الباب الأول

صبغات البناء الضوئي

- الضوء
- صبغات البناء الضوئي

obeikandl.com

obeikandl.com

الفصل الأول

الضوء

• المقدمة • طبيعة الضوء • أهمية الضوء للنباتات

• المستقبلات الضوئية • تحاشي الظل

المقدمة

تعد أشعة الشمس المصدر الرئيسي للضوء الذي يصل إلى الكرة الأرضية ، وهناك نوعان من الأشعة الشمسية التي تصل إلى الأرض وهي :

١- ضوء مباشر direct light وهو الضوء الذي لم يحدث له تشتت عند اختراقه الغلاف الجوي.

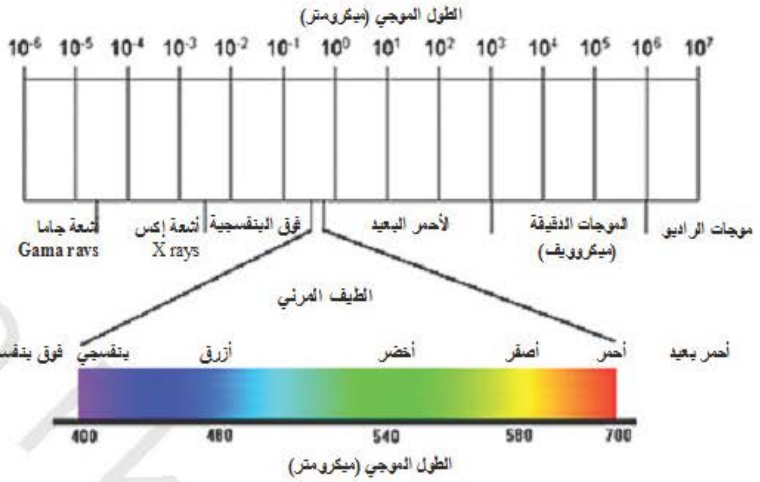
٢-ضوء منتشر diffused light وهو الضوء الذي حدث له تشتت أثناء عبوره الغلاف الجوي بفعل مكونات الغلاف الجوي مثل دقائق الغبار وبخار الماء .

إن الضوء عامل أساسي في تسيير الحياة على الكرة الأرضية علاوة على دوره في الرؤية وتمييز الأشياء والألوان . يعد الضوء المسئول عن بعض الظواهر مثل الانتحاء الضوئي (إنحناء الكائن أو العضو نحو الإضاءة أو بعيداً عنها) والتأقت الضوئي (التغيرات الفصلية التي تحدث في الكائن بتغير طول النهار والليل) والبناء الضوئي، أيضا، الذي تعتمد عليه

كل الحياة . لقد اهتم العلماء باستجابة النباتات للظروف الضوئية منذ أكثر من ١٠٠ عام (Briggs, 2006a) . ركزت الدراسات الأولى على النواحي الشكلية والتشكل والإزهار والإنبات التي تنظمها الإضاءة لكن في الآونة الأخيرة جذبت التقنيات الحديثة العلماء للنواحي الجزيئية ومنها دراسة استجابة النبات للإضاءة على المستوى الجزيئي (Devlin *et al.*, 2007) . إن معظم الإشعاع الذي يصل إلى الأرض من الشمس هو في مدى الضوء المرئي ، فالموجات ذات الطاقة العالية تصفى بواسطة الأكسجين والأوزون في طبقات الجو العليا ، ومعظم الإشعاع الأحمر البعيد يصفى بواسطة بخار الماء وثاني أكسيد الكربون قبل وصوله إلى الأرض .

طبيعة الضوء

قام إسحق نيوتن (Isaac Newton) في القرن الثامن عشر الميلادي بفصل الضوء إلى طيف من الألوان المرئية بإمراره عبر موشور ، حيث تبين أن الضوء الأبيض يتكون ، حقيقة ، من عدد من الألوان المختلفة تمتد من الأزرق فى أحد نهايات الطيف إلى الأحمر على الطرف الآخر. أضاف العالم جيمس كلارك ماكسويل (James Clerck Maxwell) في القرن التاسع عشر أن الضوء المرئي ما هو إلا جزء ضئيل جداً من طيف عظيم متصل من الإشعاع ، وهو الطيف الكهرومغناطيسي الشكل رقم (١,١). يحتل الضوء المرئي جزء صغير من الطيف الكهرومغناطيسي وهو ما يقارب ٤×١٠$^{-٧}$ متر (البنفسجي ، وقبلها منطقة فوق البنفسجي) إلى ٧×١٠$^{-٧}$ متر ، (الأحمر ، ويليها منطقة الأحمر البعيد).



الشكل رقم (١,١) . جزء من طيف الإشعاعات الكهرومغناطيسية ، والتركيز على الطيف المرئي .

المصدر (بتصرف) : www.daviddarling.info/images/visible_light.gif

تتميز هذه الإشعاعات بخصائص ومنها أن جميع الإشعاعات التي يضمها هذا الطيف تنتقل في موجات حتى في الفراغ (حيث يصل الضوء إلى الكرة الأرضية من الشمس خلال الفراغ) ، لكن غيرها من الموجات يحتاج إلى وسط مادي ، سائل مثل الماء (الموجات البحرية) أو صلب (الموجات الصوتية). توصف الموجة بالطول الموجي ورمزه (λ) والتردد ورمزه (υ) . تختلف أطوال الموجات- أي المسافات بين قمة وأخرى- في الأشعة السينية(X - rays) والتي تقاس بالنانومترات (nanometers) عنها في موجات الراديو منخفضة التردد والتي تقاس بالكيلومترات (Kilometers). وخاصية أخرى هي أن كل موجة كهرومغناطيسية تحوى طاقة يحددها الطول الموجي (λ) وكلما قصر طول الموجة كبر محتواها الطاقي. فالضوء الأحمر داخل طيف الضوء المرئي، هو أطول الموجات وأقلها محتوى طاقي بينما الضوء البنفسجي هو أقصرها وأكبرها محتوى طاقي ، انظر الجدول رقم (١,١) . تشترك هذه الإشعاعات في خاصية أخرى وهي أنها جميعها تنتقل في الفراغ بسرعة واحدة وتساوي ٢٩٩٨٠٠ كيلو متر في الثانية.

في بداية القرن العشرين الميلادى، كان هناك نظريتين لتفسير طبيعة الضوء : النظرية الجسيمية (يؤيدها العالم نيوتن) وهي أن الضوء عبارة عن جسيمات تصدر من المصدر الضوئي وتستحث حاسية النظر من خلال دخولها إلى العين، وفي الوقت ذاته تقريبا قال العالم هجنز Huygens بأن الضوء نوع من أنواع الأمواج (النظرية الموجية) . وقبل نهاية القرن التاسع عشر أظهرت التجارب أنه عندما عُرِضَتْ صفيحة من الزنك للضوء فوق البنفسجي فأنها اكتسبت شحنة موجبة. أصبح المعدن، كما استنتج من ذلك، مشحوناً بشحنة موجبة . أي أن الطاقة الضوئية تطرد الإلكترونات، مخرجة إياها بالقوة من ذرات المعدن. يُعْرَف هذا التأثير بالتأثير الكهروضوئي ويمكن تكوينه في جميع المعادن. لكل معدن طول موجي حدي لهذا التأثير؛ فالضوء (مرئي أو غير مرئي) يجب أن يكون بطول الموجة المعينة أو أقصر (أي يجب أن يكون ذا طاقة أكبر) لكي يحدث التأثير.

في بعض المعادن مثل الصوديوم والبوتاسيوم والسلينيوم، يكون الطول الموجي الحدي في حدود طيف الضوء المرئي، ونتيجة لذلك، فالضوء المرئي الساقط على المعدن يستطيع أن يحدث سيلا متحركا من الإلكترونات (تيار كهربائي). لقد أستغلت هذه الظاهرة في آلات التصوير التلفزيونية والعيون الكهربائية وغيرها حيث تعمل على هذه القاعدة من تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية.

وباستمرار البحوث تبين أن طرد الإلكترونات من معدن معين من عدمه، يعتمد على طول موجة الضوء وليس على شدته. يكون الشعاع الضعيف ذو الطول الموجي الحدي فعالا بينما الشعاع القوي (أكثر سطوعاً) ذو طول الموجة الأطول غير فعال حتى إنه في حالة استخدام شعاع خافت ذي طول موجي حدي قد ينبعث الإلكترون حال سقوط الضوء على المعدن. تبين أيضا أن زيادة شدة الإضاءة تزيد من

عدد الإلكترونات المطرودة لكنها لا تزيد السرعة التي تطرد بها من المعدن، وعند استخدام موجات أقصر من الإضاءة يمكن زيادة السرعة التي تطرد بها الإلكترونات من المعدن .

تم تفسير الظاهرة الكهروضوئية باقتراح العالم ألبرت أينشتاين (Albert Einstein) عام ١٩٠٥م "نموذج الطاقة الموجية الضوئية" وهو مبني على مفهوم ماكس بلانك Max Planck الذي افترضه سنة ١٩٠٠ م والذي يقول بأن الذرات يمكن أن تمتص أو تطلق الطاقة لكن فقط بهيئة كم (quanta)، حيث اكتشف أينشتاين أن هذه الطاقة الكمية ليست خاصية للذرة بل للطاقة نفسها. وحسب نموذج الطاقة الموجية الضوئية تكون متجمعة كوحدة يطلق عليها الفوتونات (photons) أو الكم (quanta) من الضوء. طاقة الفوتون (أو الكم من الضوء) ليست متساوية لكل أنواع الضوء لكن تتناسب مع طول الموجة ، وقد أوجد أينشتاين العلاقة بين الطاقة الضوئية للفوتون وتردد الموجة أو طولها كالتالي :

$$\text{الطاقة الضوئية } (E) = h \times \upsilon$$

$$\text{الطاقة الضوئية } (E) = (h \times c)/\lambda$$

حيث E طاقة ضوء الفوتون بالإرج erg .

h ثابت بلانك Plank's constant، نسبة للعالم بلانك، ويساوي ٦,٦٢ × ١٠^-٢٧ ارج/ ثانية

c سرعة الضوء وتساوي ٣ X ١٠^١٠ سم/ ثانية .

λ طول موجة الضوء بالسنتمتر.

υ التردد في الثانية.

ويتضح من هذه المعادلة أن طاقة الفوتون تتناسب عكسيا مع طول موجة الضوء لأن سرعة الضوء ثابتة . يطلق مصطلح أينشتاين Einstein على كمية الطاقة الموجودة في عدد أفوجادرو من الفوتونات (الكم quanta). ويوضح الجدول رقم (١,١) طاقة الأشعة المختلفة التي يتكون منها الضوء المرئي.

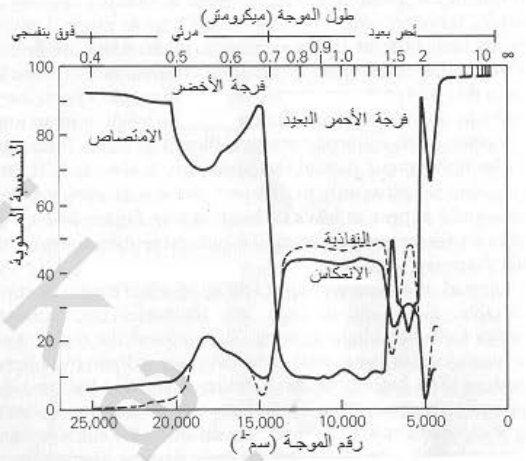
الجدول رقم (١,١). المحتوى الطاقي لبعض الإشعاعات في الطيف المرئي.

اللون color	الطول الموجي λ	التردد υ (10^{14} Hz)	الطاقة (10^{-19} J)
بنفسجي violet	٤٠٠←٤٦٠	٧,٥←٦,٥	٥,٠←٤,٣
نيلي indigo	٤٦٠←٤٧٥	٦,٥←٦,٣	٤,٣←٤,٢
أزرق blue	٤٧٥←٤٩٠	٦,٣←٦,١	٤,٢←٤,١
أخضر green	٤٩٠←٥٦٥	٦,١←٥,٣	٤,١←٣,٥
أصفر yellow	٥٦٥←٥٧٥	٥,٣←٥,٢	٣,٥←٣,٤٥
برتقالي orange	٥٧٥←٦٠٠	٥,٢←٥,٠	٣,٤٥←٣,٣
أحمر red	٦٠٠←٨٠٠	٥,٠←٣,٧	٣,٣←٢,٥

يتفق هذا التفسير للظاهرة الكهروضوئية بواسطة نموذج أينشتاين مع الآراء السابقة لنيوتن (جسيمات أو دقائق) وهجنز (موجات) ويفسر الظاهرة الكهروضوئية مستوفياً وصف المظاهر الخاصة لسلوك الضوء رياضياً . أي أن الضوء يمكن تفسيره على أنه ينتقل على هيئة موجات أو على هيئة دقائق (فوتونات) . لا يعتبر في الوقت الراهن أن هذين النموذجين يعارض أحدهما الآخر بل إنهما مكملان بمعنى أن كلا منهما مطلوب للوصف الكلي للظاهرة التي نعرفها بالضوء .

عند سقوط الضوء على النبات تكون احتملات مصيره ثلاثة : فالورقة مثلا تعكس بعض الطاقة وينفذ بعضها والباقي تمتصه . يعتمد امتصاص الورقة للطاقة على طول موجة الضوء الساقط ، فمعظم الضوء الأزرق والأحمر وجزء من الأخضر يمتص لكن معظم الضوء الأخضر ينعكس وكذلك معظم الضوء في منطقة الأحمر

القريب، بينما يمتص الضوء في منطقة الأحمر البعيد، والشكل رقم (١,٢) يوضح النفاذية والانعكاسية والامتصاصية للضوء بواسطة ورقة نبات *Mimulus cardinalis* . (Salisbury and Ross, 1978)



الشكل رقم (١,٢) . طيف الامتصاص والنفاذية والانعكاس لورقة نبات *Mimulus cardinalis*.

المصدر (بتصرف) : (Salisbury and Ross, 1978) .

وبالمثل، عند امتصاص طاقة الإشعاع في مدى الضوء المرئي بواسطة الجزيئات العضوية في النبات (الصبغات، على سبيل المثال) فإنه يجعلها تزيد من حركتها (زيادة الحرارة) ولكنها لا تستحث تغيرات في تركيبها. تلك الإشعاعات داخل مدى الضوء المرئي هي القادرة، فقط، على تهييج (إثارة) الجزيئات - أي رفع الإلكترونات إلى مستوى طاقي أعلى- وبذا، تحدث تغيرات كيميائية، وفي النهاية، تغيرات أحيائية. إذا امتصت الصبغة النباتية الطاقة والتي يحددها التركيب الكيميائي للصبغة فهناك ثلاثة احتمالات: إما أن تشع من الجزئ على هيئة حرارة وإما على هيئة إشعاع ضوئي يسمى لصف fluorescence طول موجته أكبر من طول موجة الإشعاع الممتص وبذلك تكون طاقة الفوتونات أقل كما هو الحال لمعظم الطاقة الممتصة بواسطة صبغات أشباه

الفلافون والبيتالينات ؛ والاحتمال الثالث أن تدخل في تفاعلات ضوئية كما هو الحال بالنسبة للكلوروفيل والفايتوكروم (على سبيل المثال) انظر الصفحة :

<http://science.jrank.org/pages/5301/Plant-Pigment-Absorption-radiation.html>.

أهمية الضوء للنباتات

تظهر أهمية الضوء للنباتات من تأثيراته المختلفة في النمو والتكشف الطبيعي وهو مجال التشكل الضوئي photomorphogenesis ، (Schafer and Nagy, 2006) ولعل أبرز ما درس من هذه التأثيرات باختصار هو :

- الضوء عامل رئيسي في عملية البناء الضوئي حيث هو المدخل الرئيسي للطاقة إلى العالم الأحيائي وتساهم صبغات البناء الضوئي في اقتناصه .
- كسر كمون البذور في بعض الأنواع النباتية وهو دور تتوسط فيه الفايتوكرومات من صبغات التشكل الضوئي .
- إزالة الشحوب للبادرات وتساهم في ذلك صبغات التشكل النباتية .
- النمو الموجه أو الانتحاء الضوئي الموجب والسالب وتساهم فيه صبغات التشكل النباتية .
- توقيت الإزهار بقياس طول اليوم بالساعة الأحيائية وتساهم فيه صبغات التشكل النباتية .

المستقبلات الضوئية

تتمثل المستقبلات الضوئية في النباتات في أربع طوائف رئيسية ، طائفة مسئولة عن إتمام عملية البناء الضوئي والبادئ الرئيسي هو صبغة البروتوكلورفيليد أ (Protochlorphyllyde a) وهي صبغات تمتص الضوء الأحمر والأزرق وتُختزل إلى

كلوروفيل أ ، بالإضافة إلى الصبغات المساعدة في عملية البناء الضوئي . أما الطوائف الثلاث الأخرى فهي تؤدي وظائف مميزة للإحساس بالإضاءة و/أو استحثاث عملية فسيولوجية في النبات وهي الفايتوكرومات phytochromes والفوتوتروبينات phototropins والكريبتوكرومات cryptochromes. فالكريبتوكرومات والفوتوتروبينات مسئولة عن رصد واستقبال الأطوال الموجية في منطقة الأزرق/الأشعة فوق البنفسجية أ من الطيف الضوئي بينما الفايتوكرومات ترصد الإضاءة في الأطوال الموجية في منطقة الأحمر والأحمر البعيد (Cashmore et al., 1999; Briggs and Huala, 1999 ; Smith, 2000). إجمالاً لذلك فإن هذه المستقبلات تغطي مدى واسع من طيف الامتصاص للضوء الساقط على النبات ولذا فإن مجموع نشاطات هذه المستقبلات تمكن النبات من استشعار الإضاءة في بيئته والاستجابة لها (Quail, 2002a) .

وتكتشف الدراسات المطردة وجود مستقبلات جديدة في المجاميع النباتية والكائنات الأخرى خاصة الطحالب حيث تساهم بوظيفة معينة ومنها على سبيل المثال لا الحصر فايتوكروم ٣ phy3 في السرخس *Adiantum capillus-veneri* يجمع خواص الفايتوكروم وما يشبه الفوتوتروبين لزياد الحساسية للإضاءة (Kanegae, et al., 2006) .

تحاشي الظل

تعتمد النباتات ككائنات ذاتية التغذية الضوئية photoautotrophs على مدى تعرضها للإضاءة لاستمرار حياتها ، فالتنافس على الإضاءة ظاهرة مشاهدة في المجتمعات النباتية . ولكون النباتات كائنات ثابتة في موقعها الذي نبتت فيه في البيئة فهي متأقلمة لما حولها خاصة النباتات الأخرى . بالتعرف على تغيرات الإضاءة نوعاً وكماً واتجاها بما في ذلك دورات الإضاءة والظلام اليومية والإضاءة المنعكسة من النباتات

المجاورة والتظليل ، تتمكن النباتات من تحديد أنسب الأوقات للإنبات وما يتبعه من نمو وتكشف والتحول من الطور الخضري إلى طور التكاثر . من المعايير المفيدة والتي تصف بيئة الإضاءة الطبيعية تحديد النسبة بين فوتونات الإشعاع بالضوء الأحمر إلى فوتونات الإشعاع بالضوء الأحمر البعيد (Franklin, and Whitelam., 2005) كالتالي :

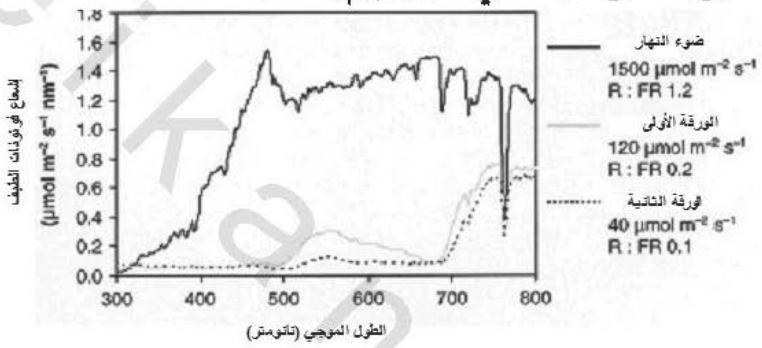
$$\text{نسبة الأحمر : الأحمر البعيد} = \frac{\text{اشعاع الفوتونات ما بين ٦٥٥ و ٦٦٥ نانومتر}}{\text{اشعاع الفوتونات ما بين ٧٢٥ و ٧٣٥ نانومتر}}$$

أي :

$$\text{R : FR ratio} = \frac{\text{photon irradiance between 655 and 665 nm}}{\text{photon irradiance between 725 and 735 nm}}$$

عند ما تنمو النباتات تحت ضوء الشمس تكون نسبة شكلي الفايتوكروم [(P_r): (P_{fr})] كما سيرد متقاربة (أى 1FR:1R) وبالتظليل كما في الغابات تتغير النسبة (قد تصل 1FR:5R) مما ينجم عنه ظاهرة تحاشي الظل (shade avoidance). ولإيضاح ذلك ، فالنباتات المكونة للظل تستغل الإضاءة في منطقة الأحمر بواسطة الكلوروفيل وبالتالي يصل إلى النباتات في أرضية الغابة نسبة كبيرة من الضوء في منطقة الأحمر البعيد مما ينجم عنه زيادة نسبة الشكل غير الفعال (P_r) . لهذا يقل تثبيط إستطالة الساق وأعناق الأوراق مما يتيح الفرصة للوصول إلى ظلة الغابة . يضاف إلى ذلك أعراض أخرى لهذه الظاهرة مثل رقة الأوراق وقلة المحتوى الكلوروفيلي وزيادة في السيادة القمية مما ينتج عنه قلة في التفرع في ذوات الفلقتين وتكوين الأفرخ في ذوات الفلقة الواحدة إلى غير ذلك من المشاهدات (Casal et al., 1986) . يعد هذا النمط من النمو (تثبيط تكون الأفرع الجانبية واستحثاث استطالة السيقان) وسيلة تنافسية على الإضاءة (Franklin and Whitelam, 2005) . ولإيضاح مدى التغيرات الكبيرة في شدة الإضاءة بعد التظليل

كما ستنتج من نسبة الأحمر: الأحمر البعيد (R:FR) وكمية الإشعاعات النشطة في البناء الضوئي photosynthetically active radiation (PAR) يوضح الشكل رقم (١,٣) تدفق الفوتونات بعد مرور الضوء العادي خلال ورقة وورقتين من نبات العشبة الواعدة (Franklin, 2008). تشير بعض الدراسات إلى أن أعراض ظاهرة تحاشي التظليل تستحث بانخفاض الإضاءة الضوئية الزرقاء والمعاملة بالهرمون النباتي الإيثيلين بالإضافة إلى انخفاض نسبة شكلي الفايتوكروم (Pierik *et al.*, 2003) .



الشكل رقم (١,٣). قياس توزيع إشعاع فوتونات الطيف في ضوء النهار (ظهرا في شهر أكتوبر في مدينة لايسيستر ببريطانيا) وتصفية أوراق نبات العشبة الواعدة *Arabidopsis* .

المصدر : (Franklin, 2008) .

عند مقارنة محتوى أوراق النباتات المعرضة لإضاءة الشمس بمحتوى أوراق النباتات النامية في الظل لوحظ أن نباتات الشمس تحوي كمية كبيرة نسبيا من مكونات دورة الزانثوفيلات وكذلك بيتا-كاروتين β-carotene. من هنا فإن الإضاءة العالية تستحث بناء بيتا-كاروتين β-carotene. من ناحية أخرى فأوراق نباتات الشمس لا تحوي ألفا-كاروتين α-carotene -باستثناء بعض الأنواع التي حوت كميات قليلة- والذي وجدت كميته عالية في أوراق نباتات الظل (Demmig-Adams and Adams, 1992) .

من هنا تعد ظاهرة تحاشي الظل استجابة تأقلمية رئيسية تتحكم فيها الفايتوكرومات عبر استقبال نسبة الضوء الأحمر إلى الأحمر البعيد ، لكن يرى بعض العلماء أنه لا يجب إغفال المساهمة النسبيه من "الاشعاعات النشطة في البناء الضوئي" photosynthetically active radiation (PAR) خاصة تغير هذه النسبة مع ثبات الضوء الأزرق (Christophe *et al*., 2006). إن هذا الرأي مبني على نتائج دراسة موسعة حيث فصل بين تأثير الضوء الأزرق في مظهر الورقة واستطالة العنق في نبات *Trifolium repens* (L.) وبين تأثير الاشعاعات النشطة في البناء الضوئي (PAR) حيث يشترك الإثنان في المساهمة في التأثير لكي تظهر هذه الاستجابة . من الاستنتاج النهائي لهذه الدراسة هو الأخذ في الحسبان هذا الاشتراك في المساهمة مع نسبة الضوء الأحمر إلى الضوء الأحمر البعيد (R:FR) .

obeikandl.com