

Transferts quantiques d'énergie entre systèmes macroscopiques

Sommaire

-I- Historique. <i>(Voir Document)</i> -----	2
-II- Transferts quantiques d'énergie.-----	2
1. Absorption quantique.-----	2
2. Émission spontanée.-----	2
3. Émission stimulée.-----	2
-III- Application: le laser.-----	3
1. Propriétés du laser.-----	3
2. Emission stimulée et amplification d'une onde lumineuse.-----	4
3. Principe du laser.-----	4
4. Résumé.-----	5
-IV- Transitions d'énergie et domaine spectrale.-----	6
1. Transitions d'énergie électroniques.-----	6
2. Transitions d'énergie vibratoires-----	6
3. Domaine spectral.-----	6

Notions et contenus :

- Émission et absorption quantiques.
- Émission stimulée et amplification d'une onde lumineuse.
- Oscillateur optique : principe du laser.
- Transitions d'énergie : électroniques, vibratoires.

Compétences attendues :

- Connaître le principe de l'émission stimulée et les principales propriétés du laser (directivité, monochromaticité, concentration spatiale et temporelle de l'énergie).
- Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information.
- Associer un domaine spectral à la nature de la transition mise en jeu.

Transferts quantique d'énergie

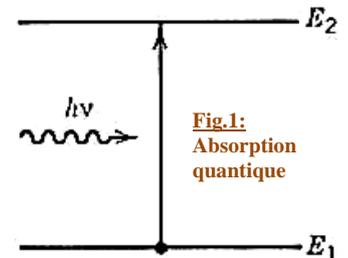
Il est impossibilité d'utiliser la mécanique classique pour l'explication : du rayonnement du corps noir, de l'effet photoélectrique et des spectres atomiques, du rayonnement lors de désintégration radioactives. C'est donc dans ce cadre interactions matière/lumière que la physique quantique s'est développée au début du XX^{ème}. La théorie quantique s'applique à l'infiniment petit. C'est une modélisation qui rend compte des phénomènes de l'infiniment petit.

-I- Historique. (Voir Document)

-II- Transferts quantiques d'énergie.

1. Absorption quantique.

Pour être dans l'état excité d'énergie E_2 , une particule (atome, molécule ou ion) dans un état d'énergie E_1 doit absorber une quantité d'énergie exactement égale à: $E_2 - E_1$. (Fig.1)



Une particule placée dans un état d'énergie donné doit absorber une quantité d'énergie spécifique pour être dans un état excité. L'absorption d'énergie par la matière est quantifiée.

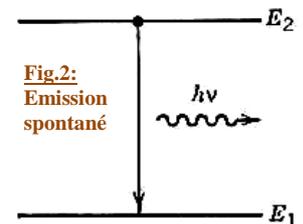
Pour faire passer la matière de son état fondamental à un état excité, plusieurs possibilités existent:

- **l'absorption d'un photon** d'énergie (donc de fréquence) spécifique.
- **le passage d'un courant électrique**: un gaz placé dans une ampoule est excité par la collision avec les électrons provenant d'un courant électrique.
- **la collision avec d'autres particules**: c'est le principe utilisé dans le laser hélium néon, où le gaz de néon est excité par la collision avec des atomes d'hélium.

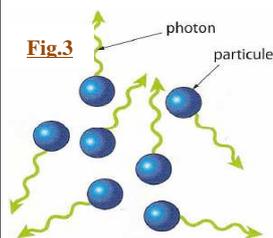
2. Émission spontanée.

Dans les lampes habituelles, la matière est excitée par un courant électrique. Les particules ne sont plus dans leur **état fondamental** mais dans un **état excité**.

Une particule se trouvant dans un état excité peut retrouver sa stabilité en émettant de façon spontanée un photon. Ce transfert d'énergie est appelé l'émission spontanée.



L'énergie du photon correspond à la différence d'énergie entre les deux niveaux d'énergie. Sur la *fig.2*, l'énergie du photon émis est $E = E_2 - E_1$ et sa fréquence d'émission ν est telle que $E = h \times \nu$, où h est la constante de Planck.



L'émission spontanée est quantifiée.

Les lampes usuelles éclairent dans toutes les directions.

Dans le processus d'émission spontanée, le photon produit est émis dans une direction aléatoire. (Fig.3)

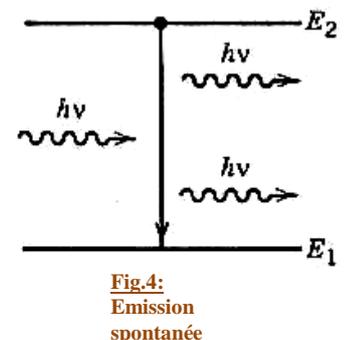
3. Émission stimulée.

En 1917, Albert Einstein évoque l'idée qu'un photon d'énergie choisie peut amener une particule vers un état d'énergie plus stable. Dans ce cas, la particule va produire un photon «jumeau» du photon incident.

Lorsqu'un photon d'énergie $E_2 - E_1$ (Fig.4) rencontre une particule dans un état excité E_2 , cette particule peut retrouver un état d'énergie plus stable E_1 en émettant un photon de même énergie $E_2 - E_1$. Ce mode d'émission est appelé l'émission stimulée.

Ces photons peuvent à leur tour stimuler d'autres émissions.

Contrairement au processus d'émission spontanée, qui émet des photons dans des directions aléatoires, l'émission stimulée produit des photons qui ont la **même direction** que les photons incidents.



-III- Application: le laser.

Le terme «laser» est à l'origine un acronyme, créé à partir des initiales des mots anglais *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement).

Contrairement aux autres sources de lumière qui utilisent l'émission spontanée, la lumière du laser est produite par émission stimulée.

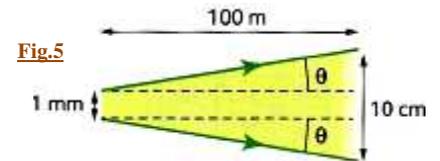
Réaliser un laser consiste donc à favoriser l'émission stimulée au détriment de l'émission spontanée. Comment cela est-il possible?

1. Propriétés du laser.

Les sources de lumière classiques émettent de la lumière dans toutes les directions. Elles donnent un spectre continu (lampes à incandescence) ou de raies (lampes spectrales) et la lumière émise contient des radiations de plusieurs longueurs d'onde.

Le laser possède des caractéristiques qui le distinguent des autres sources de lumière.

- **Contrairement aux sources de lumière classiques, la lumière laser se propage dans une direction privilégiée: elle est directive.** (Fig.5)



- **La lumière laser a une longueur d'onde clairement identifiée: elle est monochromatique.** La cavité résonante, de longueur L, du laser n'amplifie par interférence constructives que les longueurs d'onde λ telle que: $2.L = k.\lambda$ (avec L et λ en mètre ; k un nombre entier)

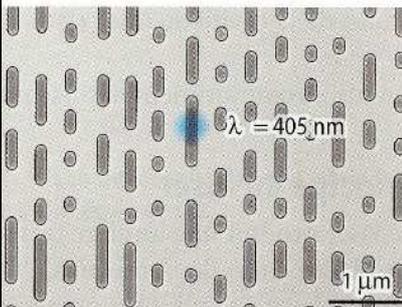
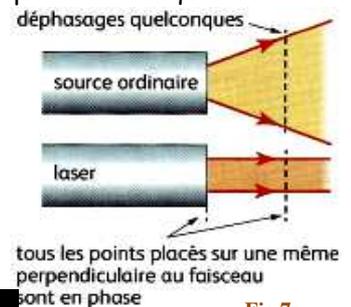


Fig.6: Les lecteurs Blu-ray utilisent une lumière laser monochromatique de longueur d'onde 405 nm.

Exemple:

Les propriétés de directivité et de monochromaticité du laser sont utilisées dans les lecteurs CD, DVD ou Blu-ray (Fig. 6). La faible longueur d'onde (405 nm pour le Blu-ray) et la directivité du laser permettent d'éclairer des zones de l'ordre de grandeur des inscriptions du disque.

- **Dans un laser, la lumière est produite par émission stimulée. Deux atomes voisins se comportent comme des sources cohérentes, propriété qui confère à la lumière laser sa grande cohérence.** (Fig.7)



ONDE LASER	ONDE ORDINAIRE
<p>Directivité : Se propage dans une seule direction,</p>	<p>Se propage dans Toutes les directions</p>
<p>Monochromatique : Tous les photons émis ont la même énergie, donc la même Longueur d'onde (une seule raie sur le spectre)</p>	<p>Les lumières émises par des lampes par ex ont plusieurs raies sur leur spectre d'émission.</p>
<p>Cohérence spatiale et temporelle: Les ondes émises sont en phase. Phénomène d'interférence évité</p>	<p>Les ondes ne vibrent pas en temps et de la même manière.</p>

Le laser présente aussi des propriétés de **concentration** spatio-temporelle.

- La **concentration spatiale de l'énergie** est une conséquence directe de sa directivité : l'ensemble de l'énergie produite est dirigé selon une direction, contrairement aux sources classiques.
- Le laser peut fournir son énergie de façon continue ou de façon pulsée. Dans ce dernier cas, plus l'impulsion est brève, plus le laser délivre une puissance instantanée importante: c'est la **concentration temporelle de l'énergie**.

Exemple:

En chirurgie, les lasers utilisés présentent une forte concentration spatiale, qui permet des découpes de tissus très localisées, et sont pulsés: les impulsions très brèves évitent les échauffements et la destruction des cellules voisines.

2. Emission stimulée et amplification d'une onde lumineuse.

Dans le laser comme dans les autres sources de lumière, c'est la présence d'atomes, de molécules ou d'ions qui est à l'origine d'émission de lumière.

Le laser émet des photons produits par émission stimulée.

L'émission stimulée permet, à partir d'un photon d'énergie adaptée, de faire apparaître un autre photon identique.

L'émission stimulée a pour effet d'amplifier l'onde lumineuse incidente.

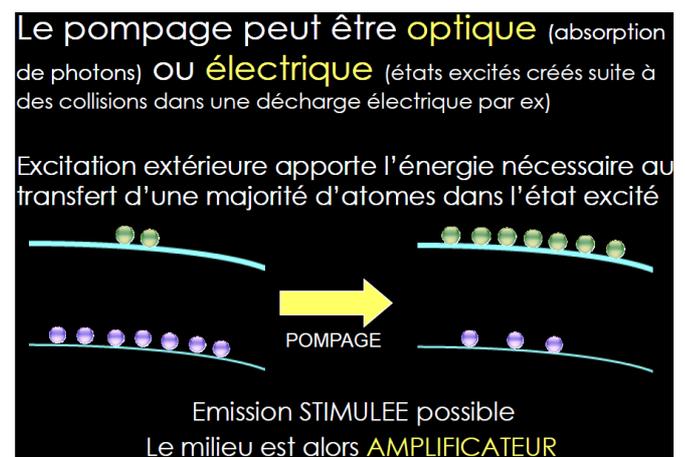
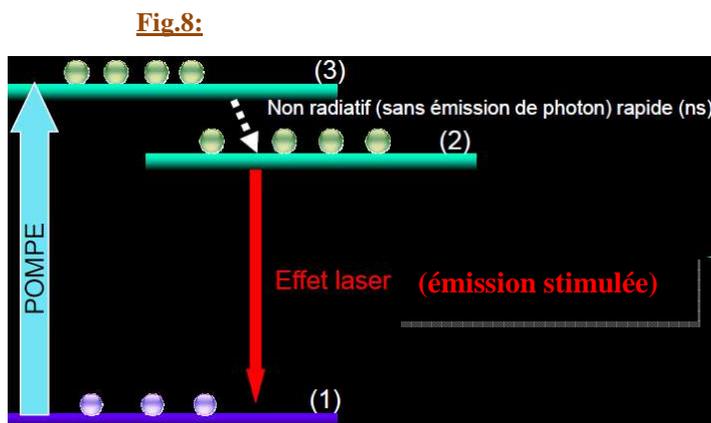
Le laser est constitué d'une cavité dans laquelle se trouvent des particules. Lorsque ces particules sont éclairées par des photons d'énergie adaptée, l'émission stimulée va amplifier le nombre de photons. Or, ces particules se trouvent naturellement dans l'état de plus basse énergie, qui est l'état fondamental: l'**absorption** des photons va donc naturellement l'emporter sur l'émission stimulée.

Pour qu'il y ait amplification de l'onde lumineuse, il faut qu'il y ait plus de particules dans un état d'énergie excité que dans l'état fondamental.

Pour amplifier l'onde lumineuse, il faut donc placer une majorité des particules de la cavité dans un état excité: c'est l'**inversion de population**.

L'opération de pompage optique consiste à placer une majorité des particules de la cavité du laser dans un état excité.

On utilise couramment des flashes de lumière pour l'inversion de population.



3. Principe du laser.

Le laser produit une lumière très directive. Pour obtenir ce faisceau, la cavité est placée entre deux **miroirs**, l'un parfaitement réfléchissant, l'autre semi-réfléchissant. Les photons qui ne se déplacent pas dans une direction perpendiculaire aux miroirs disparaissent ou sont absorbés par les parois.

Seuls les photons qui se déplacent dans la direction perpendiculaire aux miroirs peuvent sortir de la cavité laser: les miroirs ont ainsi pour effet de sélectionner la direction des photons.

Le miroir semi-réfléchissant réfléchit 99 % des photons dans la cavité laser (Fig. 9), qui joue ainsi le rôle de milieu amplificateur.

La multiplication des passages permet d'augmenter le nombre de photons identiques produits par émission stimulée (Fig. 10). Les pertes (photons disparus ou absorbés par les parois) sont compensées par des flashes qui maintiennent l'inversion de population.

Ce type de cavité est appelé **oscillateur optique entretenu**.

Fig.9: Cavité laser: espace présent entre le miroir réfléchissant et semi-réfléchissant.

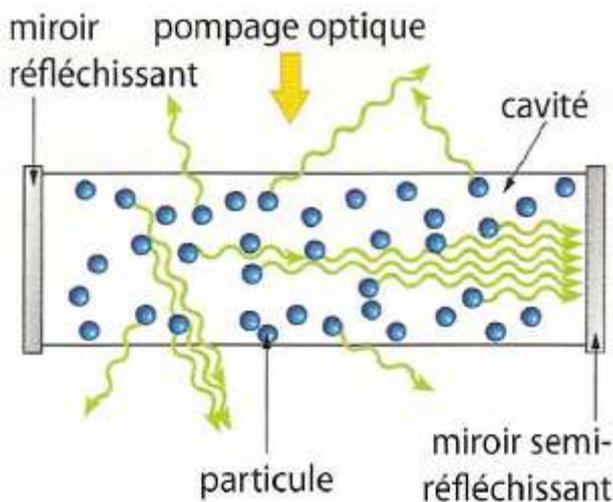
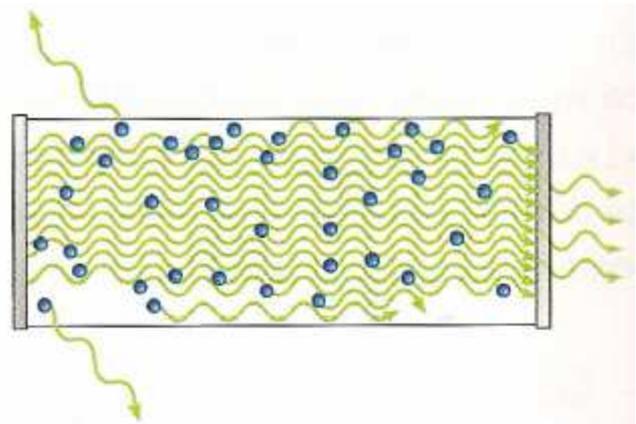


Fig.10: Après multiplication des passages dans la cavité



4. Résumé.

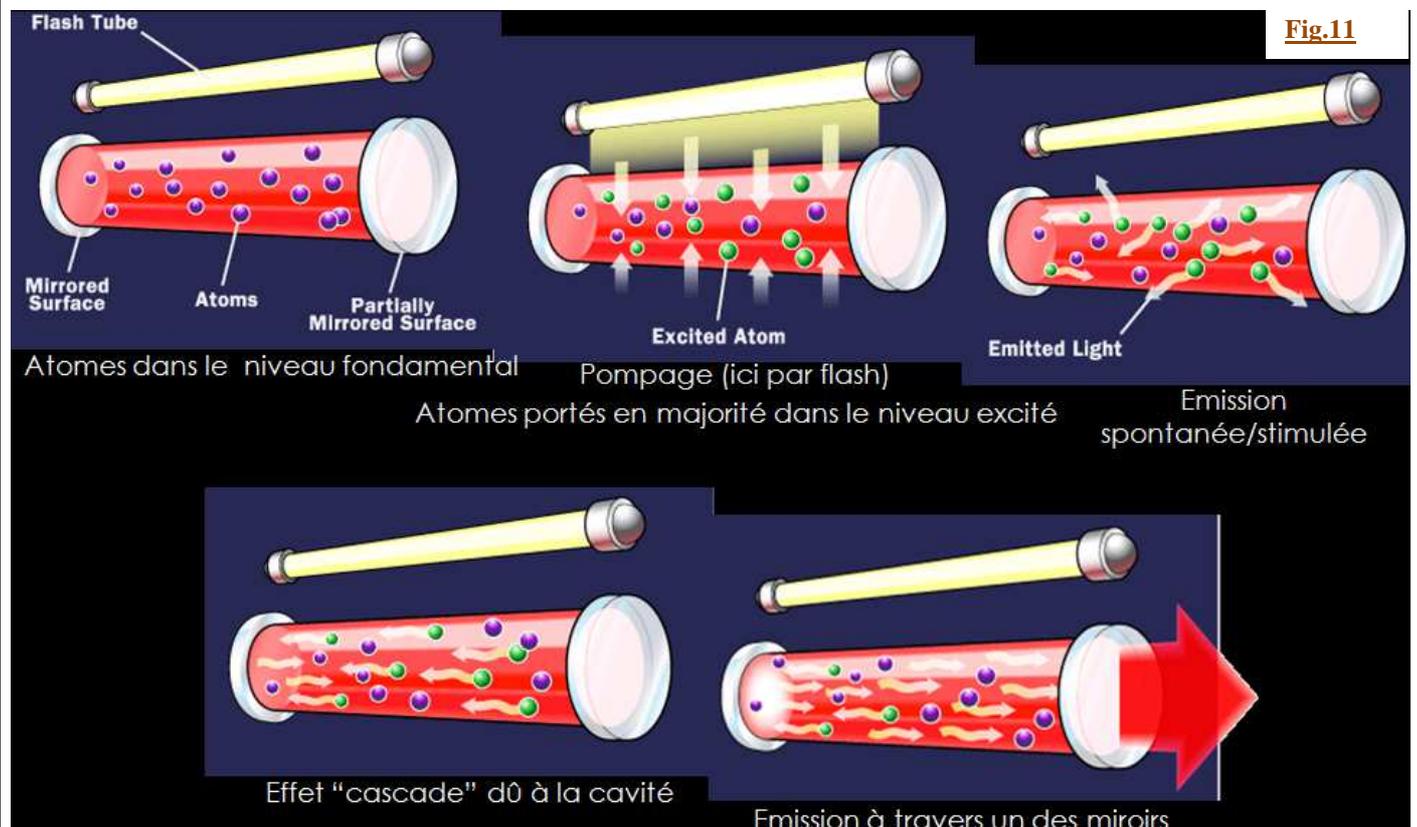


Fig.11

-IV- Transitions d'énergie et domaine spectrale.

1. Transitions d'énergie électroniques.

Dans les atomes, les niveaux d'énergie correspondent aux états électroniques.

Un atome gagne ou cède de l'énergie en faisant transiter un électron d'un niveau vers un autre niveau d'énergie: c'est une transition d'énergie électronique.

Pour atteindre les électrons de l'atome, il faut fournir des photons d'énergie suffisante, soit de l'ordre de l'électronvolt. Ces énergies correspondent à des photons du visible ou de l'ultraviolet (UV).

Lors d'une transition d'énergie électronique, les atomes émettent ou absorbent des photons dans le domaine visible ou UV.

Exemple: Les lasers He-Ne utilisent comme milieu amplificateur des atomes d'hélium et de néon. Ils produisent une lumière dans le domaine visible (632 nm).

2. Transitions d'énergie vibratoires

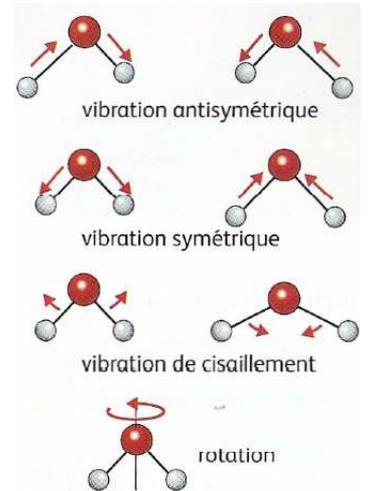
La matière est capable d'absorber et de produire des rayonnements dans d'autres domaines spectraux. Les lasers à CO₂, par exemple, émettent dans l'**infrarouge**.

Les molécules ont la possibilité d'emmagasiner de l'énergie sous forme **vibratoire**. On peut considérer les atomes des molécules comme liés par des petits ressorts qui vibrent sous l'excitation de l'onde. Aux configurations vibratoires de la molécule, on associe des niveaux d'énergie vibratoires (**Fig. 12**).

Lors d'une transition d'énergie vibratoire, la molécule passe d'une configuration vibratoire à une autre. Ces transitions d'énergie sont moins énergétiques que les transitions électroniques.

Lors d'une transition d'énergie vibratoire, il y a émission ou absorption dans l'infrarouge.

Fig.12: Les trois configurations vibratoires de la molécule de CO₂.



3. Domaine spectral.

Fig.13: Domaines spectraux associés à la nature des transitions.

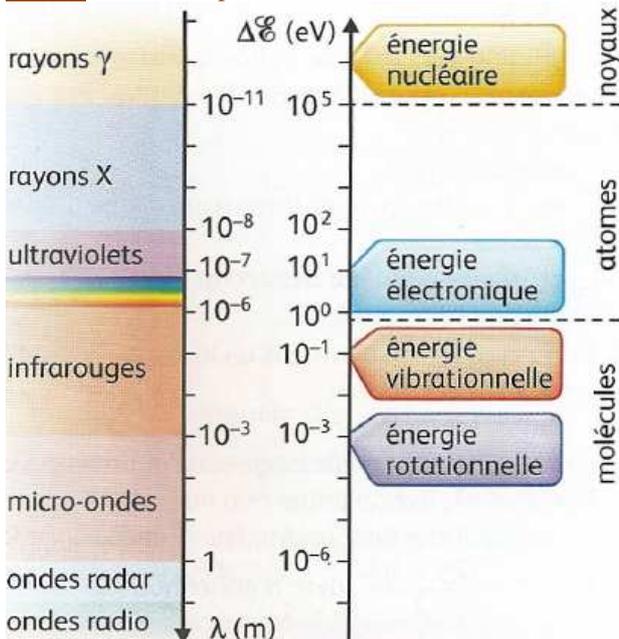
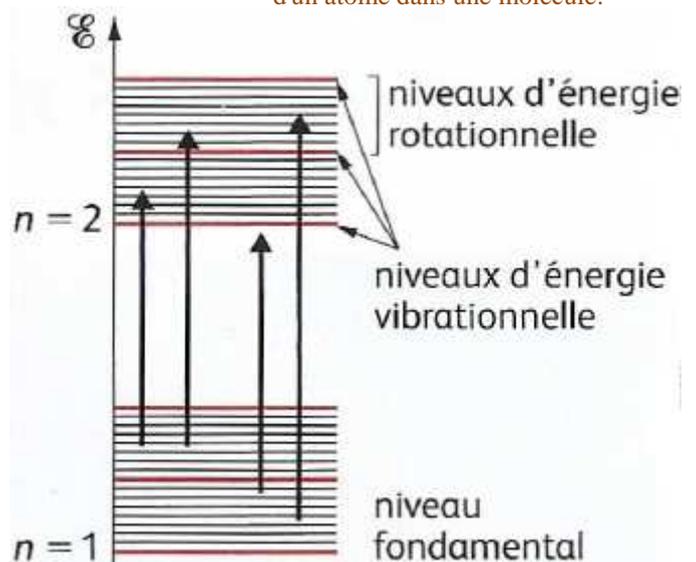


Fig.14: Schéma énergétique d'un atome dans une molécule.



Remarque: Chaque niveau d'énergie électronique est associé à un très grand nombre de valeurs pour les énergies vibrationnelles et rotationnelles, induisant ainsi une multitude de transitions possibles (**fig.14**). Cependant, les raies d'absorption ont des fréquences trop voisines pour pouvoir être discernées.