السينية، الأشعة فوق البنفسجية، الأشعة تحت الحمراء، موجات الراديو...)، إلى أمس قريب، تمثل عالما مجهولا (عالم غيب). وفي هذا دليل على صحة الخبر الذي أنبأنا به رسولنا الكريم وعلى صحة معتقد المسلمين. وفيه دليل على إمكانية وجود عوالم غيب أخرى لا تستطيع حواسنا إدراكها. وقد يتقدم العلم أكثر ويتوصل الإنسان إلى سبر أغوار عوالم أخرى هي اليوم من عالم الغيب المحجوب عنا.



الشكل 13.6:- نطاقات الطيف الكهرومغناطيسي المختلفة.



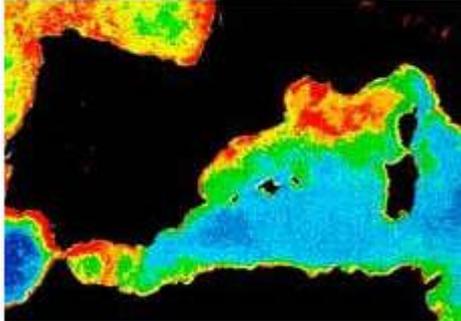
الشكل 3.6:- تصنيف مرئية عالية الطيفية لتحديد أنواع النباتات(المركز الكندي للاستشعار عن بعد).



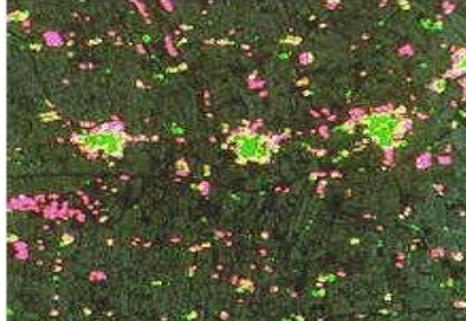
الشكل 1.6:- تظهر مساحات المغروسة بأشجار الموز B بلمعان عال(المركز الكندي للاستشعار عن بعد).



الشكل 2.6:- تحديد الحالة الصحية للنباتات من خلال مؤشر النبات المنضبط على اليمين المرئية الملونة ضمن النطاق المرئي؛ على اليسار المرئية الملونة ضمن الأشعة تحت الحمراء (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).



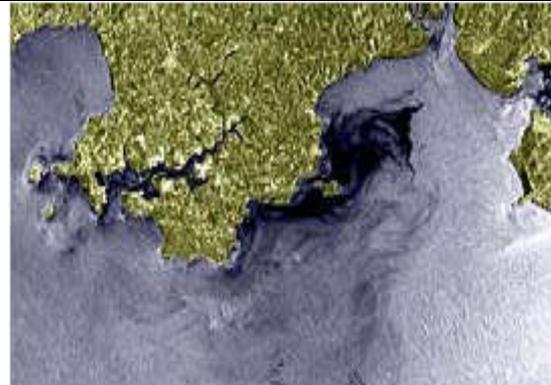
الشكل 7.6:- الحالة الصحية للبحار والمحيطات من خلال لونها المنحدر عن تركيز مادة اليخضور فيها (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).



الشكل 6.6:- مرئية متعددة الأزمان تبين التطور الحضري بين سنتي 1973 (الأخضر فاتح) و 1985 (الوردي) (المركز الكندي للاستشعار عن بعد).



الشكل 10.6:- صورة لمجرى نهرين جافين قرب مساكن قوم عاد صورت عبر الأقمار الصناعية(عن فراس نور الحق).



الشكل 8.6:- فرشاة بترولية قرب سواحل بلاد الغال ناتجة عن اصطدام ناقله نפט ضخمة بالصخور وتسرب المحروقات منها (المركز الكندي للاستشعار الفضائي).