



LA COHERENCE DE LA LUMIERE ET LES INTERFERENCES LUMINEUSES : RAISONNEMENTS DES ETUDIANTS ET DIFFICULTES D'ORDRE HISTORIQUE

Intissar Romdhane

► **To cite this version:**

Intissar Romdhane. LA COHERENCE DE LA LUMIERE ET LES INTERFERENCES LUMINEUSES : RAISONNEMENTS DES ETUDIANTS ET DIFFICULTES D'ORDRE HISTORIQUE. Éducation. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2007. Français. <tel-00483266>

HAL Id: tel-00483266

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00483266>

Submitted on 13 May 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris 7-Denis Diderot
Institut Supérieur de l'Éducation et de la Formation Continue de Tunis

THESE EN CO-TUTELLE

Présentée pour obtenir le grade de Docteur

**Spécialité : Didactique des Disciplines
Option : Didactique des Sciences Physiques**

Par Intissar ROMDHANE

LA COHERENCE DE LA LUMIERE ET LES INTERFERENCES LUMINEUSES : RAISONNEMENTS DES ETUDIANTS ET DIFFICULTES D'ORDRE HISTORIQUE

Soutenue le 19 février 2007 devant la commission d'examen constituée de :

| | |
|------------------------------|--------------------------------|
| M. Jean Jacques DUPIN | Président et Rapporteur |
| M. Mustapha FNAIECH | Rapporteur |
| M. Serge BERTHIER | Examineur |
| M. Mohamed BEN SALEM | Examineur |
| Mme Laurence MAURINES | Directeur de thèse |
| M. Ahmed CHABCHOUB | Co-directeur de thèse |

Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques (L.D.S.P.)
Laboratoire de l'Éducation, de Didactique et de Psychologie (E.DI.PS.)

Dédicaces

*A la mémoire de ma sœur Ebtissem et ma grand-mère Latifa
A mes parents Mohamed Naceur et Chadlia
A mes frères Anouar et Fehri
A ma tante Najiba et son mari Fehri
A mes cousins Ayoub, Ghada et Rihab
A mon petit ange Rayen
A mon mari Mohamed Ali
A mes amis
A tous ceux que j'aime...*

Remerciements

Je suis profondément reconnaissante à l'égard de Madame Laurence Maurines d'avoir accepté de diriger ce travail de thèse. Je la remercie pour le vif intérêt qu'elle a porté à mon travail et pour ses encouragements continus durant les mois difficiles de rédaction.

Je voudrais exprimer mes respects les plus profonds à Monsieur Noureddine Sassi qui a dirigé mes travaux de recherche, qui m'a toujours facilité les tâches administratives et qui m'a donné des remarques pertinentes.

Un remerciement à Monsieur Jean Jacques Dupin, Monsieur Mustapha Fnaiech, Monsieur Serge Berthier, Monsieur Mohamed Ben Salem et Monsieur Ahmed Chabchoub qui ont bien voulu participer à mon jury de thèse et ont accordé du temps à la lecture de mon manuscrit.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes du laboratoire qui m'ont gentiment accueillie parmi eux et m'ont aidée à diverses reprises et surtout Madame Martine Méheut pour ses remarques pertinentes et son suivi du déroulement de la thèse, Cécile De Hosson, Wanda Kaminski, Gérard Rebmann et Laurence Viennot. Je remercie également Evelyne Scaron et Sandrine Pellé qui ont été toujours disponibles pour me renseigner côté administratif.

Un grand merci à Daniel Beaufils qui a eu la gentillesse de lire la thèse et d'éclaircir certains points difficiles sur le plan physique et statistique.

Mon travail est lieu au Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques de l'université Paris 7 - Denis Diderot et le Laboratoire de l'Education, de Didactique et de Psychologie de l'Institut Supérieur de l'Education et de la Formation Continue de Tunis.

Je remercie enfin toutes les personnes que j'ai connues durant mon séjour à Paris, et qui m'ont hébergée chez eux. Sans eux, la vie quotidienne ne serait pas ce qu'elle est.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| PARTIE 1. CADRE DIDACTIQUE | 5 |
| CHAPITRE 1. | |
| CONNAISSANCE COMMUNE. MODELES ET REGISTRES SEMIOTIQUES | 6 |
| 1. Le constructivisme | 7 |
| 2. La connaissance commune | 8 |
| 2.1. Représentations et conceptions | 8 |
| 2.2. Les raisonnements communs | 10 |
| 2.3. La connaissance commune et l'enseignement | 11 |
| 2.4. Connaissance commune, histoire des sciences et enseignement | 13 |
| 3. Modèle et registre | 14 |
| 3.1. Le concept scientifique | 14 |
| 3.2. Le modèle | 14 |
| 3.3. Registres sémiotiques | 16 |
| 4. Conclusion partielle | 17 |
| CHAPITRE 2. | |
| ETAT DES RECHERCHES SUR LES ONDES | 18 |
| 1. Introduction | 19 |
| 2. Ondes mécaniques | 19 |
| 2.1. Propagation et superposition d'ondes sur les cordes | 19 |
| 2.2. Propagation du son | 23 |
| 3. Ondes lumineuses | 24 |
| 3.1. Optique géométrique | 24 |
| 3.1.1. Vision | 24 |
| 3.1.2. Propagation de la lumière | 24 |
| 3.1.3. Couleur | 25 |
| 3.1.4. Réflexion et réfraction | 25 |
| 3.2. Optique ondulatoire | 27 |
| 3.2.1. Travail de Lefèvre | 27 |
| 3.2.2. Travaux de Maurines | 28 |
| 3.2.2.1. Les concepts de rayon et de surface d'onde | 28 |
| 3.2.2.2. Les concepts de phase et de surface d'onde | 28 |
| 3.2.2.3. La diffraction par une ouverture | 29 |
| 3.2.2.4. La cohérence spatiale partielle | 30 |
| 3.2.3. Travaux de Colin et Viennot | 31 |
| 3.2.4. Travaux d'Ambrose et al. | 32 |
| 3.2.5. Travail de Wosilait et al. | 33 |
| 4. Conclusion partielle | 35 |
| PROBLEMATIQUE | 36 |

PARTIE 2. ANALYSE DE CONTENU : POINT DE VUE SCIENTIFIQUE ET HISTORIQUE ET REGARD SUR LES MANUELS D'ENSEIGNEMENT 40

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE 1. | |
| PHYSIQUE DES INTERFERENCES LUMINEUSES | 41 |
| 1. Introduction | 42 |
| 2. Les interférences lumineuses : Phénomène et dispositifs | 44 |
| 2.1. Définition du phénomène d'interférence | 44 |
| 2.2. Conditions d'obtention | 45 |
| 2.3. Dispositifs interférentiels éclairés par une source quasi-monochromatique ponctuelle | 45 |
| 2.3.1. Dispositifs à division du front d'onde | 46 |
| 2.3.1.1. Dispositif d'Young | 46 |
| 2.3.1.2. Miroirs de Fresnel | 47 |
| 2.3.2. Dispositifs à division d'amplitude | 47 |
| 2.3.2.1. Lame à faces parallèles | 48 |
| 2.3.2.2. Lames à faces non parallèles | 49 |
| 2.3.2.3. Interféromètre de Michelson | 49 |
| 2.4. Caractéristiques de la figure d'interférences lumineuses en lumière monochromatique | 50 |
| 2.4.1. Forme des franges | 50 |
| 2.4.1.1. Influence du dispositif : interférences produites par plus de deux sources ponctuelles | 51 |
| 2.4.1.2. Position de la source | 51 |
| 2.4.2. Différence de marche, ordre, interfrange | 51 |
| 2.4.3. Intensité et contraste | 52 |
| 2.4.4. Localisation des interférences lumineuses | 53 |
| 2.5. Dispositifs interférentiels avec une source primaire monochromatique étendue | 54 |
| 2.5.1. Interféromètre à division du front d'onde | 55 |
| 2.5.2. Interféromètre à division d'amplitude | 56 |
| 2.5.2.1. Cas des franges d'égalé inclinaison | 56 |
| 2.5.2.2. Cas des franges d'égalé épaisseur | 57 |
| 2.5.3. Récapitulatif | 57 |
| 2.6. Figure d'interférences produites par une source ponctuelle non monochromatique | 58 |
| 2.6.1. Cas d'une lumière quasi monochromatique | 58 |
| 2.6.2. Cas d'un doublet | 58 |
| 2.6.3. Cas d'une lumière blanche | 59 |
| 3. Interprétation de l'aspect d'une figure d'interférences lumineuses | 60 |
| 3.1. Modèle ondulatoire de la lumière | 60 |
| 3.2. Modèle du récepteur | 60 |
| 3.3. Interférences lumineuses à deux ondes avec une source primaire ponctuelle | 61 |
| 3.3.1. Intensité et contraste des franges | 61 |
| 3.3.2. Formes des franges d'interférences et interfrange | 64 |
| 3.3.2.1. Superposition d'ondes planes | 64 |
| 3.3.2.2. Superposition d'ondes sphériques | 64 |
| 4. Interprétation des conditions d'obtention des interférences lumineuses | 67 |
| 4.1. Introduction | 67 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2. Cohérence temporelle | 68 |
| 4.2.1. Modèle du train d'onde | 68 |
| 4.2.1.1. Superposition cohérente et superposition incohérente de deux ondes | 69 |
| 4.2.1.2. Longueur de cohérence | 69 |
| 4.2.1.3. Application avec les trous d'Young | 70 |
| 4.2.2. Modèle spectral | 71 |
| 4.2.2.1. Profil de raie | 72 |
| 4.2.2.2. Interprétation de la variation du contraste pour un doublet et de la figure obtenue avec une lampe bichromatique | 73 |
| 4.2.2.3. Interprétation des franges irisées en lumière blanche | 74 |
| 4.2.2.4. Généralisation : largeur de raie et contraste de la figure d'interférences | 75 |
| 4.2.3. Fonction d' « autocorrélation » | 76 |
| 4.2.4. Caractéristiques temporelles du laser et des lames spectrales | 77 |
| 4.3. Cohérence spatiale | 78 |
| 4.3.1. Interprétation de l'influence de la largeur de la source primaire sur la visibilité des franges d'interférences dans le cas des trous d'Young | 78 |
| 4.3.2. Grandeurs caractérisant la cohérence spatiale : largeur de cohérence et angle de cohérence spatiale | 80 |
| 4.3.3. Contraste et distribution de l'intensité | 81 |
| 4.4. Approche générale de la cohérence spatiotemporelle | 82 |
| 4.5. Conclusion partielle | 82 |
| | |
| CHAPITRE 2. | |
| HISTOIRE DES INTERFERENCES LUMINEUSES | 84 |
| | |
| 1. Introduction | 85 |
| 2. Quelques éléments d'histoire des théories de la lumière | 86 |
| 2.1. Antiquité et Moyen-âge | 86 |
| 2.2. XVI ^{ème} et XVII ^{ème} Siècle | 86 |
| 2.2.1. Kepler | 86 |
| 2.2.2. Descartes et Grimaldi | 87 |
| 2.2.3. Hooke | 88 |
| 2.2.4. Newton et Huygens | 88 |
| 3. Young et Fresnel | 91 |
| 3.1. Principe de superposition – Principe d'interférences | 91 |
| 3.2. Young | 92 |
| 3.2.1. Transition son – optique | 92 |
| 3.2.2. Lames minces | 93 |
| 3.2.3. Trous d'Young | 95 |
| 3.2.4. Les conditions d'obtention | 98 |
| 3.3. Fresnel | 98 |
| 3.3.1. Etudes sur la diffraction | 99 |
| 3.3.2. Etudes sur les interférences | 100 |
| 3.3.3. Dispositifs interférentiels | 101 |
| 3.3.3.1. Biprismes de Fresnel | 101 |
| 3.3.3.2. Miroirs de Fresnel | 102 |
| 3.3.3.2.1. Construction du dispositif et condition sur l'angle des miroirs | 102 |
| 3.3.3.2.2. Condition sur la largeur de la source | 103 |
| 3.3.3.2.3. Localisation des franges | 103 |
| 3.3.3.2.4. Observation en lumière blanche et homogène | 104 |

| | |
|--|-----|
| 3.3.3.2.5. Relation donnant l'interfrange | 105 |
| 3.3.4. Conditions d'interférences lumineuses | 105 |
| 3.3.5. Interprétation des conditions d'obtention liées à la cohérence temporelle | 106 |
| 3.3.5.1. Le train d'onde et la limite de l'œil | 106 |
| 3.3.5.2. Condition sur la fréquence | 108 |
| 3.3.5.3. Condition sur l'origine | 109 |
| 3.3.5.4. Conditions sur la proximité des sources | 110 |
| 3.3.5.5. Condition sur la différence de marche | 110 |
| 3.3.5.6. Conditions sur la largeur de la source lumineuses | 111 |
| 5. Contemporains et successeurs de Fresnel | 112 |
| 5.1. La description des interférences | 112 |
| 5.2. Cohérence | 114 |
| 5.2.1. Les années 1830 | 115 |
| 5.2.2. Les années 1860 | 116 |
| 5.2.3. Les années 1890-1930 | 118 |
| 6. Conclusion partielle | 121 |

CHAPITRE 3. PROGRAMMES ET MANUELS D'ENSEIGNEMENT 122

| | |
|---|-----|
| 1. Introduction | 123 |
| 2. Les programmes d'enseignement du secondaire | 123 |
| 2.1. En Tunisie | 123 |
| 2.2. En France | 125 |
| 3. Les programmes d'enseignement du Supérieur | 125 |
| 3.1. Classes préparatoires : section PC ou PSI | 126 |
| 3.2. Classes préparatoires : autres sections | 127 |
| 3.3. A l'université | 128 |
| 3.4. Conclusion partielle | 131 |
| 4. Analyse des manuels d'enseignement supérieur | 132 |
| 4.1. Définition des interférences lumineuses | 132 |
| 4.2. Dispositifs interférentiels | 133 |
| 4.2.1. Ordre d'apparition et utilisation des dispositifs | 133 |
| 4.2.2. Interprétation de l'expérience : schéma | 134 |
| 4.3. Conditions d'obtention des interférences lumineuses et cohérence | 137 |
| 4.3.1. Cohérence spatiale | 138 |
| 4.3.2. Cohérence temporelle | 140 |
| 4.3.3. Différenciation des cohérences spatiales et temporelle | 141 |
| 5. Conclusion partielle | 143 |

QUESTIONS DE RECHERCHE 145

PARTIE 3. METHODOLOGIE 150

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 1. Introduction | 151 |
| 2. Les questionnaires | 152 |
| 2.1. Elaboration des questionnaires | 152 |
| 2.2. Typologie des questions | 153 |

| | |
|--|------------|
| 2.2.1. Questions ouvertes | 154 |
| 2.2.2. Questions semi-ouvertes | 155 |
| 2.3. Catégorisation des questions | 156 |
| 3. Population étudiée et mode de passation | 158 |
| 3.1. Populations d'étudiants | 158 |
| 3.2. Passation | 159 |
| 4. Traitement des données | 160 |
| | |
| PARTIE 4. PREMIERES ETUDES EXPERIMENTALES : Les interférences lumineuses | 162 |
| | |
| 1. Introduction | 163 |
| 2. Conditions d'obtention d'une figure d'interférences | 163 |
| 2.1. Avec une source | 164 |
| 2.2. Avec deux lampes identiques | 166 |
| 2.3. Avec deux lampes de longueurs d'onde différentes | 167 |
| 2.4. Avec deux lasers à faisceaux divergents | 167 |
| 2.5. Avec deux lasers à faisceaux parallèles | 168 |
| 2.6. Deux sources secondaires | 169 |
| 2.7. Premier bilan | 171 |
| 3. Dispositifs interférentiels, largeur et position de la source primaire : descriptions « spontanées » des interférences lumineuses | 172 |
| 3.1. Trous d'Young | 172 |
| 3.1.1. Avec une source ponctuelle | 172 |
| 3.1.2. Source étendue | 174 |
| 3.1.2.1. Question ouverte | 174 |
| 3.1.2.2. Question semi-ouverte | 175 |
| 3.2. Les miroirs de Fresnel | 176 |
| 3.2.1. Avec une source ponctuelle | 176 |
| 3.2.2. Avec une source ponctuelle placée devant une lentille | 179 |
| 3.3. Les lames minces | 181 |
| 3.3.1. lame à faces parallèles et source ponctuelle | 182 |
| 3.3.2. lame à faces parallèles et source ponctuelle au foyer objet d'une lentille | 185 |
| 3.3.3. lame à faces parallèles et source étendue | 187 |
| 3.3.4. lame à faces parallèles et source étendue à l'infini | 190 |
| 3.3.5. lame en coin et lumière monochromatique | 192 |
| 3.4. Deuxième bilan | 194 |
| 4. Paramètres dont dépend une figure d'interférences | 197 |
| 4.1. Effet de la variation des distances D et a | 197 |
| 4.2. Variation de la longueur d'onde de la source primaire | 200 |
| 4.3. Variation de l'intensité de la source primaire ou des sources secondaires | 200 |
| 4.4. Variation de la phase des sources secondaires | 202 |
| 4.5. Introduction d'une lame mince | 204 |
| 4.6. Troisième bilan | 206 |
| | |
| PARTIE 5. MODELES DE RAISONNEMENT DES ETUDIANTS | 207 |
| | |
| 1. Introduction | 208 |
| 2. Comment obtient-on les interférences ? | 208 |
| 3. A quoi correspondent les interférences | 209 |

| | |
|---|------------|
| 4. Tendances transversales de raisonnement | 211 |
| 4.1. Difficultés liées au raisonnement à plusieurs variables | 211 |
| 4.1.1. Vision synchrétique et indifférenciée | 212 |
| 4.1.2. Centration sur un concept ou un aspect de la situation | 212 |
| 4.2. Aspects perceptifs privilégiés | 212 |
| 4.3. Lecture des schémas | 213 |

PARTIE 6. MISE A L'EPREUVE DU MODELE DE RAISONNEMENT **214**

| | |
|--|------------|
| 1. Introduction | 215 |
| 2. Cohérence des sources et principe de superposition | 216 |
| 2.1. Cohérence spatiale | 216 |
| 2.1.1. Trois sources secondaires cohérentes ponctuelles | 217 |
| 2.1.1.1. Question ouverte | 217 |
| 2.1.1.2. Question semi-ouverte | 218 |
| 2.1.2. Deux sources secondaires cohérentes étendues | 220 |
| 2.1.2.1. Question ouverte | 220 |
| 2.1.2.2. Question semi-ouverte | 221 |
| 2.1.3. Deux sources primaires ponctuelles incohérentes | 222 |
| 2.1.3.1. Question ouverte | 222 |
| 2.1.3.2. Question semi-ouverte | 224 |
| 2.2. Cohérence temporelle | 225 |
| 2.2.1. Deux radiations monochromatiques | 225 |
| 2.2.2. Deux filtres différents devant les trous | 228 |
| 2.2.3. Bilan | 230 |
| 3. Raisonnement géométrique | 230 |
| 4. Raisonnement mécaniste | 233 |
| 4.1. Deux lampes à vapeur de sodium | 234 |
| 4.2. Deux lasers | 235 |

PARTIE 7. DEUXIEMES ETUDES EXPERIMENTALES : La cohérence de la lumière **237**

| | |
|--|------------|
| 1. Introduction | 238 |
| 2. Caractérisation de la cohérence spatiotemporelle d'une onde | 238 |
| 2.1. Modèle du train d'onde | 238 |
| 2.1.1. Situations de cohérence temporelle | 239 |
| 2.1.2. Situations d'incohérence temporelle | 241 |
| 2.1.3. Bilan | 243 |
| 2.2. Grandeurs caractérisant la cohérence d'une onde | 243 |
| 2.2.1. Cohérence temporelle | 246 |
| 2.2.2. Cohérence spatiale | 248 |
| 2.2.3. Comparaison des réponses sur la cohérence temporelle et la cohérence spatiale | 249 |
| 2.2.4. Caractérisation d'une source par plusieurs fiches | 250 |
| 2.3. Bilan | 251 |
| 3. Figure d'interférences en cohérence partielle | 252 |
| 3.1. Cohérence temporelle partielle | 252 |
| 3.1.1. Largeur du champ d'interférences | 252 |
| 3.1.2. Lame de verre devant une source secondaire | 254 |
| 3.2. Cohérence spatiale partielle | 255 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.1. Source étendue et variation de la distance <i>d</i> | 256 |
| 3.2.2. Source étendue et variation de la distance <i>a</i> | 257 |
| 3.3. Bilan | 258 |
| PARTIE 8. PROPOSITIONS PEDAGOGIQUES | 259 |
| 1. Introduction | 260 |
| 2. Définition et conditions d'obtention | 260 |
| 3. Dispositifs interférentiels | 262 |
| 4. La cohérence | 265 |
| 4.1. Cohérence temporelle et cohérence spatiale | 265 |
| 4.2. Différenciation cohérences spatiale et temporelle | 265 |
| 5. Les simulations | 267 |
| 6. Histoire des sciences | 269 |
| CONCLUSION GENERALE | 270 |
| BIBLIOGRAPHIE ALPHABETIQUE | 276 |
| BIBLIOGRAPHIE THEMATIQUE | 289 |
| ANNEXES | 301 |
| ANNEXE 1 : Résumé du Mémoire de DEA (2001) | 302 |
| ANNEXE 2 : Questionnaires | 306 |
| ANNEXE 3 : Programmes d'enseignement | 335 |
| ANNEXE 4 : Etude complémentaire sur la zone de cohérence spatiale | 351 |
| ANNEXE 5 : Test de Chi ² (χ^2) | 355 |

**INTRODUCTION
GENERALE**

Notre recherche porte sur l'enseignement-apprentissage des interférences lumineuses. Elle s'inscrit dans une perspective constructiviste de l'apprentissage qui impose de se centrer sur l'apprenant. Comme ce thème de la physique, réputé difficile à étudier, a donné lieu à peu de travaux en didactique, nous avons choisi de dégager et d'analyser les difficultés rencontrées par les étudiants lors de l'étude des interférences lumineuses au niveau de l'enseignement supérieur. Nous nous sommes intéressée aux principales tendances de raisonnements utilisés par les étudiants et avons cherché à les modéliser à l'aide d'un petit nombre de caractéristiques afin d'en proposer une description organisée, cohérente et prédictive. Nous espérons ainsi contribuer à alimenter une réflexion sur les objectifs pédagogiques à poursuivre et sur les méthodes à utiliser pour les atteindre.

Le phénomène des interférences lumineuses, délicat à observer et à interpréter, est abordé pour la première fois généralement au niveau de la deuxième année d'université et étudié de manière plus approfondie en troisième année¹. Notre recherche a porté quasiment uniquement sur ce dernier niveau et est constituée de deux séries d'enquêtes. La première concerne les conditions d'obtention des interférences lumineuses et les caractéristiques de la figure d'interférences en éclairage totalement cohérent. La deuxième approfondit la question de la cohérence de la lumière et des figures d'interférences en éclairage partiellement cohérent. Elles constituent deux niveaux d'étude du phénomène.

Ce mémoire comprend huit parties.

La première partie comporte deux chapitres qui fixent le cadre didactique dans lequel ce travail s'inscrit.

Après une rapide présentation de la vision constructiviste de l'apprentissage partagée par les didacticiens, nous indiquons les principales caractéristiques de la connaissance commune et soulignons l'existence de similitudes entre cette connaissance commune et des théories ayant eu leur heure de gloire dans le passé. Nous signalons également comment les travaux sur la connaissance commune peuvent aider à la construction de situations d'enseignement.

Nous poursuivons en nous intéressant au savoir savant et précisons quelques propriétés des modèles utilisés en physique et les difficultés qu'ils peuvent faire surgir chez les élèves et

¹ Ceci étant en France. En Tunisie, l'optique ondulatoire est enseignée en quatrième année d'université.

étudiants. Nous faisons ensuite un panorama des recherches en didactique ayant nourri notre réflexion, ce qui permettra de situer l'apport de notre travail.

Dans la deuxième partie consacrée à l'analyse de contenu, nous présentons les trois études théoriques qui nous ont permis de dégager des thèmes et des questions précises de recherche à explorer.

Nous débutons en présentant le cadre de référence sur la physique des interférences lumineuses que nous avons défini afin de cerner les difficultés des étudiants. La physique des interférences lumineuses est un domaine dont la présentation dans les manuels d'enseignement apparaît souvent comme éclatée. C'est pourquoi nous avons cherché à en donner une vision unifiée et cohérente organisée autour d'un petit nombre de connaissances. Pour cela, nous avons été amenée à expliciter certains points délicats et parfois à en rectifier d'autres.

Nous poursuivons par une analyse de l'histoire de la physique des interférences lumineuses. Celle-ci nous permettra de montrer que le phénomène des interférences lumineuses est un phénomène sur lequel les scientifiques ont buté autrefois. Une grande partie de notre travail a porté sur les conditions d'obtention des interférences et sur l'interprétation de ces conditions. Cette étude historique nous a permis de faire quelques hypothèses sur les difficultés susceptibles d'être rencontrées par les étudiants et nous a conduite à faire quelques propositions pédagogiques.

Nous passons ensuite à l'étude des programmes et des manuels d'enseignement. Celle-ci permettra de définir ce que les étudiants sont censés savoir et de voir si certaines approches peuvent soulever des difficultés. En ce qui concerne les manuels, nous n'avons pas fait d'étude exhaustive, nous nous sommes centrée sur un certain nombre de points définis à l'aide de l'analyse de la physique et de l'histoire des interférences lumineuses et des travaux dans le domaine des ondes. Nous verrons ainsi que l'enseignement actuel n'aide pas à l'apprentissage des interférences lumineuses.

Nous terminons en donnant les différents éléments de notre problématique. Nous nous sommes attachée à montrer que les erreurs commises par les étudiants dans une situation donnée sont la manifestation de tendances typées de raisonnement qui se manifestent transversalement à ces situations. Nous faisons l'hypothèse qu'un étudiant ne se conformera pas nécessairement à tout le modèle de raisonnement que nous avançons pour rendre compte de nos résultats mais, qu'à un moment ou à un autre, il mettra en œuvre une tendance de raisonnement décrit par ce modèle. Ayant réalisé l'étude expérimentale auprès d'étudiants

ayant reçu un enseignement sur les interférences lumineuses, nous supposons que nous mettons en évidence des tendances de raisonnement « spontané », c'est-à-dire non appris en tant que tel, et d'autres induites par l'enseignement. Nous supposons également que ces tendances de raisonnement rejoindront par certains aspects les tendances de raisonnement mises en évidence par Maurines (2001) dans le domaine des ondes, en particulier dans le cas de la diffraction de la lumière.

Dans la troisième partie, nous décrivons la méthodologie que nous avons utilisée. L'étude expérimentale a été réalisée en deux temps à l'aide de questionnaires écrits. L'interprétation des réponses obtenues aux questionnaires a également été réalisée en deux temps. Nous avons tout d'abord effectué un bilan des difficultés rencontrées par les étudiants après chaque série de questionnaires et avons présenté les résultats obtenus lors de deux communications en 2003 et 2005. Nous avons ensuite cherché à dégager un modèle de raisonnement lors de la rédaction de ce mémoire.

Dans la quatrième partie, nous présentons une partie des résultats obtenus lors de notre première étude sur les conditions d'obtention des interférences et les figures d'interférences en éclairage cohérent.

Dans la cinquième partie, nous proposons un modèle du raisonnement des étudiants. Ce modèle comprend plusieurs caractéristiques liées les unes aux autres. Deux d'entre elles sont spécifiques au domaine des interférences lumineuses, les autres se rencontrent de manière transversale dans différents domaines de la physique.

Dans les sixième et septième parties, nous montrons que le modèle de raisonnement des étudiants que nous avançons permet aussi d'interpréter les autres résultats de la première étude et de prévoir les difficultés de la deuxième étude sur la cohérence de la lumière et les figures d'interférences en éclairage partiellement cohérent.

Dans la huitième partie, nous avançons quelques propositions pédagogiques.

Nous concluons ce mémoire en montrant les limites de notre travail et en dégageant des pistes pour des recherches ultérieures.

PARTIE 1
CADRE DIDACTIQUE

Chapitre 1

CONNAISSANCE COMMUNE.

MODELES ET REGISTRES

SEMIOTIQUES

1. Le constructivisme

Plusieurs théories ont été avancées pour rendre compte du processus d'enseignement - apprentissage. Au début du XX^{ème} siècle, la théorie dominante était le béhaviorisme qui s'intéresse essentiellement aux comportements d'apprentissage observables. Depuis les années 60, l'approche cognitive prend le dessus. Elle étudie les processus mentaux chez l'individu.

Les didacticiens s'accordent actuellement sur une vision constructiviste de l'apprentissage : « *le sujet **construit** ses connaissances par une interaction active avec l'environnement. Cela signifie par là même à la fois que les connaissances ne s'empilent pas les unes sur les autres (elles sont structurées), et qu'elles ne sont pas un simple reflet de la structure objective des objets extérieurs* » (Johsua et Dupin 1989, p. 29).

Cette vision trouve son origine dans les travaux de Piaget (1896-1980). Celui-ci s'est intéressé au développement mental de l'enfant et de l'adolescent (Piaget 1980). Il le conçoit par le passage par différents "stades" caractérisés par des *schèmes spécifiques*. Le développement mental se produit sous l'action d'une simple maturation et grâce à l'interaction avec l'extérieur, surtout avec le monde matériel. Chaque stade correspond à un état d'équilibre des structures cognitives. Cet équilibre résulte de l'action réciproque de l'assimilation de connaissances nouvelles et de l'accommodation des structures cognitives : « *l'évolution du répertoire des schèmes résulte du double mécanisme d'assimilation - accommodation, qui intervient lors des déséquilibres auxquels le sujet est soumis, par le jeu de son dialogue avec les objets* » (Astolfi et al 1997, p. 51).

Sous l'influence des travaux de psychologues tels que Vygotsky (1896-1934), les didacticiens sont passés d'une vision constructiviste à une vision socio-constructiviste de l'apprentissage pour lesquelles les interactions sociales sont primordiales. Dans ce cadre, le langage joue un rôle prédominant dans l'organisation des processus de pensée.

Pour Vygotsky (1934), l'acquisition de connaissances nouvelles ne se fait que si elles se situent dans la zone de développement proximal, c'est-à-dire dans une zone entre ce que l'apprenant est capable d'accomplir seul et ce qu'il ne saurait pas faire avec une aide extérieure. L'apprentissage devient en mesure de guider le développement au lieu d'être entraîné par lui.

2. La connaissance commune

2.1. Représentations et conceptions

Dans les travaux en didactique, on rencontre différents termes pour désigner les « idées des élèves ». Notre but n'est pas d'en faire un inventaire exhaustif. Nous distinguerons les représentations des conceptions, souvent utilisées de manière équivalente mais renvoyant cependant à des notions différentes.

Ainsi, Richard (1995) considère la notion de représentation comme « *la plus centrale en psychologie cognitive. Pourtant, elle est loin d'être claire et renvoie à des concepts assez différents* » (op. cit. p. 10). Du point de vue de leur nature, « *les représentations doivent être distinguées des connaissances ou croyances* » (idem.). Elles sont « *des constructions circonstancielle faites dans un contexte particulier et à des fins spécifiques, à savoir dans une situation donnée et pour faire face aux exigences de la tâche en cours, à savoir un texte, un problème qu'on doit résoudre* » (idem.). De plus, elles « *prennent en compte l'ensemble des éléments de la situation et de la tâche : elles sont donc très particularisées, occasionnelles et précaires par nature* » (idem.). Mais dès que la situation change, la représentation sera modifiée. Donc « *elles sont par nature transitoires : une fois la tâche terminée, elles sont remplacées par d'autres représentations liées à d'autres tâches* » (idem.).

On parle de conception quand on veut répertorier les représentations des apprenants d'une connaissance scientifique dans un domaine précis. Les termes traduisant l'idée de conception dépendent de la discipline (psychologie, philosophie, didactique...). Par exemple, Giordan et al (1994a) ont relevé 28 qualificatifs comme "pré-représentations" et 27 synonymes passant de "déjà-là" à "pupils paradigms". Tous ces termes reposent sur le fait que les apprenants ont des idées spécifiques à la physique qui se manifestent dans des situations plus que dans d'autres. En effet, il existe « *un ensemble d'idées coordonnées et d'images cohérentes, explicatives, utilisées par les apprenants pour raisonner face à des situations-problèmes, (...) que cet ensemble traduit une structure mentale sous-jacente responsable de ces manifestations contextuelles* » (op. cit. p. 79). Ainsi, les conceptions sont conçues comme un « *système d'accueil, de référence, à partir duquel s'opère le travail de transformation, d'intégration, d'appropriation d'éléments informatifs et représentatifs nouveaux ou différents* » (ibid. p. 30). Elles sont des outils, des 'registres de fonctionnement', des 'stratégies de pensée', les seules dont dispose l'apprenant pour appréhender la réalité, les

objets d'enseignement ou les contenus informationnels. C'est à travers elles que l'apprenant va sélectionner des informations et leur donner une signification. Alors, « *acquérir une connaissance, c'est passer d'une conception à une autre plus pertinente par rapport à la situation* » (ibid. p. 10).

Les conceptions ont différentes origines : « *La réponse la plus générale que l'on peut donner à cette question [d'où viennent ces conceptions ?] est qu'elles s'enracinent dans l'expérience passée du sujet. Mais celle-ci peut être elle-même fort diverse : sociale (par exemple dans ses aspects liés à la culture communément partagée), affective (se traduisent par exemple par des structurations profondes de la personnalité), en relation aux rapports entretenus avec les objets et/ ou les personnes (lesquels se traduiraient en schèmes cognitifs ou/ et sociaux-cognitifs), ou encore tout simplement didactique (l'enseignement passé et son cadre de fonctionnement)* » (Johsua 1989, p. 122).

Plusieurs caractéristiques sont attribuées aux conceptions.

Premièrement, contrairement à la connaissance scientifique, que Closset (1983) présente comme étant explicite, questionnable, entièrement structurée et cohérente, la connaissance commune se présente comme implicite et « *n'est pas questionnable par essence, elle n'est que partiellement structurée et partiellement cohérente* » (op. cit. p. 9).

Deuxièmement, les conceptions sont des structures profondes de pensée qui fonctionnent comme des **théories naïves**. Elles apparaissent le plus souvent en relation avec un (ou des) concept (s), elles sont liées au savoir en jeu et les connaissances auxquelles elles correspondent constituent de véritables théories implicites, naïves et qui sont pertinentes dans la vie quotidienne. C'est le point sur lequel insistent Astolfi et Develay (1996) ainsi que Larochelle et Désautels (1992).

Troisièmement, très souvent, elles sont fausses sur le plan scientifique. Elles constituent alors un **obstacle** à l'apprentissage. Cette notion d'obstacle, introduite par Bachelard (1977) dans son analyse du développement historique de la science, est à penser comme un déjà-là : « *c'est dans l'acte même de connaître, intimement, qu'apparaissent, par une sorte de nécessité fonctionnelle, des lenteurs et des troubles. C'est là que nous montrerons des causes de stagnation et même de régression, c'est là que nous décèlerons des causes d'inertie que nous appellerons des obstacles épistémologiques* » (op. cit. p.13). Un obstacle est avant tout une connaissance et il fait partie de la connaissance de l'apprenant puisqu'il « *explique et stabilise la représentation* » (Astolfi et Peterfalvi 1993, p. 110). Un

obstacle se manifeste par les erreurs qu'il va provoquer. Ces erreurs commises par les apprenants ne sont en général pas seulement l'effet du hasard ou de la maladresse : elles sont la conséquence logique de leurs connaissances et « *le témoin d'un autre savoir au moins partiellement organisé* » (Closset 1983, p. 18). Ainsi, selon la perspective constructiviste, l'erreur fait partie du processus même de construction des connaissances et y joue un rôle fondamental.

Quatrièmement, les conceptions sont susceptibles de **s'adapter aux situations** et de gagner en logique. Elles peuvent être résistantes comme le soulignent Giordan, Larochelle et Désautels. Ainsi, « *même après avoir été mis en présence avec de nouveaux concepts et théories dans une classe de science, ils reviennent à leurs théories antérieures pour résoudre les problèmes qui s'écartent des exemples des livres scolaires* » (Goix 1997, p. 126).

2.2. Les raisonnements communs

Les expressions de "représentation" (ou de conception) et de "mode de raisonnement" sont couramment utilisées pour désigner la façon dont un élève traite une notion. Ces deux expressions sont parfois utilisées indistinctement ; parfois, elles sont bien distinguées. Pour nous, le mode de raisonnement renvoie aux procédures mentales de l'élève en situation de résolution de problème, celui de conception renvoie à l'ensemble structuré de concepts sur lequel s'appuie le raisonnement.

Dans son livre, Richard (1995) distingue deux classes de raisonnement, répondant à des finalités différentes : « *les raisonnements à visée épistémique et les raisonnements à visée pragmatique. Les résultats du premier sont utilisés pour construire des interprétations, les résultats du second sont utilisés pour engendrer des objectifs d'action* » (op. cit. p. 18).

Ces raisonnements permettent de produire des inférences d'une part, « au moyen de règles qui définissent les conditions de passage des informations connues aux conclusions, d'autre part, en utilisant des connaissances en mémoire » (ibid. p. 19).

La comparaison des résultats de recherches dans différents domaines de la physique (mécanique, électrocinétique, propagation des ondes,...) amène Viennot à conclure que des tendances de raisonnement se manifestent sous des formes analogues d'un domaine à l'autre. Elle souligne que « *l'idée centrale qui oriente le raisonnement commun est celle d'objet quasi-matériel doué de propriétés intrinsèques...C'est toujours vers la simplicité que se dirige le raisonnement commun pour qualifier l'objet qui lui sert de support...Des objets et*

des histoires : ce résumé lapidaire conviendrait si l'on n'avait que cinq mots pour décrire le raisonnement usuel. » (Viennot 1996, pp. 227-228).

2.3. La connaissance commune et l'enseignement

Le professeur à orientation constructiviste a une relation spéciale avec l'apprenant grâce à sa méthode d'enseignement. En effet, *« un professeur d'allégeance constructiviste aura tendance à insister sur le caractère arbitraire ou subjectif des modèles scientifiques, en encourageant l'élève à construire ses propres connaissances. Pour ce professeur, l'expérimentation ne sert qu'à vérifier la cohérence interne de la construction. Un cours de science correspond, pour ce professeur, à une suite de modèles reconnus actuellement par le milieu scientifique que l'élève doit réussir à comprendre, à construire et à maîtriser. Un professeur qui adopte la conception constructiviste de la science aura évidemment aussi tendance à adopter les procédures d'enseignement constructivistes où l'élève est au cœur des apprentissages »* (Riopel 2005, p. 28).

L'approche constructiviste de l'apprentissage impose donc de tenir compte de l'apprenant et notamment de ses difficultés. La connaissance des conceptions et modes de raisonnement commun dans un domaine précis de la physique permet de choisir parmi les nombreux objectifs d'enseignement susceptibles d'être retenus, ceux qui posent problèmes. Elle permet la définition de ce que Martinand appelle des objectifs-obstacles (Martinand 1986).

En ce qui concerne les stratégies d'enseignement, le point essentiel est de rendre l'étudiant plus actif afin qu'il se pose des questions. En effet, *« avant tout, il faut savoir poser des problèmes. Et quoi qu'on dise, dans la vie scientifique, les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique. Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit »* (Bachelard 1977, p. 14).

Une question alors se pose, comment rendre l'étudiant actif dans la construction de ses connaissances ? Il est proposé de provoquer chez l'étudiant un "étonnement" à propos d'une situation qui, au préalable, ne lui posait pas de problème. Pour cela, il est nécessaire de partir de ses conceptions et de faire en sorte qu'elles soient sources de contradictions. Par exemple, quand les résultats d'une observation ou d'une expérience sont différents de ceux auxquels il

s'attendait, cela peut créer un doute chez lui et sur sa représentation du phénomène. L'apparition d'un conflit cognitif sera favorisée et une dialectique entre le "problème" et sa connaissance pourra s'instaurer et donner naissance à une connaissance nouvelle, par laquelle l'obstacle aura été franchi. Ce franchissement exige « *un travail de même nature que la mise en place d'une connaissance, c'est-à-dire des interventions répétées* » (Brousseau 1983, p. 175) et ne demande pas une destruction d'une connaissance au profit d'une autre. En effet, comme le souligne Closset (1983), « *il nous paraît tout aussi illusoire de vouloir les [les obstacles] détruire que de les prendre tels quels comme point de départ d'une évolution. Par contre, en exploitant l'aspect prédictif de la connaissance commune on peut la confronter au réel, pour provoquer chez l'étudiant une prise de conscience de l'existence de ses raisonnements naturels et de leur caractère inadapté à rendre compte de certains phénomènes. La déstabilisation ainsi créée facilite la mise en place d'un nouveau schéma explicatif qui survivra avec le raisonnement naturel. L'étudiant devra apprendre en même temps à identifier les situations pour lesquelles tel ou tel schéma explicatif est plus adapté qu'un autre. C'est ce retour critique sur son propre mode de fonctionnement qui constitue la première démarche scientifique de l'étudiant et qui permettra l'évolution, non nécessairement destructive, vers le mode de la connaissance scientifique* » (op. cit. p. 16).

Pour favoriser ce retour critique sur son propre mode de fonctionnement, la situation d'enseignement devrait permettre à l'étudiant d'exposer son point de vue et de l'argumenter. Cela serait ainsi l'amorce d'un débat scientifique auquel chaque étudiant contribuerait afin de résoudre le problème proposé en faisant des observations et réalisant des expériences, et par la critique mutuelle. Pour ce faire, la situation d'enseignement comprendrait selon Larochelle et Desautels (1992) trois phases essentielles :

- « - **La présentation d'un phénomène à étudier,**
- **La mise en forme d'un événement perturbateur,**
- **La restructuration des idées (...)** » (op. cit. p. 35).

Mais comme l'a expliqué Piaget (1967), pour s'approprier une connaissance nouvelle, l'étudiant doit la faire fonctionner sur d'autres situations que celle pour laquelle elle a été construite. L'étudiant devra appliquer son caractère prédictif à la résolution d'autres situations-problèmes. L'enseignant prendra soin de les choisir selon deux critères :

* d'abord proche de la situation initiale, afin que l'élève puisse réinvestir le même schème, par assimilation reproductrice, ces observations constituant un début de validation ;

* puis sur des situations un peu plus éloignées afin de passer à une assimilation généralisatrice. Ces nouvelles observations permettant de l'enrichir de propriétés et d'étendre son domaine de validité.

Au cours de l'apprentissage, l'activité de l'étudiant sera concentrée sur la formulation correcte du problème, l'émission d'hypothèses, la vérification de ces hypothèses et l'essai d'interprétation des observations expérimentales. Par la suite, l'étudiant cherchera à tester le modèle explicatif en l'utilisant sur des situations variées pour l'affiner et vérifier leur pouvoir prédictif.

2.4. Connaissance commune, histoire des sciences et enseignement

Plusieurs travaux en didactique mettent en évidence l'existence de similitudes entre les difficultés rencontrées par les scientifiques autrefois et celles rencontrées par les élèves aujourd'hui. Cependant, comme Johsua et Dupin (1989) le soulignent : s'il « *est toujours tentant de mettre en relation les conceptions d'élèves et les conceptions semblables qui ont jalonné l'histoire des sciences (...), il est toujours délicat d'accorder trop d'importance interprétative à ces rapprochements, comme si les élèves aujourd'hui devaient récapituler les étapes passées* » (op. cit. p. 135). Si ce « *détour par l'histoire est toujours éclairant* », il ne permet pas de fournir « *toutes les clés de la compréhension des difficultés rencontrées par les élèves* », mais il permet au moins de « *montrer combien les concepts en jeu sont délicats, et à quel point leur traitement peut varier selon les problèmes et le cadre épistémologique* » (ibid. p. 136).

En ce qui concerne l'enseignement, Vergnaud et al (1978) notent qu'il est « *illusoire de considérer qu'une présentation historique du savoir pourrait lever tous les obstacles didactiques. Elle peut être utilisée dans certains cas, mais elle peut aussi contribuer à faire surgir des obstacles qui n'existent pas avec une autre présentation* » (op. cit. p. 8). L'importance de l'histoire des sciences c'est qu'elle pourra « *apporter à l'enseignant de physique des éléments d'explication à la fois sur l'élaboration des concepts de la discipline et les méthodes qu'elle met en jeu, mais aussi des éléments explicatifs sur les erreurs habituellement réalisées par les élèves* » (Toussaint et al 1996, p. 87).

Cela ne veut donc pas dire qu'il faut refaire avec les apprenants ce qui s'est passé dans l'histoire. L'apprenant n'aura pas nécessairement à franchir les mêmes obstacles ou à suivre le même itinéraire. Le contexte scientifique a bien changé, des notions autrefois mystérieuses sont maintenant évidentes. Nous pouvons par contre supposer que certains obstacles rencontrés autrefois par les scientifiques peuvent être les mêmes que ceux auxquels se heurtera l'apprenant aujourd'hui et qu'il y a un certain nombre de 'passages obligés' communs. Par ailleurs, nous pouvons aussi supposer que l'analyse de la façon dont les obstacles ont été franchis autrefois peut donner des indications pour mettre au point des situations qui, aujourd'hui, permettront à l'apprenant de mieux les affronter. C'est pourquoi, l'histoire dans les cours de sciences ne doit pas seulement mentionner les découvertes et leurs dates de sorte à n'être réduite qu'à une simple histoire des succès, elle doit s'attacher aux errements, aux débats et aux obstacles.

3. Modèle et registre

3.1. Le concept scientifique

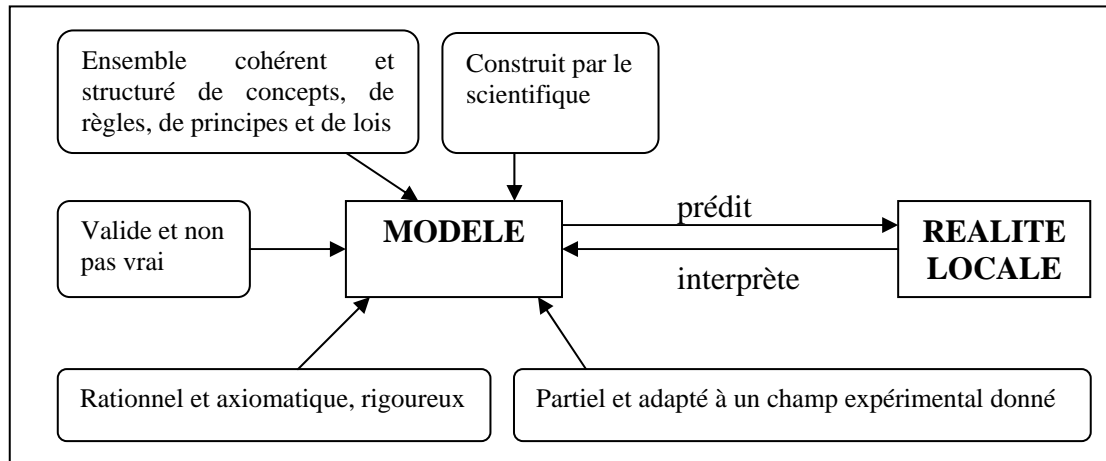
Rappelons tout d'abord qu'il existe plusieurs sortes de concepts : « *les concepts scientifiques ne sont pas de même nature que les concepts linguistiques ou que les concepts mathématiques* » (Astolfi et Develay 1996, p. 27). En sciences, le concept est considéré comme « *un outil intellectuel qui permet au chercheur d'identifier un problème et d'essayer de le résoudre* » (Rumelhard 1986, p. 14). De plus, il « *fonctionne toujours en relation avec d'autres concepts techniques et/ou théoriques. Il est un nœud dans un réseau de relation cohérent et organisé et non un élément disposé à côté d'autres éléments, par simple juxtaposition* » (idem.).

Donc, il n'existe pas de concept isolé (Cassirer 1977). Un concept scientifique prend son sens au travers des relations qui le lient à d'autres concepts (Closset 1983) et permet de rendre compte de situations diverses. Il est doté alors d'un **caractère opérationnel**.

3.2. Le modèle

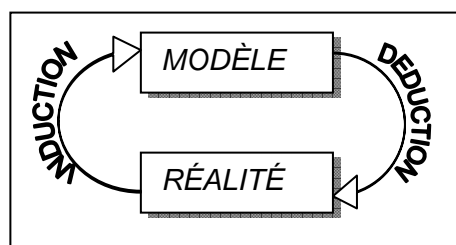
Le modèle est considéré comme une *représentation du réel* qui a essentiellement deux fonctions, à savoir l'*explication* et la *prédiction*. Soulignons qu'un modèle n'est pas une copie du réel mais traduit l'idée que l'on s'en fait (Encadré 1). Ainsi, Martinand en prenant

l'exemple des interférences lumineuses dit : « *une explication, une prévision s'appuient sur la représentation que l'on se fait du réel auquel on se réfère. Il est déjà satisfaisant de disposer d'une représentation en termes d'addition et de soustraction de lumière qui rende acceptable le fait que la superposition de lumière puisse donner de l'obscurité (dans un phénomène d'interférences)* » (Toussaint 1996, p.163).



Encadré 1. Les propriétés du modèle selon Robardet et Guillaud (1997, p. 105)

Le modèle est en étroite relation avec les modes de raisonnement inductif et déductif ainsi que la réalité (Encadré 2). Dans le mode appelé l'induction, « *à partir d'un certain nombre d'interaction avec la réalité, on tente d'obtenir un modèle permettant de comprendre ou d'expliquer cette réalité. Ce type d'activité correspond à la construction empirique ou à la synthèse d'un modèle* » (Riopel 2005, p. 3). Dans le mode appelé la déduction, « *on tente à partir d'un modèle donné, de prédire le résultat d'une ou de plusieurs interactions avec la réalité* » (ibid. p. 4). Remarquons que pour donner du sens en physique, beaucoup de chercheurs (par exemple, Robardet et Guillaud 1997) insistent sur le fait qu'il est nécessaire de faire apparaître les liens entre modèle et réalité, autrement dit de travailler le modèle selon ces deux modes.



Encadré 2. Modèle et réalité entre déduction et induction

Il existe différents types de modèles. Le *modèle physique* traduit les phénomènes sous forme de représentations concrètes, homothétiques (modèles réduits), ou analogiques. Le

modèle symbolique traduit une situation physique définie par « *un système cohérent et structuré de notions reliées entre elles par un ensemble de règles d'organisation appelées règles syntaxiques* » (Robardet et Guillaud 1997, p. 100). Un tel modèle s'exprime par l'intermédiaire de représentations symboliques et schématiques « ... *on peut appeler objet modèle toute représentation schématique d'un objet. Si l'objet représenté est concret, son modèle en sera une idéalisation. La représentation peut être graphique, s'il s'agit d'un dessin, ou conceptuelle, dans le cas d'une formule mathématique ; elle peut être figurative, (...), semi-symbolique, (...) ou symbolique (...)* » (Jimenez-Valladares et Perales-Palacios 2002, p. 398).

3.3. Registres sémiotiques

Pour caractériser le mode de fonctionnement de la pensée d'un apprenant en didactique des mathématiques, Duval (1995) introduit la notion de registre sémiotique. C'est un système sémiotique lui permettant d'exercer trois activités cognitives fondamentales :

-« *constituer une trace ou un assemblage de traces perceptibles qui soient identifiables comme une représentation de quelque chose dans un système déterminé* » ;

-« *transformer les représentations par les seules règles propres au système de façon à obtenir d'autres représentations pouvant constituer un apport de connaissance par rapport aux représentations initiales* » ;

-« *convertir les représentations produites dans un système en représentations d'un autre système, de telle façon que ces dernières permettent d'explicitier d'autres significations relatives à ce qui est représenté* » (op. cit. p. 21).

Autrement dit, lors de l'apprentissage, l'étudiant doit faire des liens entre le modèle et les phénomènes, et entre les différents systèmes sémiotiques. Pour Duval, deux conditions doivent être remplies pour qu'un modèle donne à l'apprenant accès à l'objet qu'il représente :

-« *qu'il dispose d'au moins de deux systèmes sémiotiques différents pour produire la représentation d'un objet, d'une situation, d'un processus...* »

-« *qu'il puisse convertir 'spontanément' d'un système sémiotique, à l'autre, sans même le remarquer, les représentations produites* » (Duval 1988, p. 14).

La notion de registre a été reprise en didactique des sciences. Ainsi pour Malafosse et al (2000, 2001), un registre se reconnaît par le biais de trois activités cognitives fondamentales :

- *la formation de représentations* (qui est la reconnaissance d'une représentation, identifiable comme une représentation d'un registre donné),
- *le traitement* (qui est la transformation d'une représentation en une autre appartenant au même registre à l'aide de règles propres),
- *la conversion* (qui est la transformation d'une représentation en une représentation du tout ou d'une partie dans un autre registre).

L'étude d'un phénomène nécessite la prise en compte de plusieurs grandeurs physiques et l'établissement de relations. Celles-ci font appel à différents systèmes sémiotiques comme les écritures vectorielles ou scalaires, des représentations graphiques, des notations, etc. :

- « *LN : langage naturel*
- RS : représentation symbolique*
- RG : représentation graphique*
- RD : représentation dynamique*
- I : image* » (Séjourné et Tiberghien 2002, p. 105).

Terminons en disant que pour Touma (2005), « *un savoir mathématique ou physique ne s'appréhende et n'acquiert du sens que par l'intermédiaire de systèmes d'expressions et de représentations sémiotiques* » (op. cit. p. 98).

4. Conclusion partielle

Comme nous nous inscrivons dans une vision constructiviste de l'apprentissage, nous partageons l'idée qu'il faut rendre l'apprenant actif en concevant des situations d'enseignement prenant en compte sa façon de penser. C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier les conceptions et raisonnements de sens commun dans le domaine des interférences lumineuses. Nous retenons que le détour par l'histoire des sciences peut apporter des éléments d'informations sur les difficultés susceptibles d'être rencontrées par les apprenants aujourd'hui car celles-ci peuvent être analogues à celles rencontrées par les scientifiques autrefois, même si l'on doit aussi tenir compte de la différence de contextes. Nous supposons que l'essentiel dans l'apprentissage est de saisir et comprendre les liens qui existent d'une part entre le modèle et la réalité, et d'autre part entre les registres au travers desquels le modèle s'exprime.

Chapitre 2

***ETAT DES RECHERCHES SUR LES
ONDES***

1. Introduction

En partant de l'hypothèse que les difficultés soulevées par l'étude des interférences lumineuses peuvent relever du type d'onde (lumière), de modèle (ondulatoire), de situation (superposition cohérente d'ondes) ainsi que de la façon de produire deux sources secondaires à partir d'une source primaire (donc du trajet suivi par la lumière dans un dispositif optique donné) et à l'envisager en présence d'interférences, nous présentons dans ce qui suit les principaux résultats des travaux existant dans la littérature en didactique concernant les conceptions des apprenants dans le domaine des ondes. Cela nous permettra de dégager un certain nombre de points intéressants à explorer et de situer l'apport de notre travail. Cela nous permettra aussi de voir si les tendances de raisonnement mises à jour dans ces travaux se retrouvent chez les étudiants que nous avons interrogés.

Nous n'allons pas lister les travaux dans le domaine des ondes mais les grouper en fonction du type d'onde et de modèle et donner uniquement les résultats ayant nourri notre réflexion. Nous présenterons tout d'abord les raisonnements mécanistes qui se manifestent pour la propagation d'ondes mécaniques (signaux transversaux sur une corde, son) et leur superposition. Nous nous intéresserons ensuite aux raisonnements utilisés dans des situations relevant de l'optique géométrique (propagation de la lumière, couleur des objets, formation des images) et de l'optique ondulatoire (interférences, diffraction, formation des images en éclairage cohérent).

Comme l'étude des interférences lumineuses fait appel à de nombreuses grandeurs physiques, il est vraisemblable que les élèves et étudiants rencontreront aussi des difficultés soulevées par cette multiplicité de grandeurs. C'est pourquoi nous mentionnerons également les travaux portant sur les difficultés soulevées par le raisonnement à plusieurs variables. De même, comme l'étude des interférences fait appel à de nombreux schémas, nous mentionnerons également les difficultés dégagées par la lecture des schémas en optique, en particulier ceux avec des rayons parallèles.

2. Ondes mécaniques

2.1. Propagation et superposition d'ondes sur des cordes

La première recherche sur les difficultés soulevées par l'étude des ondes qui se propagent sur une corde est celle réalisée par **Maurines (1986)**. Cette recherche a été menée

auprès de 700 élèves n'ayant pas reçu d'enseignement sur les ondes (classes de seconde, première scientifique et technique, terminale technique) et de 600 autres ayant reçu un enseignement sur les ondes (classes de terminale scientifique, trois premières années d'université scientifiques) à l'aide de questionnaires papier-crayon. Les résultats obtenus montrent que les élèves expliquent la propagation d'un signal sur une corde comme si la forme visible qui se déplace, "la bosse", était un *objet matériel* créé et mis en mouvement par la source (la main qui tient l'extrémité de la corde). Maurines interprète ces résultats en reprenant la notion de « *capital* » introduite par Viennot (1979) pour le mouvement d'un objet matériel et en l'adaptant au cas d'un signal. Ce *capital* est un concept hybride, mélange de force, de vitesse et d'énergie qui permet à la fois au signal d'exister et de se déplacer. Un raisonnement en termes de capital conduit les élèves et étudiants à :

- appliquer à la bosse qui se déplace une "mécanique" de l'objet matériel (la vitesse de propagation du signal dépend de la source et peut varier au cours du temps),
- établir une interdépendance entre le mouvement transversal d'un point du milieu et la vitesse de propagation, et donc à créer des liens entre les trois grandeurs physiques H amplitude du signal, V vitesse de propagation, T durée d'un signal. Ainsi les élèves peuvent déduire la vitesse de propagation du mouvement de la source et de l'amplitude du signal. Dans d'autres situations, ils peuvent relier la durée d'un signal à la vitesse de propagation : c'est ainsi que la durée d'un signal n'est pas conservée lors d'une transmission d'un milieu à un autre.

Par ailleurs, Maurines montre que les étudiants ne distinguent pas les deux types de descriptions possibles d'un phénomène de propagation (spatial ou temporel) et considèrent globalement la "forme" du signal : tout se passe comme si l'étendue spatiale du signal était nulle.

Par la suite, **Maurines (1991)** a exploré plus en détail les difficultés soulevées par le nombre élevé de variables à prendre en compte lors de l'étude de la propagation de signaux sur une corde. Si la thèse mettait l'accent sur la tendance des élèves et étudiants à utiliser un raisonnement mono-notionnel s'appuyant sur la notion de capital, et donc vers une pensée *globale et indifférenciée*, l'étude suivante confirme l'hypothèse faite sur la tendance à raisonner avec *un nombre restreint de concepts différenciés*. Face à des situations où interviennent des variables en nombre supérieur à deux, les étudiants établissent uniquement des associations entre variations de deux grandeurs physiques en ne se souciant pas des autres

et en transformant ainsi les lois étudiées en relations binaires. De plus, quand les étudiants font intervenir plusieurs grandeurs physiques, ils les associent deux par deux par l'intermédiaire de relations binaires qu'ils enchaînent. Ces difficultés liées au *raisonnement à plusieurs variables* ne sont pas spécifiques des ondes. Elles se rencontrent dans d'autres domaines, en particulier la thermodynamique comme l'a montré **Rozier (1988)**.

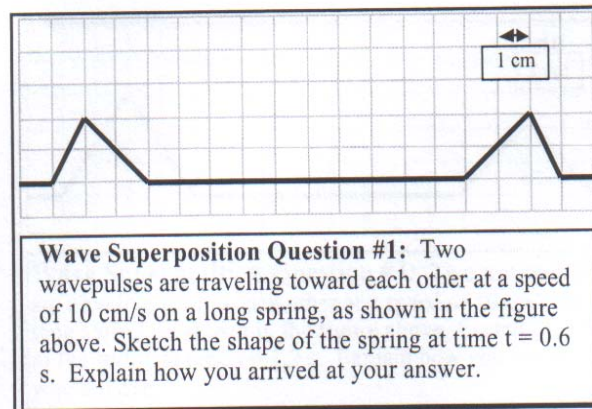
Partant de la constatation faite lors de son travail de thèse, que les élèves n'ayant pas eu d'enseignement sur les ondes, tendent à confondre un point d'une onde avec un point du milieu, en donnant une composante commune à leur mouvement, **Maurines (1995)** a exploré les difficultés liées au concept de phase d'une onde, dans le cas d'une onde se propageant sur une corde. Cette étude confirme les hypothèses faites concernant la tendance des étudiants vers une *pensée syncrétique* et la non-différenciation des concepts, notamment ceux de phase et d'amplitude d'une onde.

Les caractéristiques d'une pensée syncrétique et d'un raisonnement en termes d'objet matériel en mouvement se rencontrent dans l'étude menée à l'aide de questionnaires papier-crayon par **Abboud (1989)** au Liban auprès d'élèves et d'étudiants (N = 134) ayant reçu un enseignement sur les ondes de niveau secondaire et supérieur (18-19 ans). En effet, les élèves et les étudiants ne dissocient pas le mouvement d'un point de la corde et le mouvement de translation de la forme du signal (les élèves et les étudiants accordent aux points de la corde, non pas une vitesse transversale, mais une vitesse tangente à la corde), et deux signaux d'amplitudes différentes se propageant en sens contraire "rebondissent" au lieu de se croiser.

On retrouve que deux ébranlements ne peuvent passer l'un à travers l'autre dans les travaux de **Grayson et McDermott (1996)**, qui ont mené leur recherche d'une part à l'université de Washington à Seattle aux États Unis et d'autre part à l'université de Natal en Afrique du Sud. Les étudiants interrogés raisonnent également en termes de collision. L'enquête effectuée à l'université de Washington a porté sur la cinématique des éléments d'une corde dans des situations de propagation et de superposition d'ondes. Des interviews individuelles ont été réalisées avec des étudiants (N = 18) après apprentissage de la cinématique et des ondes.

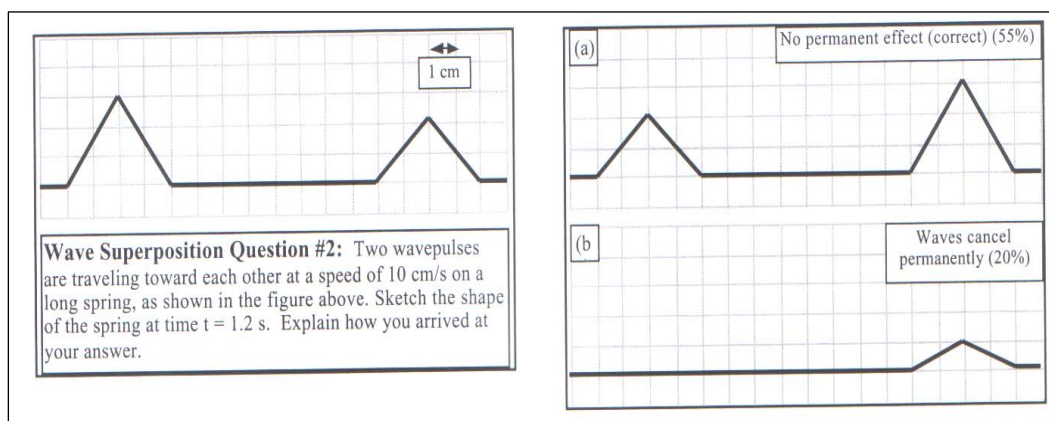
Wittmann (1998a, b) dans une étude conduite aux Etats-Unis à partir d'un double questionnaire (à questions ouvertes et à choix multiples) auprès d'étudiants (N = 92) avant et

après apprentissage des ondes a mis également en évidence un raisonnement en termes d'objet. Lorsqu'il s'agit de représenter une corde sur laquelle deux signaux de même amplitude se propagent l'un vers l'autre depuis chaque extrémité de la corde (Encadré 3), 40% des étudiants n'appliquent pas le principe de superposition des amplitudes lors du croisement et semblent se focaliser sur le sens de déplacement des signaux et non sur celui des points du milieu : l'amplitude du signal résultant n'est pas plus grande que celle des deux signaux, ceux-ci sont simplement tronqués comme s'ils s'annulaient partiellement.



Encadré 3. Situation proposée aux étudiants : représenter la forme de la corde à l'instant $t = 0.6$ s

Récemment, **Wittmann (2002)** a retrouvé dans des situations de superposition ce qui a déjà été évoqué à propos du lien établi par les étudiants entre la vitesse de propagation et l'amplitude du signal (Encadré 4). Lorsque les ébranlements sont d'amplitudes différentes, les élèves considèrent une annulation partielle de la grosse bosse par la petite. Il en résulte une petite bosse se déplaçant plus lentement dans le sens où allait la grosse bosse. Ces résultats ont été obtenus à partir de différents modes d'investigation (entretiens individuels filmés, questionnaires distribués en séances de TP et questions posées lors de contrôles de connaissances).



Encadré 4. Situation donnée aux étudiants suivie de leurs réponses

2.2. Propagation du son

Linder et Erickson (1989) ont étudié les représentations du son mises en jeu par dix étudiants canadiens de troisième cycle de physique et engagés dans un programme de formation de professeur. Quatre types de conceptions apparaissent. L'une correspond à une propagation, c'est-à-dire à une interaction entre une molécule et ses voisines. Les trois autres sont compatibles avec l'assimilation d'un son à un objet matériel, quelle que soit la description utilisée (microscopique centrée sur les particules du milieu matériel ou macroscopique centrée sur le signal ou l'onde qui se déplace) et la façon dont le milieu bouge (à petite ou grande échelle). Ils correspondent donc à un *raisonnement en termes de mouvement d'un objet matériel*.

Linder (1993) a prolongé l'étude précédente par une autre sur les conceptions des élèves sur les facteurs affectant la vitesse de propagation du son. L'échantillon interrogé est formé de 14 étudiants canadiens et sud-africains poursuivant un cycle de formation de professeur. Trois types de conceptions sont mis en évidence : certains étudiants établissent un lien entre la vitesse de propagation du son et la "taille" des molécules du milieu (plus les molécules sont de grande taille, plus elles freinent la propagation du son et plus la vitesse est faible) ; d'autres lient la vitesse à l'espace libre entre les molécules (plus cet espace est réduit, plus le son se propage vite) ; pour d'autres, il existe une proportionnalité entre la compressibilité du milieu et la vitesse de propagation du son. Il apparaît ainsi que les étudiants n'arrivent pas à discerner le nombre de grandeurs physiques qu'il faut prendre en compte simultanément. On retrouve ici les difficultés soulevées par *le raisonnement à plusieurs variables*.

Maurines (1992a) s'est également intéressée aux facteurs dont les élèves font dépendre la vitesse de propagation du son. Ses résultats rejoignent ceux de **Linder et Erickson** : on retrouve les tendances vers un raisonnement mécaniste et la réduction du nombre de variables qu'elle a dégagées pour la propagation d'un signal sur une corde.

Plus récemment, **Benhassoun (1998)** dans le cadre de son mémoire de DEA a mis en évidence des raisonnements en termes d'objet chez une trentaine d'élèves de classe terminale scientifique interrogés après un enseignement sur les ondes en Tunisie. Des tendances similaires sont retrouvées par **Wittmann et al (2003)** aux Etats-Unis.

3. Ondes lumineuses

3.1. Optique géométrique

Beaucoup de travaux existent sur les difficultés soulevées par l'étude de l'optique géométrique. Ils touchent une population allant de la maternelle à l'université. Comme l'étude des interférences lumineuses fait appel à des notions d'optique géométrique (réflexion, réfraction) et à des dispositifs tels que des miroirs, lentilles, lames minces, nous nous centrerons surtout sur les recherches ayant trait à ces thèmes. Comme notre recherche porte sur les difficultés rencontrées au niveau universitaire, nous nous intéresserons peu aux jeunes apprenants.

3.1.1. Vision

A partir d'entretiens réalisés auprès de collégiens (N = 12), **De Hosson (2005)** a trouvé que, pour expliquer spontanément le mécanisme de la vision, la moitié d'entre eux expliquent la vision d'un objet par l'envoi par l'œil de "quelque chose" désigné par les termes "vision", "regard" ou encore "radar". Trois d'entre eux disent que l'œil reçoit une "image" ou un "truc" de la part de l'objet. La lumière n'est spontanément évoquée que par un élève « *la vue c'est la lumière qui entre dans l'œil* ».

3.1.2. Propagation de la lumière

Kaminski (1989, 1991) a montré que la propagation rectiligne de la lumière et la nécessité de recevoir la lumière dans l'œil ne sont pas des lois contraignantes pour le raisonnement des enseignants de collège en formation continue (N = 36) et des étudiants en formation professionnelle technique (section de Technicien Supérieur d'arts appliqués) (N = 48). Beaucoup raisonnent comme si la lumière était elle-même un objet, visible d'un peu partout.

Des étudiants israéliens en formation initiale pour l'enseignement, interrogés par **Finegold et Smit (1993)**, considèrent la lumière comme une propagation de particules. Ces mêmes conceptions sont dégagées chez des élèves tchèques âgés de 15 ans par **Mechlova (1993)**.

Les concepts de faisceaux de lumière et rayons lumineux ne sont pas clairement distingués par 71 % des apprenants interrogés par **Perales Palacios et al (1989)** (étudiants en deuxième année de formation initiale pour l'enseignement espagnol). Il en est de même en Israël avec le travail de **Finegold et Smit (1993)**.

3.1.3. Couleur

En ce qui concerne la couleur, plusieurs chercheurs ont détecté différents types de conceptions. Au travers d'interviews réalisées auprès d'élèves âgés de 16 ans, **Reiner (1992)** a trouvé qu'il y a une tendance à assimiler couleur et matière. Ces mêmes résultats sont soulignés par **La Rosa et al (1984)**, **Bouwens (1987)** et **Chauvet (1994, 1996)**. Par ailleurs, cette dernière a souligné combien l'assimilation entre couleur et longueur d'onde réduit l'analyse des phénomènes de couleur chez de nombreux étudiants techniciens supérieurs d'arts plastiques (N = 60). De plus, pour eux,

**« la lumière colorée s'ajoute à la couleur naturelle de la matière, les lois du 'mélange' des couleurs s'assimilent à celles du mélange des pigments »*,

**« les lois de l'addition des lumières et les notions sur la perception ne sont pas ou peu connues² »* (Chauvet 1993, p. 5).

3.1.4. Réflexion et réfraction

Singh et Butler (1990) ont étudié les conceptions des étudiants de Nouvelle Zélande (15-19 ans, N = 35) sur la réflexion et la réfraction. Seulement deux étudiants mentionnent que la lumière en incidence normale est réfléchiée sur une interface et 14 d'entre eux donnent la relation sur les angles d'incidence et de réfraction. De plus, les étudiants tendent à considérer un seul processus à la fois, réflexion ou réfraction, pour schématiser toutes les possibilités des directions que pourrait avoir une onde incidente sur une interface plane. Cela est à rapprocher des résultats obtenus par **Galili et Hazan (2000, 2001)**. Pour 36 % des étudiants (N = 166), la lumière est déviée à la rencontre d'un prisme ou d'une lentille, et pour seulement 27 % elle est aussi réfléchiée avec un angle égal à celui d'incidence.

² La question posée aux étudiants est : « *Au cour d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. Qu'observe-t-on là où les faisceaux se superposent ?* ». La réponse correcte est « du jaune », donnée par 3 % des étudiants.

Pour beaucoup d'apprenants, le rôle de la lentille est souvent réduit au fait de "retourner, renverser ou déformer" une image et non de la former. Cette image est comprise comme voyageant en bloc de l'objet à l'écran, d'où l'idée d'un raisonnement en termes "d'image voyageuse" qui se déplace le long d'un système optique en se modifiant au fur et à mesure des obstacles rencontrés sur son trajet (**Fawaz et Viennot 1986 ; Kaminski 1989 ; Goldberg et Mc Dermott 1987 ; Galili 1996 ; Viennot 1996, 2000 ; Maurines 2000**). Ainsi dans le cas où on cache la moitié de la lentille faisant l'image d'un objet, 30 % (N = 166) d'étudiants interrogés par **Galili et Hazan (2000)** pensent qu'une moitié de l'image est observée alors que les autres penchent pour l'observation d'aucune image. Sur les schémas, un point objet et un point image ne sont reliés que par un rayon et non un faisceau de rayons.

Kaminski et Mistrioti (2000) ont exploité les résultats de questionnaires distribués à des élèves de collège ayant reçu un enseignement sur l'optique géométrique en 1985 (N = 24) et en 1992 (N = 93) pour les comparer et voir si les modifications effectuées dans le programme d'enseignement ont fait évoluer les conceptions des élèves. Parmi leurs résultats, on note que la moitié des élèves pensent qu'une image réelle ne peut pas être observée directement avec l'œil, c'est-à-dire sans le support matériel d'un écran.

Récemment, **Mistrioti (2003)** a montré que très peu d'étudiants expliquent la vision d'une image virtuelle de manière compatible avec le modèle des faisceaux de Kepler. Le but de sa recherche est d'analyser la place des lois de la réfraction et de la réflexion dans les raisonnements des étudiants de DEUG (N = 62). Pour cela, elle a réalisé des questionnaires pour lesquels elle a obtenu beaucoup de schémas mais peu d'explications. Suite à ce manque d'explications, elle a choisi, pour chaque question, deux schémas fournis par des étudiants de DEUG et elle a demandé à des étudiants de CAPES de les critiquer en donnant le plus possible de justifications. Elle a ainsi trouvé que les étudiants ne s'appuient pas sur les lois de Descartes, mais qu'ils se servent de la connaissance de la réponse brute et comparent les schémas-réponses proposés à ces résultats mémorisés. Plus précisément, elle a constaté que, pour des étudiants de DEUG, il est plus facile d'énoncer les lois de la réfraction que celles de la réflexion. Pour l'image d'un objet donnée par un dioptré plan, le taux de schémas est faible ; à peine 11 % (N = 30). Cependant, la majorité des étudiants du CAPES tracent des rayons qui respectent qualitativement les lois de la réfraction et de la réflexion, mais il y a une grande différence entre la réussite des étudiants à énoncer les lois de Descartes et les difficultés à faire les liens entre les rayons (réfractés ou réfléchis) et la formation d'image.

Ainsi, les étudiants savent tracer les rayons réfléchis et réfractés, mais ils ne s'en servent pas pour expliquer la formation d'une image.

3.2. Optique ondulatoire

Les travaux réalisés en didactique à propos de l'optique ondulatoire sont beaucoup moins nombreux que ceux portant sur l'optique géométrique. Ceux qui s'intéressent au phénomène des interférences lumineuses le sont encore moins. Néanmoins, les conceptions détectées pour d'autres phénomènes ondulatoires peuvent nous aider à avancer des hypothèses sur les difficultés des étudiants. Vu la diversité des modes d'investigation et des situations proposées, nous allons présenter ces travaux un par un afin d'en dégager les principales tendances de raisonnement des apprenants.

3.2.1. Travail de Lefèvre

Dans sa thèse, **Lefèvre (1988)** a effectué une étude exploratoire sur un échantillon d'environ 200 étudiants, au niveau de la 1^{ère} année universitaire, à l'aide d'interviews et de questionnaires écrits. Il a mis en évidence des tendances vers un *raisonnement de caractère mécaniste* : pour 61 % des étudiants interrogés par questionnaires, la grandeur physique caractéristique de la couleur de la lumière est la longueur d'onde alors que la réponse correcte est la fréquence (seulement 15 % des étudiants donnent cette réponse). Par ailleurs, il a noté une grande *imprécision* dans l'utilisation du vocabulaire d'optique sur les interviews effectuées : les étudiants *confondent* les phénomènes de dispersion avec ceux de diffusion et de diffraction³. Selon **Lefèvre**, les réponses correctes sont données le plus souvent lorsqu'elles correspondent aux situations habituelles d'apprentissage.

En ce qui concerne les interférences, il a noté trois problèmes : 50 % uniquement des étudiants associent la lumière à une onde lorsqu'elle donne lieu à des interférences (pour 9 %, la lumière est associée à des corpuscules, pour 11 % à la fois à une onde et à des corpuscules). Le taux de réponse est encore plus faible dans le cas de la lumière monochromatique, celle-ci correspond à une onde pour 33 % des étudiants, à des corpuscules pour 14 % et aux deux en même temps pour 19 %. Lorsqu'il s'agit d'affirmer ou de nier que la couleur d'une cerise est due au phénomène d'interférences lumineuses, 59 % des étudiants répondent correctement à

³ Cette confusion se retrouve aussi avec les phénomènes de diffraction et des interférences lumineuses, pour des élèves âgés de 14-16 ans interrogés par **Buotempo et al (1993)**.

savoir que ce n'est pas dû aux interférences. Pour 44 %, la couleur de la cerise dépend de la longueur d'onde de la lumière qui l'éclaire.

3.2.2. Travaux de Maurines

3.2.2.1. Les concepts de rayon et de surface d'onde

Maurines (1999a, 1999b) a analysé la manière dont les étudiants utilisent les concepts de "rayon" et de "surface d'onde" ainsi que le principe de Huygens-Fresnel qui permettent de décrire, d'expliquer et de représenter graphiquement des situations où une onde lumineuse se propage selon plusieurs directions dans diverses situations de propagation, de réflexion et de diffraction par une ouverture. Elle a montré que le raisonnement commun sur la propagation des ondes en dimension trois tend à *réduire* la complexité des phénomènes et des théories. En effet, d'une part les étudiants ne différencient pas clairement les concepts mis en jeu mais les amalgament ou les lient : il en est ainsi des concepts de phase et d'amplitude, de surface d'onde et de surface isoamplitude, de rayon et de surface d'onde. D'autre part, ils les utilisent de manière dissociée : la surface d'onde est associée au modèle ondulatoire et au son, et le rayon au modèle géométrique et à la lumière.

Par ailleurs, **Maurines** a souligné que la tendance vers cette analyse *réductrice* des phénomènes s'accompagne d'une tendance à *matérialiser* les concepts, c'est-à-dire à les appréhender au travers d'aspects immédiats et perceptifs des phénomènes ou en référence à l'idée d'objet matériel. En effet, comme les étudiants n'arrivent pas à distinguer le concept de phase de celui d'amplitude ou d'intensité de l'onde, ils raisonnent non pas sur une fonction de deux variables, la phase et l'amplitude, mais sur des grandeurs directement accessibles à l'observateur, l'intensité lumineuse. De plus, le concept de rayon est assimilé à celui de trajectoire de particules.

3.2.2.2. Le concept de phase et de surface d'onde

Dans son étude sur la phase d'une onde se propageant selon une direction et la surface d'onde, **Maurines (2003a, 2003b)** a proposé des questionnaires à 170 étudiants âgés de 17 à 19 ans ayant suivi un enseignement de niveau secondaire sur les ondes et à 380 étudiants âgés de 20 à 23 ans ayant suivi un enseignement de niveau supérieur. Elle a confirmé que, pour beaucoup d'étudiants le concept de phase d'une onde n'est pas dissocié de celui d'amplitude

du champ : la phase d'un point de l'onde varie dans le temps de la même façon que le champ, au lieu d'être constante, et diminue quand l'amplitude de l'onde diminue. Elargissant le domaine d'étude à des situations de propagation en dimension trois, elle a montré que les étudiants présentent des schémas où la position des franges d'interférences résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources ponctuelles monochromatiques cohérentes dépend de l'intensité des sources. Elle a montré ainsi, une fois de plus, que les étudiants ont une tendance à lier le concept de phase à celui d'amplitude, c'est-à-dire à *matérialiser les concepts*.

Il en est de même des tendances vers un *raisonnement mécaniste*. Elle a montré qu'un grand nombre d'étudiants considèrent la surface d'onde comme un objet matériel : la forme de la surface d'onde d'une onde progressive ne dépend pas de la vitesse de propagation (41 %) et de la source étendue qui est à l'origine de l'onde (63 %). De plus, la forme de la surface d'onde d'une onde incidente est conservée lors d'une réflexion ou d'une transmission d'un milieu à un autre. Par ailleurs, dans des situations de superposition d'ondes cohérentes, l'onde résultante n'a pas de surface d'onde et chaque onde élémentaire garde son identité propre pour 59 % des étudiants.

3.2.2.3. La diffraction par une ouverture

Dans son étude sur la façon dont les étudiants utilisent les concepts de "rayon" et de "surface d'onde" ainsi que le principe de Huygens-Fresnel pour décrire, expliquer et représenter graphiquement une onde lumineuse se propageant à travers une ouverture, **Maurines (1997, 1999a)** a montré l'existence de tendances vers un *raisonnement mécaniste* pour les ondes en dimension trois. Pour **Maurines**, tout se passe comme si les étudiants racontaient l'histoire au niveau macroscopique d'objets fictifs qui se déplacent le long de trajectoires-rayons énergétiquement indépendants : « *les étudiants expliquent la déviation de l'onde incidente en la suivant dans son déplacement lors de son passage à travers l'ouverture* » (Maurines 2001, p. 152). De plus, les justifications des étudiants « *ne font pas apparaître les termes "sources" et interférences* ». Ainsi, le raisonnement des étudiants n'est ni un raisonnement en termes de champ et de phase, ni un raisonnement basé sur le principe de superposition et les sources de Huygens. Les concepts de champ et de phase n'étant pas dissociés, les étudiants semblent raisonner sur les "objets" des théories géométriques (la "lumière") : « *Ils assimilent la diffraction aux phénomènes de dispersion, diffusion, réflexion, réfraction et la comparent à des situations d'optique géométrique "classique" dans lesquelles*

des lentilles sont utilisées » (idem.). Cependant, il existe une différence essentielle entre les "objets" que l'on peut introduire pour rendre compte du raisonnement des étudiants et ceux des théories géométriques. En effet, pour **Maurines**, tout se passe comme si les "objets" sur lesquels s'appuie le raisonnement des étudiants possédaient "quelque chose" leur permettant d'avancer, d'avoir une intensité, une "forme". Ce "quelque chose" peut varier lors de la propagation, ce qui se manifeste par un changement d'intensité ou/et de "forme" de l'onde, et ce qui entraîne la variation simultanée d'une ou de plusieurs autres caractéristiques de l'onde. **Maurines** a proposé de rendre compte du raisonnement des étudiants pour les ondes en dimension trois en reprenant la notion introduite pour les ondes en dimension un, celle de "capital". Cette notion qui amalgame nombre de concepts susceptibles d'intervenir dans une situation donnée, à savoir la phase, l'intensité, la vitesse de propagation, la fréquence, etc., entraîne la variation simultanée de plusieurs grandeurs physiques.

Poursuivant son étude sur la diffraction de la lumière par une ouverture, **Maurines (2000a, 2000b)** a montré que les schémas correspondant à la diffraction à l'infini sont difficiles à interpréter par les étudiants. Rares sont les étudiants pour qui l'onde localement plane qui se propage derrière l'ouverture dans une direction donnée provient de la superposition des ondes de Huygens : 38% des étudiants pensent que les lignes représentées après l'ouverture sont les rayons d'une onde plane mais ne font pas de lien avec les ondes de Huygens, 40% pensent que ces lignes ne sont pas ceux d'une onde plane mais uniquement ceux des ondes de Huygens (réponses obtenues à un questionnaire écrit passé à 79 étudiants dont 27 de premier cycle universitaire et les autres de CAPES).

3.2.2.4. La cohérence spatiale partielle

Comme les situations de cohérence partielle sont difficilement compatibles avec le raisonnement syncrétique des étudiants, puisqu'elles demandent d'élémentariser la source et de reconstruire l'onde en chaque point de l'espace à l'aide d'ondes élémentaires, **Maurines (2001a)** s'est intéressée aux interférences, et particulièrement au dispositif des fentes d'Young éclairé par une fente-source dont on fait varier la largeur. Cette étude a montré que, dans une situation "classique"⁴ d'enseignement, une moitié d'étudiants (N=28) justifient la question portant sur la raison de la disparition des franges en décomposant la source. A la question "classique" portant sur l'influence de la distance source-fentes d'Young sur la visibilité des

⁴ Nous parlons de situation « classique » quand elle est utilisée fréquemment dans les cours de physique.

franges, un nombre non négligeable d'étudiants considèrent que la distance de la source aux fentes d'Young n'a aucune influence sur la visibilité de la figure d'interférences alors qu'une moitié d'étudiants répondent correctement mais justifient la réponse de manière déclarative en disant uniquement que la source tend vers un point. A la question moins standard de l'influence de l'écartement des fentes, le nombre de non-réponses est élevé et le nombre de réponses fausses est non négligeable. Maurines a conclu en disant que seule une minorité d'étudiants prennent en compte le système dans son entier lors de l'étude de la cohérence spatiale. Pour la majorité d'entre eux, tout se passe comme si *la cohérence spatiale était la seule caractéristique de la source*.

3.2.3. Travaux de Colin et Viennot

Colin (1999) s'est intéressé à la formation d'image en présence d'interférences et a réalisé une enquête sur un ensemble de 120 étudiants après enseignement des interférences (71 de classes Mathématiques Spéciales Technologiques et les autres en licence). De ses résultats, il se dégage que les étudiants considèrent la formation des images et les interférences comme deux phénomènes incompatibles. En effet, à la question de savoir si une lentille donne l'image de quelque chose et, si oui, de quoi, dans une situation portant sur l'observation de franges d'interférences agrandies à l'aide d'une lentille, environ un tiers des étudiants ($N = 120$) répondent qu'elle ne donne pas d'image. Les justifications explicitent l'existence des interférences : « *ce n'est pas une image, c'est une interférence entre les ondes lumineuses cohérentes* » (op. cit. p.10). De plus, pour les étudiants, la lentille ne donne une image que d'un objet lumineux "matériel". En effet, environ un cinquième des étudiants ($N = 120$) répond à cette même question que la lentille donne une image et justifie leur réponse par l'intervention de sources lumineuses. **Colin** a noté ainsi que « *les seules présentes étant les sources S_1 et S_2 , les étudiants donnent la réponse type suivante "c'est l'image des sources ponctuelles S_1 et S_2 "* » et a souligné que « *certains vont même jusqu'à écrire "on observe l'image de l'objet AB" marquant leur souci de trouver une source "matérielle" là où il n'en existe pas* » (op. cit. p.9). Ces résultats rejoignent ceux obtenus par **Maurines** dans son étude sur la formation des images en présence de diffraction (**1999, 2000**). Ces deux phénomènes sont perçus également comme incompatibles par les étudiants et pour eux, un objet non matériel (un « trou » éclairé par une source) n'a pas d'image.

Colin s'est également intéressé à une expérience classique combinant deux situations, « *l'une typique d'optique ondulatoire –le dispositif des trous d'Young- l'autre typique de l'optique géométrique –la formation d'une image par une lentille mince convergente* » (ibid. p. 40). Il s'agit d'une part de « *construire les chemins suivis par la lumière après trois fentes d'Young pour atteindre un point M du plan focal image d'une lentille et, d'autre part, la possibilité, pour la lumière, de suivre ce trajet* ». **Colin** a mis en évidence des difficultés similaires à celles dégagées par **Maurines** pour la diffraction par une ouverture. Un grand nombre d'étudiants ont des difficultés à interpréter les lignes tracées derrière les trous d'Young : les "rayons" représentés sur leurs schémas semblent être le prolongement des rayons de l'onde plane incidente et ainsi correspondre aux rayons déviés de l'onde incidente.

3.2.4. Travaux d'Ambrose et al

Au cours d'une recherche effectuée à l'université de Washington à l'aide d'interviews et de questionnaires écrits, **Ambrose et al (1999a)** ont également trouvé que beaucoup des 46 étudiants interrogés après un enseignement sur les interférences et la diffraction ont des difficultés à concilier les phénomènes d'interférences et de diffraction dans le cas du dispositif des fentes d'Young. En effet, ils semblent assimiler la figure d'interférences à la superposition ou la juxtaposition de deux figures de diffraction, chacune correspondant au passage de la lumière par une fente. Quand il s'agit de prévoir ce qui se passe quand l'une des fentes est cachée, 45 % des étudiants (N = 200) répondent qu'une figure d'interférences est toujours observée : celle-ci est moins lumineuse, mais de même largeur (25 %) ou bien moins large et aussi lumineuse (20 %). Ceci est dû, selon les auteurs, à ce que les étudiants "*seemed to think that each slit alone must produce the same pattern. To account for the double-slit pattern, they were effectively adding intensities from the individual slits without regard to the phase difference of the light from the two slits. They were trying to apply ideas from geometrical optics to an interference phenomenon*". Nous retrouvons ici les difficultés à utiliser un modèle ondulatoire dans une situation ondulatoire mises en évidence par **Maurines** dans le cas de la diffraction par une fente.

De plus, **Ambrose et al** ont noté que, pour obtenir l'état d'interférences en un point donné, les étudiants ne font pas appel à la différence de phase des ondes au point d'observation et à leur amplitude, mais à la direction moyenne de propagation de la lumière et à la longueur du chemin suivi. Pour quelques étudiants, la différence de la longueur du chemin devient négligeable à des distances larges.

Par ailleurs, **Ambrose et al (1999a, b)** ont trouvé d'autres difficultés. Parmi les erreurs détectées, notons qu'une fente, quelle que soit sa largeur ou sa forme, peut donner lieu à la diffraction. De plus, pour 20 % des étudiants, les maximums de diffraction se resserrent quand nous diminuons la dimension des fentes. Enfin pour beaucoup d'étudiants (40 %, $N = 410$), il n'y a pas de lumière qui passe à travers une fente quand la largeur de celle-ci est inférieure à la longueur d'onde. Pour les étudiants, l'écran est totalement obscur car "*it's hard to put something that's big through something that's smaller than it is...the light has to bend in order to fit through*". Nous retrouvons le raisonnement en termes d'objet mis en évidence par **Maurines (1997)** à une question similaire.

3.2.5. Travail de Wosilait et al

Dans leur travail de recherche, **Wosilait et al (1999)** ont distribué des photos de franges d'interférences lumineuses à 600 étudiants de l'université de Washington et leur ont demandé de prédire ce qui se passe sur l'écran quand une fente est cachée. Ils obtiennent des résultats similaires à ceux d'Ambrose et al : la moitié des étudiants répondent que la figure d'interférences demeure mais uniquement en partie (« *la partie gauche de la figure demeure* »). Concernant la distinction entre optique géométrique et optique physique, pour les fentes d'Young, 45 % des étudiants utilisent un « *modèle hybride* ».

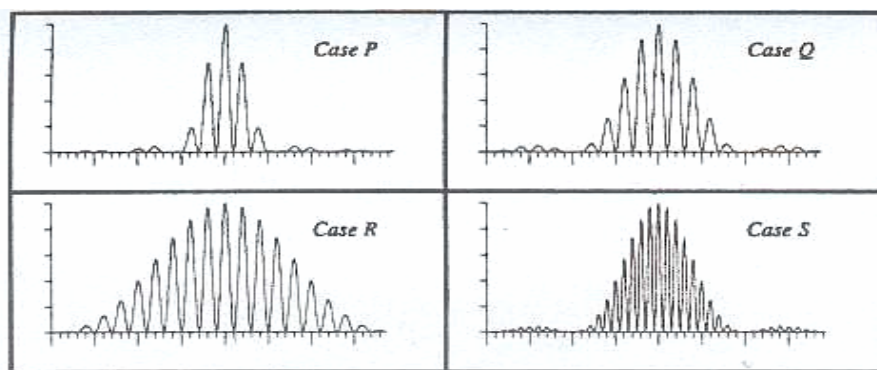
Concernant les caractéristiques du système optique pour obtenir une figure d'interférences donnée, ces auteurs ont montré à 205 étudiants deux photos d'interférences, la première étant une figure « classique » d'interférences, la deuxième comportant des minimums et des maximums plus éloignés les uns des autres que dans la première⁵. Ils leur ont demandé de dire quelle est la grandeur responsable de cette différence. Seuls 25 % des étudiants reconnaissent qu'une diminution de la distance entre les fentes provoquent une augmentation de la distance entre les maximums. Pour 30 % des étudiants, c'est l'augmentation de la distance entre les fentes qui cause ce changement de la figure.

Une deuxième question porte sur la figure d'interférences produites par deux fentes lorsque la distance entre les fentes varie. Plus précisément, il s'agit de dire ce que devient l'état d'interférences en deux points, le premier *A* se situant initialement au niveau d'une frange brillante et le second *B* au niveau d'une frange sombre. 70 % des étudiants interrogés

⁵ « *In the second, the maxima and minima are farther apart than in the first* » (idem.).

($N = 570$) répondent correctement pour le point A (quelle que soit la distance entre les fentes, le point A se situe toujours au niveau d'une frange brillante) alors que pour le point B , ils ne sont plus que 30 % (lorsque la distance entre les fentes est un nombre entier de longueur d'onde, le point B se situe au niveau d'une frange brillante et si la distance est un nombre demi entier de λ , B se trouve au niveau d'une frange sombre). Ils ont des difficultés à raisonner en terme de superposition des interférences lumineuses : quelque soit la distance, pour eux, le point B se trouve toujours au niveau d'une frange sombre.

Par ailleurs, **Wosilait et al** ont voulu savoir si les étudiants arrivent à différencier le phénomène d'interférences de celui de diffraction sur la figure d'interférences produite par les fentes d'Young en s'intéressant à l'effet de la variation de la distance entre les fentes d et à celui de la largeur des fentes a . Ils ont distribué aux étudiants des graphes donnant la variation de l'intensité en fonction de la différence de marche (Encadré 5) et ils leur ont demandé de les classer suivant la largeur de la fente et l'écartement des fentes. Les résultats obtenus en pré-test ($N = 365$, Tableau 1) indiquent des difficultés à établir des relations correctes entre la largeur des fentes et la largeur de la tache de diffraction (première ligne) et entre la distance source-écran et l'interfrange (deuxième ligne). Ils montrent aussi que moins de la moitié des étudiants savent trouver sur le graphe les informations relatives au phénomène de diffraction (il faut s'intéresser à la distance couverte par les pics) et au phénomène d'interférences (il faut s'intéresser à la distance entre les pics).



Encadré 5. Variation de l'intensité en fonction de la différence de marche

Tableau 1. Réponses des étudiants interrogés

| Réponse correcte | Pré-test N = 365 | Post-test N = 330 |
|------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Largeur : $a_P > a_Q = a_S > a_R$ | 55 % | 85 % |
| Distance : $d_S > d_P = d_Q = d_R$ | 45 % | 80 % |
| Les deux | 40 % | 75 % |

4. Conclusion partielle

En guise de conclusion, nous retenons que :

- En ce qui concerne le modèle ondulatoire, les étudiants utilisent une règle d'addition des intensités, ne différencient pas la phase et l'amplitude d'une onde, ne décomposent pas l'onde incidente en ondes élémentaires mais la suivent tout en la modifiant.

- En ce qui concerne la **superposition des ondes**, les étudiants considèrent les signaux mécaniques comme des objets, il y a ou bien une collision de ces objets ou bien un croisement suivi d'une transformation de ces objets. Dans le cas des ondes lumineuses incohérentes (le cas de deux faisceaux de couleurs différentes), les étudiants considèrent que les ondes se croisent en se transformant. Dans le cas des ondes lumineuses **cohérentes** et avec le dispositif des fentes/trous d'Young, ils ne différencient pas la diffraction et les interférences. Ils ont des difficultés à relier les caractéristiques de la figure d'interférences et celles du dispositif interférentiel. De plus, pour eux, l'état d'interférences en un point donné du champ d'interférences dépend d'une direction moyenne et non du déphasage entre deux ondes,

- En ce qui concerne le **trajet** de la lumière et la **formation d'image**, les étudiants ne font pas de liens entre les rayons et les images, n'envisagent pas l'existence simultanée de la réflexion et de la réfraction partielle à un dioptre et utilisent un raisonnement en termes d'image voyageuse. De plus, pour eux, il n'existe pas d'image en présence de diffraction ou d'interférences,

- En ce qui concerne le raisonnement à **plusieurs variables**, les étudiants ne différencient pas les descriptions temporelle et spatiale ainsi que les concepts (tendance à un raisonnement mono-notionnel en termes de capital, confusion phase-amplitude) ou se centrent sur un seul aspect de la situation en privilégiant les aspects perceptifs,

- En ce qui concerne les **schémas à rayons parallèles derrière une ouverture**, les étudiants les interprètent comme ceux de l'onde plane incidente déviée.

Terminons en disant qu'il existe aussi des confusions de vocabulaire et des tendances vers un raisonnement mécaniste dans le cas de la propagation (la vitesse de propagation de l'onde n'est pas une constante et l'onde est caractérisée par une grandeur spatiale, sa longueur d'onde).

PROBLEMATIQUE

Nous avons commencé à nous intéresser aux difficultés soulevées par l'étude de l'optique ondulatoire lors de notre DEA en 2001. Ce choix était justifié par le fait qu'il existait à l'époque peu de travaux en didactique sur ce domaine de la physique. Nous avons décidé de débiter notre recherche en nous centrant sur le concept de déphasage, car c'est un concept fondamental pour l'étude des situations nécessitant l'utilisation de l'optique ondulatoire (interférences et diffraction). Si les difficultés soulevées par le concept de phase d'une onde avaient été analysées par Maurines (1995, 2003), celles soulevées par le concept de déphasage ne l'avaient quasiment pas été. Nous avons commencé une analyse de contenu comportant trois volets (une analyse de la physique, de l'histoire du concept de déphasage et d'un cours d'optique ondulatoire) et avons réalisé une mini-enquête pour le mémoire de DEA auprès d'étudiants tunisiens ayant reçu un enseignement sur les interférences lumineuses (Romdhane, 2001). Il est en effet indispensable de connaître les difficultés des étudiants pour définir des situations d'enseignement dans le cadre d'une perspective constructiviste de l'apprentissage.

Les étudiants avaient à s'interroger sur le déphasage entre deux ondes dans des situations de propagation et dans des situations d'interférences. Dans le premier cas, il s'agissait essentiellement de voir si, pour eux, le déphasage entre deux ondes lumineuses en un point donné de l'espace dépend de la vitesse de propagation (une onde se propageant dans l'air et l'autre dans une lame de verre par exemple). Dans le deuxième cas, il s'agissait notamment de voir si le déphasage entre deux ondes lumineuses en un point donné de l'espace dépend de la position des deux sources secondaires et de la position de la source primaire.

Les réponses à la question portant sur le lien entre le déphasage et la vitesse de propagation de la lumière ont pu être exploitées. Nos résultats sont similaires à ceux obtenus par Maurines pour la propagation de signaux mécaniques visibles ou non (1986, 1992). Les étudiants ont des problèmes à identifier les invariants fondamentaux et ont tendance à privilégier le concept d'intensité et d'amplitude. Ainsi, dans leur raisonnement, les étudiants ne tiennent pas compte de la variation de la longueur d'onde avec les différents milieux. En contrepartie, ils ne construisent pas la période –ou la fréquence– comme invariant caractéristique des phénomènes ondulatoires. Parallèlement à cette mauvaise appropriation des relations fondamentales de l'optique ondulatoire, nous rencontrons fréquemment une

réponse en termes de conception « dissipative ». Les étudiants, en effet, utilisent préférentiellement l'intensité –ou l'amplitude- pour décrire ce qui se passe dans un milieu translucide autre que l'air. Comme les invariants fondamentaux ne sont pas identifiés par les étudiants et comme, pour eux, tout varie dans la relation, alors celle-ci ne peut être correctement utilisée. Perdant de ce fait ses propriétés opératoires, elle ne permet pas de construire correctement les concepts physiques comme concepts opérationnels.

Comme les réponses obtenues aux questions portant sur les situations d'interférences n'ont pu être exploitées car elles n'étaient pas assez nombreuses et explicites, nous avons décidé de centrer notre travail de thèse sur les interférences lumineuses. Ce thème ayant été peu exploré sur le plan de la didactique, nous avons choisi de nous restreindre aux situations d'interférences à deux ondes. Comme l'étude du phénomène des interférences lumineuses s'accompagne inévitablement d'une recherche des conditions de leur obtention, nous avons consacré une grande part de notre travail à cette question ainsi qu'à celle de leur interprétation, autrement dit à la question de la cohérence de la lumière. Comme il existait deux études sur les interférences produites par le dispositif des fentes d'Young éclairé en lumière monochromatique (Ambrose et al, Wosilait et al), nous avons voulu élargir le domaine d'investigation à d'autres dispositifs interférentiels et d'autres types d'éclairage. Nous nous sommes ainsi intéressée aux miroirs de Fresnel et aux lames minces, et aux interférences en éclairage partiellement cohérent (ondes quasi-monochromatiques ou dont le spectre comporte deux radiations, deux sources ponctuelles ou étendues). Comme les recherches en didactique montrent l'existence de difficultés liées à la formation d'image par une lentille en présence d'interférences et de diffraction, nous avons choisi des situations expérimentales dans lesquels les interférences sont observées par l'œil soit directement, soit uniquement à l'aide d'un écran.

Nous avons cherché à dégager et à analyser les difficultés rencontrées par les étudiants lors de l'étude des interférences lumineuses dans l'enseignement supérieur. Nous nous sommes intéressée aux principales difficultés qu'un enseignant pourrait observer dans sa classe et non à celles d'un étudiant en particulier. Nous n'avons pas voulu réaliser une évaluation de l'enseignement reçu par les étudiants. Nous nous sommes attachée à montrer que les erreurs commises dans une situation donnée sont la manifestation de tendances typées de raisonnement qui se manifestent transversalement à ces situations. Nous avons cherché à établir un modèle de raisonnement, c'est-à-dire une description cohérente et organisée, et de

ce fait aussi prédictive, des principales tendances observées. Nous faisons l'hypothèse qu'un étudiant ne se conformera pas nécessairement à tout le modèle mais qu'à un moment ou à un autre, il mettra en œuvre une tendance de raisonnement que ce modèle décrit.

Ayant réalisé l'étude expérimentale auprès d'étudiants ayant reçu un enseignement sur les interférences lumineuses, nous supposons que nous mettons en évidence des tendances de raisonnement « spontané », c'est-à-dire non appris en tant que tel, et d'autres induites par l'enseignement. Maurines (2001) ayant mis en évidence des tendances transversales de raisonnement dans le domaine des ondes, notamment pour la diffraction de la lumière, nous supposons que celles-ci se manifesteront aussi pour les interférences lumineuses.

Pour que notre travail puisse bénéficier aussi bien à l'enseignement français qu'à l'enseignement tunisien, nous avons interrogé deux populations, une française et une tunisienne. Ce choix nous a obligée à réaliser deux études en parallèles, une portant sur l'enseignement tunisien et les étudiants tunisiens, l'autre portant sur l'enseignement français et les étudiants français. Cette double étude a des inconvénients mais aussi un avantage, elle permet de juger de la nature d'une difficulté. Ainsi, lorsqu'un programme d'enseignement met l'accent sur un point particulier et que les étudiants ayant suivi ce programme commettent autant d'erreurs que ceux qui ne l'ont pas suivi, nous pouvons supposer que la difficulté mise en évidence est bien la manifestation d'une tendance forte de raisonnement « spontané ».

Les travaux en didactique ayant montré que les étudiants rencontrent aujourd'hui des difficultés similaires à celles rencontrées par les scientifiques autrefois, nous supposons qu'il en est de même dans le domaine des interférences lumineuses.

Afin de vérifier ces hypothèses, nous avons construit un cadre de référence auquel comparer les réponses des étudiants. Nous avons ainsi réalisé une analyse de la physique des interférences lumineuses, de l'histoire des interférences lumineuses et des programmes et manuels d'enseignement. Cette étude du savoir savant a été commencée avant toute enquête, poursuivie pendant et affinée après.

PARTIE 2

ANALYSE DE CONTENU : POINT DE VUE SCIENTIFIQUE ET HISTORIQUE ET REGARD SUR LES MANUELS D'ENSEIGNEMENT

Chapitre 1

PHYSIQUE DES INTERFERENCES

LUMINEUSES

1. Introduction

En cherchant dans le dictionnaire *Le petit Robert 1* (1982) la définition première des interférences, nous avons relevé ces citations :

« ***INTERFÉRENCE**. *n.f.* (1793 ; angl. *interference*. *V. Interférer*). ♦1° *Phys.* (1842). *Phénomène résultant de la superposition de deux vibrations de même longueur d'onde, lorsque celles-ci sont en phase ou en opposition de phase. Interférence des rayons lumineux, des ondes sonores. Franges d'interférence.* ♦2° (*déb. xx^e*). *Intervention contradictoire, conjonction de faits. Interférence des phénomènes politiques et économiques.*

***INTERFÉRER**. *v. intr.* ; *conjug. céder* (1833 ; angl. *interfere*, du lat. *inter* « entre », et *ferire* « frapper » ; Cf. *Férrir*) ♦1° *Phys.* *Produire des interférences.* ♦2° *Fig.* (1902). *Se dit d'actions simultanées qui se font tort⁶ Leurs initiatives risquent d'interférer* » (op. cit. p. 1020).

Nous remarquons que ces définitions renvoient dans le langage courant à deux idées principales à savoir celle d'actions simultanées ("*superposition*", "*conjonction*") et celle d'interactions qui se font tort ("*contradictaires*"). Pour ce qui concerne la physique, elles soulèvent plusieurs questions. Tout d'abord, elles ne précisent pas le phénomène observé, ensuite elles correspondent seulement au cas particulier d'ondes en phase ou en opposition de phase, par ailleurs elles ne différencient pas les interférences sonores des interférences lumineuses en précisant que les interférences lumineuses s'obtiennent dans des conditions particulières, enfin la première utilise un terme erroné en parlant d'interférence de rayons.

La présentation et l'interprétation du phénomène d'interférences lumineuses présentées dans de nombreux manuels suscitent elles-aussi un certain nombre d'interrogations (voir plus loin). C'est pourquoi nous allons préciser dans ce qui suit ce qui est notre cadre de référence sur la physique des interférences lumineuses avant de continuer à présenter comment nous avons défini et réalisé notre recherche sur les conceptions et raisonnements de sens commun dans ce domaine. Il est à noter que la définition d'un cadre de référence en physique est nécessaire à plusieurs titres : il nous permettra de définir des points délicats à explorer, d'analyser les réponses des étudiants, de dégager des méthodes utilisées par les manuels susceptibles de soulever des difficultés, d'analyser l'histoire des interférences lumineuses. Lors de la définition de ce cadre de référence, nous avons dû expliciter certains points délicats

⁶ C'est nous qui soulignons les mots.

(tels que les conditions d'obtention des interférences lumineuses mais aussi les liens entre les différentes grandeurs physiques mises en jeu) et clarifier certains concepts (tels celui de cohérence).

Les interférences peuvent être étudiées à différents niveaux d'enseignement suivant différents niveaux de formulation. Comme notre étude expérimentale porte sur des étudiants ayant suivi un enseignement sur les interférences équivalent à celui dispensé en deuxième ou troisième année de l'enseignement supérieur français, nous nous situons à ce niveau. Nous nous contentons d'une étude basée sur le modèle scalaire de la lumière et le modèle semi-classique de l'émission lumineuse (nous n'aborderons ni le modèle vectoriel de la lumière, ni le modèle quantique de l'émission lumineuse). Nous nous restreignons aux interférences à deux ondes.

Nous avons choisi de présenter tout d'abord les faits expérimentaux associés au phénomène d'interférences puis les concepts et principes permettant de les interpréter.

Dans la première partie, après avoir défini le phénomène des interférences, nous précisons les conditions d'obtention du phénomène et poursuivons par la présentation des différents dispositifs interférentiels à division du front d'onde et à division d'amplitude permettant de les produire. Nous présentons ensuite les caractéristiques des franges d'interférences (forme des franges, interfrange, contraste, localisation et largeur du champ d'interférences) et examinons le cas des franges produites par une source monochromatique étendue puis le cas des franges produites par une source ponctuelle non monochromatique.

Dans la deuxième partie, nous interprétons le phénomène d'interférences grâce au modèle ondulatoire scalaire de la lumière et en tenant compte du temps de réponse du récepteur.

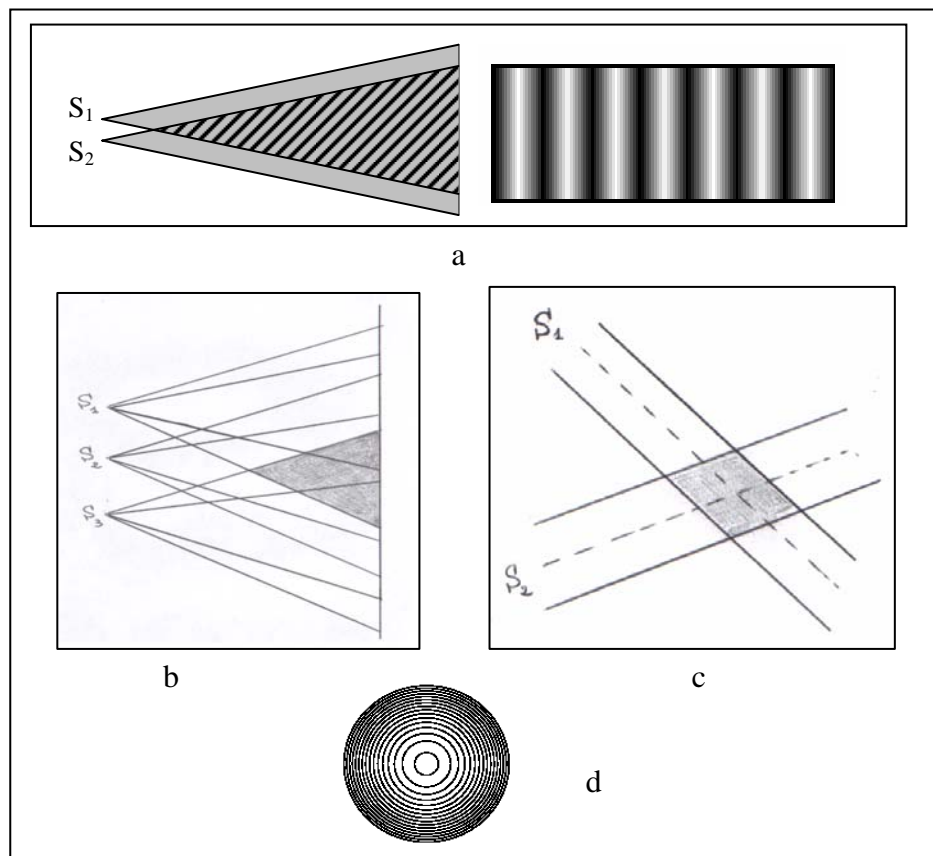
Dans la troisième partie, nous étudions les conditions d'obtention des interférences sous l'angle de la cohérence temporelle, par l'intermédiaire des modèles des trains d'ondes et spectral, et de la cohérence spatiale, par l'intermédiaire du concept de largeur de cohérence. Nous terminons en donnant une approche générale de la cohérence spatio-temporelle.

La définition de ce cadre de référence en physique fait appel à de nombreux schémas concernant aussi bien le phénomène en tant que tel (franges observées, dispositifs) que son interprétation. Nous avons repris les schémas des manuels qui correspondaient à ceux que nous aurions pu donner et nous avons fait ceux que nous n'avons pas trouvés.

2. Les interférences lumineuses : Phénomène et dispositifs

2.1. Définition du phénomène d'interférences

La définition que nous proposons des interférences est une définition « expérimentale » liée à l'observation. D'une manière générale, on observe une figure dite "d'interférences" lorsqu'il existe des franges alternativement sombres et brillantes (ou claires) dans la zone commune à deux faisceaux lumineux (Encadré 6a). On dit que les franges brillantes correspondent à des interférences constructives et les franges sombres à des interférences destructives. La région de l'espace où des franges d'interférences peuvent être observées est appelée "champ d'interférence". Il est à noter qu'il peut exister des franges d'interférences dans la zone commune à plus de deux faisceaux lumineux (Encadré 6b), que ces faisceaux peuvent être parallèles (Encadré 6c) ou non, que les franges peuvent avoir une forme quelconque (Encadré 6d).



Encadré 6. Franges d'interférences dans la zone commune à deux (ou plus) faisceaux lumineux

Il est également à signaler que la définition proposée se réfère à l'observation d'interférences en lumière quasi-monochromatique. Dans le cas d'une lumière blanche, les

franges claires sont colorées et présentent en général une périodicité. Le point important c'est qu'elles diffèrent du spectre de la lumière blanche.

Il est enfin à remarquer que la définition proposée ne rend pas compte du cas très particulier de la teinte prise par une lame mince lorsqu'elle est éclairée en lumière monochromatique sous un angle d'incidence unique, couleur ayant la propriété de changer avec l'angle d'incidence de la lumière.

2.2. Conditions d'obtention

D'une façon générale, deux faisceaux quelconques de lumière ne donnent pas d'interférences. Nous dirons que les faisceaux sont cohérents lorsqu'ils peuvent donner lieu à des interférences. Ils sont incohérents sinon.

Deux faisceaux cohérents peuvent être fournis par deux sources ponctuelles (qu'elles soient à distance finie ou à l'infini) de fréquences identiques (nous dirons que les sources sont synchrones). En général, deux sources quelconques de lumière ne peuvent pas donner lieu à des interférences ; elles doivent être produites à partir d'une source primaire de lumière de petite dimension par un dispositif interférentiel. Ce n'est que très récemment que des interférences ont pu être observées par deux lasers indépendants (Hecht 2002). Nous dirons également que deux sources qui peuvent produire des interférences sont cohérentes.

Notons que nous avons choisi de donner une définition « expérimentale » de la cohérence et de nous intéresser en premier lieu aux faisceaux et non aux sources car comme nous le verrons plus loin, la cohérence de la lumière évolue au cours de la propagation de la source au récepteur. Elle ne dépend pas uniquement des sources.

2.3. Dispositifs interférentiels éclairés par une source quasi-monochromatique ponctuelle

Il existe différents dispositifs permettant de produire des faisceaux cohérents. Nous distinguons deux catégories de dispositifs interférentiels : les dispositifs à division du front d'onde et les dispositifs à division d'amplitude.

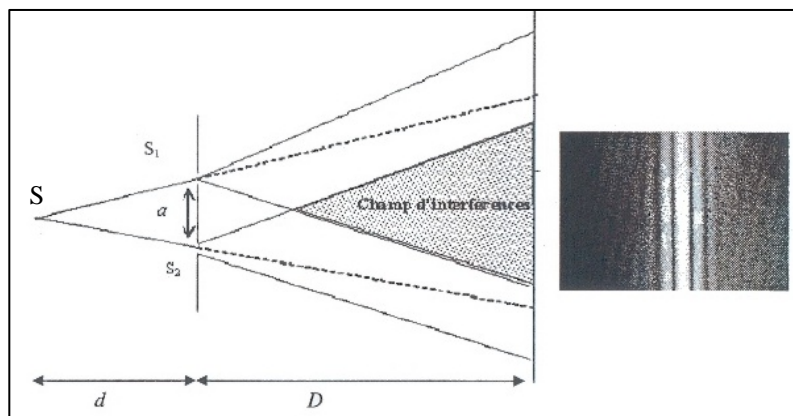
2.3.1. Dispositifs à division du front d'onde

Il existe un dispositif mettant en jeu le phénomène de diffraction, le dispositif d'Young, et d'autres dispositifs mettant en jeu les phénomènes de réflexion (Miroirs de Fresnel, Miroir de Lloyd) ou de réfraction (Biprismes de Fresnel, Bilentilles de Meslin...).

2.3.1.1. Dispositif d'Young

Le dispositif d'Young consiste en deux fentes (ou deux trous) S_1 et S_2 , percées dans un écran placé devant une source lumineuse S , située à une distance d des fentes. Les fentes étant suffisamment fines (ou les trous suffisamment petits), la diffraction⁷ de la lumière ne peut être négligée. La lumière est déviée au passage des fentes (ou des trous) si bien qu'il existe une zone commune aux deux faisceaux lumineux issus de ces fentes (ou de ces trous). Les franges obtenues ont la forme d'hyperboloïdes de foyer les sources secondaires.

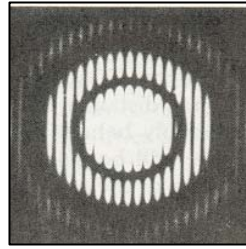
Si nous plaçons un écran⁸ D parallèlement aux deux sources S_1 et S_2 , la figure d'interférences consiste en une série de franges alternativement sombres et brillantes modulées par la figure de diffraction d'une fente ou d'un trou. L'encadré 7 correspond au dispositif d'Young éclairé par une source ponctuelle.



Encadré 7. Dispositif des fentes d'Young en présence d'une source ponctuelle : franges d'interférences

⁷ Il existe un phénomène de diffraction lorsque la déviation de la lumière ne peut être expliquée ni par la réflexion, ni par la réfraction. Le principe de Huygens-Fresnel permet d'interpréter la diffraction d'une onde par une ouverture Σ de forme quelconque. Il concilie le principe d'Huygens (chaque point de l'ouverture peut être considéré comme une source secondaire émettant une ondelette) et le principe de superposition des ondes (L'amplitude complexe de l'onde au point d'observation P est la somme des amplitudes complexes des ondelettes émises par toutes les sources secondaires).

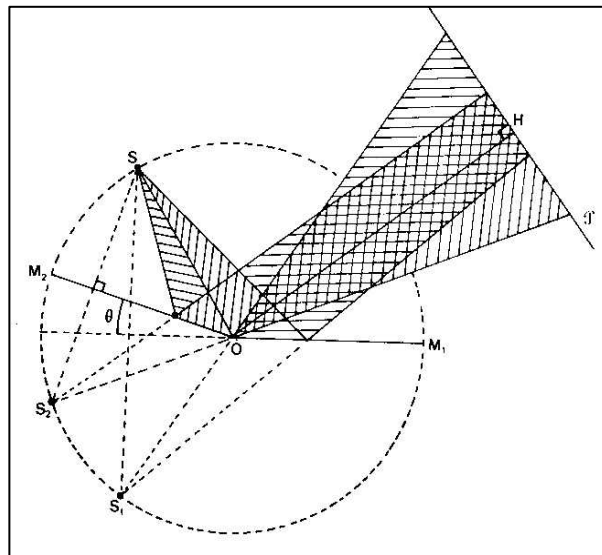
⁸ Dans tout ce qui suit, nous supposons l'écran « loin » des sources secondaires (la distance entre les sources est très grande devant la distance sources-écran).



Encadré 7bis. Franges d'interférences pour le dispositif des trous d'Young en présence d'une source ponctuelle

2.3.1.2. Miroirs de Fresnel

Les miroirs de Fresnel comportent deux miroirs plans, M_1 et M_2 , d'arête commune perpendiculaire au plan de la figure, et faisant entre eux un petit angle θ (Encadré 8).



Encadré 8. Miroirs de Fresnel (Provost et Provost 1980, p. 85)

Un faisceau incident, issu de S , fournit deux faisceaux réfléchis provenant des images virtuelles S_1 et S_2 respectivement symétriques de S par rapport à M_1 et M_2 . Nous pouvons observer des interférences dans la région commune aux deux faisceaux. Là encore, les franges obtenues ont la forme d'hyperboloïdes de foyers les sources secondaires et la figure observée sur un écran parallèle à la ligne des sources secondaires est constituée de franges rectilignes perpendiculaires à la ligne des sources.

2.3.2. Dispositifs à division d'amplitude

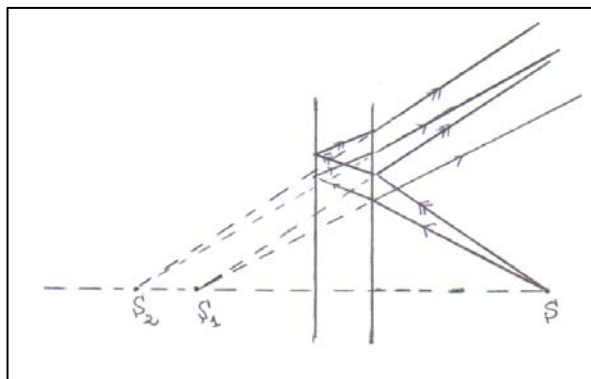
Le principe consiste ici à faire passer le faisceau lumineux dans une lame qui laisse passer un certain pourcentage de lumière et réfléchit le reste au niveau de chaque face. Nous disposons ainsi de deux fronts d'ondes secondaires, réfléchis ou transmis, obtenus à partir du même front d'onde incident, que nous pouvons faire interférer dans une région de notre choix au moyen de miroirs par exemple. Notons que nous pouvons nous ramener à ce que nous avons vu auparavant, à savoir la production d'interférences à partir de deux sources. Ces sources sont ici les images de S par réflexion ou par transmission⁹ sur les deux dioptries.

L'idéal est d'avoir une lame de coefficients de transmission et de réflexion égaux à 50%. Si la lame n'est pas traitée, les franges d'interférences par réflexion sont plus contrastées que celles par transmission. Signalons que les phénomènes par réflexion et par transmission sont complémentaires : les franges brillantes et sombres sont inversées.

2.3.2.1. Lame à faces parallèles

Étudions de plus près le cas d'une lame d'épaisseur constante e , d'indice n , éclairée par une source lumineuse S ponctuelle monochromatique.

Nous observons le phénomène lumineux par réflexion ou par transmission. Les faisceaux réfléchis par les deux faces semblent provenir des images de S données par chaque face (Encadré 9a). Dans un plan parallèle à la lame, c'est à dire un plan perpendiculaire à la ligne des sources secondaires, nous pouvons voir des anneaux circulaires concentriques et dans un plan perpendiculaire à la lame, c'est à dire parallèle à la ligne des sources secondaires, nous pouvons voir des franges rectilignes.

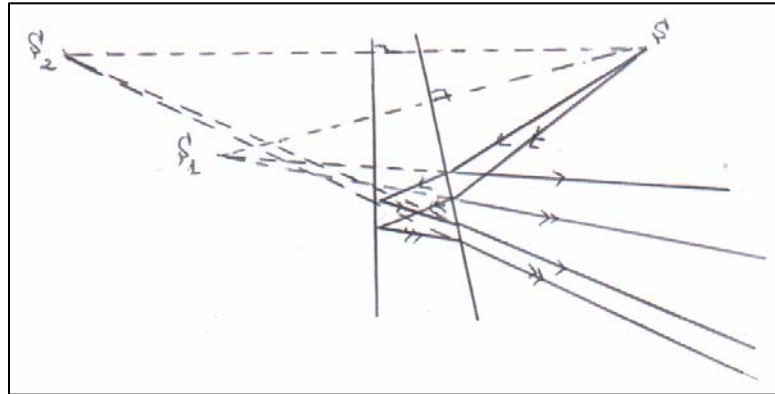


Encadré 9. Observation d'anneaux avec une lame à faces parallèles

⁹ Il est à noter que dans le cas de la transmission, nous pouvons aussi parler d'image car le récepteur (l'œil par exemple) limite l'ouverture du faisceau lumineux : il y a stigmatisme approché.

2.3.2.2. lame à faces non parallèles

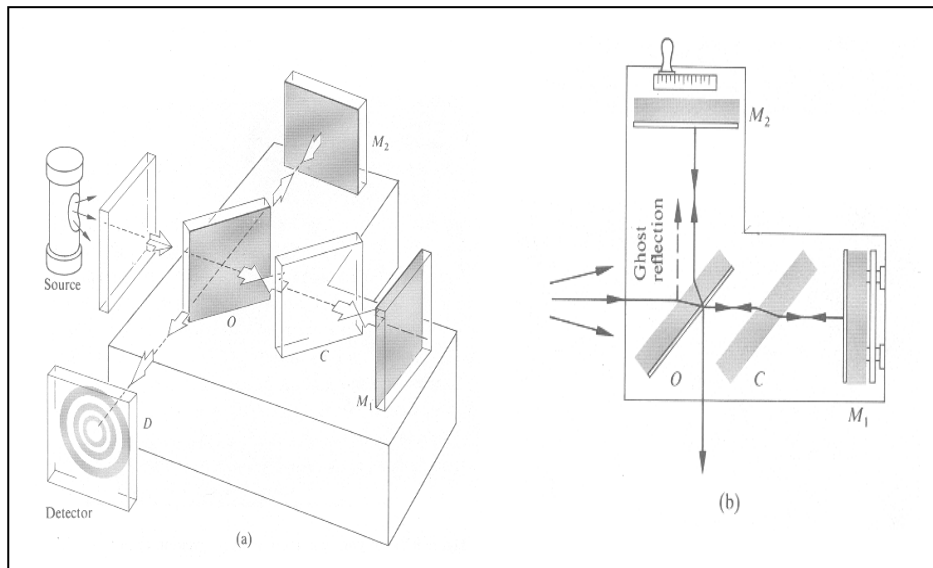
Quand les faces des lames ne sont pas parallèles (Encadré 10), nous pouvons également observer des interférences par réflexion ou par transmission. Les faisceaux réfléchis par les deux faces semblent également provenir des images de S données par chaque face. Mais selon la position de l'écran, nous observons des franges rectilignes, circulaires ou de forme quelconque.



Encadré 10. Interférences par une lame à faces non parallèles

2.3.2.3. Interféromètre de Michelson

C'est un interféromètre par division d'amplitude (Encadré 11). La lame semi-réfléchissante O , divise l'onde en deux. Ces deux ondes sont réfléchies par M_1 et M_2 et retournent vers la lame O . Une partie de l'onde venant de M_2 est transmise à travers O vers le détecteur, une partie de l'onde venant de M_1 est réfléchi par O vers le détecteur. Ainsi les deux ondes sont recombinaées et nous pouvons nous attendre à des interférences. Notons que l'un des faisceaux traverse trois fois la lame O , alors que l'autre seulement une fois. Comme son nom l'indique, la compensatrice C est introduite dans le dispositif de telle sorte que les deux faisceaux traversent la même épaisseur de verre. Suivant la position des miroirs, nous pouvons faire parcourir à chacun des faisceaux un trajet différent avant la superposition. Cette différence de trajet -ou différence de marche- va entraîner une différence de phase entre les ondes lumineuses, qui selon sa valeur, conduira à une intensité importante ou faible. Ces variations d'intensité donnent lieu à l'observation d'anneaux ou de franges suivant la position des miroirs. Les sources secondaires à considérer sont les images de la source primaire par réflexion sur les miroirs. On peut montrer que ce dispositif est équivalent à une lame d'air à faces parallèles ou en coin selon la position des miroirs. On se ramène ainsi au cas précédent mais il n'y a pas de réfraction à prendre en compte.



Encadré 11. Interféromètre de Michelson (Hecht 2002, p. 408)

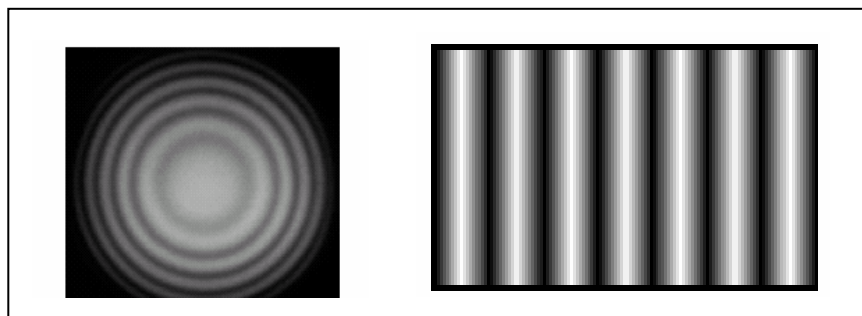
a. vue en perspective
b. vue d'en haut

2.4. Caractéristiques de la figure d'interférences lumineuses en lumière quasi-monochromatique

Les franges d'interférences peuvent être caractérisées par leur forme et leur position sur un écran, leur écartement, leur intensité, leur contraste et leur localisation dans l'espace.

2.4.1. Forme des franges

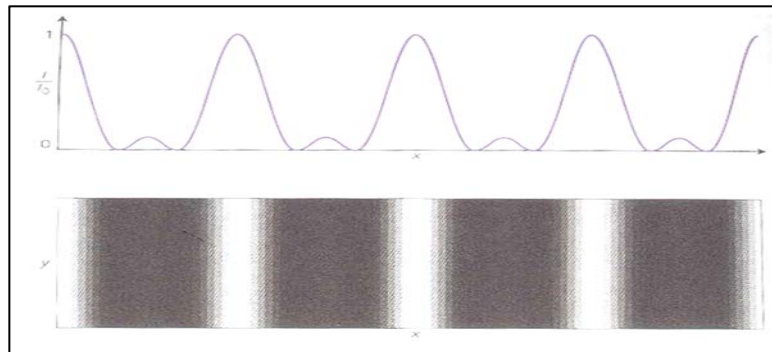
La forme des franges (Encadré 12) dépend du dispositif interférentiel (à division d'amplitude ou à division du front d'onde), de la position de l'écran d'observation (parallèle au plan des sources secondaires ou perpendiculaire) et de la position de la source (proche ou éloignée).



Encadré 12. Différentes formes de franges

2.4.1.1. Influence du dispositif : interférences produites par plus de deux sources ponctuelles

En insérant une troisième source ponctuelle, la figure d'interférence sera différente de celle obtenue avec deux sources ponctuelles. Si les franges d'intensité maximale sont au même endroit que dans le cas de deux sources, il y a en plus, entre deux franges consécutives, une frange brillante d'intensité moindre entourée de deux franges sombres (Encadré 13).



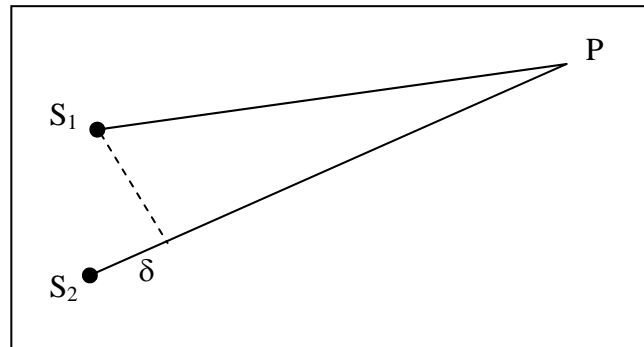
Encadré 13. Variation de l'intensité pour 3 sources ponctuelles et l'aspect des franges (Maurel et Bouchet 2003, p. 134)

2.4.1.2. Position de la source

Lorsque les sources secondaires sont à distance finie (interférences par superposition d'ondes sphériques) ou à l'infini (interférences par superposition d'ondes planes), on observe sur un écran parallèle à la ligne des sources et loin d'elles des franges rectilignes, sur un écran perpendiculaire à la ligne des sources, des anneaux et des franges de forme quelconque sinon.

2.4.2. Différence de marche, ordre d'interférences, interfrange

L'état d'interférence en un point P de l'espace dépend du chemin optique parcouru par la lumière émise par S_1 entre S_1 et ce point, et du chemin optique parcouru par la lumière émise par S_2 entre S_2 et ce point. Plus précisément, l'état d'interférence en P dépend de la différence de chemin optique. Elle est appelée *différence de marche* δ . Elle dépend de l'indice du milieu dans lequel se propagent les ondes lumineuses et de la distance parcourue par chaque onde. Elle ne dépend pas de l'intensité de la lumière émise par S_1 et S_2 .



Encadré 14. Différence de marche entre eux radiations émises par \$S_1\$ et \$S_2\$

Nous appelons "ordre d'interférence \$p\$" au point \$P\$ le rapport δ / λ . Il dépend de la position du point d'observation et de la longueur d'onde de la lumière. Lorsque l'ordre d'interférence est entier, il y a interférence constructive. Lorsqu'il est demi-entier, il y a interférence destructive.

La distance séparant deux franges de même nature, appelée *interfrange* et notée i_0 ¹⁰, dépend de la longueur d'onde de la radiation, du lieu d'observation et de la position des sources. Elle est donnée par $i_0 = \frac{\lambda D}{a}$.

Tableau 2. Caractéristiques générales des franges lumineuses (Mouchet 2000, p. 191)

| (S_1S_2) | Franges | Ordre d'interférence au centre | Interfrange |
|---------------------------|------------------------------|---|---|
| Parallèle à l'écran | Perpendiculaire à (S_1S_2) | Minimal, de l'ordre de 1 voire nul | Uniforme proportionnel à $\frac{\lambda}{a}$ |
| Perpendiculaire à l'écran | En anneaux concentriques | Maximal, de l'ordre de $\frac{S_1S_2}{\lambda} \gg 1$ | Non uniforme (diminue quand le rayon des anneaux augmente), proportionnel à $\frac{\lambda}{a}$ |

2.4.3. Intensité et contraste

Les franges sont plus ou moins visibles car plus ou moins contrastées. Ce contraste peut être caractérisé par le facteur de *visibilité* défini par la relation :

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

¹⁰ Nous avons choisi cette notation pour ne pas la confondre avec l'angle d'incidence i .

où I_{max} et I_{min} sont les intensités maximales et minimales détectées dans la région de superposition. Les franges sont d'autant mieux observables que le *contraste* est proche de 1. Le contraste peut varier dans le champ d'interférence. Il dépend dans ce cas de la différence de marche. Lorsque le contraste est égal à 1, nous dirons que la cohérence est totale, s'il est inférieur à 1, nous dirons que la cohérence est partielle. La cohérence totale est obtenue pour une source primaire pouvant être considérée comme ponctuelle et monochromatique.

Notons que le contraste que nous introduisons ici est un contraste « physique » qui ne prend pas en compte le récepteur « œil ». En effet, ce contraste est égal à 1 quelle que soit l'intensité de la source primaire de lumière totalement cohérente. Or la perception de l'œil dépend de l'intensité de la lumière : les franges lui apparaîtront d'autant plus contrastées que l'intensité de la lumière est élevée.

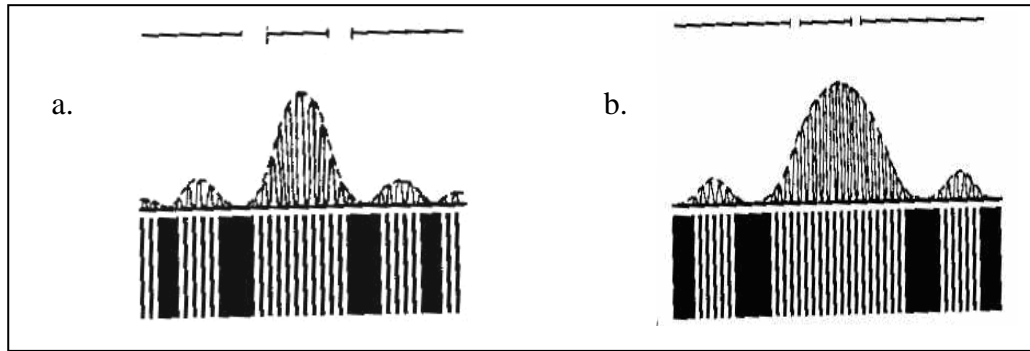
2.4.4. Localisation des interférences lumineuses

Il est important de savoir où sont localisées les franges d'interférences pour pouvoir les observer.

Le lieu des franges est obtenu en prenant l'intersection de deux rayons émergeant du système optique. Soulignons que ces rayons doivent être ceux de deux ondes différentes et cohérentes, autrement dit provenir de deux sources secondaires cohérentes. Ces deux sources sont les images du même point de la source primaire.

Les franges peuvent être réelles ou virtuelles, localisées ou non localisées. Les franges réelles sont celles qui peuvent être observées sur un écran. Les rayons formant ces franges convergent, à contrario des rayons divergeant forment des franges virtuelles. Ces dernières peuvent être vues à l'œil ou sur un écran à l'aide d'un système de focalisation.

Les franges localisées sont observables seulement sur une surface particulière. Les franges non localisées sont réelles et existent dans une région étendue de l'espace. L'expérience d'Young en donne un exemple : nous pouvons placer un écran presque partout devant les sources et y observer une figure d'interférence. Il faut cependant préciser que le lieu où les franges sont observées dépend de la largeur des trous. La figure ci-dessous montre que la largeur du champ d'interférence observé sur l'écran est d'autant plus grande que le diamètre des trous est petit (Encadré 15).



Encadré 15. Variation de la largeur du champ d'interférences (Rossing 1999, p. 118)

a. Situation de référence

b. Situation où le diamètre des trous est plus petit

Soulignons aussi que la détermination du lieu où les franges peuvent être observées est un phénomène complexe qui dépend à la fois du dispositif et de la cohérence de la lumière. Nous abordons dans ce qui suit le problème de la cohérence spatiale, autrement dit le lien entre la dimension de la source et la localisation des franges pour chaque dispositif. Nous examinons ensuite le problème de la cohérence temporelle, c'est à dire le lien entre la largeur du spectre de la lumière émise par la source et la largeur du champ d'interférence observé sur un écran.

2.5. Dispositifs interférentiels avec une source primaire quasi-monochromatique étendue

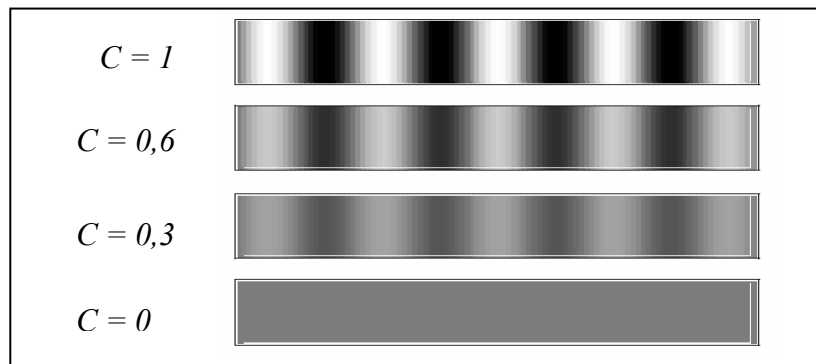
Si la source lumineuse est ponctuelle, les interférences sont observables dans tout l'espace où se superposent les faisceaux lumineux quel que soit le type de dispositif. Par contre, les systèmes d'interférences obtenues avec ces deux types de dispositifs ne se comportent pas de la même façon quand la source est élargie. Avec les dispositifs à division du front d'onde, le contraste diminue rapidement quand la taille de la source augmente alors qu'avec les dispositifs à division d'amplitude, les interférences restent observables avec un bon contraste dans une zone bien déterminée de l'espace.

Cependant, il ne faut pas oublier que « *la construction des rayons à partir des règles de l'optique géométrique permet de déterminer la zone de recouvrement des faisceaux lumineux qui vont interférer* » et qu' « *Il y a aussi des limitations dues au fait que le contraste dans la zone de recouvrement des faisceaux n'est pas en général uniforme* » et qu'enfin « *plus la source primaire est cohérente, plus la zone d'interférence est grande* » (Mouchet 2000,

p.210). Nous allons voir plus en détail l'effet de l'élargissement de la source sur la localisation et le contraste des franges pour chaque type de dispositif interférentiel.

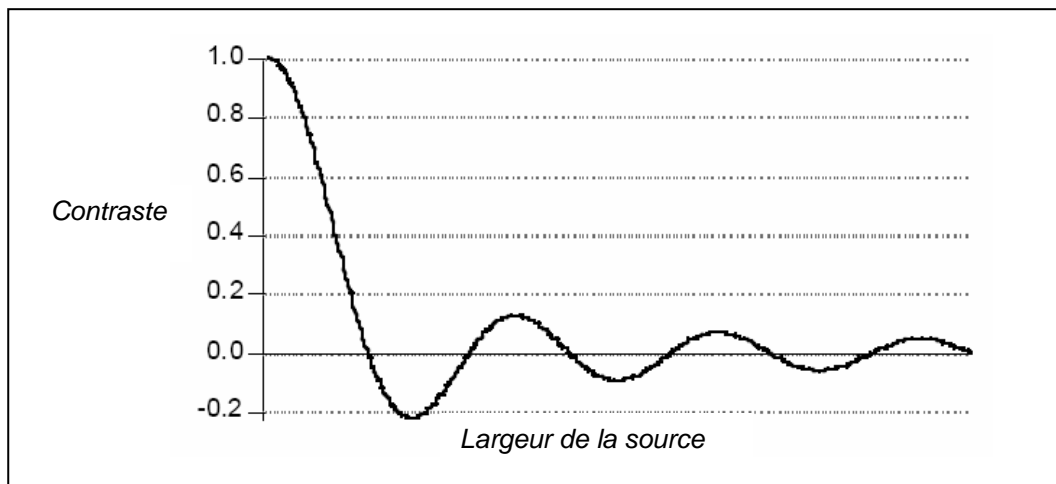
2.5.1. Interféromètre à division du front d'onde

Avec une fente source de largeur l , centrée en S , nous observons sur un écran parallèle aux sources secondaires des franges de même interfrange i_0 que dans le cas d'une source ponctuelle mais de contraste différent. Ce contraste peut rester constant (Encadré 16) sur l'écran d'observation (ne pas dépendre de la position du point d'observation, comme pour un dispositif d'Young) ou varier (comme c'est le cas avec un miroir de Lloyd). Cela dépend du dispositif.



Encadré 16. Aspects des franges suivant le contraste

Comme l'illustre l'encadré 17, la variation du contraste dépend de la largeur de la source : « Pour un certain diamètre de la source, le contraste des franges devient nul, et si l'on continue à élargir la source, on observe une réapparition des franges. Elles sont beaucoup moins contrastées et les franges brillantes ont pris la place des franges sombres. Le contraste diminue à nouveau, s'annule encore et la seconde réapparition de franges est plus difficile à observer, car le contraste des franges est plus faible » (Françon et al 1969, p. 44).



Encadré 17. Evolution du contraste de la figure d'interférences en fonction de la largeur de la source

2.5.2 Interféromètre à division d'amplitude

2.5.2.1. Cas des franges d'égle inclinaison

Les interférences produites par une source ponctuelle ne sont pas localisées.

Dans le cas d'une source étendue, chaque élément de la source donne son propre état d'interférences en un point P . Si l'étendue de la source est suffisamment restreinte pour que l'état d'interférence au point P et dans son voisinage ne varie pas de façon significative, nous observons des franges dans cette région. Mais, à mesure que nous augmentons la taille de la source, la figure d'interférence se brouille jusqu'à disparition. Cependant, elle garde un bon contraste à grande distance de la lame. L'observation des franges d'interférences n'est donc possible qu'en limitant l'étendue de la source, et cette limitation dépend de la zone d'observation et de l'épaisseur de la lame.

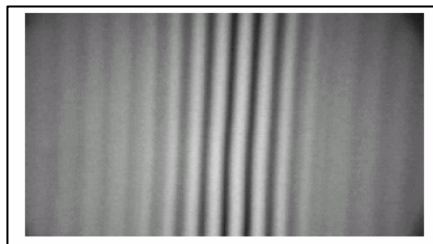
Il existe un seul cas où nous pouvons augmenter sans restriction la taille de la source et gagner en luminosité des interférences : celui de l'observation à l'infini. Dans ce cas, les franges sont dites *localisées à l'infini*. En pratique, l'observation est faite dans le plan focal image d'une lentille convergente. La différence de marche δ sera de la forme : $\delta = 2 e \cos i$. Les franges observées sont des anneaux qui se resserrent de plus en plus, à mesure que nous nous éloignons de leur centre et qui sont d'autant plus resserrés que l'épaisseur de la lame e est grande.

2.5.2.2. Cas des franges d'égale épaisseur

Les interférences produites par une source ponctuelle ne sont pas localisées. Lorsque la source est étendue, les interférences sont localisées au voisinage de la lame.

Si la source est étendue, il n'y a pas de compensation entre les variations d'épaisseur e et les variations d'angle d'incidence i quand nous passons d'un point à l'autre de la source. En conséquence, les variations de la différence de marche pour les différents points de la source augmentent à mesure que nous étendons les dimensions de la source.

Pour une source de taille et de position données, c'est lorsque le point P est sur la lame que les variations de différence de marche sont les moindres quand nous passons d'un point de la source à un autre. De plus, les points qui constituent la source étendue envoient des rayons correspondant à des angles d'incidence différents. Il convient donc de limiter l'angle sous lequel un point de la lame voit la source. Et à chaque point P de la lame est maintenant associée une épaisseur et donc une différence de marche et par suite un état d'interférence bien précis. Les franges sont des lignes d'égale valeur du produit $2e \cos i$, et comme i est fixé, ce sont les lignes d'égale épaisseur e . D'où vient l'appellation des franges d'égale épaisseur (Desmeules et Roynard 1997, p. 153).



Encadré 18. Franges d'égale épaisseur

Ainsi, nous pouvons déduire que la **localisation du phénomène d'interférences** sur une surface (ou à l'infini) induite par les dispositifs diviseurs d'amplitude ne sera respectée que partiellement et il existera **tout un voisinage** où les interférences resteront visibles avec un bon contraste. Ce voisinage sera d'autant plus réduit que la source primaire utilisée sera plus large.

2.5.3. Récapitulatif

Nous pouvons récapituler les situations étudiées dans les tableaux ci-dessous. Le tableau 3 concerne la localisation des franges et les tableaux 4a et 4b la forme des franges produites par une lame et observées sur un écran parallèle à la lame.

Tableau 3. Localisation des franges en fonction de l'étendue de la source et du type de dispositif

| | Dispositif à division de front d'onde | Dispositif à division d'amplitude |
|--------------------------|---|--|
| Source ponctuelle | Interférences non localisées | Interférences non localisées |
| Source étendue | Interférence non localisées observables dans une petite zone à certaines conditions | Interférences localisées |

Tableaux 4. Forme des franges en fonction de l'étendue et de la position de la source par rapport aux lames à faces parallèles et non parallèles

| a. Lame à faces parallèles | | |
|--|--|---|
| Forme de la source | Ponctuelle | Etendue |
| Place de la source | | |
| Près de la lame | Anneaux concentriques non localisés sur un écran parallèle à la lame | Anneaux localisés à l'infini (ou dans le plan focal d'une lentille convergente) |
| A l'infini ou dans le plan focal d'une lentille convergente | Eclairement uniforme ou 'teinte' | Anneaux localisés à l'infini (ou dans le plan focal d'une lentille convergente) |

| b. Lame à faces non parallèles de type « coin » | | |
|--|---|--|
| Forme de la source | Ponctuelle | Etendue |
| Source près de la lame | Franges non localisées dont la forme dépend de la position de l'écran | Franges rectilignes localisées au voisinage de la lame |

2.6. Figure d'interférences produites par une source ponctuelle non monochromatique

2.6.1. Cas d'une lumière quasi monochromatique

Nous avons vu que le contraste des franges est maximal et égale à un dans le cas de la cohérence totale, autrement dit d'une source ponctuelle émettant une radiation monochromatique. Dans le cas d'une lumière quasi-monochromatique, la variation du contraste des franges avec l'ordre d'interférence dépend de la largeur du spectre de la lumière émise par la source primaire. A intensité égale, plus le spectre de la lumière est étroit, plus le champ d'interférence est grand.

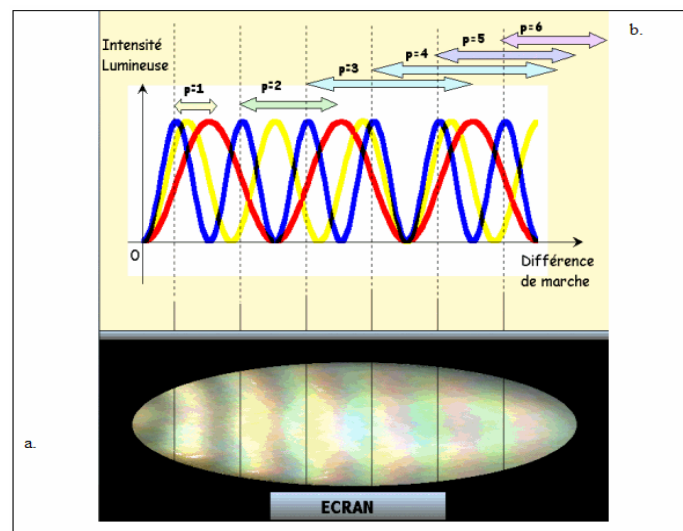
2.6.2. Cas d'un doublet

Certaines sources, comme les lampes à vapeur de sodium, émettent deux radiations de longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 très voisines. Les franges produites par ces sources présentent un contraste variant périodiquement avec l'ordre d'interférence. Nous observons des petites zones où il n'y a pas d'interférences. Puisque les ondes n'ont pas la même fréquence, le phénomène observé est en fait similaire à un phénomène de battements.

2.6.3. Cas d'une lumière blanche

Si nous éclairons un dispositif interférentiel par une lumière blanche, nous obtenons des franges irisées. La frange correspondant à l'ordre d'interférence nul est brillante et blanche. Lorsque l'ordre d'interférence p est suffisamment petit par rapport à 1, des franges sont observables. Par contre pour p très supérieur à 1, l'éclairement sur l'écran paraît uniforme et blanc : on parle alors de blanc d'ordre supérieur.

Concernant la coloration des franges observables, la frange brillante centrale est bordée de rouge ; les deux franges latérales blanches (Encadré 19) sont bordées de violet du côté voisin de la frange centrale et de rouge sur le bord opposé (Provost et Provost 1980, p. 124). Ainsi, la frange latérale blanche sera irisée, bordée de violet d'un côté et de rouge de l'autre côté.



Encadré 19. Franges en lumière blanche avec la lame en coin¹¹

Retenons que la largeur du champ d'interférences observé sur un écran dépend de la cohérence temporelle de la lumière. Il sera d'autant plus grand, que cette cohérence est grande.

¹¹ <http://www.ujf-grenoble.fr/phys-info/TPMichelsondemo/Modules/Teintes/Teintes.htm>

3. Interprétation de l'aspect d'une figure d'interférences lumineuses

3.1. Modèle ondulatoire de la lumière

Pour interpréter le phénomène d'interférences tel que nous venons de le décrire, nous faisons appel à la théorie ondulatoire de la lumière (Provost et Provost 1980). Dans les situations qui nous intéressent, nous pouvons nous placer dans le cadre de l'**approximation scalaire**. Celle-ci consiste à considérer que les amplitudes du champ électrique et du champ magnétique au point P sont proportionnelles. C'est pourquoi dans le cas de cette approximation, seule l'amplitude E du champ électrique est considérée. Celle-ci s'exprime par :

$$E(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}) e^{j\omega t} = a_0 e^{j[\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi]} \quad \text{pour une onde plane ;}$$

$$E(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}) e^{j\omega t} = \frac{a_0}{r} e^{j[\omega t - kr + \varphi]} \quad \text{pour une onde sphérique ;}$$

en notant r la distance à l'origine, φ la phase, ω la pulsation de l'onde et le vecteur d'onde $\mathbf{k} = k \mathbf{e}$ ($k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$). On appelle l'**amplitude complexe de l'onde** le terme $a(\mathbf{r})$.

Le champ électrique et le champ magnétique associés à une onde lumineuse vérifient les équations de Maxwell. Comme celles-ci sont linéaires dans les milieux étudiés (vide, air, milieu matériel transparent, homogène et isotrope), la somme de deux solutions de ces équations est encore solution.

Il en résulte que s'il existe plusieurs ondes lumineuses provenant par des voies différentes en un point P de l'espace, l'onde résultante au point P a une amplitude complexe qui est égale à la somme des amplitudes complexes de chaque onde. Dans le cas de deux ondes, nous avons :

$$a(P) = a_1(P) + a_2(P).$$

3.2. Modèle du récepteur

Notre œil est un récepteur quadratique dont le temps de réponse fait que « *le couplage entre l'onde et le détecteur ne permet au contraire que de capter des valeurs moyennes (des flux) énergétiques proportionnelles au carré de l'amplitude de l'onde* »¹² (Mouchet 2000, p.

128). En effet, l'intensité de l'onde est donnée par : $I(P) = \left\langle \frac{1}{2} k E E^* \right\rangle$;

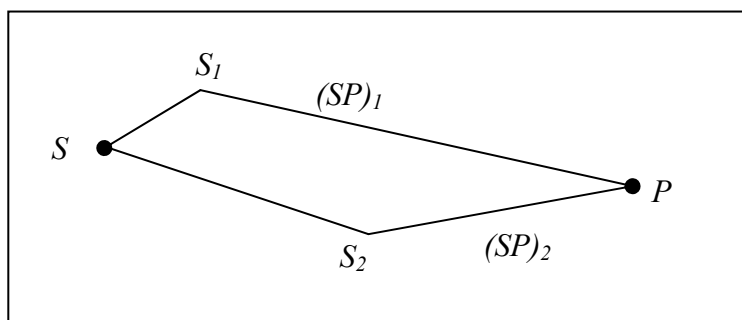
Le fait que l'œil soit sensible qu'à l'intensité d'une onde fait non seulement perdre l'information concernant la phase, mais surtout fait disparaître au niveau de la détection les propriétés de linéarité : l'intensité d'une superposition linéaire d'ondes n'est pas égale à l'addition des ondes prises séparément. C'est précisément cette propriété qui désigne le phénomène d'interférence.

Notons par ailleurs que l'œil est non seulement limité par son temps de réponse mais aussi par son pouvoir de résolution. Les interférences ne pourront être observées que si les franges sont suffisamment espacées : l'angle sous lequel est vu deux franges de même nature consécutives doit être plus grand que une minute d'angle.

3.3. Interférences lumineuses à deux ondes avec une source primaire ponctuelle

3.3.1. Intensité et contraste des franges

Considérons deux ondes parvenant au même point P après deux trajets différents (Encadré 20), comptés depuis la même source S ¹³.



Encadré 20. Onde atteignant le même point P après deux trajets différents

¹² La plupart des détecteurs sont caractérisés par un temps de réponse trop long pour suivre l'évolution temporelle d'une onde. Ils ne sont pas sensibles à la phase mais à l'intensité énergétique c'est-à-dire à la valeur moyenne temporelle du carré de l'amplitude de la quantité scalaire décrivant l'onde.

¹³ Pour le schéma, nous prenons le cas d'une source à distance finie, ce qui ne change rien à l'interprétation à donner.

Les amplitudes des champs électriques de ces ondes sphériques décrites dans le cadre de l'approximation scalaire sont données par :

$$E_1(r, t) = \frac{a_{01}}{(SP)_1} e^{j(\omega t - k(SP)_1 + \varphi_{01})} \quad \text{et}$$

$$E_2(r, t) = \frac{a_{02}}{(SP)_2} e^{j(\omega t - k(SP)_2 + \varphi_{02})},$$

avec φ_{01} et φ_{02} représentent la phase à l'origine de chaque onde.

Ces ondes arrivant simultanément en P , l'amplitude du champ électrique résultant est :

$$\begin{aligned} E(t, r) &= E_1(t, r) + E_2(t, r) \\ &= \left[\frac{a_{01}}{(SP)_1} e^{j(\omega t - k(SP)_1 + \varphi_{01})} + \frac{a_{02}}{(SP)_2} e^{j(\omega t - k(SP)_2 + \varphi_{02})} \right]. \end{aligned}$$

Compte tenu de la définition de l'intensité au point P , nous avons :

$$I(P) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \left\langle \cos \left[(\varphi_{01} - \varphi_{02}) + \frac{\omega}{c} [(SP)_2 - (SP)_1] \right] \right\rangle.$$

Dans l'expression ci-dessus, le déphasage des deux ondes se compose de deux termes. Le premier terme ne fait intervenir que le déphasage à l'origine des deux ondes $\varphi_{01} - \varphi_{02}$. Le deuxième est proportionnel à la différence de marche δ entre les ondes qui interfèrent en P depuis la source S ($\delta = (SP)_2 - (SP)_1$) qui ne dépend que du point d'observation P . Deux cas se présentent :

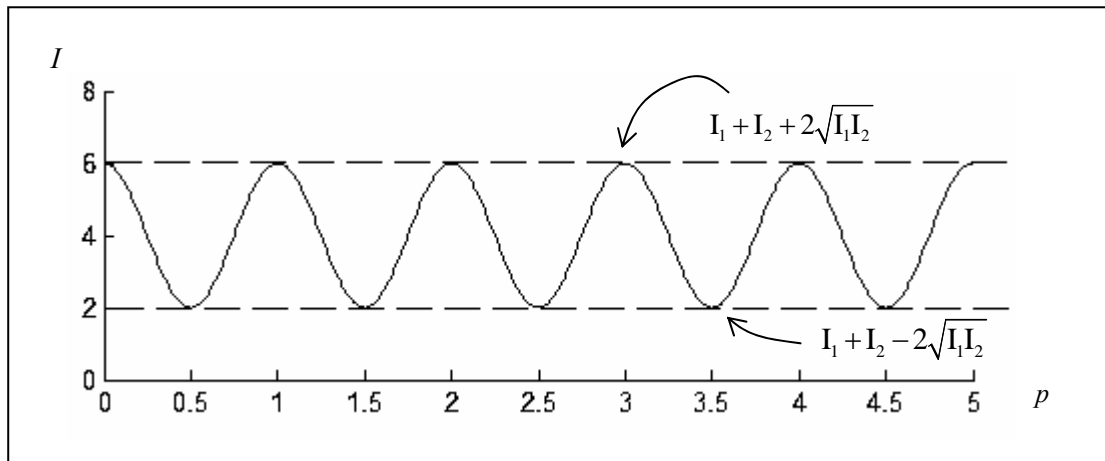
- si cette différence de phase est constante au cours du temps la valeur moyenne temporelle du terme entre crochets n'est pas nulle : nous observons des interférences. Les deux ondes sont cohérentes.
- si cette différence de phase n'est pas constante au cours du temps, la valeur moyenne temporelle du terme entre crochets est nulle : nous n'observons pas d'interférences. Les deux ondes sont incohérentes.

Dans le cas de deux ondes cohérentes, l'intensité lumineuse dans le champ d'interférences est donnée par :

$$I(P) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta \right) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos (2\pi p),$$

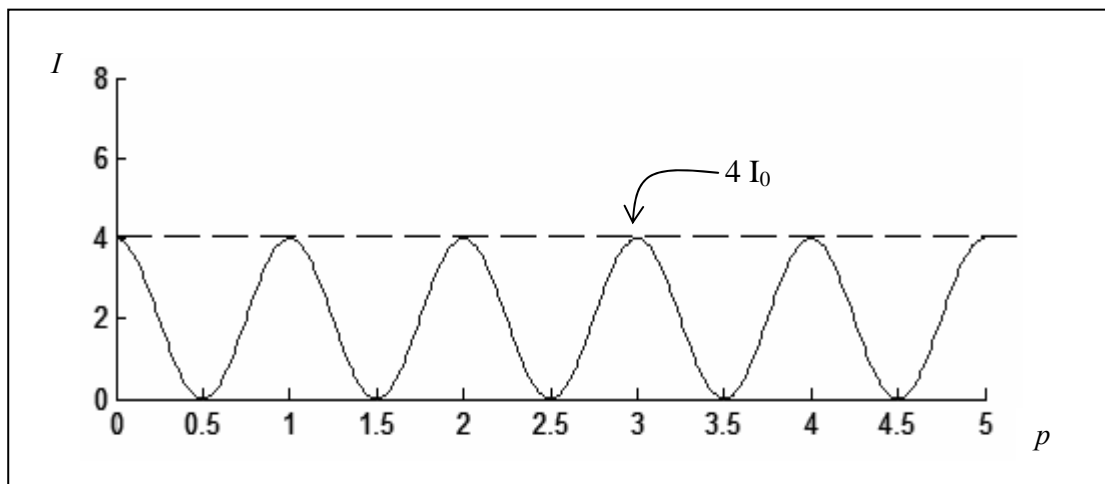
avec p l'ordre d'interférence défini par $p = \frac{\delta}{\lambda}$.

Cette intensité évolue entre une valeur maximale pour p entier, ce qui correspond à l'obtention de **franges claires** (interférences constructives) et une valeur minimale pour p demi-entier, ce qui correspond à l'obtention de **franges sombres** (interférences destructives). L'intensité pour les franges claires est de la forme $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$, et l'intensité pour les franges sombres est de la forme $I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ (Encadré 21).



Encadré 21. Variation de l'intensité I en fonction de l'ordre d'interférence p

Dans le cas particulier où les amplitudes des deux ondes sont identiques, l'intensité lumineuse dans le champ d'interférences varie de 0 à $4I_0$ (Encadré 22).



Encadré 22. Variation de l'intensité I en fonction de l'ordre d'interférence p pour $I_1 = I_2$

Le **contraste** des franges, caractérisé par le facteur de visibilité défini par $C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ est égal à $2 \frac{\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$ dans le premier cas et à 1 dans le second.

3.3.2. Formes des franges d'interférences et interfrange

3.3.2.1. Superposition d'ondes planes

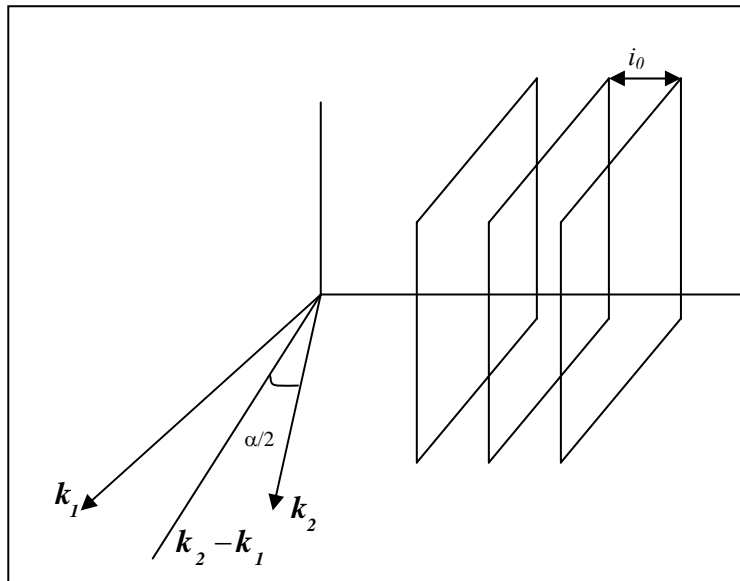
Les amplitudes de deux ondes planes parvenant au point P repéré par le vecteur position \mathbf{r}^{14} , s'écrivent : $a_1 = E_1 e^{j(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1 + \varphi_{01})}$ et $a_2 = E_2 e^{j(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2 + \varphi_{02})}$, avec \mathbf{k} le vecteur d'onde. La différence de phase en P s'écrit alors :

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = (\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{r} + (\varphi_{02} - \varphi_{01}) = \delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta\varphi.$$

Les franges sont planes et perpendiculaires à la somme des vecteurs d'ondes. Nous observons des franges dont l'interfrange est donnée par :

$$i_0 = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\alpha}{2}},$$

avec α est l'angle entre les deux vecteurs \mathbf{k}_1 et \mathbf{k}_2 (Encadré 23).



Encadré 23. Interfrange en fonction de l'angle séparant les vecteurs d'ondes

3.3.2.2. Superposition d'ondes sphériques

Nous considérons deux sources ponctuelles S_1 et S_2 , distantes de a , monochromatiques de longueur d'onde λ . Les amplitudes des deux ondes sphériques au point P ont pour expression :

¹⁴ On note le vecteur en gras.

$$a_1 = \frac{E_1}{r_1} e^{j(\omega t - k r_1 + \varphi_{01})} \quad \text{et} \quad a_2 = \frac{E_2}{r_2} e^{j(\omega t - k r_2 + \varphi_{02})},$$

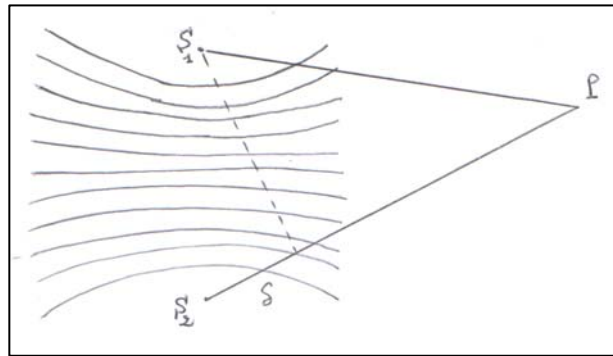
avec E_1 et E_2 sont deux constantes ; r_1 et r_2 les distances parcourues par les ondes provenant des sources secondaires S_1 et S_2 .

Intéressons-nous à ce que l'on observe dans un plan parallèle à la ligne des sources. Le déphasage entre les deux ondes arrivant en P vaut :

$$\Delta\varphi = k(r_2 - r_1) - (\varphi_{02} - \varphi_{01}) = \frac{2\pi}{\lambda_0} [(S_2P) - (S_1P)] - (\varphi_{02} - \varphi_{01}).$$

Les franges sont des hyperboloïdes de foyer S_1 et S_2 . La *différence de marche entre les rayons (1) et (2)* sera la quantité :

$$\delta = (S_2P) - (S_1P) \text{ (Encadré 24).}$$



Encadré 24. Calcul de la différence de marche

Calculons alors la différence de marche entre les deux rayons issus des deux sources ponctuelles. Appelons (x,y) les coordonnées de P et a la distance entre les deux sources. Nous obtenons :

$$S_1P = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \quad ; \quad S_2P = \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2}$$

$$\text{d'où : } \delta = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} - \sqrt{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2 + y^2 + D^2}.$$

Dans les conditions usuelles d'observation, le point P est situé au voisinage de O et donc $(x,y) \ll D$ et par suite $\delta = \frac{ax}{D}$. L'expression de la répartition de l'intensité sur l'écran est

donc :

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi ax}{\lambda D}\right) \right) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{2\pi ax}{\lambda D}\right).$$

L'intensité sur l'écran ne dépend que de x pour une différence de marche au premier ordre, et donc nous observons des franges rectilignes parallèles aux sources dans la direction y . L'*interfrange* (distance entre deux franges sombres ou brillantes) correspond à :

$$\frac{ai_0}{\lambda D} = 1 \text{ donc } i_0 = \frac{\lambda D}{a}.$$

Si l'écran d'observation est à présent placé dans un plan perpendiculaire à la ligne des sources, nous observons des anneaux.

Dans le cas d'une superposition avec trois sources secondaires ponctuelles au lieu de deux, au point d'observation, nous avons des interférences de trois ondes a_1 , a_2 et a_3 , écrites par exemple sous la forme :

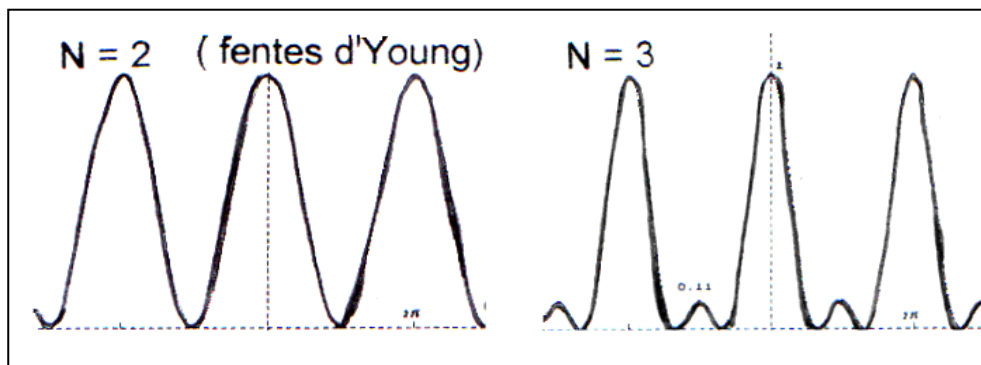
$$a_1 = a_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad ; \quad a_2 = a_0 \cos \omega t \quad ; \quad a_3 = a_0 \cos(\omega t - \varphi)^{15}.$$

En appliquant le principe de superposition des amplitudes, nous avons :

$$a = a_1 + a_2 + a_3 = a_0 (1 + 2 \cos \varphi) \cos \omega t .$$

L'intensité I est alors donnée par :

$$I = \frac{a_0^2 \sin^2 3 \frac{\varphi}{2}}{\sin^2 \frac{\varphi}{2}} \text{ (Encadré 25).}$$



Encadré 25. Variation de l'intensité en présence de 2 puis de 3 vibrations (Rossing 1999, p. 61)

En conclusion, nous pouvons dire que « l'ensemble des caractéristiques définies ci-dessus pour les franges d'interférence dépend essentiellement de l'expression de la différence de marche δ en fonction de la position de P , ainsi que de la comparaison des intensités I_1 et I_2 ce qui dépend de l'analyse du dispositif physique destiné à réaliser la séparation des deux chemins menant de S à P » (Roux 1994, p. 200).

¹⁵ On a pris, pour simplifier le calcul, $E_1 = E_2 = E_3 = a_0$

4. Interprétation des conditions d'obtention des interférences lumineuses

4.1. Introduction

Nous avons vu dans la partie précédente que les interférences lumineuses ne peuvent être observées en un point donné que sous certaines conditions. Les ondes qui interfèrent doivent être cohérentes, c'est-à-dire être **synchrones** (avoir la même fréquence) et **être obtenues à partir d'une source unique** (sauf dans le cas de lasers). Cette source doit être de plus de **petite dimension**. La cohérence des ondes dépend non seulement de la source primaire, mais aussi du point d'observation et du dispositif interférentiel.

Nous distinguons les conditions d'obtention qui sont liées à la cohérence temporelle de la source (conditions sur la synchronicité et la source primaire unique) de celles liées à la cohérence spatiale de la source (condition sur la petitesse de la source primaire).

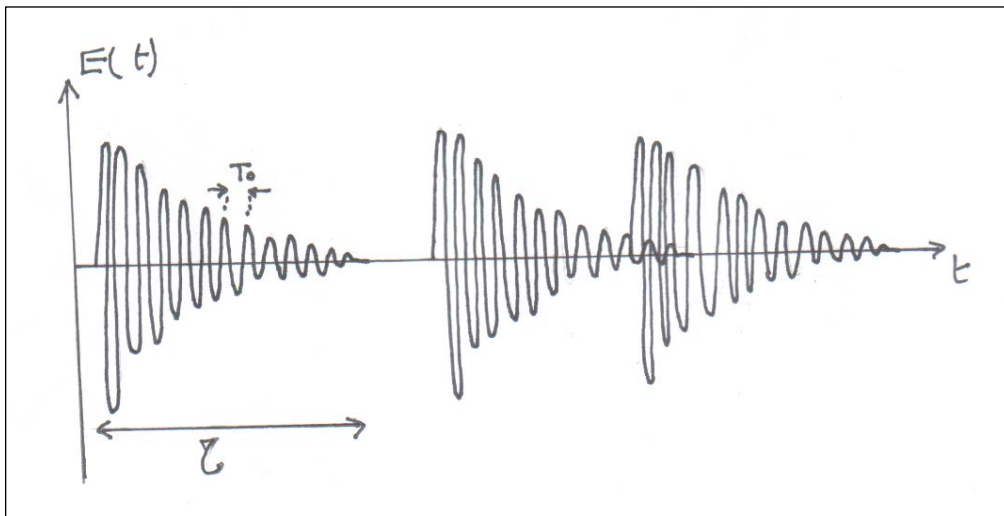
Nous verrons tout d'abord que pour interpréter les conditions de cohérence temporelle, il est nécessaire de s'intéresser à la nature de l'émission lumineuse et d'introduire deux modèles, le modèle des trains d'ondes et le modèle spectral. Nous verrons que ces deux modèles sont liés (nous passons de l'un à l'autre par transformée de Fourier) et qu'à un premier niveau d'enseignement (celui reçu par les étudiants interrogés), le premier modèle est traditionnellement utilisé pour interpréter qualitativement le phénomène d'interférence et le second quantitativement pour calculer la répartition de l'intensité lumineuse. Nous poursuivrons en remarquant que l'interprétation des conditions de cohérence spatiale fait appel à la décomposition de la source primaire étendue en une infinité de sources ponctuelles et à une règle d'addition des intensités des figures d'interférences. Nous terminerons en soulignant que la lumière émise par une source n'est jamais totalement monochromatique et la source totalement ponctuelle et qu'à un deuxième niveau d'enseignement, il faut tenir compte simultanément de la cohérence temporelle et de la cohérence spatiale. Nous verrons alors que l'étude de la cohérence spatio-temporelle s'appuie sur le modèle des trains d'ondes et l'introduction de fonctions de corrélation qui permettent un traitement quantitatif du phénomène.

Tels sont les points qui nous paraissent nécessaires pour la compréhension des conditions d'obtention des interférences lumineuses et que nous allons clarifier dans ce qui suit.

4.2. Cohérence temporelle

4.2.1. Modèle du train d'onde

Dans la réalité, il n'existe pas de source ponctuelle de lumière rigoureusement monochromatique, autrement dit, il n'existe pas d'onde sinusoïdale de durée infinie. Dans une description semi-classique, nous assimilons un atome à un oscillateur amorti et nous modélisons la lumière qu'il émet par une succession de trains d'ondes émis aléatoirement dont la pseudo période ne peut prendre que certaines valeurs. L'ordre de grandeur de la durée d'un train d'onde τ , c'est-à-dire l'ordre de grandeur du temps séparant deux collisions d'atomes, est toujours très faible devant le temps de réponse du récepteur : environ 10^{-8} s. Elle varie de 10^{-12} s pour une lampe à vapeur de mercure basse pression à 10^{-5} s pour certains lasers stabilisés. Cette durée τ est très largement supérieure à la pseudo période T_0 des trains d'ondes de la lumière visible dont la durée est de l'ordre de 10^{-14} s (Encadré 26).



Encadré 26. Champ électrique en un point donné de l'espace en fonction du temps dans le cas d'une succession aléatoire de trains d'ondes de durée τ et de pseudo période T_0

Dans un modèle semi-classique, la lumière émise par un atome se propage dans toutes les directions. Un train d'onde s'étend donc dans une zone de l'espace comprise entre deux sphères.

4.2.1.1. Superposition cohérente et superposition incohérente de deux ondes

Considérons deux sources identiques. Elles émettent des trains d'ondes aléatoires, présentant un déphasage en P . Ce déphasage comprend deux parties : un déphasage à l'origine aléatoire et un deuxième déphasage non aléatoire et dépendant de la différence de marche. L'intensité de l'onde lumineuse est donnée par :

$$I = \mathbf{E}\mathbf{E}^* = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\varphi_1(\mathbf{r}) - \varphi_2(\mathbf{r})].$$

Comme les détecteurs ont un temps d'intégration beaucoup plus grand que τ (pour l'oeil, il vaut environ un vingtième de seconde), la détection donnera comme résultat la valeur moyenne de l'intensité sur un très grand nombre de trains d'ondes, soit :

$$I(P) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \left\langle \cos \left[(\varphi_{01} - \varphi_{02}) + \frac{\omega}{c} [(SP)_2 - (SP)_1] \right] \right\rangle.$$

Des interférences pourront être observées avec deux sources quasimonochromatiques, identiques et indépendantes, à condition que la durée des trains d'ondes soit supérieure au temps de réponse du récepteur. Cela a pu être réalisé récemment avec deux lasers.

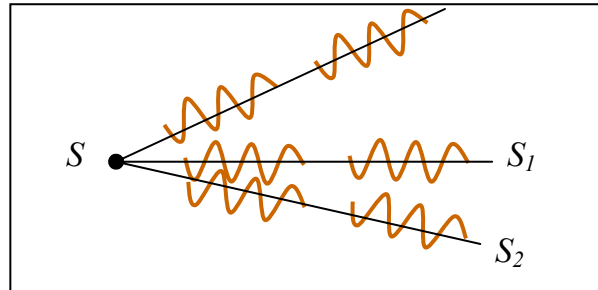
Dans le cas contraire, la valeur moyenne du cosinus est nulle et la grandeur détectée vérifie : $I = I_1 + I_2$. Ainsi lorsque deux sources sont incohérentes, les ondes vérifient une règle d'addition des intensités, équivalente au principe de superposition des intensités de l'optique géométrique classique.

4.2.1.2. Longueur de cohérence

Pour que deux sources secondaires puissent produire des interférences au point P , autrement dit être cohérentes, elles doivent émettre des trains d'ondes présentant en P un déphasage constant au cours du temps. Les trains d'onde qu'elles émettent doivent donc déjà présenter un déphasage constant. Cela ne peut se produire que si ces trains d'ondes proviennent du même train d'onde incident.

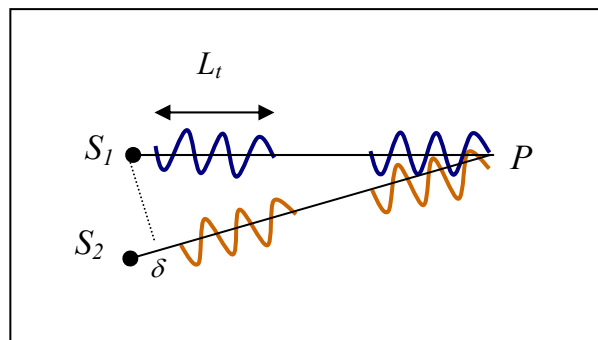
Deux cas sont à distinguer. Quand les sources secondaires sont les images d'une source ponctuelle obtenues par réflexion ou réfraction, cette condition est toujours réalisée. Quand les sources secondaires sont des trous S_1 et S_2 éclairés par une source ponctuelle qui ne se trouve pas sur la médiatrice de $S_1 S_2$, il faut que la différence des durées de propagation de la source primaire aux trous soit petite devant la durée des trains d'ondes de sorte qu'un train d'onde provenant de la source primaire arrive en même temps aux sources S_1 et S_2 (Encadré

27). Cela est vérifié si $\delta < L_t$, où L_t représente la longueur d'un train d'onde selon une direction de propagation, encore appelée **longueur de cohérence temporelle** et δ représente la différence de chemin optique entre S et les sources secondaires.



Encadré 27. Trains d'ondes émis par la source S

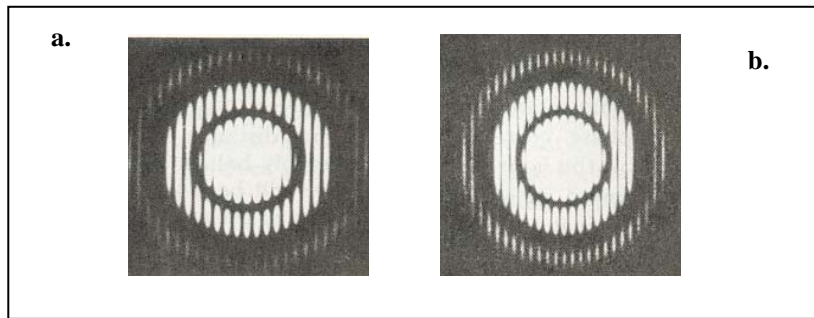
Par ailleurs, pour observer des interférences en un point P , il faut également que la différence de marche entre les sources secondaires et le point P soit petite devant la longueur de cohérence pour que les deux trains d'ondes qui se superposent en P proviennent du même train d'onde incident (Encadré 28). Une différence de marche δ trop grande, entraîne au point d'observation P une différence de durée de trajets supérieure à τ (temps de cohérence temporelle défini comme la durée d'un train d'onde, avec $L_t = c\tau$ et c la vitesse de propagation), ce qui entraîne une perte totale de la cohérence temporelle.



Encadré 28. Trains d'ondes arrivant en P issus des deux sources

4.2.1.3. Application avec les trous d'Young

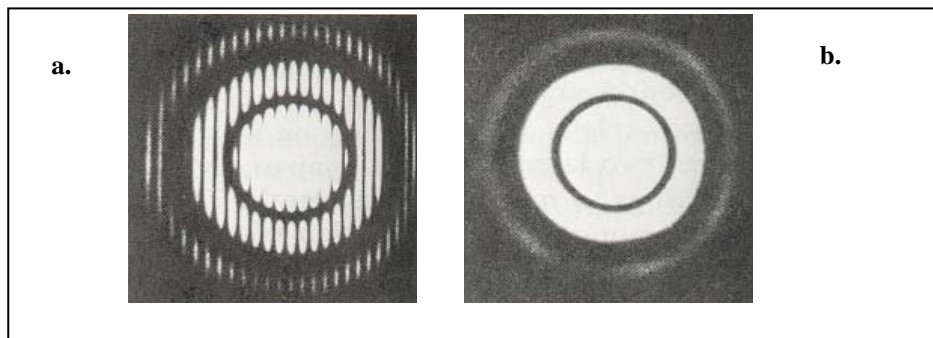
Nous pouvons utiliser le modèle du train d'onde pour interpréter les expériences suivantes réalisées avec les trous d'Young. Les trous, éclairés successivement par un laser He-Ne et une lampe à vapeur de mercure, produisent les figures de l'encadré 29. Ces figures montrent des franges de même forme et de même interfrange mais moins lumineuses et moins contrastées dans le cas de la lampe à vapeur de mercure que dans le cas du laser.



Encadré 29. Interférences avec les trous d'Young (Hecht 2002, p. 518) pour :

- a. un laser**
- b. une lampe à mercure**

Lorsque l'on place une lame mince de verre devant l'un des trous, les franges observées auparavant avec le laser existent toujours (Encadré 30a) mais celles observées avec la lampe à mercure disparaissent (Encadré 30b). Cela s'explique par le fait que la longueur de cohérence temporelle du laser est supérieure à la différence de marche introduite par la lame de verre, alors que la longueur de cohérence temporelle de la lampe à vapeur de mercure est inférieure à la différence de marche introduite par la lame de verre.



Encadré 30. Une lame de verre placée devant l'un des trous d'Young (idem.) :

- a. interférence avec le laser**
- b. pas d'interférence avec la lampe à mercure**

4.2.2. Modèle spectral

Nous commençons par introduire le modèle spectral puis nous montrons comment ce modèle est utilisé dans deux cas particuliers, celui des interférences produites par un doublet et celui des interférences produites par la lumière blanche. Nous terminons en généralisant pour une lumière quelconque.

4.2.2.1. Profil de raie

Le théorème de Fourier permet de considérer la fonction donnant la variation au cours du temps de l'amplitude de l'onde émise par une source, comme résultant de la superposition d'ondes élémentaires monochromatiques de fréquence ν , de longueur d'onde λ et de nombre d'onde $\sigma = \frac{1}{\lambda}$. Nous appelons distribution spectrale de l'onde, ou spectre, la fonction donnant la répartition de l'amplitude des ondes élémentaires en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde (ou du nombre d'onde). Dans la suite, cette fonction sera notée $\frac{dI}{d\sigma}$.

Comme nous l'avons remarqué, la nature de l'émission lumineuse limite la cohérence temporelle. Cela signifie que la durée des trains d'ondes n'est pas infinie mais limitée et que le spectre est centré sur une valeur centrale λ_0 ou σ_0 et a une largeur spectrale $\Delta\lambda$ ou $\Delta\sigma$ (Roux 1994, p. 233). La largeur spectrale est d'autant plus petite que la durée des trains d'onde est petite.

Deux phénomènes physiques sont à l'origine de l'élargissement de la largeur naturelle de la raie émise par un atome :

- D'une part, l'agitation thermique des atomes de la source provoque un décalage en longueur d'onde proportionnel à la vitesse d'éloignement ou de rapprochement entre l'atome et l'observateur : c'est l'effet Doppler-Fizeau qui dépend de la *température* de la source. Il se traduit par un élargissement symétrique du spectre en général représenté par une fonction gaussienne :

$$\frac{dI}{d\sigma} = \frac{I_0}{\Delta\sigma} \exp\left(-\frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{\Delta\sigma^2}\right),$$

- D'autre part, les chocs entre atomes de la source provoquent un déphasage aléatoire des ondes donc une diminution de la durée pendant laquelle le train d'onde est émis. Cela entraîne un élargissement asymétrique ou lorentzien, lié essentiellement aux nombres de chocs, donc à la *pression* de la source, et donné par la relation :

$$\frac{dI}{d\sigma} = \frac{I_0}{\Delta\sigma} \exp\left(-\frac{(\sigma - \sigma_0)}{\Delta\sigma}\right) \quad \text{si} \quad \sigma > \sigma_0.$$

Terminons en disant que les ondes élémentaires composant le spectre en fréquence d'une onde sont incohérentes entre elles. Par conséquent, l'intensité de la figure d'interférences produite par une source de répartition spectrale $\frac{dI}{d\sigma}$ est donnée par :

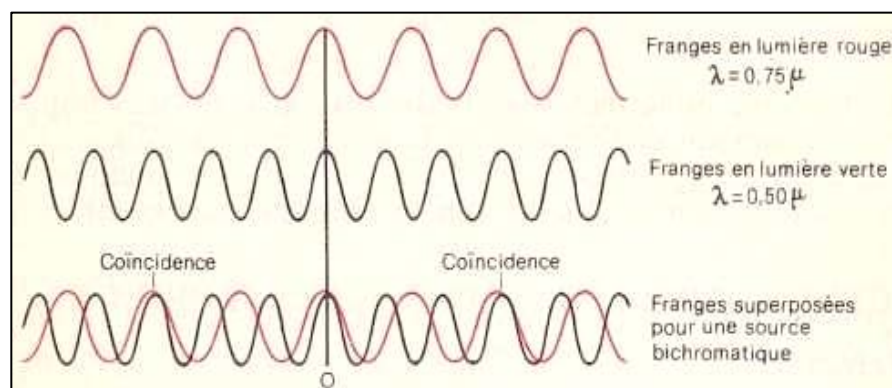
$$I(P) = 2 \int_{\sigma} \frac{dI}{d\sigma} (1 + \cos(2\pi\sigma\delta(P))) d\sigma.$$

4.2.2.2. Interprétation de la variation du contraste pour un doublet et de la figure obtenue avec une lampe bichromatique

Les franges d'interférences produites par une lampe à vapeur de sodium ont un contraste qui varie localement et périodiquement. Pour expliquer cette variation du contraste, nous considérons que le spectre de la lumière émise par la source primaire S est constitué de deux raies fines de fréquences ν_1 et ν_2 incohérentes entre elles : l'intensité résultant de la superposition des deux ondes est égale à la somme des intensités de chaque onde prise séparément. Pour obtenir l'intensité des franges produites par le doublet, nous considérons que chaque radiation du doublet donne lieu à un système d'interférences et que les franges produites par le doublet résultent de la superposition des deux systèmes d'interférences, d'interfranges légèrement différentes et de franges brillantes de "même couleur".

Les interfranges des deux systèmes étant différents, les systèmes d'interférences se décalent progressivement à partir du point de l'espace correspondant à l'ordre d'interférences zéro. Il existe des points de l'espace où une frange brillante de l'un des systèmes se superpose à une frange sombre de l'autre et réciproquement : nous observons dans ce cas un éclaircissement uniforme autour de ce point, signe d'un contraste nul. Nous parlons d'anticoïncidence des deux systèmes. Il existe des points de l'espace où une frange brillante de l'un des systèmes se superpose à une frange brillante de l'autre : les franges sont à leur maximum de netteté et le contraste est égal à 1. Nous parlons dans ce cas de coïncidence des deux systèmes.

L'encadré 31 explicite ce que nous venons de dire dans le cas, non pas d'un doublet, mais une lumière bichromatique, c'est-à-dire de deux radiations monochromatiques dont les fréquences correspondent à des lumières 'rouge' et 'verte'.



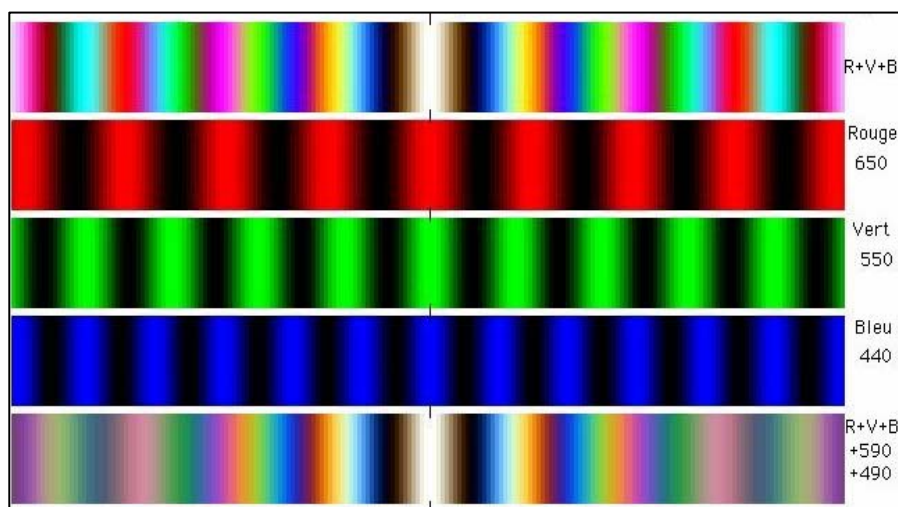
Encadré 31. Superposition des franges vertes et des franges rouges (Fontaine et al 1967, p. 197)

Dans ce cas, au lieu d'avoir des franges brillantes de même couleur, nous avons aux points de coïncidence, une frange dont la couleur résulte de la superposition de deux franges brillantes de couleur différente : nous observons au centre une frange jaune bordée d'un côté par du vert et de l'autre par du rouge.

4.2.2.3. Interprétation des franges irisées en lumière blanche

Lorsque nous remplaçons la source primaire ponctuelle monochromatique par une lumière blanche, nous observons sur l'écran une frange centrale encadrée de quelques franges irisées, puis du blanc à nouveau.

Pour interpréter ce phénomène, nous utilisons le même raisonnement que précédemment et nous considérons la lumière blanche comme « *une lumière à composition spectrale continue* » (Provost et Provost 1980, p. 122). Les franges d'interférences, correspondant aux diverses longueurs d'ondes présentes dans la source, se superposent, mais comme elles n'ont pas le même interfrange, elles sont décalées les unes par rapport aux autres à partir du point d'ordre O pour lequel tous les systèmes coïncident en donnant une frange blanche. Après la frange blanche, tous les systèmes de franges ont leur première frange sombre quasi au même endroit, c'est pourquoi la frange centrale du phénomène apparaît bordée de noir (Encadré 32). Dès la frange brillante suivante se montrent les irisations : la couleur bleue, jaune puis rouge etc.



Encadré 32. Franges colorées en lumière blanche

4.2.2.4. Généralisation : largeur de raie et contraste de la figure d'interférences

Le calcul de l'intégrale donnant l'intensité des franges produites par une source ayant un profil de raie de largeur $\Delta\sigma$ conduit à l'expression :

$$I(P) = 2I_0 \left[1 + C(P; \Delta\sigma) \cos(2\pi\sigma_0\delta(P)) \right],$$

où la fonction $C(P; \Delta\sigma)$ caractérisant le contraste est proportionnelle à la partie réelle de la Transformée de Fourier de la luminance spectrale de la source $\frac{dI}{d\sigma}$ ¹⁶. Plus la source se rapproche d'une source monochromatique ($\Delta\sigma$ tend vers 0), plus le contraste C est une fonction de P à support large : les franges sont partout bien contrastées. Dans le cas de sources quasimonochromatiques, il y a perte de contraste par rapport au cas d'une source parfaitement monochromatique.

En pratique, de nombreuses raies sont en fait des doublets, donnant lieu à l'addition des intensités. Nous pouvons nous rapprocher de la situation de parfaite cohérence temporelle en utilisant des sources spectrales (comme les lampes à vapeur de sodium par exemple), complétées par l'utilisation de filtres pour sélectionner, parmi toutes les longueurs d'ondes émises par la source, une seule raie quasiment monochromatique.

Comme nous venons de le dire, le contraste des franges d'interférences est lié à la répartition spectrale de l'intensité de la lumière émise par la source. Par conséquent, il suffit de connaître l'intensité de la figure d'interférences pour remonter au profil de raie. Cela peut être réalisé avec l'interféromètre de Michelson à partir de l'enregistrement de l'interférogramme (intensité observée en fonction de la distance séparant les miroirs, en d'autres termes de la différence de marche). Une fois l'enregistrement obtenu, nous en réalisons la Transformée de Fourier inverse pour obtenir le profil de raie. Le tableau 5 montre que plus la durée des trains d'ondes est grande, plus la largeur du spectre en fréquence est étroite et plus le champ d'interférences est grand.

¹⁶ L'équation définissant ainsi la fonction contraste est connue sous le nom de théorème de Wiener-Khintchine.

Tableau 5. Correspondances train d'ondes- spectre – interférogramme pour différentes situations

| Trains d'ondes | Spectre | Interférogramme |
|----------------|---------|-----------------|
| | | |
| | | |

4.2.3. Fonction d'« autocorrélation »

Après avoir introduit qualitativement le modèle des trains d'ondes, nous allons faire une étude quantitative en faisant référence à la fonction d'autocorrélation et montrer que la fonction caractérisant le contraste des franges peut être interprétée non seulement par le modèle spectral mais aussi par le modèle des trains d'onde.

Quand la source est partiellement cohérente temporellement, on caractérise la corrélation de l'onde à deux instant différents par la fonction d'auto-corrélation donnée par

$\Gamma(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V^*(t)V(t+\tau) dt$ ou par le degré de cohérence temporelle donné par :

$$\gamma_t = \frac{\langle f(t)f^*(t+\tau) \rangle}{I} = \frac{\langle f(t)f^*(t+\tau) \rangle}{\langle f(t)f^*(t) \rangle}.$$

Le terme $f(t)$ donne les variations du champ au cours du temps en un point donné de l'espace. Les deux notions de corrélation temporelle et de répartition spectrale d'une lumière sont liées l'une à l'autre par la Transformée de Fourier :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t+\tau)f^*(t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F^*(\omega)F(\omega)e^{-j\omega\tau} d\omega.$$

On en déduit que la densité spectrale $F(\omega) = \frac{dI}{d\sigma}$ vérifie $\frac{dI}{d\sigma} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau$ et que

par mesure du contraste des franges, on a accès à la densité spectrale de l'onde (théorème de Wiener-Khintchine) et à la fonction d'auto-corrélation.

Lorsque la source est parfaitement monochromatique, le facteur de cohérence est égal à 1 quelle que soit la différence de marche. Pour une source de lumière blanche, « *le spectre est large et γ est une fonction piquée sur $\delta = 0$, c'est-à-dire qu'il n'y a interférence qu'au voisinage de la différence de marche nulle (frange centrale)* » (Duffait 1997, p. 51). Dans ce cas, la longueur de cohérence temporelle L_t est de la forme : $L_t = c\tau_t = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda_{1/2}}$.

4.2.4. Caractéristiques temporelles du laser et des lampes spectrales

A titre indicatif, par ordre décroissant de longueur de cohérence, nous avons le Laser, la lampe à hydrogène (quelques millimètres), la lampe au sodium, la lumière blanche. Nous pouvons récapituler les propriétés des différentes sources utilisées en Travaux Pratiques dans le tableau 6 ci-dessous.

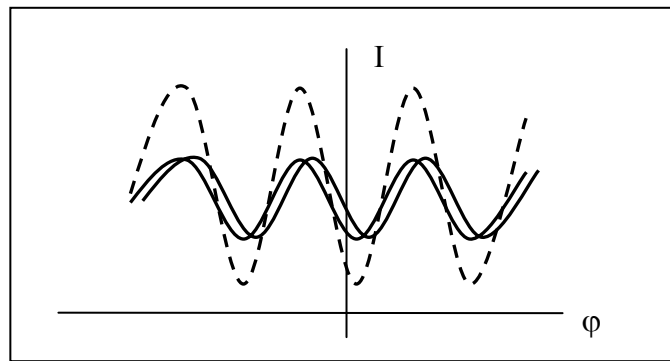
Tableau 6. Propriétés des différentes sources utilisées en T.P.

| Source | Longueur de cohérence L_t (m) | Durée de cohérence τ (s) | Largeur spectrale (Hz) |
|-----------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Lumière blanche | 10^{-6} | $3 \cdot 10^{-15}$ | $3 \cdot 10^{14}$ |
| Lampe spectrale | $3 \cdot 10^{-3}$ à 0.3 | 10^{-11} à 10^{-9} | 10^9 à 10^{11} |
| Laser stabilisé | 300 | 10^{-6} | 10^6 |
| Laser (record) | $3 \cdot 10^7$ | 10^{-1} | 10 |

Bien que le laser soit constitué d'un très grand nombre d'atomes, ces derniers émettent un ensemble de trains d'ondes de façon corrélée « *Plus précisément, tous les atomes d'un laser émettent en phase les uns par rapport aux autres et ce n'est que la phase globale de l'ensemble qui varie aléatoirement au bout d'un temps Δt . Non seulement il y a interférence entre les différents trains d'ondes mais encore cette interférence est constructive* » (Mouchet 2000, p. 161) c'est pour cela que le laser est puissant. « *La corrélation entre les atomes ne se limitent pas aux phases, aux amplitudes et aux directions d'émission des trains d'ondes mais concerne également les fréquences qui restent toujours très voisines les unes des autres* » (ibid, p. 162) c'est pour cela qu'il a une meilleure cohérence temporelle que les lampes.

4.3. Cohérence spatiale

Pour interpréter la troisième condition (la source doit être de petite dimension), nous considérons qu'une source primaire de lumière est constituée d'atomes émettant de manière indépendante et que la figure d'interférences donnée par deux sources secondaires est égale à la superposition des figures d'interférences données par chaque atome (Encadré 33).



Encadré 33. Superposition de deux figures d'interférences (en pointillée)

Une source primaire étendue donnera des interférences si le décalage des figures d'interférences dû à la différence des durées de propagation entre les différents points de la source et le point d'observation est petit devant l'interfrange. En fait, plus la dimension de la source est petite, plus la différence des durées de propagation depuis les deux points les plus éloignés de la source à un point donné de l'espace est petite, plus la cohérence spatiale est grande.

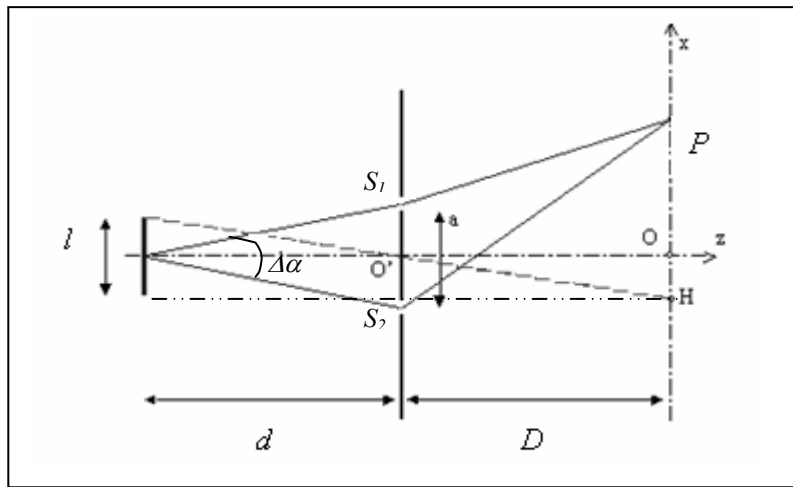
Nous allons analyser comment ce que nous venons de dire permet d'interpréter l'influence de la largeur de la source primaire dans le cas particulier des dispositifs à division du front d'onde. Nous introduirons ensuite les grandeurs permettant de caractériser la cohérence spatiale (largeur de cohérence, angle de cohérence spatiale)¹⁷.

4.3.1. Interprétation de l'influence de la largeur de la source primaire sur la visibilité des franges d'interférences dans le cas des trous d'Young

Dans le cas du dispositif d'Young (Encadré 34), nous désignons par l l'étendue de la source, a la distance séparant les deux trous S_1 et S_2 , d la distance source-trous et enfin D la

¹⁷ Une troisième grandeur est introduite dans l'annexe 5 qui est la « zone de cohérence ».

distance trous-écran d'observation. Les distances sont telles que $a \ll D$ et $l \ll D$. Le point P est le point d'observation.



Encadré 34. Trous d'Young éclairés par une source étendue

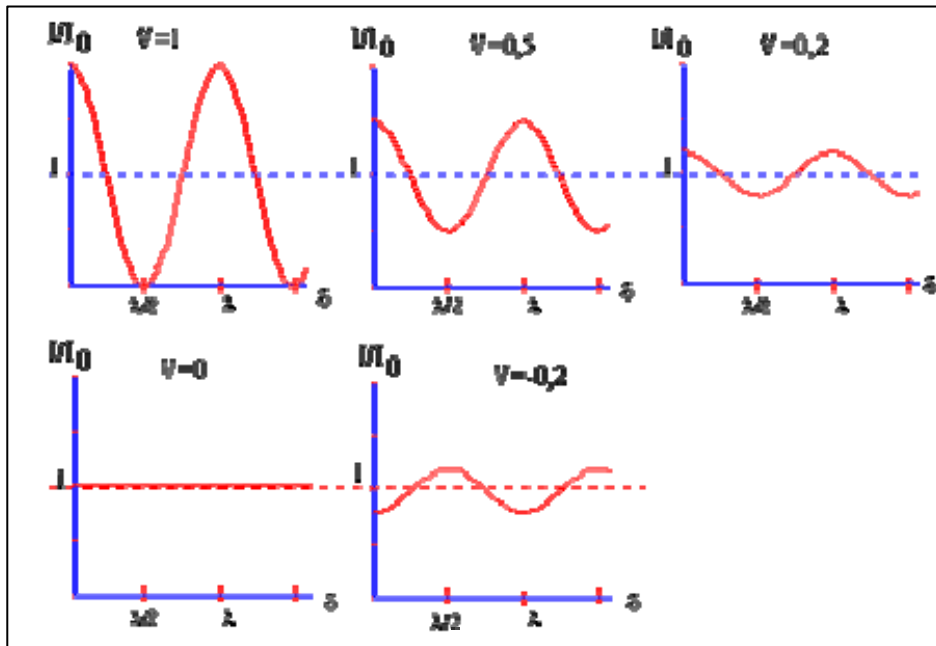
Dans le cas d'une source ponctuelle ($l = 0$), nous prévoyons d'observer au voisinage du point d'ordre zéro (ici le point O) des franges rectilignes parallèles à Oy et équidistantes (interfrange $i_0 = \frac{\lambda D}{a}$). Nous appelons H le point de l'axe Ox correspondant à l'ordre zéro pour la figure d'interférences produite par le point le plus éloigné du centre de la source.

Quand nous élargissons la source, nous obtenons un premier brouillage de la figure d'interférences lorsque la distance OH est égale à un demi interfrange. En tenant compte des expressions $OH = \frac{lD}{2d}$ et $\frac{i_0}{2} = \frac{\lambda D}{2a}$, la condition de visibilité des interférences est donnée par $lD/d < \lambda D/a$ autrement dit par $\lambda/a > l/d$. Cette expression signifie que l'angle sous lequel nous voyons la source depuis le point situé à équidistance des trous d'Young est inférieur à l'angle sous lequel nous voyons l'interfrange depuis ce même point.

Nous interprétons ce qui se passe dans le cas d'une source « large » en la décomposant en un ensemble de sources ponctuelles incohérentes. Chaque source élémentaire contribue à l'éclairement de l'écran selon une figure d'interférence identique mais translatée. Il suffit ensuite de faire l'intégrale des intensités élémentaires pour obtenir la figure d'interférences globale. Ainsi, l'intensité totale s'écrit :

$$I = I_0 \left(1 + \frac{\sin u}{u} \cos 2\pi \frac{ax}{\lambda D} \right) \text{ avec } u = \frac{\pi la}{\lambda d} \text{ et } x \text{ l'abscisse du point } P.$$

L'évolution de l'intensité des franges dans le plan d'observation au fur et à mesure que l'étendue de la source S augmente est donnée par l'encadré 35. Le facteur de visibilité diminue.



Encadré 35. Variation de l'intensité suite à l'augmentation de l'étendue de la source

4.3.2. Grandeurs caractérisant la cohérence spatiale : largeur de cohérence et angle de cohérence spatiale

Pour introduire ces grandeurs, nous prendrons comme exemple le dispositif d'Young. Compte tenu de ce qui précède, la condition sur la visibilité des franges peut s'écrire : $\lambda/l > a/d$. Le terme a/d correspond à l'angle $\Delta\alpha$ sous lequel nous voyons la source depuis le point situé au milieu du segment reliant les trous d'Young. Cette relation permet d'introduire l'angle α_s , donné par $\alpha_s = \lambda/l$. Cet angle est appelé **largeur angulaire de cohérence spatiale** ou angle de cohérence spatiale de la source S . Les franges d'interférences ne sont pas brouillées si $\Delta\alpha < \frac{\lambda}{l} = \alpha_s$.

Une interprétation simple de cette relation faisant appel à la diffraction de la lumière par une ouverture peut être donnée dans le cas où l'ouverture-source est éclairée par un laser. Une ouverture de taille l éclairée uniformément par une onde plane monochromatique produit un faisceau de lumière cohérente ayant la forme d'un cône d'angle au sommet λ/l (Mouchet 2000, p. 156.). Les deux trous d'Young seront cohérents s'ils sont à l'intérieur du cône de

lumière. Cela conduit à dire que l'angle a/d sous lequel on voit les trous d'Young depuis le centre de la source vérifie $a/d < \lambda/l$. Cela conduit également à dire que la largeur du faisceau de lumière à la distance d de la source est supérieure à la distance séparant les trous d'Young, autrement dit $(\lambda/l)d > a$.

Dans le cas d'une ouverture-source éclairée par une source autre que le laser, la grandeur $\lambda d/l$ correspond à la largeur de la zone transversale à la direction moyenne de propagation de la lumière à la distance d de la source, pour laquelle la durée de propagation des ondes émises par les différents points de la source est quasi constante. Cette grandeur est appelée largeur de cohérence spatiale et est notée L_s .

Précisons que la notion de largeur de cohérence peut être utilisée dans d'autres dispositifs : ce qui compte c'est que la distance entre les sources secondaires soit plus petite que L_s . Si les sources sont à l'infini, il faut raisonner en angle de cohérence (comme c'est le cas pour l'interféromètre stellaire de Michelson qui a permis en 1920 d'estimer le diamètre angulaire des plus grosses et plus proches étoiles).

4.3.3. Contraste et distribution de l'intensité

Quand la source est partiellement cohérente spatialement, l'intensité de la figure d'interférences est donnée par :

$$\frac{I}{I_0} = 2(1 + \gamma_s \cos \varphi) \text{ où } \gamma_s \text{ caractérise le contraste des franges.}$$

Nous pouvons montrer que le contraste des franges produites par une source de largeur donnée vérifie :

$$\gamma_s = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I(\alpha) \exp(-jk_0 x \alpha) d\alpha}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(\alpha) d\alpha}.$$

Cette équation¹⁸ définit le degré de cohérence spatiale de l'onde. Celui-ci est égal à la transformée de Fourier de la distribution de l'intensité $I(\alpha_x, \alpha_y)$ de la source (avec α l'angle sous lequel nous voyons la source). Elle permet de prévoir la diminution du contraste des franges quand nous élargissons la source.

¹⁸ Elle porte le nom de théorème de Van Cittert et Zernike.

4.4. Approche générale de la cohérence spatiotemporelle

Précédemment, nous avons étudié séparément la cohérence temporelle et la cohérence spatiale. Dans le premier cas, nous avons supposé la source ponctuelle et dans le second la lumière monochromatique. Or une source de lumière n'est jamais parfaitement ponctuelle ni parfaitement monochromatique. Nous devons donc tenir compte de la cohérence temporelle et de la cohérence spatiale à la fois. Pour cela, on introduit le concept de cohérence spatiotemporelle en tant qu'extension des concepts de cohérences temporelle et spatiale (Provost et Provost 1980).

On s'intéresse à la superposition de plusieurs ondes en un point P . Ces ondes proviennent des différentes sources ponctuelles constituant la source étendue et sont modélisées comme une succession de trains d'ondes émis de façon aléatoire par chaque source ponctuelle. L'amplitude de l'onde en P s'écrit sous la forme :

$$a(P, t) = a_0 e^{-j\omega t} \sum_{n=1}^N e^{j\varphi_n}, \text{ avec } \{\varphi_n\}_{n \in \{1, \dots, N\}} \text{ phase des ondes monochromatiques}$$

arrivant en P .

Le module au carré de $a(P, t)$ s'écrit donc :

$$\begin{aligned} |a(P, t)|^2 &= a_0^2 \left(e^{j\varphi_1} + \dots + e^{j\varphi_N} \right) \left(e^{-j\varphi_1} + \dots + e^{-j\varphi_N} \right) \\ &= a_0^2 \left[N + \sum_{0 \leq n < m \leq N} \left(e^{j(\varphi_n - \varphi_m)} + e^{j(\varphi_m - \varphi_n)} \right) \right] \\ &= a_0^2 \left[N + \sum_{0 \leq n < m \leq N} 2 \cos(\varphi_n - \varphi_m) \right]. \end{aligned}$$

Lorsqu'il n'y a pas de corrélation entre les ondes, les phases φ_n et $(\varphi_n - \varphi_m)$ sont aléatoires. Comme N est grand, la somme des cosinus s'annule (ou reste petite devant N). Au point P , un capteur détecte une intensité égale à la somme des intensités de chaque onde : $I = Na_0^2$, les intensités s'ajoutent et il n'y a pas d'interférences.

4.5. Conclusion partielle

Au travers de ce panorama de la physique des interférences lumineuses, nous avons voulu montrer que la diversité des faits expérimentaux s'interprète dans le cadre d'un modèle ondulatoire de la lumière et d'un modèle semi-classique de l'émission lumineuse en faisant appel :

- au principe de superposition des ondes émises par deux sources cohérentes
- à une règle d'addition des figures d'intensités produites par des sources incohérentes
- à la formation des images par réflexion et réfraction.

Nous avons également voulu souligner que l'étude des interférences produites par les différents dispositifs interférentiels éclairés par une source ponctuelle peut se ramener à celle des interférences produites par deux sources secondaires. Lorsque la source est étendue, le principe est le même.

Par ailleurs, nous avons souhaité accompagner la définition des interférences des conditions de leur obtention et interpréter celles-ci de manière qualitative grâce au modèle des trains d'onde. Nous avons aussi voulu montrer que ce modèle permet d'interpréter d'autres faits expérimentaux et que le concept de cohérence spatiale caractérise l'onde et non seulement la source primaire.

Chapitre 2

***HISTOIRE DES INTERFERENCES
LUMINEUSES***

1. Introduction

Comme plusieurs travaux en didactique (par exemple, Benseghir et Closset 1993 ; Saltiel et Viennot 1985, Maurines 2001) ont montré l'existence de similitudes de raisonnement entre des anciennes théories et les idées des étudiants, nous avons émis l'hypothèse qu'il en serait de même pour le phénomène des interférences, ceci en tenant compte que :

« le contexte historique de la pensée de tel ou tel homme de science du passé n'est pas celui de l'école ou de l'université de 1977, la pression idéologique et l'autorité ne sont pas de même nature et ne vont pas dans le même sens, les étudiants ou les élèves ne sont pas les "grands hommes" de leur époque » (Vergnaud et al 1978, p. 8).

Cela nous a amené, d'une part, à chercher dans l'histoire les difficultés qu'ont pu rencontrer les scientifiques lors de l'étude du phénomène des interférences lumineuses car celles-ci peuvent donner une idée des difficultés que risquent de rencontrer l'étudiant au cours de son apprentissage ; et d'autre part à nous intéresser à la manière dont l'interprétation du phénomène des interférences a émergé car elle pourrait nous aider à faire des propositions d'enseignement.

Pour cette étude historique, nous nous sommes appuyée sur des documents de différentes natures, à savoir des textes scientifiques originaux (Young 1802 ; Biot 1816, 1824 ; Billet 1858 ; Verdet 1869, 1872 ; De Senarmont et al 1866¹⁹ ; Michelson 1890, 1891, 1892) et des travaux sur l'histoire de la lumière (Marie 1887 ; Maitte 1981 ; Kipnis 1991 ; Maury 1992 ; Mason 1956 ; Massain 1982 ; Ronchi 1966, 1996 ; Rosmorduc 1979, 1987, 1995, 1996 ; Shamos 1990 ; Worrall 1975 ; De Hosson 2004, etc.). Nous avons également consulté des livres plus généraux tels que les encyclopédies (Taton 1961 ; Encyclopædia Britannica 1829) ou les dictionnaires d'histoire et de philosophie des sciences (Bynum et Browne 1985 ; Lecourt 2003).

Dans un premier temps, nous donnons un bref aperçu sur les interprétations des phénomènes lumineux avancées par les scientifiques de l'antiquité au dix-huitième siècle. Ensuite, nous analyserons comment les concepts utilisés de nos jours pour l'étude des interférences ont été élaborés au 19^{ème} siècle par Young et Fresnel. Nous nous intéresserons

¹⁹ Nous avons utilisé la nouvelle édition de ce livre parue en 1995.

particulièrement aux difficultés soulevées par la détermination des conditions d'obtention de ce phénomène et à l'émergence du concept de cohérence et de son interprétation. Nous terminerons en disant deux mots sur les travaux des successeurs de Fresnel.

2. Quelques éléments d'histoire des théories de la lumière

2.1. Antiquité et Moyen-âge

Très tôt, on s'est intéressé non pas à la lumière, mais à la vision. Différentes explications sont proposées. Pour Démocrite (460-370 av. J. C.), la vision résulte d'"un quelque chose" qui est émis par les corps lumineux et influence l'œil. Pour Euclide (3^{ème} siècle av. J. C.), la vision est provoquée par un "flux visuel" sortant de l'œil et allant vers l'objet. Platon (428-348 av. J. C.) propose une explication combinant les deux précédentes où la vision résulte de la rencontre d'un "quelque chose" émis par l'œil et par l'objet observé. Aristote (384-322 av. J. C.) considère que la vision naît du mouvement excité par le corps sensible d'un milieu intermédiaire entre l'objet et l'œil. Plus tard, Lucrèce (98-55 av. J. C.) explique la vision par le fait qu'un ensemble de rayons visuels est émis par l'œil.

Les progrès sont venus ensuite d'Égypte où le grand savant arabe Ibn Alhaytham dit Alhazen (965-1039), surnommé le second Ptolémée, réalise plusieurs expériences destinées à mettre en évidence l'influence de la lumière sur l'œil, en inventant le dispositif appelé « chambre obscure ». Le phénomène de la vision est alors décomposé en processus élémentaires (l'image d'un objet est l'ensemble des images des points qui le constituent) et l'idée d'indépendance des rayons lumineux qui se croisent sans être altérés est avancée. De plus, Alhazen réalise et interprète de très nombreuses expériences de réflexion et de réfraction, utilisant des miroirs ou des lentilles planes ou sphériques.

2.2. XVI^{ème} et XVII^{ème} Siècle

2.2.1. Kepler

L'innovation chez Kepler (1571-1630) est d'avoir jeté les bases de l'optique géométrique en accordant une grande importance au rayon lumineux, outil fondamental pour

interpréter la vision et le fonctionnement des lentilles convergentes et divergentes. Il a le mérite de poser clairement le principe de la propagation rectiligne de la lumière de la source vers l'objet (supposée cependant se faire avec une vitesse infinie).

2.2.2. Descartes et Grimaldi

L'étude de la lumière a progressé avec Descartes (1596-1650) qui fait connaître les lois de la réfraction établies par Snell (1591-1626). Mais ses théories de la lumière sont nombreuses, confuses et contradictoires. Ainsi, pour lui, la lumière résulte de frottements entre tourbillons d'éther et se propage avec une vitesse infinie. La réflexion de la lumière est envisagée comme le rebond d'un jet de projectiles et la réfraction comme la traversée par ces projectiles d'une toile tendue, qui les accélère si le deuxième milieu est plus réfringent.

Fermat (1601-1665) a retrouvé les lois de la réfraction à l'aide du principe de moindre temps. Mais les difficultés qu'ont éprouvées ses contemporains à lier son principe aux autres théories, ont fait que Fermat a eu moins d'influence en optique qu'en mathématiques.

Grimaldi (1618-1663), disciple de Galilée, croit en la nature ondulatoire de la lumière. En réalisant une expérience consistant à recevoir les rayons du soleil directement sur deux trous très étroits et voisins, percés dans le volet d'une chambre obscure, il met en évidence un nouveau phénomène qu'il appelle diffraction. Ainsi, dans un ouvrage paru en 1665, Grimaldi mentionne avoir constaté qu'au contour des obstacles ou aux bords d'un trou, le trajet de la lumière subit une 'déformation'. En fait, dans les conditions où il s'est placé, il semble difficile pour Verdet que Grimaldi aient pu observer des franges d'interférences puisque « *si maintenant on laisse passer la lumière par les deux trous, et si l'on place l'écran de façon que la circonférence extérieure de l'anneau qui entoure l'une des images soit tangente à la circonférence qui limite le cercle blanc lumineux de l'autre image, les circonférences extérieures des deux anneaux paraissent plus sombres dans la région commune aux deux faisceaux que dans les points où ces faisceaux sont séparés. Il n'y a là, (...) qu'une observation fortuite d'un phénomène très complexe, dont l'explication exigerait la connaissance exacte des dimensions des deux trous, de leur distance mutuelle et de leur distance à l'écran* » (Verdet 1869, p. 51), ce qui n'est pas le cas dans les observations de Grimaldi.

2.2.3. Hooke

Les premiers travaux véritablement coordonnés sur le phénomène des interférences lumineuses concernent les couleurs observées à la surface des lames minces. Ils sont réalisés par Robert Boyle (1627-1691) et sont publiés dans les *Experiments and Considerations Touching Colours* (Londres, 1664). Robert Hooke (1635-1703) les prolonge dans un ouvrage intitulé *Micrographia* (Londres, 1665), consacré en particulier à des observations microscopiques. Hooke remarque qu'« *une coloration apparaît sur une lame transparente limitée par deux surfaces réfléchissantes, de réfringence différente de celle de la lame, lorsque son épaisseur est comprise entre une limite supérieure et une limite inférieure en dehors desquelles ne peut être perçue aucune couleur, la lame devenant transparente* » (Blay 2003, p. 596). Opposé à la théorie newtonienne de la lumière, Hooke explique cette coloration des lames minces en tenant compte de la réflexion par les deux faces et en utilisant, en quelque sorte, un principe de superposition des "impulsions". Il est le premier à soutenir l'idée que la lumière est constituée de vibrations rapides mais commet l'erreur de penser qu'elles se propagent instantanément avec une très grande vitesse.

2.2.4. Newton et Huygens

Dès le début du XVII^{ème} siècle, l'optique connaît une grande controverse et deux théories s'affrontent pendant presque deux siècles : d'une part la théorie de l'émission, dont le représentant principal est Isaac Newton (1642-1727) ; d'autre part, la théorie des milieux dont le représentant est Christian Huygens (1629-1695).

Les travaux de Newton en optique sont importants et la date de publication de ses deux traités (1672 pour la *Théorie des couleurs* et 1709 pour l'*Optique*) montre que leur auteur a toujours été préoccupé par le sujet. C'est en 1666 que Newton expérimente avec le prisme. Eclairant un prisme par la lumière du soleil, il observe derrière le prisme une bande de couleurs, qui lui paraît immatériel et qu'il appelle « spectre ». Il interprète l'existence des couleurs en disant que « *toute lumière homogène a sa couleur propre qui répond à ses degrés de réfrangibilité* » (Massain 1982, p. 266).

Auteur d'une théorie ondulatoire du son, Newton trouve fantaisiste l'hypothèse de la nature ondulatoire de la lumière. Selon lui, lors de l'émission, les corps lumineux doivent émettre des particules de lumière se succédant le long de lignes droites, à très grande vitesse et dans toutes les directions de l'espace. Pourtant, les expériences qu'il réalise (anneaux d'interférences) plaident plutôt en faveur de l'hypothèse ondulatoire. Ses écrits indiquent clairement tous les doutes qui l'habite et toutes les questions qu'il se pose à propos de la lumière. Il complique sa théorie corpusculaire en envisageant des actions instantanées à distance entre surfaces réfléchissantes et essaye en vain d'interpréter les phénomènes de nature ondulatoire avec des corpuscules lumineux. Sa description de la lumière comme composée de petites particules se déplaçant très vite en ligne droite se révèle adéquate pour expliquer la netteté des bords des ombres et la formation des images par réflexion. Ainsi, le phénomène de réflexion s'explique tout simplement comme le renvoi de la particule lumineuse lors d'un choc avec une surface plane. Par contre, l'explication de la réfraction qu'il propose soulève des problèmes car elle implique que la vitesse de la lumière est plus grande dans un milieu matériel que dans l'air : pour lui, les particules sont supposées avoir une masse si bien qu'un changement de milieu augmente l'effet de la force de gravitation exercée sur la particule, ce qui la dévie et l'accélère. Par ailleurs, sa théorie corpusculaire soulève d'autres questions : pourquoi deux faisceaux de lumière peuvent-ils se croiser sans se modifier ?

A la fin de l'année 1675, Newton explique la genèse des anneaux colorés en reprenant l'expérience de Hooke et plus généralement l'origine de la couleur des lames minces. Il place une lentille convexe sous une lentille plan-convexe, la surface plane de cette dernière étant tournée vers le bas. Il fait alors défiler sur ces deux lentilles les diverses couleurs homogènes²⁰. Il constate que l'aspect des anneaux est indépendant du degré de convexité des lentilles mais dépendant de l'épaisseur de la lame d'air séparant les deux verres : les anneaux sombres apparaissent avec l'accroissement de l'épaisseur. Ainsi, « *il effectue des observations très précises sur les cercles colorés produits. Bien qu'ayant constaté le caractère périodique des couleurs de ces cercles*²¹, Newton se refusa toujours à reconnaître à la lumière, (...), tout caractère ondulatoire » (Jandaly 1998, p. 237). En effet, Newton interprète le phénomène de la réflexion partielle en avançant la théorie des Accès : une partie des « rayons » incidents se

²⁰ A cette époque, il existe un dilemme sur l'homogénéité de la lumière blanche. Pour Newton, la lumière blanche est considérée « *comme composée (...) d'un agrégat de lumières homogènes* » (Blay 2001, p. 74).

²¹ « *Des cercles de même couleur correspondent à des épaisseurs traversées multiples les unes des autres* » (Jandaly 1998, p. 237).

trouvent dans des Accès de facile réflexion et une autre partie dans des Accès de facile transmission « *il sera disposé à intervalles égaux à être facilement transmis ou facilement réfléchis par une deuxième surface* » (Blay 2001, p. 90). Ainsi, les couleurs observées correspondent pour Newton à des rayons inégalement réfractés et ne résultent pas de la superposition de l'onde incidente et de l'onde transmise ou réfléchie.

Huygens, qui a connu personnellement Descartes, pense que l'univers est rempli de particules dont les mouvements oscillatoires se transmettent de proche en proche. C'est en faisant une analogie avec la propagation des rides à la surface de l'eau qu'il introduit le terme "onde". Par ailleurs, il établit un parallélisme entre le son et la lumière. Il décrit la notion d'onde à l'aide des principes suivants :

- * les particules ont la capacité d'osciller autour d'une position moyenne,
- * les particules sont en contact les unes avec les autres et se transmettent les vibrations,
- * chaque particule se mettant à vibrer joue le rôle d'une source de vibration secondaire.

De plus, Huygens ajoute deux autres principes explicatifs, à savoir :

- * un principe de superposition où les ondes se traversent l'une l'autre sans se gêner et s'unissent de sorte qu'elles composent une seule onde. Huygens cependant ne distingue pas l'intensité de l'amplitude des ondes,

- * un principe dit aujourd'hui de Huygens où les ondes s'auto-engendrent par multiplication, la somme de deux ondes étant encore une onde. Cette dernière, en un point donné, est la superposition des "ondelettes" émises par les divers points.

Sa théorie lui permet d'expliquer les phénomènes de réflexion, de réfraction et même de double réfraction de la lumière par la calcite. Par contre, elle ne lui permet pas d'expliquer la propagation rectiligne et la netteté des bords des ombres. En effet, Huygens n'a pas d'idée très claire des phénomènes d'interférences et plus généralement des relations de phase. Cela rend sa théorie parfois obscure. Malgré sa capacité à expliquer les phénomènes de réflexion et réfraction, la théorie de Huygens ne s'est pas imposée dans le milieu scientifique, en grande partie à cause de la notoriété de Newton.

3. Young et Fresnel

Il faut attendre le début du XIX^{ème} siècle pour que les expériences de diffraction et d'interférences livrent leurs secrets et que deux scientifiques, Young et Fresnel, fournissent des outils permettant de trancher en faveur de la théorie ondulatoire.

3.1. Principe de superposition – Principe d'interférence

Les historiens ne sont pas d'accord sur l'interprétation adéquate qu'il faut attribuer aux termes 'superposition' et 'interférence' que Young introduit dans ses travaux. Alors que pour Worrall, les deux termes signifient la même chose, Latchford réserve le terme d'interférence à l'optique d'Young et le terme de superposition à l'acoustique d'Young.

Pour y voir plus clair et établir ce que nous allons considérer comme notre référence, nous allons distinguer différents principes de superposition.

Le principe le plus général est celui du principe de superposition des mouvements : c'est-à-dire « *quand une particule participe simultanément dans deux mouvements, ses composants instantanés du déplacement est égal au vecteur somme des déplacements, que la particule a si chaque mouvement existe seul. La première partie de cette formulation est la règle de composition alors que la deuxième définit les mouvements indépendants* » (Kipnis 1991, p. 18). Pour l'auteur²², le principe de superposition est appliqué à deux mouvements 'indépendants'.

Il y a aussi le principe de superposition des ondes qui signifie l'addition appliquée à un instant donné des représentations temporelles de chaque vibration, en particulier, des amplitudes. Cette addition peut se faire de manière analytique ou graphique. En fait, le principe de superposition des ondes, basé sur le principe de superposition des mouvements, est appliqué pour les ondes de faible amplitude.

D'après Kipnis (op. cit. p. 21), le principe de superposition est une simple loi mathématique alors que le principe d'interférence se réfère à un phénomène physique observable correspondant à des changements périodiques de l'intensité du son, de la lumière et des ondes à la surface de l'eau. L'énoncé de ce principe était le plus souvent accompagné de l'énoncé de conditions expérimentales.

²² Il fait référence implicitement à la linéarité des équations.

3.2. Young

3.2.1. Transition son – optique

Le médecin anglais Thomas Young (1773-1829) est un esprit universel puisqu'il est capable d'écrire dans l'encyclopédie *Britannica* des articles sur la vision, l'arc-en-ciel, le mouvement des fluides et les marées, la capillarité, la pesanteur, l'architecture navale, la médecine, la rosée, les hiéroglyphes.

Young se réfère à l'idée d'un modèle ondulatoire de la lumière et s'appuie sur ses observations des phénomènes sonores et le principe d'interférences des ondes sonores qu'il avance peu de temps avant. Ainsi, « *il avait remarqué que, contrairement à l'idée reçue à son époque, l'intensité du son produit par un nombre donné d'instruments de musique identiques n'est pas en proportion du nombre d'instruments : il y a des endroits où le son est moins intense (et d'autres où il est plus intense)* » (Bracco 2004, p. 77). De plus, le phénomène des battements des ondes sonores semble l'avoir conduit à la première idée de l'interférences des vibrations : « *c'est le phénomène de battements qui paraît avoir suggéré à Young la première idée de l'interférence des vibrations. Les ondulations d'où résultent les battements ne sont ni de même origine ni de même période ; mais si les périodes sont peu différentes, ces vibrations se trouvent alternativement dans les mêmes conditions favorables à leur renforcement et à leur affaiblissement réciproques, et ces effets contraires sont sensibles à l'oreille* » (Verdet 1872, p. 322).

Par la suite, il a recours à l'analogie (en 1801) entre le son et la lumière pour établir le principe de superposition des ondes lumineuses. Ainsi « *la lumière étant formée d'ondes tout comme le son* », il se demande « *si, d'une manière analogue, deux faisceaux lumineux, issus de la même source originelle, ne sont pas susceptibles de produire, tantôt une lumière plus intense, tantôt de l'obscurité. Il met à ce propos en évidence l'analogie existant entre les lois des tuyaux sonores fermés et celle des anneaux colorés. Il appelle interférences le phénomène perçu et montre que son existence permet d'expliquer facilement différents effets restés mystérieux : les couleurs des lames minces, (...) ainsi que diverses figures de diffraction* » (Rosmorduc 1987, p. 221).

3.2.2. Lames minces

Young (en mai 1801), en reprenant l'idée de Hooke, propose que la lumière réfléchie en partie sur la première face de la lame mince doit, en s'ajoutant à l'autre partie de lumière réfléchie sur la deuxième face, déterminer la formation de franges (Figure 1).

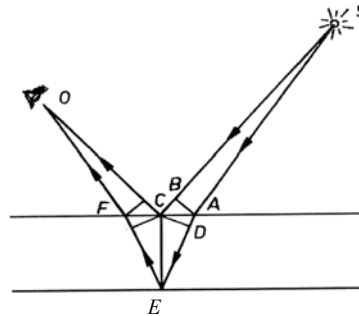


Figure 1. Schéma donné par Young pour obtenir les couleurs à partir des lames minces
(*Misc. Works 1 : Fig. 130*²³).

Young s'intéresse au calcul de la différence de marche δ des rayons interférents SCO et $SAEFO$. [O représente la position de l'œil et S la source lumineuse (le soleil), AB est perpendiculaire à SC et CD à AE , $e=CE$ est l'épaisseur de la lame et r l'angle de réfraction] :

$$\delta = 2DE = 2e \cos r .$$

Et pour tester ce résultat, Young le transforme en considérant que « hence, that DE may be constant, or that the same color may be reflected, the thickness CE must vary as the secant of the angle of refraction CED ; which agrees exactly with Newton's experiments; for the correction is perfectly inconsiderable »²⁴ (Kipnis 1991, p. 93). Ainsi, il vérifie que pour une différence de marche constante (ou pour une même couleur) : $e \cos r = \text{const.}$

Pour interpréter le phénomène d'interférences grâce au principe de superposition des ondes, il a recours à des représentations mathématiques de la lumière. Contrairement à ce qu'il fait pour les interférences sonores où les ondes sont représentées par une fonction triangulaire, il utilise pour les interférences lumineuses une représentation sinusoïdale, déjà introduite par Newton pour expliquer sa théorie des accès. Ainsi, « la différence fondamentale avec la théorie de Huygens est que les vibrations sont périodiques, et qu'il ne s'agit plus d'"impulsions". Young se donne ainsi le moyen d'expliquer les couleurs, grâce aux longueurs

²³ *Miscellaneous Works of the late Thomas Young*. 3 vols. Éditeurs : G. Peacock (vols. 1-2) et J. Leitch (vol. 3). London : J. Murray, 1855. Repris. New York : Johnson Reprint Corp., 1972.

²⁴ Young, « Theory of light », p. 160.

d'ondes caractéristiques de ces « ondulations ». Il bénéficie de l'apport d'Euler dans ce domaine » (Bracco 2004, p. 78). Young propose une interprétation qualitative, avec une résolution graphique et sans détails numériques.

Lors de l'étude de l'expérience des lames minces, Young formule différentes versions du principe des interférences. La première est introduite dans son article "Theory of light" du *Royal Society* en 1801 :

(Y1) « *When two undulations, **from different origins**, coincide either perfectly or very **nearly in direction**, their joint effect is a **combination** of the motions belonging to each » (Worrall 1975, p. 70).*

Dans cette version, la "combinaison" des perturbations ne se produit *qu'à condition* que les deux ondulations issues d'origines différentes aient presque la même direction.

Dans une deuxième publication apparue en 1802, Young donne la raison des teintes prises par les lames minces :

(Y2) « *La loi est que lorsque deux portions de la **même lumière** arrivent à l'œil par des **voies différentes**, soit exactement dans la **même direction**, soit dans deux **directions très proches**, la lumière est au maximum d'intensité lorsque la différence des chemins parcourus est un multiple d'une certaine longueur et au minimum d'intensité pour l'état intermédiaire des positions interférentes ; cette longueur prend des valeurs différentes pour les **lumières des différentes couleurs** » (Young 1802, pp. 113-114).*

Ici viennent s'ajouter l'idée que les faisceaux lumineux doivent avoir la même origine et les conditions d'interférences constructive et destructive.

Young mentionne qu'il n'y a pas d'interférences « entre lumières » de différentes couleurs. Son idée majeure est que quand deux faisceaux de lumière blanche se rencontrent en un point, la condition d'interférence destructive se réalise pour certaines couleurs qui disparaissent donnant ainsi une tache colorée au lieu d'être blanche. Mais il n'explique pas ce processus clairement et certains de ses contemporains le comprennent comme étant contradictoire à la théorie des couleurs de Newton. En effet, celui-ci démontre que le mixage des couleurs produit de la lumière blanche alors que Young déclare l'opposé à savoir que le mixage de deux faisceaux de lumière blanche forme des couleurs.

Young continue à donner d'autres versions du principe d'interférences dans lequel il introduit à chaque fois les conditions d'interférences. Sa troisième version publiée dans le

Royal Institution lectures en 1803, montre qu'il insiste sur la condition de la même origine, mais par contre il ne détaille ni celle portant sur la fréquence, ni celle portant sur la petitesse de la différence de marche :

(Y3) « *In order that the effects of two portions of light may be thus combined [to produce 'the alternate union and extinction of colours'] it is **necessary** that they be derived from the **same origin**, and that they arrive at the **same point** by **different paths**, in **directions not much deviating from each other** » (Worrall 1975, p. 74). La principale condition pour Young est donc que deux "portions" de lumière ont la même origine et arrivent au même point par des chemins parcourus différents. Signalons par ailleurs que cette citation pousse Brougham à s'interroger sur ce que vise Young en parlant de deux "portions" de la "même" lumière.*

La version suivante du principe d'interférence apparaît dans son article "*Chromatics*"²⁵ en 1817 où Young est très prudent dans le choix des mots :

(Y4) « (...) when two **equal** portions of light, in circumstances **exactly similar**, have been separated and coincide again, in nearly the **same direction**, they will either co-operate, or destroy each other, accordingly as the difference of the times, occupied in their separate paths, is an even or an odd multiple of a certain half interval (...) » (Worrall 1975, p. 77). Ainsi, les deux "portions" de lumière sont devenues "égales" et "similaires" (ce qui n'est valable que pour les ondes de même intensité). Le principe d'interférence, trouvé en 1803, est enfin donné sous sa forme définitive. Seule la condition sur la largeur de la source n'est pas étudiée.

3.2.3. Trous d'Young

Après les lames minces, Young réalise une expérience (en 1807) qui depuis porte son nom. En perçant deux trous dans une plaque opaque de sorte que deux parties de la lumière incidente peuvent passer, il observe une série de franges alternativement sombres et brillantes sur un écran situé derrière la plaque. La théorie corpusculaire (qui stipule que la lumière se propage en ligne droite) ne permet pas d'interpréter cette observation (Figure 2) car elle prévoit l'existence de « *deux points lumineux, se situant dans le prolongement des droites qui joignent la source à chacune des deux perforations du premier écran* » (Diu 2000, p. 228).

²⁵ *Encyclopaedia Britannica*. Suppl. 4^e ed. Edinburgh, 1824.

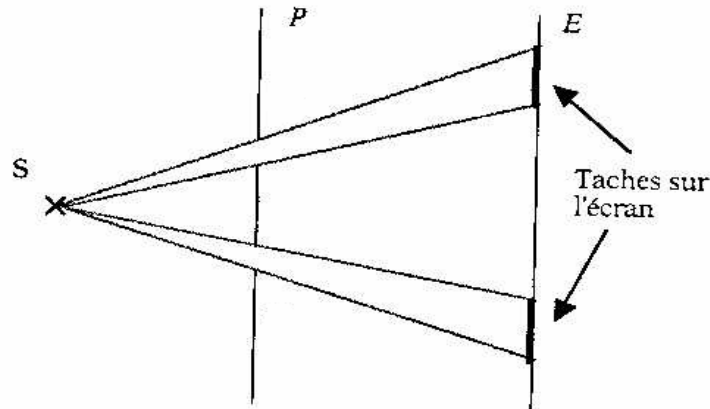


Figure 2. Trous d'Young en théorie corpusculaire (Diu 2000, p. 229)

Voici comment Young décrit son expérience des trous, selon ses propres termes dans les *Lectures I*²⁶, où il pense observer uniquement des interférences lumineuses : « (...) *a beam of homogeneous light falls on a screen in which there are two very small holes or slits*²⁷, which may be considered as centers of divergence, from whence the light is diffracted in every direction. In this case, when the two newly formed beams are received on a surface placed so as to intercept them, their light is divided by dark stripes into portions nearly equal, but becoming wider as the surface is more remote from the apertures, so as to subtend **very nearly equal angles** from the apertures at all distances, and wider also in the same proportion as the apertures are closer to each other. The middle of the two portions is always light, and the bright stripes on each side are at such distances, that the light, coming to them from one of the apertures, must have passed through a longer space than that which comes from the other, by an interval which is equal to the breadth of one, two, three, or more of the supposed undulations, while the intervening dark spaces correspond to a difference of half a supposed undulations » (Kipnis 1991, p. 118).

Nous pouvons récapituler son expérience, en nos termes, en disant qu'elle consiste à faire passer un faisceau de lumière (apparemment, Young utilise les rayons solaires qui traversent un prisme pour obtenir une lumière "homogène") à travers deux trous taillés à proximité l'un de l'autre dans un écran. Il en résulte un dédoublement de la lumière observable à l'œil sur une toile de fond. Or, au lieu de donner une seule tache lumineuse, le

²⁶ (1807). *A course of lectures on natural philosophical and the mechanical arts*. Vol I. London : J. Johnson. (nouvelle édition (1971). New York : Johnson Reprint Corp.), p. 464.

²⁷ Selon Billet, Young a effectué son expérience avec des trous. Mais à travers ses propos, il se dégage que Young n'a pas distingué les trous des fentes.

mélange des deux lumières produit une série de raies parallèles, les unes brillantes, les autres sombres : ce sont les franges d'interférences.

La citation précédente présente en plus de la description de l'expérience une expression qualitative des conditions d'interférence destructive. L'expérience permet à Young de déterminer les longueurs d'ondes de la lumière à partir de l'étude de la position des franges d'interférences²⁸. Elles se révèlent très courtes : d'environ 676 nm pour le rouge à 424 nm pour le violet (en physique moderne, les valeurs sont de 700 nm pour le rouge et 400 nm pour le violet). Young introduit la notion de "*longueur d'ondulations*" – appelée aujourd'hui "*longueur d'onde* ». Malgré que ce soit un point très discuté par les historiens, il semble qu'il ait aussi introduit la relation reliant l'interfrange (distance séparant les franges) à la distance séparant les trous et celle les séparant de l'écran d'observation $i_0 = \frac{\lambda D}{a}$.

Les contemporains de Young ne sont pas arrivés à reproduire son expérience pour plusieurs raisons. Dans ses *Lectures*, Young aurait simplifié au maximum la présentation de son expérience et de son interprétation en éliminant la plupart des détails techniques et mathématiques. Ainsi, il n'a pas donné beaucoup d'informations sur la manière de réaliser le dispositif pour obtenir des interférences. Ajoutons aussi le fait que la description de l'expérience des trous dans son *Lectures* est différente de celle des *Philosophical Transactions*. De plus, « *il s'est contenté d'expliquer en gros les phénomènes sans instituer entre l'expérience et la théorie cette comparaison minutieuse qui garantit seule la possession de la vérité* » (Verdet 1972, p. 326). Ainsi, si Young indique avoir utilisé la flamme d'une bougie pour éclairer les trous, il n'indique pas quelle est sa dimension, ni n'explique le phénomène en la décomposant en sources élémentaires. Il la considère implicitement comme ponctuelle alors qu'elle est étendue.

Précisons que Rosmorduc et al (1987) ont critiqué l'expérience d'Young qui laisse entendre que la diffraction est un cas particulier des interférences lumineuses : « *ses démonstrations manquaient souvent de rigueur. Enfin, les rayons qui interféraient, dans cette dernière expérience, étaient des rayons diffractés. La diffraction elle-même n'étant pas expliquée, l'interprétation de Young pouvait faire penser qu'il la considérait comme un cas*

²⁸ En fait, Young a obtenu des valeurs proches de celles obtenues par Newton avec les lames minces.

particulier des interférences » (op. cit. p. 221). Ce sont les successeurs d'Young qui énoncent clairement comment obtenir des franges d'interférences avec le dispositif d'Young.

3.2.4. Les conditions d'obtention

Le Tableau 7 récapitule les conditions introduites par Young dans ses différentes versions du principe d'interférence pour les dispositifs des lames minces et des trous (ou fentes) d'Young.

Tableau 7. Les conditions d'interférences selon Young

| Interférence par les : | Date | Origine | Fréquence | Direction et différence de marche | Largeur de la source |
|------------------------|------------|-------------------------|---|-----------------------------------|----------------------|
| Lames minces | Y(1) :1801 | Différente | ----- | Même direction | ----- |
| | Y(2) :1802 | Même | ----- | Même direction | ----- |
| | Y(3) :1803 | Même | ----- | Même direction | ----- |
| | Y(4) :1817 | ----- | « deux portions lumineuses identiques » | Même direction | ----- |
| Fentes/trous | 1807 | « deux petites fentes » | « lumière homogène » (c'est-à-dire ayant la même longueur d'onde) | « angles à peu près égaux » | ----- |

Ainsi, les conditions d'obtention des interférences lumineuses portant sur l'origine commune et la même direction sont mentionnées à différentes périodes. Toutefois, la condition sur la fréquence reste floue (puisque Young fait seulement allusion à la lumière homogène) et celle sur la différence de marche est inexistante. Remarquons que Young ne voit pas de différence entre les conditions d'obtention des interférences pour le dispositif des lames minces et pour celui des trous : la largeur de la source n'est jamais prise en compte alors qu'elle devrait l'être dans le cas des trous.

3.3. Fresnel

Fresnel (1788-1827) est un des premiers physiciens, qui s'est spécialisé réellement en ne s'intéressant qu'à un seul domaine, l'optique. Sceptique à l'égard de la théorie newtonienne de la lumière, il est convaincu de la validité de la théorie ondulatoire. Selon Kipnis, le travail réalisé par Fresnel comporte trois périodes (1815-1816 ; 1816-1818 ; 1819-1822). Au cours de la première période, Fresnel redécouvre le principe des interférences lumineuses et avance

la loi de la diffraction. Il démontre les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière avec le principe des interférences. Puis, il construit un nouveau dispositif, les miroirs des Fresnel. Pendant la deuxième période, Fresnel explique les « franges internes²⁹ » en considérant plusieurs ondes interférentes. En 1817, il résout le problème de l'addition de plusieurs ondes avec des phases arbitraires et étudie la polarisation. En 1821, au cours de la troisième période, Fresnel publie sa théorie sur la polarisation chromatique. Ceci l'aide à établir les conditions d'obtention des interférences et à introduire le concept des trains d'ondes. Il utilise comme dispositif celui d'une fente diffractante, puis les lames minces à faces parallèles.

3.3.1. Études sur la diffraction

Sans connaître les derniers travaux d'Young, Fresnel entreprend, à partir de 1814, une série d'expériences sur la diffraction de la lumière. A travers l'étude des ombres, en particulier celle d'un fil étroit, il est conduit au principe d'interférences.

Dans cette étude, il fait appel à la notion de "*longueur d'ondulation*" – appelée aujourd'hui "*longueur d'onde*" - et précise les paramètres dont elle dépend, à savoir la vitesse de propagation et la période d'oscillation: « *la longueur 'd' d'une ondulation dépend de deux choses :*

- 1) *de la promptitude (rapidité) avec laquelle le mouvement se propage dans le fluide,*
- 2) *de la durée de l'oscillation complète du plan vibrant ; car, plus sa durée sera longue et la propagation du mouvement rapide, plus le premier ébranlement sera loin du plan solide au moment où celui-ci reviendra à son point de départ »* (De Senarmont et al 1995, tome 2, p. 42).

Il calcule l'effet que doivent produire deux ondes qui se rencontrent en appliquant le principe des "*intersections de ces ondulations*" – nous dirions "*vibrations*" – qui se propagent suivant les rayons lumineux. Pour cela, il fait trois hypothèses :

1. « *les vibrations de la lumière sont les plus simples possibles -c'est-à-dire sinusoïdales,*
2. *la diffraction est due à la superposition d'ondes provenant de la source et d'ondelettes" réémises par les extrémités de l'écran diffractant,*

²⁹ C'est l'appellation qu'a donnée Fresnel aux franges d'interférences qui se trouvent envelopper par celle de la diffraction.

3. *les vibrations qui interfèrent se renforcent lorsqu'elles sont dans le même état vibratoire –elles ont alors une différence de marche valant un nombre entier de longueurs d'ondes- Fresnel dit qu'elles sont en phase ; au contraire, les vibrations s'annulent lorsqu'elles s'opposent- elles ont alors une différence de marche valant un nombre impair de demi-longueur d'ondes – il les dit en opposition de phase »* (Maitte 1981, tome 12, p. 222).

En confrontant ses conclusions théoriques avec l'expérience, Fresnel remet en question l'hypothèse que l'onde incidente interfère avec les ondes réémises par les bords du fil et avance celle que les ondes qui interfèrent sont celles émises par les points de la surface d'onde non interceptée par le fil. Il est ainsi le premier à avoir combiné le principe des interférences avec le principe de Huygens et trouver des solutions aux difficultés restées en suspens.

La force des travaux de Fresnel tient dans la construction de son argumentation et dans sa théorie mathématique. **Par le calcul** (qui s'appuie sur les célèbres *intégrales de Fresnel*), il parvient en 1817, d'une part, après division de l'onde lumineuse incidente en ondes élémentaires, à évaluer la somme des contributions de ces ondes partielles en un point pris dans la zone de diffraction, c'est-à-dire l'intensité de la vibration résultante en ce point ; et d'autre part au résultat que des franges claires et sombres doivent alterner et qu'elles sont situées sur des hyperboles. Le mathématicien Denis Poisson (1781-1840) ayant déduit de ces calculs que le centre de l'ombre d'un petit disque circulaire doit être un point brillant, Fresnel lui apporte la **confirmation expérimentale** de cette prévision. Par ailleurs, en montrant que le mouvement transmis par une onde sphérique se détruit partiellement par interférences, il a également su écarter l'objection faite à Huygens que la théorie ondulatoire ne permet pas d'expliquer la propagation rectiligne de la lumière.

3.3.2. Études sur les interférences

Fresnel élabore de nouveaux dispositifs interférentiels connus sous les noms de biprismes et miroirs de Fresnel pour s'affranchir du phénomène de diffraction : « *mais celle que je viens de décrire le met peut-être encore mieux en évidence, parce que les bandes obscures qu'elle présente sont en général plus noires que celles des phénomènes de diffraction proprement dites, et qu'elle éloigne toute idée d'une action **diffRACTIVE**, qui dilaterait les faisceaux lumineux dans certains points, pour les condenser sur d'autres,*

puisque le phénomène est ici produit par des rayons régulièrement réfléchis » (De Senarmont et al 1995, tome 2, p. 20). C'est surtout grâce à cet apport que son dispositif des miroirs a été retenu.

A travers ces expériences, il propose la relation donnant l'interfrange (en démontrant qu'elle est applicable pour les miroirs ainsi que pour les fentes) et les conditions de cohérence (en 1822). De plus, il est le premier à réaliser des inter-relations entre les différentes conditions de cohérence puisqu'il suppose que les interférences peuvent être observées avec différentes combinaisons de la dimension de la source, du degré de monochromaticité de la lumière et de la différence de marche.

3.3.3. Dispositifs interférentiels

3.3.3.1. Biprismes de Fresnel

Dans son expérience avec les biprismes (Figure 3), Fresnel « *a placé une source lumineuse S^{30} en face de la grande base d'un prisme isocèle de verre ABC (...). Les résultats ont été ceux mêmes que Young avait déjà obtenus. (...) on a pu observer sur cet écran une série de bandes parallèles aux arêtes du prisme (...). Une bande blanche occupait le milieu du tableau ; deux bandes noires se remarquaient de part et d'autre ; enfin, venaient des bandes irisées* » (Marie 1888, tome 12, pp. 45-46).

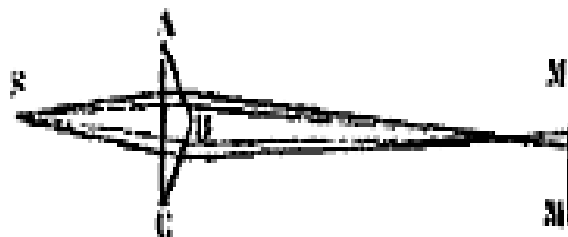


Figure 3. Biprismes de Fresnel (op. cit. p. 46)

Cependant, « *l'expérience n'était pas encore instituée de manière à fournir, ni les vérifications que Fresnel cherchait à la théorie qu'il avait déjà adoptée, ni les éléments*

³⁰ Pour obtenir une source lumineuse ponctuelle, Fresnel procède comme suit : « *au lieu de former le point lumineux avec un trou d'épingle pratiqué dans la feuille d'étain ou de carton qui ferme l'ouverture de volet de la chambre obscure, il est beaucoup plus commode d'y enchasser une lentille de verre, d'un très-court foyer, sur laquelle on dirige aussi les rayons solaires réfléchis horizontalement par le miroir placé en dehors de la chambre* » (De Senarmont 1995, tome 2, p. 12.)

nécessaires à la constitution définitive de cette théorie et à ses progrès ultérieurs. Fresnel avait déjà compris que l'interférence de deux rayons similaires ne pouvait avoir lieu que sous la double condition qu'émanés en même temps d'une même source, ils eussent parcouru, avant de se rencontrer de nouveau, des chemins différent entre eux d'une certaine quantité déterminée. Il imagina alors de substituer aux réfractions éprouvées par les deux faisceaux, avant leur concours, deux réflexions qui devaient, en outre, avoir l'avantage d'éliminer de la production du phénomène toute cause étrangère de dispersion » (idem.)

3.3.3.2. Miroirs de Fresnel

3.3.3.2.1. Construction du dispositif et condition sur l'angle des miroirs

Contrairement à l'expérience des trous d'Young pour laquelle nous n'avons pas pu trouver une description exhaustive d'Young lui-même, Fresnel donne des informations précises sur la manière d'utiliser les deux miroirs (en 1821), notamment le fait que l'angle entre les miroirs doit être petit pour que les franges ne soient pas trop serrées et ainsi puissent être observées : « *(on a) placé les deux miroirs l'un à côté de l'autre, et de sorte que les deux bords se touchent parfaitement, on les fait tourner jusqu'à ce qu'ils se trouvent presque dans le même plan, et forment néanmoins entre eux un angle légèrement rentrant, de manière à présenter à la fois deux images du point lumineux. On peut juger de cet angle d'après l'intervalle qui sépare les images ; il faut que cet intervalle soit petit pour que les franges aient une largeur³¹ suffisante. Mais une chose à laquelle on doit apporter le plus grand soin, c'est que les miroirs ne saillent pas l'un sur l'autre dans la ligne de contact, car une saillie d'un ou deux centièmes de millimètre suffirait souvent pour empêcher l'apparition des franges » (De Senarmont et al 1995, tome 2, p. 17).*

Fresnel précise qu'il réalise l'expérience par « *tâtonnement, en pressant peu à peu celui des deux miroirs que l'on croit le plus saillant contre la cire molle au moyen de laquelle on les a fixés sur un appui commun ; et l'on juge au tact, et mieux encore en cherchant les franges à l'aide de la loupe, si la condition est remplie. On pourrait sans doute imaginer un mécanisme au moyen duquel on ferait varier à volonté l'angle des deux miroirs, en évitant toute saillie de l'un sur l'autre ; mais il faudrait qu'il fût construit avec un grand soin. Si le procédé que je viens d'indiquer est plus long par les tâtonnements qu'il nécessite, il a du*

³¹ Les termes utilisés ont changé de signification au cours des siècles. Par exemple, nous parlons aujourd'hui d'« interfrange » (qui est la distance séparant deux franges de même nature) alors qu'avant, on utilisait le terme de « largeur des franges ».

moins l'avantage de n'exiger d'autre appareil que deux petits miroirs de métal ou du verre noir, et d'être ainsi à la portée de tout le monde » (idem.).

3.3.3.2.2. Condition sur la largeur de la source

Fresnel signale qu'il faut utiliser une source ponctuelle afin d'avoir des franges nettes et qu'il existe un lien entre la largeur de la source et le contraste des franges : « *On ne doit employer dans cette expérience, (...), que la lumière d'un seul point lumineux ; et pour que les franges soient bien nettes, il faut qu'il soit d'autant plus fin ou plus éloigné qu'elles sont plus étroites*³² » (ibid. p. 18).

3.3.3.2.3. Localisation des franges

Pour pouvoir localiser les franges (Figure 4), Fresnel stipule qu'il faut « *s'éloigner un peu des miroirs, et recevoir directement les rayons qu'ils réfléchissent sur une loupe d'un court foyer, derrière laquelle on tient son œil placé de manière que toute sa surface paraisse illuminée. Alors on cherche les franges dans l'espace où se réunissent les rayons réfléchis sur les deux miroirs, qu'il est facile de distinguer du reste du champ lumineux à la supériorité de son éclat* » (idem.).

La figure ci-dessous montre que les interférences sont à l'intersection des rayons réfléchis qui viennent des images de la source. Ce qui s'avère intéressant c'est que Fresnel trace les surfaces d'onde. Il y a deux types de surfaces d'onde, celles qui sont séparées par une longueur d'onde, et celles qui sont entre, donc séparées d'une demi-longueur d'onde. Les points qui sont à l'intersection des surfaces de même nature forment des interférences constructives, les autres destructives.

³² Nous parlons aujourd'hui de « franges serrées » et non de « franges étroites ou larges ».

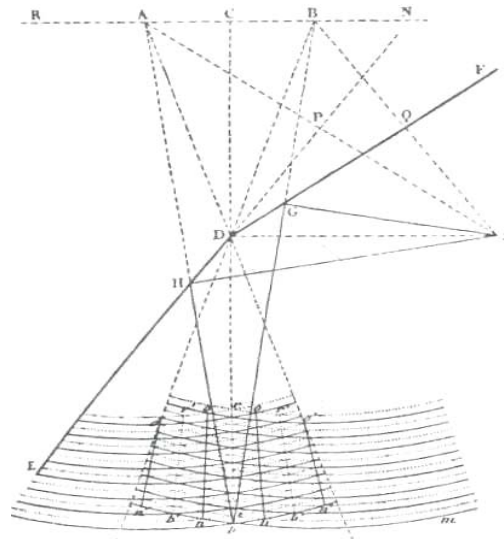


Figure 4. « Section des deux miroirs et des ondes réfléchies, faite par un plan mené du point lumineux perpendiculairement à ces miroirs projetés en ED et DF. Le point lumineux est en S, et A et B représentent les positions géométriques de ses deux images » (ibid. p. 55)³³

3.3.3.2.4. Observation en lumière blanche et homogène

Fresnel utilise tout d'abord une lumière blanche et constate comme Young que les franges sont « *parées des plus vives couleurs*³⁴ surtout celles qui avoisinent le centre ; car, à mesure qu'elles s'en éloignent, elles s'affaiblissent graduellement, et disparaissent enfin vers le huitième ordre » (idem.). Puis expérimentant en lumière homogène, obtenue à l'aide d'un prisme ou d'un verre coloré en rouge remis par Arago, il constate que « *la bande centrale est brillante, comme dans les franges qui divisent l'ombre d'un corps étroit, ou celles qu'on obtient au moyen d'un écran percé de deux fentes parallèles, très fines et suffisamment rapprochées. Cette bande brillante est placée entre deux bandes obscures du noir le plus foncé, quand on emploie, comme nous le supposons, une lumière sensiblement homogène ; chacune d'elle est suivie d'une bande brillante, à laquelle succède de nouveau une bande obscure, et ainsi de suite. Les bandes obscures sont encore d'un noir très foncé, dans les franges du deuxième et du troisième ordre ; mais, à mesure qu'on s'éloigne du centre, elles deviennent moins prononcées, ce qui tient à ce que la lumière employée n'est jamais parfaitement homogène* » (ibid. p. 19). Remarquons que Fresnel signale ici une variation du contraste des franges lorsqu'on s'éloigne de la frange centrale, variation qu'il relie au degré d'homogénéité de la lumière, autrement dit à son degré de cohérence temporelle.

³³ Nous pouvons dire que c'est Fresnel qui a donné le schéma avec les surfaces d'onde pour la lumière car Young les a utilisées seulement pour l'eau (Kipnis 1991, fig. 13, p. 55).

³⁴ « Pour bien distinguer ces couleurs, il faut avoir soin de rendre les franges suffisamment larges en rapprochant beaucoup l'une de l'autre les deux images du point lumineux » (idem.).

3.3.3.2.5. Relation donnant l'interfrange

A la fin de son explication de l'expérience des miroirs, Fresnel donne la relation reliant l'interfrange à la longueur d'onde : « *la largeur des franges, toujours proportionnelle à la longueur de d^{35} , doit être en outre en raison inverse de l'intervalle qui sépare les deux images du point lumineux, et en raison directe de leur distance au micromètre, ou, en d'autres termes, doit être en raison inverse de l'angle sous lequel l'observateur verrait cet intervalle, en plaçant son œil au point où il mesure les franges* » (ibid. p. 26). Puis, il fait une analogie entre ce dispositif et celui des fentes d'Young. Il suppose que les points A et B (Figure 4) images de la source par le miroir, peuvent être considérés comme les projections de deux fentes fines. Il conclut ainsi que les calculs qu'il réalise pour les miroirs peuvent être appliqués à l'expérience des fentes en stipulant que « *la largeur des franges est toujours en raison directe de la distance à l'écran, et en raison inverse de l'intervalle compris entre les milieux des deux fentes* » (idem.). En d'autres termes, la "largeur des franges", que nous notons i_0 serait égale à $\frac{\lambda D}{a}$ (cette relation est celle donnant l'interfrange).

3.3.4. Conditions d'interférences lumineuses

Contrairement à Young, Fresnel a pu formuler de manière claire les conditions d'obtention des interférences en 1822³⁶, en se référant aux dispositifs des trous, des miroirs de Fresnel et d'une lame mince³⁷ : « *On doit maintenant concevoir pourquoi les rayons lumineux quoique exerçant toujours une certaine influence les uns sur les autres, la montrent si rarement, et dans des cas si particuliers ; c'est que, pour la rendre sensible, il est nécessaire :*

- 1) *que les rayons qui interfèrent soient **partis d'une source commune** ;*
- 2) *qu'ils ne diffèrent dans leur **marche** que d'un nombre d'ondulations assez **limité**, même lorsqu'on emploie la lumière la plus simplifiée ;*
- 3) *qu'ils ne se croisent **pas sous un trop grand angle**, parce que les franges deviendraient si étroites qu'elles échapperaient à la plus forte loupe³⁸ ;*

³⁵ La longueur d est définie par Fresnel comme étant « *la différence des chemins parcourus par les rayons des faisceaux qui se réunissent au milieu de la bande brillante* » (ibid. p. 21).

³⁶ Les conditions d'interférences sont données durant la 3^{ème} période (1819-1822).

³⁷ Avec les lames minces, la condition sur la dimension de la source ne joue pas pour l'observation des franges. Chaque dispositif a permis à Fresnel de formuler les conditions d'obtention d'interférences.

³⁸ Ceci signifie que l'interfrange devient trop petit et nous ne pouvons distinguer plus rien.

4) *que, tant que ces rayons ne sont pas parallèles et forment entre eux un angle sensible, l'objet éclairant doit être de très petites dimensions, et qu'il soit d'autant plus fin que cet angle est plus considérable* » (ibid. p. 59).

Dans cette citation apparaissent les conditions sur l'origine des ondes (elle doit être unique), la différence de marche (elle doit être petite), la proximité des sources secondaires (sinon l'interfrange devient tellement petit que les franges sont trop resserrées et ne peuvent plus être observées), la dimension de la source (celle-ci doit être petite si les rayons ne sont pas parallèles). Notons que si, ici, il ne mentionne pas la condition sur la direction voisine des rayons qui interfèrent, il le fait ailleurs.

Par ailleurs, signalons qu'ici, Fresnel ne dit pas pourquoi la différence de marche entre les ondes qui interfèrent doit être petite. De plus, il relie la condition sur la proximité des sources secondaires uniquement à la nécessité d'avoir des franges espacées pour être visibles et ne précise pas que, dans le cas des trous d'Young éclairés par une source située ailleurs que sur leur médiatrice, la différence de marche entre la source et les trous doit aussi être petite.

Fresnel donne d'une manière précise, les conditions dans lesquelles l'interférence peut se produire pour chaque couleur du prisme : *« il reconnaît d'abord que le phénomène ne peut se produire qu'entre des rayons identiques, c'est-à-dire de même couleur et de même réfrangibilité ; que ces rayons doivent être partis du même point, de la même source lumineuse, et qu'ils doivent avoir parcouru des distances inégales. Ses recherches précédentes avaient déjà mis sur la voie de la belle théorie des ondulations, qui fournissait d'elle-même une explication toute naturelle du phénomène de l'extinction mutuelle de deux rayons »* (Marie 1888, p. 127).

3.3.5. Interprétation des conditions d'obtention liées à la cohérence temporelle

3.3.5.1. Le train d'onde et la limite de l'oeil

Pour Fresnel, la propagation de la lumière correspond à la propagation d'une onde dans l'éther. Il considère qu'il ne peut pas y avoir de lumière totalement "homogène" : *« la lumière la mieux simplifiée se compose encore d'une infinité de rayons hétérogènes qui n'ont pas exactement la même longueur d'ondulations »* (De Senarmont et al 1995, tome 2, p. 49). Il

avance qu'« une même particule éclairante peut produire successivement des ondes de différentes longueurs [sous entendu longueur d'onde], ou des rayons de diverses couleurs » (ibid. tome 1, p. 202). Il suppose ainsi qu'un même atome puisse émettre des ondes de différentes longueurs d'onde.

Fresnel considère que **l'onde lumineuse est constituée de trains d'onde émis aléatoirement** et que **l'œil n'est pas assez sensible** pour suivre les variations de leur superposition : « *on ne peut admettre que ces perturbations s'opèrent simultanément et de la même manière dans des **particules séparées et indépendantes**, en sorte qu'il arrivera, par exemple, que les oscillations de l'une seront retardées d'une demi oscillation complète, tandis que celles de l'autre se continueront sans interruption, ou seront retardées d'une oscillation entière (...). Or ces effets opposés se succédant avec une rapidité extrême ne produiront sur l'œil qu'une sensation continue, qui sera moyenne entre les sensations plus ou moins vives, et restera constante, quelle que soit la différence des chemins parcourus* » (ibid. pp. 50-51).

Bien que Fresnel précise que « *les oscillations des particules éclairantes dans leurs plus grandes amplitudes doivent toujours être extrêmement courtes, relativement à la longueur des ondulations éthérées qu'elles font naître, qui, quoique extrêmement petites, sont cependant appréciables pour nos sens* » (ibid. p. 202), la description que donne Fresnel des trains d'onde laisse subsister des ambiguïtés. On peut en effet se demander si les trains d'onde émis par un même atome sont semblables ou non : « (...) *il faut considérer chaque particule comme exécutant toujours, pendant quelques instants, une série nombreuse d'oscillations semblables avant de s'arrêter, ou de changer de nature de vibration, c'est-à-dire, supposer une certaine persistance de mouvement dans les centres d'ébranlement. (...) Il est naturel de supposer aussi qu'il faut une certaine succession de ces petits chocs pour ébranler la rétine, et qu'une seule pulsation lumineuse ne produirait pas la vision. Nous supposons donc sur chaque rayon lumineux une succession nombreuse et même indéfinie d'ondulations semblables (...)* » (De Senarmont et al 1995, tome 1, p. 201). De même, nous ne pouvons pas affirmer que Fresnel a fait une liaison entre la longueur des trains d'ondes et l'homogénéité de la lumière.

Nous allons à présent voir en détail comment Fresnel utilise le modèle du train d'onde pour interpréter les conditions d'obtention des interférences lumineuses liées à la cohérence temporelle, autrement dit celles liées à la fréquence des ondes, leur origine, la proximité des sources secondaires, la limitation de la différence de marche au point d'observation.

3.3.5.2. Condition sur la fréquence

En ce qui concerne la fréquence, Fresnel avance une explication liée à la sensibilité de l'œil et à la nécessité que les effets de la superposition des ondes soient permanents. Il utilise également une analogie avec les battements sonores. Il raisonne à partir de la période des ondes et non de la longueur des trains d'onde.

Il suppose que « *chacune de ses deux ondes, qui diffèrent dans leur marche d'une demi-ondulation, soit précédée et suivie d'un grand nombre d'autres ondes semblables ; alors, au lieu de l'interférence de deux ondes isolées, nous aurons à considérer l'interférence de deux systèmes d'ondes. Je les suppose pareils quant au nombre des ondes qu'ils contiennent et à leur intensité. Puisque par hypothèse, ils diffèrent d'une demi-ondulation dans leur marche, les demi-ondes de l'un (...), coïncident avec les demi-ondes de l'autre (...) et elles se font équilibre ; en sorte que le mouvement se trouve détruit dans toute l'étendue des deux systèmes d'ondes, excepté les deux demi-ondes extrêmes, qui échappent à l'interférence* » (ibid. tome 2, p. 46).

Dans son premier mémoire, Fresnel avance deux explications quant au fait que les rayons de différentes couleurs ne se détruisent pas même s'ils viennent d'une même source et ont la même direction : « *First, the waves of different frequency do not arrive at the eye simultaneously. Second, if they do arrive at the same time, they never oppose each other as completely and permanently as vibrations of the same frequency and opposite phase do. He is probably hinting here at the explanation, (...) that such an interference is similar to beats of sound but too occurs to be recognized* » (Kipnis 1991, p. 184). Il fait ici une analogie avec les battements sonores qu'il reprendra plus tard en explicitant le fait que l'œil n'est pas sensible à des variations rapides : « *ce raisonnement n'est applicable qu'à des systèmes composés d'ondes de même longueur³⁹ ; car si les ondes de l'un étaient plus longues que celles de l'autre, (...), il arriverait que la position relative des ondes ne serait pas la même dans toute l'étendue des deux groupes, et que, tandis que les premières ondes se contrarieraient presque complètement, les ondes suivantes ne seraient plus en discordance complète (...) d'où résulterait une succession de vibrations faibles et fortes analogues aux battements que fait entendre la consonance de deux notes peu différentes ; mais ces alternatives de lumière faible et forte, se succédant avec une rapidité prodigieuse, ne produiraient sur l'œil qu'une*

³⁹ Dans ce cas, et en appliquant à la vision son approche mécanique, Fresnel indique qu'il « *appelle ici longueur de l'onde ou longueur d'ondulation l'intervalle compris entre le premier et le dernier point ébranlé dans le fluide par une oscillation complète de la particule vibrante* » (ibid. p. 45).

sensation continue » (De Senarmont et al 1995, tome 2, p. 46). Il illustre ceci par une courbe donnant l'interférence d'une onde de couleur bleue et une autre de couleur rouge (Figure 5).

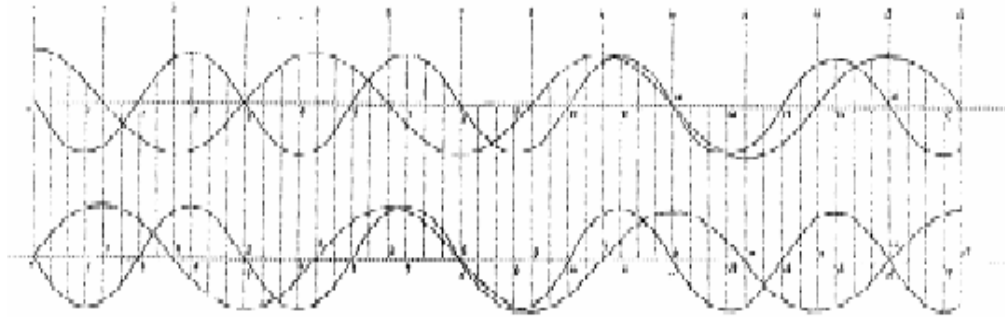


Figure 5. Interférence d'une onde rouge et une onde bleue (ibid. p. 47)

Fresnel précise plus loin : « *on peut déterminer aisément la position et l'intensité d'un système d'ondes résultant de deux autres systèmes, dont les intensités et les positions respectives sont données, et que nous supposons composés d'ondes de même longueur [longueur d'onde] ; car des ondes de nature différente ne peuvent produire que des effets variables par leurs interférences, et qui, par conséquent, sont insensibles pour l'œil dans leur rapide succession ; c'est pourquoi l'on dit que des rayons **hétérogènes** ne s'influencent pas* » (De Senarmont et al, 1995, tome 1, p. 203).

3.3.5.3. Condition sur l'origine

Fresnel explique qu'il est nécessaire **d'avoir une source commune** pour que les effets de la superposition des ondes soit **permanent** : « *Nous avons encore énoncé, comme une des conditions nécessaires à l'apparition des phénomènes d'interférences, que les rayons qui se réunissent soient partis **d'une source commune** (...). Tout système d'ondes qui en rencontre un autre exerce toujours sur lui la même influence quand leurs positions relatives sont les mêmes, soit qu'ils émanent d'une source commune ou de sources différentes ; car il est clair que les raisonnements par lesquels nous avons expliqué leur influence mutuelle sont également applicables aux deux cas. Mais il ne suffit pas que cette influence existe pour qu'elle soit sensible à nos yeux ; **il faut encore que ses effets soient permanents**. Or c'est ce qui ne peut avoir lieu lorsque les deux systèmes d'ondes qui interfèrent émanent de sources différentes. En effet, (...), les particules des corps éclairants, dont les vibrations ébranlent l'éther et produisent la lumière, doivent éprouver de très fréquentes perturbations dans leurs oscillations, en raison des changements rapides qui s'opèrent autour d'elles, ce qui peut très bien se concilier néanmoins, (...), avec l'émission régulière d'un grand nombre d'ondulations*

dans chacune des séries séparées par ces perturbations. Cela posé, on ne peut admettre que ces perturbations s'opèrent simultanément et de la même manière dans des particules séparées et indépendantes » (De Senarmont et al 1995, tome 2, p. 50).

3.3.5.4. Conditions sur la proximité des sources

Il semble que Fresnel relie la condition sur la proximité des sources secondaires uniquement à la nécessité d'avoir des franges suffisamment espacées pour pouvoir être séparées par l'oeil. En effet, pour lui, une condition des interférences lumineuses est que les rayons « *ne se croisent pas sous un trop grand angle, parce que les franges deviendraient si étroites qu'elles échapperaient à la plus forte loupe* » (ibid. p. 59). Il ne mentionne pas l'émission aléatoire de trains d'onde qui est aussi à prendre en compte dans le cas de trous d'Young éclairés par une source située hors de leur médiatrice. Il semble avoir raisonné à partir de l'interfrange et considéré que les sources secondaires produites par diffraction sont similaires à celles produites par réflexion ou réfraction⁴⁰.

3.3.5.5. Conditions sur la différence de marche

Fresnel insiste sur l'importance de la limitation de la différence de marche qui varie suivant le système d'onde à considérer. Dans le cas d'une grande différence de marche, Fresnel ajoute qu'« *une autre cause s'oppose beaucoup plus tôt à ce qu'on aperçoive les effets de l'influence mutuelle des systèmes d'ondes dont la différence de marche est un peu grande : c'est l'impossibilité de rendre la lumière suffisamment homogène ; car la lumière la mieux simplifiée se compose encore d'une infinité de rayons hétérogènes qui n'ont pas exactement la même longueur d'ondulation, et quelque légère que soit cette différence, quand elle est répétée un assez grand nombre de fois, elle produit nécessairement, ainsi que nous l'avons déjà remarqué, une opposition entre les modes d'interférence des divers rayons, qui compense alors l'affaiblissement des uns par le renforcement des autres. Voilà sans doute la principale raison pour laquelle les effets de l'influence mutuelle des rayons lumineux deviennent insensibles lorsque leur différence de marche est trop considérable et surpasse seulement 50 ou 60 fois la longueur d'ondulation* » (ibid. pp. 49-50). Il déduit que l'augmentation de la différence de marche entraîne une diminution du contraste des franges,

⁴⁰ Dans ces deux cas, les sources secondaires sont des images de la source et sont en phase.

mais il ne fait pas de lien explicite entre cette limite de la différence de marche obtenue en prenant en considération la superposition des franges de différentes couleurs et la longueur du train d'onde. Par contre, il indique que si la différence de marche dépasse 50 fois la longueur d'onde, alors les franges d'interférences disparaissent.

En utilisant le dispositif des fentes, Fresnel indique que si on interpose une lame mince de mica devant une fente, la différence de marche change. Il ajoute que cette expérience peut aussi se faire avec les deux miroirs. Il rappelle que « *le milieu de la bande centrale provient toujours (...) de l'arrivée simultanée des rayons partis en même temps du point lumineux ; il faut donc, dans le cas ordinaire où ils ont traversé le même milieu, qu'ils aient parcouru des chemins exactement égaux, pour qu'ils arrivent en même temps au point de concours* » (ibid. p. 70). Dans le cas où la lame est interposée, Fresnel remarque que « *celui des deux faisceaux qui aura marché plus lentement arrivera plus tard en ce point, qui ne pourra plus être, en conséquence, le milieu de la bande centrale* » (idem.).

Cette expérience lui permet de conclure sur les vitesses de propagation que « *la durée de chaque ondulation (...) ne dépend point de la vitesse plus ou moins grande avec laquelle l'ébranlement se propage dans le fluide, mais seulement de la durée de l'oscillation complète qui a donné naissance à cette onde* » (ibid. p. 71).

3.3.5.6. Conditions sur la largeur de la source lumineuse

Fresnel s'est intéressé à la largeur de la source primaire en distinguant les dispositifs du type d'Young pour lesquels la diffraction intervient de ceux pour lesquels elle n'intervient pas. Il remarque que la source de lumière doit être petite pour les dispositifs d'Young et interprète cela en considérant que la figure observée sur l'écran est la superposition des figures d'interférences produites par chaque point de la source : « *Au lieu de supposer un dérangement dans le point éclairant, supposons qu'il ait des **dimensions très-sensibles** ; alors les divers points lumineux dont il sera composé produiront chacun un groupe de franges, et les positions de ces groupes différeront d'autant plus que ses points seront plus éloignés les uns des autres ; et il arrivera, s'ils le sont assez, c'est-à-dire si le **point éclairant est assez large, que les franges des différents groupes, en empiétant les unes sur les autres, s'effaceront mutuellement**. Voilà pourquoi, dans les expériences d'interférence où les rayons se croisent sous des angles sensibles, comme dans tous les phénomènes de diffraction, il faut employer un **point lumineux très-fin** pour apercevoir les effets de leur influence mutuelle ; et*

ce point doit l'être d'autant plus que les rayons se croisent sous un angle plus grand. Quelque petit que soit le point lumineux, il est toujours composé, dans la réalité, d'une infinité de centres d'ondulations, et c'est de chacun de ces centres qu'il faut entendre ce que nous avons dit jusqu'à présent du point éclairant. Mais tant qu'ils sont très-peu distants les uns des autres, relativement à la largeur des franges, on conçoit que les divers groupes de franges qu'ils produisent, au lieu de se mêler d'une manière confuse, se superposent presque exactement, et, loin de s'effacer les uns les autres, se renforcent mutuellement » (ibid. p. 58). Fresnel n'indique pas dans ses propos (en 1821) la raison pour lesquelles les figures d'interférences se superposent. Il donne la condition que la distance entre les différentes figures doit être petite devant leur interfrange.

5. Contemporains et successeurs de Fresnel

Nous allons montrer dans ce qui suit que le travail de Fresnel a mis du temps à être assimilé par ses successeurs et a donné lieu à des débats, les scientifiques n'étant pas d'accord entre eux sur les conditions d'obtention à considérer comme fondamentales. Nous commencerons par présenter deux descriptions du phénomène d'interférences qui montrent la difficulté d'appropriation de la théorie ondulatoire de la lumière. Nous examinerons ensuite les débats suscités par les conditions d'obtention des interférences et l'évolution de leur interprétation.

5.1. La description des interférences

Biot (1774-1862) reconnaît l'accord entre les calculs de Fresnel et les expériences d'interférences et de diffraction. Il reprend le principe des interférences et de Huygens-Fresnel dans ces cours tout en refusant de donner aux calculs de Fresnel une interprétation ondulatoire. Il cherche à leur donner une interprétation corpusculaire et pour cela il est amené à refuser certains points de la théorie des accès de Newton en supposant que « *si la lumière est réellement une matière émise, les accès sont une propriété nécessaire, parce qu'ils ne sont qu'un énoncé littéral des alternatives de réflexion et de transmission que les anneaux colorés présentent ; mais en constituant autrement la lumière, ces alternatives peuvent se représenter différemment* » (Biot 1824, p. 452). Il décrit le phénomène d'interférences produit par les **lames minces** en le présentant comme une loi expérimentale exprimée par l'énoncé suivant :

« lorsque deux portions **égales** de lumière, dans des circonstances exactement semblables, ont été séparées et coïncident de nouveau à-peu-près dans une **même direction**, les sensations qu'elles produiraient isolément s'ajoutent l'une à l'autre ou se détruisent mutuellement, selon que la différence des temps employés dans leurs trajets séparés est un multiple pair ou impair d'un certain demi-intervalle, lequel est différent pour les différentes couleurs, mais constant pour chaque espèce de lumière simple,

- a) dans l'application de cette loi à différents milieux, les vitesses de la lumière doivent être supposées réciproques aux rapports de réfractions des milieux, de manière que les rayons se meuvent plus lentement dans les substances plus denses, et plus vite dans les plus rares, selon ces rapports,
- b) dans la réflexion sur la surface d'un milieu plus rare, sur quelques métaux et dans plusieurs autres circonstances, il se perd un demi-intervalle,
- c) les longueurs de ces intervalles sont toujours quadruples des accès assignés par Newton aux mêmes couleurs » (ibid. p. 462).

La première partie de son énoncé est semblable à celle donnée par Young. Biot a ajouté que certaines grandeurs sont susceptibles de provoquer des changements comme la nature du milieu (par l'intermédiaire de son indice) qui entraîne une nouvelle vitesse de propagation et une nouvelle différence de marche.

Nous retrouvons cette difficulté à intégrer le discours ondulatoire dans la description de l'expérience d'Young donnée par Marie en 1888. En effet, en accompagnement du schéma qu'il dessine (Figure 6), il dit: « une source lumineuse *S*, de **petite dimension**, est placée à une assez grande distance sur la perpendiculaire *IS* au milieu de la droite qui joint les centres de deux petites ouvertures *O* et *O'*, percées dans un écran opaque *EE'*. (...) Cet écran *MM* ne reçoit pas d'autres rayons lumineux que ceux qui proviennent des faisceaux *SO* et *SO'*. Dans la région de l'écran *MM* comprise entre les bases *C* et *C'* des deux faisceaux, on aperçoit nettement des bandes rectilignes blanches, noires et colorées, s'étendant perpendiculairement à la ligne qui joint les centres de ces deux bases. La bande du milieu est blanche ; viennent ensuite de part et d'autre deux bandes noires symétriquement disposées ; puis des bandes irisées où l'on peut distinguer des maxima et minima lumineux » (op. cit. p. 44).

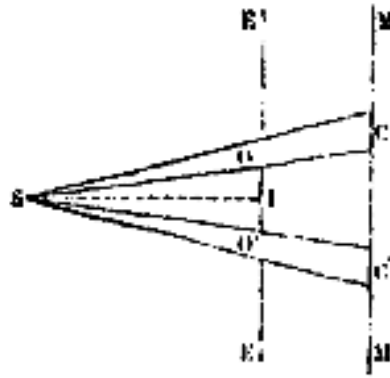


Figure 6. L'expérience d'Young schématisée par Marie (idem.)

Nous remarquons tout d'abord que sur la figure 6, le phénomène de diffraction n'est pas représenté. Pourtant, Marie semble l'évoquer un peu plus tôt dans ses écrits quand il décrit ce qui se passe lorsqu'on cache un des trous : « *Si l'on bouche l'une des ouvertures O et O', la lumière s'étend plus ou moins loin en dehors de la base C' ou C du cône lumineux qui continue de passer, mais toutes les bandes disparaissent* » (Marie 1888, p. 45).

Nous notons également qu'il n'y a pas deux rayons qui se coupent en un point donné de l'écran. Seuls deux faisceaux lumineux issus des trous sont dessinés. Ce schéma est identique à celui donné pour expliquer ce qui serait observé si la lumière était constituée de corpuscules matériels⁴¹.

Nous constatons également que Marie précise la condition sur la petitesse de la dimension de la source, placée à une grande distance de l'écran, mais qu'il subsiste des imprécisions : il n'indique pas la nature de la source qui produit des bandes colorées et la distance entre cette source et les trous pour qu'elle puisse être considéré comme petite.

5.2. Cohérence

Plusieurs scientifiques ont cherché d'une part à étudier les conditions d'observation des interférences telles qu'elles ont été données par Fresnel, et d'autre part à approfondir leur interprétation. Il a fallu un siècle environ pour que les concepts utilisés aujourd'hui soient proposés.

⁴¹ Voir § 3.2.3.

5.2.1. Les années 1830

Dans les années 1830, ce sont les scientifiques français qui se sont intéressés au concept de cohérence. Pécelet en 1823, Babinet (1794-1872) et Despretz (1793-1853) en 1825, ont essayé de déterminer si les conditions d'interférences sont indépendantes ou non l'une de l'autres et celles qui sont absolument nécessaires. Ils se sont intéressés notamment à la valeur de la différence de marche, à la direction des rayons et à la source commune.

Les scientifiques allemands et britanniques ont peu prêté attention à ce concept. Ainsi, Baumgartner s'est référé brièvement aux conditions sur la fréquence et sur la direction et les frères Weber ont totalement ignoré ce concept. Gustav Fechner a dit quelques mots sur la cohérence en faisant quelques remarques sur les conditions sur la source commune et la direction mais sans donner d'explications. George Airy (1801-1892), célèbre dans son pays par son travail fondé sur la théorie ondulatoire de la lumière, a seulement mentionné les conditions sur la fréquence et la différence de marche sans les commenter. Il a supposé implicitement en 1835 que tous les points d'un appareil diffuseur sont des sources cohérentes, ce qui n'est pas vrai car il faut tenir compte de la largeur et de la position de la source primaire, des dimensions des ouvertures, de la nature de la lumière.

Biot (1774-1882) reprend les écrits de Fresnel et Arago et s'intéresse à l'interprétation d'une expérience qui consiste à placer une lame de verre devant l'un des trous d'Young. Il énonce la possibilité de comparer les réfractions des diverses substances en « *interposant des lames égales ou inégales de chacune d'elles dans la direction des deux rayons qui interfèrent* » (Biot 1824, p. 463). Il ajoute que « *M. Arago et M. Fresnel ont essayé cette méthode, et elle s'est trouvée si exacte, qu'elle leur a permis de mesurer des différences de réfractions qu'aucun autre moyen n'avait pu donner* » (ibid. p. 462). Il n'évoque pas la disparition possible des franges dues à la cohérence limitée de la lumière.

Récapitulons dans le tableau 8, les conditions d'observation des interférences données par ces scientifiques par ordre chronologique :

Tableau 8. Conditions d'interférences données par les successeurs de Fresnel durant les années 1830

| Scientifiques | Date | Conditions |
|---------------------|------|---|
| Péclet | 1823 | *Source commune |
| Biot | 1824 | *Faible différence de marche |
| Babinet Despretz | 1825 | *Même direction |
| Baumgartner | 1830 | *Même fréquence *Même direction |
| Fechner | 1830 | *Source commune *Même direction |
| Powell | 1833 | *Même direction |
| Airy | 1835 | *Même fréquence *Faible différence de marche |

5.2.2. Les années 1860

Dans son 'Traité d'optique', Billet (1808-1882) énonce deux "précautions" (selon ses termes) pour assurer le succès des franges pour une expérience quelconque d'interférences. L'accent est mis sur la nécessité d'une origine commune et la petitesse de cette origine. Il reprend l'idée avancée par Fresnel que l'onde lumineuse présente des « accidents » contrairement à l'onde sonore :

« 1°. Il faut que les divers rayons aient une **origine commune**, soient issus d'un **même point lumineux**. Avec deux luminaires indépendants on n'aurait pas de franges. Les oscillations des particules des corps sont beaucoup plus désordonnées dans l'excitation lumineuse que dans l'excitation sonore : on conçoit que l'éther, (...), soit soumis dans tout rayon de lumière à des irrégularités ; que de temps en temps, par exemple, il y ait de sauté quelque fraction d'ondulation, qu'à d'autres instants le mouvement s'arrête » (Billet 1858, p. 43). Billet continue en donnant la solution pour dépasser cet obstacle : « Pour avoir des franges permanentes, il faut que **de pareils accidents** arrivent dans les deux faisceaux. Nous ne connaissons qu'un moyen de les asservir aux mêmes irrégularités et de maintenir ainsi entre eux, malgré ces irrégularités, la relation que leur assignent les chemins décrits : c'est de les faire dériver par réflexion, par réfraction, par le principe d'Huyghens, etc., d'un **même point lumineux primitif** » (ibid. p. 44).

« 2°. Il faut employer **un luminaire d'un très petit diamètre apparent**. Chaque point donne en effet son système de franges, et il ne faut pas un luminaire d'une grande étendue angulaire, pour que les franges brillantes de certains points tombent sur les franges noires de certains autres points. Si l'on veut que ces systèmes soient sensiblement superposés et conséquemment se renforcent, il faut que le luminaire ait **de faibles dimensions angulaires**. (...) Les miroirs ont une supériorité bien marquée sur les deux autres manières de réaliser

*l'expérience de Young*⁴² » (idem.). Si Billet met ici uniquement l'accent sur l'angle à partir duquel les interférences peuvent être observées, il a aussi conscience que la distance entre les sources secondaires doit être petite : « *le synchronisme des mouvements ne serait point parfait dans l'onde sphérique entière, et, outre la condition d'être issus du même lumineux, il y aurait intérêt à exiger entre les deux rayons qu'on veut faire interférer un faible écartement* » (ibid. p. 63). Mais il est à noter qu'il ne fait pas de lien entre ces deux grandeurs, ce que fera Verdet.

En 1865, Verdet (1824-1886) reprend les travaux de Fresnel. Il explique la nécessité d'utiliser deux miroirs en sous-entendant que la lumière est émise aléatoirement : « *l'utilité de l'emploi de deux miroirs résulte de ce que les deux sources ainsi obtenues sont nécessairement toujours d'accord, c'est-à-dire que leurs mouvements vibratoires sont identiques au même instant, ce qui serait impossible à réaliser si on employait deux sources lumineuses réellement différentes, au lieu de se servir des deux images d'un même point lumineux* » (Verdet 1869, p. 76). Nous constatons par ailleurs qu'il précise deux conditions, à savoir l'origine commune et la petitesse de la source.

Verdet cherche également à évaluer **quantitativement la dimension maximale** que pourrait avoir une source pour pouvoir observer les interférences : « *nous sommes conduits (...) à nous occuper de la manière dont se forment les ondes avec une source lumineuse d'étendue finie, et à rechercher jusqu'à quelle limite une pareille source peut être confondue avec un point lumineux unique* » (ibid. p. 104). Il montre que les vibrations produites sur l'écran à une distance 'a' qui le sépare d'une source de rayon 'R', sont cohérentes à l'intérieur d'un cercle de rayon 'ρ', avec $\rho \leq \frac{a\lambda}{2R}$. Par cette équation, Verdet introduit le concept appelé

aujourd'hui « **largeur de cohérence** ». Il l'utilise pour déterminer les conditions permettant de réaliser l'expérience de Grimaldi avec deux trous et montre qu'une source primaire comme le soleil, peut produire des franges observables quand elle illumine des trous d'Young proches l'un de l'autre ($\leq 0.05\text{mm}$). Ainsi, il peut montrer que même lorsque « *la durée d'illumination des deux sources est assez faible pour qu'on puisse regarder leur état vibratoire comme constant, aucun phénomène d'interférence ne pourra apparaître du moment que ces sources ont une étendue sensible* » (op. cit. p. 102).

⁴² Les autres manières dont Billet fait mention sont celles où on emploie des lentilles et des lames, en avant et en arrière des trous d'Young.

5.2.3. Les années 1890-1930

Un nouveau stade de développement de l'étude des interférences arrive quand un groupe de physiciens (Lord Rayleigh (1842-1919), Albert Michelson (1852-1931), Charles Fabry (1867-1945), Pérot (1863-1925) et d'autres) font des études intensives sur le rôle et l'effet de la dimension de la source afin de réussir les nouvelles expériences de spectroscopie et d'interférométrie.

Michelson et Morley tentent en 1881 une expérience visant à mesurer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther grâce au phénomène d'interférences lumineuses⁴³. Ils construisent un interféromètre formé de deux bras égaux et perpendiculaires destinés à être parcourus par deux faisceaux lumineux issus d'une même source (dispositif appelé aujourd'hui le Michelson). Leur hypothèse est que si l'appareil se déplace, solidairement avec la Terre, dans une direction de l'espace, les rayons lumineux, solidaires eux de l'éther, ne se propageront pas à la même vitesse dans les deux bras, et présenteront un décalage de phase lors de leur réunion. On devrait alors observer des franges d'interférences. Le résultat étant contraire à celui prévu, ils refont l'expérience en 1887 sans succès.

En 1890, après avoir étudié les expériences d'Young et Fresnel, Michelson énonce l'ensemble des conditions d'obtentions des interférences. Celles-ci sont au nombre de quatre, la première est considérée comme la plus importante alors que les deux suivantes sont à utiliser afin de faciliter l'observation, la quatrième dépend de la nature de du dispositif interférentiel :

*« 1. The **first and most important** of these is that the two interfering pencils must have a **constant phase relation**. This can only be realized in the case of light-vibrations if the two pencils originate in the same source. Thus it is altogether impossible to observe interference with two candles as sources; for the vibrations of the individual electrons, being practically independent, give a resulting illumination which amounts to an integration due to **wave-trains whose phase, amplitude, and orientation vary many millions of times per second**. This condition is therefore indispensable; the others which follow are convenient for facilitating the observation,*

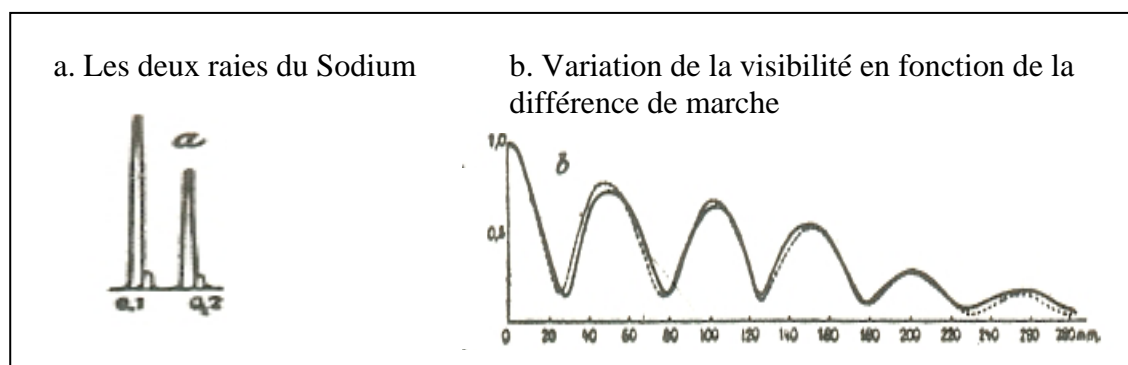
⁴³ Et ne visant pas de mesurer la vitesse de la lumière.

2. *If the source is not homogeneous, that is, if it is made up of a mixture of colors, and hence of different wave-lengths, the resulting interference bands will have widths and positions depending on the separate wave-lengths and will coincide exactly only for the case of exact equality of the paths of the two interfering pencils, and approximately where this path difference amounts to a very few thousandths of a millimeter,*

3. *The direction of the two pencils should be nearly the same; otherwise, the interference fringes will be too narrow to distinguish » (Michelson 1995, p. 17).*

Michelson ajoute une autre condition qui est à utiliser lors de la manipulation du dispositif d'Young et de Fresnel « there is still another condition which, however, applies only to apparatus like that of Young or of Fresnel, namely, that the source must be of very small dimensions, otherwise the different systems of fringes are not superposed in the same location, thus masking all evidence of interference » (idem.).

En 1891, Michelson utilise un faible spectroscope pour éclairer le dispositif des anneaux de Newton et observe la variation de la visibilité des anneaux en fonction de la différence de marche des deux rayons interférents. Il est le premier à mettre en évidence expérimentalement et par le calcul, la correspondance entre la distribution spectrale de la source lumineuse, sa longueur d'onde et la visibilité des franges d'interférences. Il étudie cette correspondance pour différents éléments (Zinc, Thallium, Mercure...), en particulier le doublet du Sodium, (Encadré 36).



Encadré 36. Correspondance de la variation de la visibilité aux distributions spectrales

(Michelson 1995, p. 35)

En collaborant avec Alfred Pérot, Fabry participe à la mise au point de l'interféromètre de Fabry-Pérot : interféromètre à ondes multiples. En effet, Fabry ayant traité de manière académique le problème des franges d'interférences dans sa thèse, Pérot imagine un dispositif original, un électromètre dont les deux bornes mobiles sont les deux lames métallisées de

l'interféromètre. L'invention de cet interféromètre va déclencher de nombreux travaux - mesure des petites épaisseurs, détermination des longueurs d'onde, spectroscopie, largeur des raies spectrales et théorie cinétique des gaz, vérification expérimentale de l'effet Doppler-Fizeau⁴⁴.

Fabry (en 1923 ou 1929) expérimente avec une source étendue afin de regarder les changements provoqués sur les miroirs de Fresnel. Il énonce que l'on peut obtenir des interférences selon certaines conditions : « à chacun des points lumineux, **indépendants les uns des autres**, qui la [source étendue] constituent, correspondra en général, sur l'écran, un système particulier de franges. Tous ces systèmes de **franges empiétant** les uns sur les autres, le résultat sera, en général, de donner à l'écran un **éclat sensiblement uniforme**. Les franges seront par suite **invisibles**, à moins que l'on ne se place dans des conditions particulières » (Fabry 1938, p. 4). Cette condition⁴⁵ stipule que « pour que les franges soient parfaitement nettes, il faut que, pour tous les points utiles de la source, la **différence de marche** que présentent les couples de rayons correspondant à chacun d'eux, et qui se croisent au point central M de l'écran considéré, **reste le même**. (...) L'écran sera alors recouvert d'un système de franges qui présentera en M un maximum de netteté » (ibid. p. 139).

Ce n'est qu'en 1930 que P.H. van Cittert et après Fritz Zernike ont étudié théoriquement la cohérence partielle (Hecht 2002, p. 560).

Terminons en disant que la modélisation d'une lumière blanche comme succession de trains d'onde a donné lieu à de nombreux débats. Ainsi Fleury et Mathieu (1970) rapportent que « (...) Chaque centre lumineux dans un corps incandescent doit émettre des trains d'onde finis. On s'est jadis demandé si l'on devait considérer la lumière blanche comme formée d'un mélange de tous ces trains d'onde ou comme le résultat de leur composition. On sait aujourd'hui que la question est illusoire, en ce sens qu'on ne connaît pas d'expérience permettant de choisir entre les deux conceptions. Dans la première, les trains d'onde existent dans le faisceau de lumière blanche. Le spectroscope les sépare et ils sont capables d'interférer... Du second point de vue, les diverses vibrations émises par la source se

⁴⁴ C'est le décalage entre la fréquence de l'onde émise et de l'onde reçue lorsque l'émetteur et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre ; il apparaît aussi lorsque l'onde se réfléchit sur un objet en mouvement par rapport à l'émetteur ou au récepteur. Il a été proposé par Christian Doppler en 1842 et également proposé par Hippolyte Fizeau sur les ondes électromagnétiques en 1848.

⁴⁵ « Les miroirs de Fresnel, tels qu'on les emploie ordinairement (fente et miroirs verticaux, axe optique horizontal), réalisent précisément les conditions de non-localisation (plan de symétrie). (...) les franges sont d'autant plus faciles à voir, alors même que la fente est trop large ou mal orientée, que l'on rapproche davantage la loupe des miroirs » (Fabry 1938, p. 12).

composent en un mouvement résultant qui se propage, sous la forme d'un train d'onde très court, ne présentant même plus aucun caractère de périodicité, et constituant une pulsation d'énergie rayonnante » (op. cit. p. 102).

6. Conclusion partielle

Les éléments d'histoire de la physique des interférences lumineuses que nous venons de présenter montrent combien il a fallu de temps pour que le phénomène des interférences lumineuses soit complètement interprété. Une des premières tentatives est celle de Newton qui explique les interférences d'une lame mince à l'aide d'une théorie corpusculaire de la lumière. La suivante est celle de Young qui modélise la lumière comme une onde sinusoïdale, introduit le concept de phase et le principe de superposition des ondes. Il énonce une partie des conditions d'obtention des interférences mais ne les interprète pas. Fresnel modélise également l'onde lumineuse comme une onde sinusoïdale, mais utilise une méthode algébrique et vectorielle, contrairement à Young qui utilise une méthode qualitative et graphique. S'il énonce complètement les conditions d'obtention et introduit le concept de train d'onde pour rendre compte de la condition sur la source unique, certains détails lui échappent. Il ne précise pas la longueur des trains d'ondes et ne fait pas de lien entre cette longueur et le degré d'homogénéité de la lumière. Il n'utilise le train d'onde que pour interpréter la condition sur l'origine unique. Pour la condition sur la proximité des sources secondaires, il ne fait pas appel au modèle des trains d'ondes mais à ce que les franges sont trop serrées pour être visibles. Dans la plupart de ses raisonnements, il fait une analogie avec les battements sonores.

Les successeurs de Fresnel ne sont pas d'accord entre eux sur les conditions à considérer comme fondamentales. Il faut attendre plusieurs années pour qu'un consensus s'installe et que les conditions soient complètement interprétées.

Ainsi, le détour par l'histoire peut être utile dans la recherche en didactique. Même s'il ne fournit pas d'emblée toutes les clés de la compréhension des difficultés rencontrées, cela peut être le cas au moins partiellement. Il permet au moins de montrer combien les concepts en jeu sont délicats et à quel point leur traitement peut varier selon les problèmes et le cadre épistémologique. Voyons maintenant comment la physique des interférences lumineuses est enseignée aux étudiants à l'université en Tunisie et en France.

Chapitre 3

***PROGRAMMES ET MANUELS
D'ENSEIGNEMENT***

1. Introduction

Dans ce qui suit, nous nous penchons sur l'enseignement des interférences afin de définir ce que les étudiants devraient savoir et dégager des difficultés potentielles d'apprentissage liées à des approches posant problèmes. Nous nous référons à Chevallard (1985) pour définir le passage du savoir savant au savoir enseigné dans les classes : « *un contenu de savoir ayant été désigné comme savoir à enseigner subit dès lors un ensemble de transformations adaptatives qui vont le rendre apte à prendre place parmi les objets d'enseignement. « Le travail » qui, d'un objet de savoir à enseigner, fait un objet d'enseignement est appelé la transposition didactique* » (Astolfi et al 1997, p. 177). Selon lui, il existe deux sortes de transposition, l'une externe (du savoir savant au savoir à enseigner), et l'autre interne (du savoir à enseigner au savoir enseigné). Nous nous limitons à une transposition externe puisque nous n'avons pu avoir accès qu'aux programmes d'enseignement et aux manuels relatifs aux interférences lumineuses.

Nous nous intéresserons peu à l'enseignement secondaire car notre recherche porte sur l'enseignement supérieur. Nous examinerons tout d'abord les programmes des classes préparatoires en Tunisie et en France, et nous pencherons ensuite sur ceux d'une faculté tunisienne (Monastir) et française (Paris 7). Nous passerons ensuite à l'examen de quelques manuels utilisés par les étudiants en Tunisie et en France.

2. Les programmes d'enseignement du secondaire

2.1. En Tunisie

Nous nous référons au programme officiel de l'enseignement secondaire des sciences physiques (Annexe 3) tel qu'il est proposé par le bulletin officiel de l'enseignement secondaire des sciences physiques (décret 98-1280, année 1998). Ce programme est structuré suivant trois rubriques : les objectifs spécifiques (correspondant aux compétences que doit acquérir l'élève), le contenu (se référant à la physique) et les recommandations (conseillant une stratégie d'enseignement sans donner de définition et sans signaler de difficulté).

Concernant le contenu, l'optique géométrique est enseigné dans les classes de troisième scientifiques alors que la physique des ondes est enseignée dans les classes de troisième

lettres et économie - gestion⁴⁶ et dans les classes terminales scientifiques et techniques (Annexe 3). Nous nous contentons d'examiner ce dernier enseignement puisque c'est celui reçu par les étudiants qui poursuivent des études supérieures scientifiques.

Le programme (Annexe 3) porte d'abord sur les ondes mécaniques puis sur les ondes lumineuses. Les interférences sont abordées pour chaque type d'onde. Parmi les recommandations faites aux enseignants, nous retenons ceci :

*« *On réalisera deux expériences de diffraction d'ondes mécaniques et d'ondes lumineuses et on déduira par analogie la nature vibratoire de la lumière,*

**On rappellera le phénomène de la dispersion de la lumière blanche par un prisme et on conclura que cette lumière est composée de plusieurs radiations monochromatiques, chaque radiation est caractérisée par sa fréquence,*

**On montrera une expérience d'interférences en lumière monochromatique ; ce qui confirmera la nature vibratoire de la lumière,*

**On établira l'expression de la différence de marche et de l'interfrange en fonction des caractéristiques du dispositif expérimental : (fentes d'Young et miroirs de Fresnel) et de la longueur d'onde,*

**L'interférence en lumière blanche et les déplacements des franges sont hors programme ».*

En ce qui concerne les objectifs de cet enseignement, retenons que *« l'élève sera capable d' :*

**Interpréter une expérience d'interférences lumineuses et confirmer, par analogie avec les interférences mécaniques, la nature ondulatoire de la lumière,*

**Expliquer la forme des franges observées et calculer l'interfrange ».*

Nous remarquons donc que l'étude de la diffraction de la lumière, abordée avant celle des interférences, permet d'introduire le modèle ondulatoire de la lumière par analogie avec les ondes mécaniques. L'expérience d'interférences en lumière monochromatique permet de confirmer la nature ondulatoire de la lumière. Elle est réalisée avec le dispositif des fentes d'Young. Une étude qualitative est présentée pour décrire la figure d'interférences (ensemble de franges équidistantes). Elle est suivie d'une étude quantitative réalisée en Travaux Pratiques qui porte sur l'influence de la longueur d'onde, de la distance des sources à l'écran

⁴⁶ L'équivalent de ce niveau en France est la seconde.

et de la distance entre les sources sur la figure d'interférences observée sur un écran. Les conditions d'obtention des interférences lumineuses ne sont pas mentionnées. Il est seulement demandé d'établir l'expression de la différence de marche en utilisant le dispositif des fentes d'Young et les miroirs de Fresnel. Pour les miroirs, ils sont sous forme d'exercice résolu.

2.2. En France

Les programmes du secondaire ont récemment changé. Jusqu'en 2002, la diffraction de la lumière et les interférences étaient étudiées au niveau de la terminale scientifique et l'optique géométrique en troisième. La diffraction servait à introduire le caractère ondulatoire de la lumière. Contrairement au programme tunisien, le programme français demandait uniquement une étude qualitative des interférences s'appuyant sur des descriptions spatiales et temporelles des ondes. Il était demandé de donner la relation de l'interfrange en utilisant le dispositif d'Young. La cohérence était mentionnée seulement en disant que pour obtenir les interférences, les ondes doivent être cohérentes sans entrer dans les détails. Les documents d'accompagnement proposaient des exercices qualitatifs.

Actuellement, les interférences lumineuses ne font plus partie du programme de cette classe. Cependant, la propagation et la superposition des ondes mécaniques ont été introduites et la diffraction de la lumière subsiste.

3. Les programmes d'enseignement du Supérieur

Les programmes des classes préparatoires en France et en Tunisie sont identiques (Annexe 3). Pour les différentes spécialités, physique chimie (PC)⁴⁷, physique et sciences de l'ingénieur (PSI), mathématiques physique (MP) et physique et technologie (PT), les ondes sont abordées au niveau de la deuxième année et les programmes sont pratiquement les mêmes. Nous nous intéresserons d'abord au programme de PC et PSI dans lequel l'étude de l'optique ondulatoire est la plus développée et préciserons ensuite les différences et les ressemblances avec les programmes des autres spécialités. Nous commencerons par le cours et présenterons les thèmes abordés, les dispositifs cités, les interprétations données. Nous poursuivrons par les travaux pratiques.

⁴⁷ Les programmes des classes PC et PSI sont identiques.

3.1. Classes préparatoires : section PC (ou PSI)

Le cours d'optique ondulatoire débute par l'étude des interférences à deux ondes, se poursuit par celle de la diffraction et se termine par celle des interférences à ondes multiples et la polarisation. Le programme précise : « *On se limite aux situations telles qu'une description en termes d'ondes scalaires est suffisante* » (Annexe 3). En ce qui concerne les travaux pratiques (Annexe 3), les séances sont orientées vers l'acquisition d'une autonomie progressive dans la démarche expérimentale. Les thèmes ne sont que des propositions. Les contenus sont à l'initiative de l'enseignant. Parallèlement aux travaux pratiques, il existe des TP-cours.

En ce qui concerne le cours sur les interférences, les étudiants commencent avec les '*interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes entre elles*' afin de faire une « *comparaison des prévisions théoriques et des réalités expérimentales* ». Cela « *conduit à affirmer un critère opérationnel de cohérence mettant en œuvre les notions de trains d'ondes, de sources synchrones, de diviseur d'ondes et de longueur de cohérence* ». Dans cette partie, le dispositif à utiliser n'est pas mentionné et le modèle spectral n'est pas indiqué. Le dispositif d'Young est abordé pour la première fois dans le chapitre sur la diffraction.

Les étudiants n'étudient pas les interférences données par les lames minces. Ils abordent directement l'interféromètre de Michelson qui doit être présenté comme équivalent à une lame mince d'air à faces parallèles ou à un coin d'air. Quand l'interféromètre est éclairé par une source ponctuelle, il est demandé de faire appel aux sources images secondaires.

Avec le Michelson, une étude de la figure d'interférences, du champ d'interférences, des franges, de l'ordre d'interférences et du défilement éventuel de franges, du contraste de la figure d'interférences est réalisée dans le but de « *maîtriser la physique du phénomène d'interférences* ». Il est indiqué que le dispositif à utiliser ne doit pas comporter une lentille ou un prisme.

La théorie générale de la cohérence est hors programme. En ce qui concerne la cohérence temporelle, il est demandé de mettre en évidence « *l'influence de la largeur spectrale d'une source sur le contraste du système de franges d'interférences* ». Le dispositif utilisé pour cette étude est le Michelson éclairé par une source ponctuelle. Le modèle du doublet spectral et du profil spectral rectangulaire en nombre d'onde sont introduits. Avec le Michelson, les interférences en lumière blanche sont étudiées uniquement en TP-Cours, de

même que les interférences avec une source étendue. L'accent est mis sur l'étude de la localisation des franges d'interférences et la diminution du contraste : « *L'objectif est de comprendre pourquoi, selon l'expérience, on utilise soit un éclairage convergent soit un éclairage quasi-parallèle, pourquoi, on observe soit l'image des miroirs soit une projection dans le plan focal d'une lentille convergente de sortie* ». Il est précisé : « *A cette occasion, on montre que l'ordre d'utilisation des différentes sources (laser éventuellement, puis lampe spectrale, enfin lumière blanche) est lié à la cohérence temporelle des sources lumineuses* ».

3.2. Classes préparatoires : autres sections

Un des objectifs principaux du cours de la section MP est de s'intéresser à la compréhension du phénomène physique plutôt qu'à l'étude numérique : « *Les calculs ne doivent en aucun cas passer au premier plan. S'il s'agit bien de savoir mettre en équations la situation modélisée, la résolution mathématique ne doit en aucun cas obérer la compréhension physique du phénomène étudié. Les exercices ne faisant appel qu'aux seules techniques de calcul étant bannis, l'attention de l'étudiant, libérée d'une charge lourde et inappropriée doit être reportée sur la conceptualisation et/ou l'approche expérimentale du phénomène lui-même, stimulant ainsi une attitude active et créatrice. Questions et exercices seront orientés dans ce sens. Les techniques de calcul ne doivent pas constituer un obstacle infranchissable empêchant par exemple les étudiants de suivre un cours avec profit. Il importe de ne pas sous-estimer leurs besoins de formation dans ce domaine* » (Annexe 3).

Dans les tableaux ci-dessous (Tableaux 9, 10), nous indiquons par une étoile ce qu'on enseigne aux étudiants des sections autres que les sections PC et PSI dans les cours et dans les TP-Cours. Nous laissons la case du tableau vide quand ce n'est pas précisé. En ce qui concerne les programmes des différentes sections, ils ne sont pas identiques. Certaines choses sont mentionnées dans une section alors qu'elles ne le sont pas dans une autre. Les sections PC/PSI et PT ont les mêmes TP-Cours. Par contre, pour la section MP, il n'y a que l'étude des franges du coin d'air et de la lame d'air avec source spectrale de l'interféromètre de Michelson qui est réalisée.

Tableau 9. Cours sur les interférences lumineuses donnés dans les différentes sections

| Cours | | PC/PSI | MP | PT |
|---|---|--------|----|----|
| Interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes entre elles | Miroirs de Fresnel et trous d'Young | | * | |
| | Comparaison des prévisions théoriques avec les réalités expérimentales pour expliquer la notion de cohérence (train d'onde, synchronicité, longueur de cohérence) | * | * | * |
| Michelson avec source ponctuelle | Son équivalent : lame d'air à faces parallèles ou coin d'air | * | * | |
| | Raisonnement avec sources images | * | * | |
| | Influence de la largeur spectrale d'une source sur le contraste des franges (doublet, profil rectangulaire) | * | | |
| Interprétation | Figure d'interférences, champ d'interférences, franges, ordre d'interférences et défilement des franges | * | | * |
| | Contraste | * | | |
| | En utilisant les Miroirs de Fresnel et les trous d'Young | | | * |
| Michelson avec source étendue | Etude du contraste (deux sources ponctuelles non cohérentes de même longueur d'onde ou doublet) | | | * |

Tableau 10. TP-Cours donnés aux étudiants

| TP-Cours | | PC/PSI | MP | PT |
|-----------------------------|--|--------|----|----|
| Interféromètre du Michelson | Présentation et réglage | * | | * |
| | Franges du coin d'air et de la lame d'air avec une lampe spectrale | * | * | * |
| | Localisation des franges avec une source étendue | * | | * |
| | Passage à la teinte plate et contrôle de sa qualité en lumière blanche | * | | * |
| | Frange du coin d'air en lumière blanche | * | | * |
| | Influence de la translation d'un miroir sur la figure d'interférences | * | | * |
| Spectroscopie à réseau | | * | * | * |
| Polarisation | | * | * | |

3.3. A l'université

A l'université, en Tunisie comme en France, c'est l'enseignant qui définit le programme pour les différents niveaux d'enseignement. Souvent, ce programme s'inspire de celui des classes préparatoires. En Tunisie, l'optique géométrique est étudiée en première année, la propagation des ondes mécaniques en deuxième année et l'optique ondulatoire en quatrième année. En France, l'optique géométrique est généralement étudiée en première année de Deug, les ondes et l'équation de propagation, l'optique ondulatoire en deuxième année de

Deug et en Licence. L'ordre généralement suivi par les programmes des universités françaises en troisième année et tunisiennes en quatrième année est similaire.

Nous nous sommes intéressée aux programmes correspondant à la population que nous avons interrogée (Annexe 3). Nous avons eu accès aux cours donnés aux étudiants de maîtrise de la faculté des sciences de Monastir⁴⁸ et de Licence à l'université de Paris 7. Dans ce qui suit, nous présentons le contenu des tables des matières.

En Tunisie, et particulièrement à Monastir, en ce qui concerne les interférences lumineuses, le programme (Annexe 3) débute par une étude générale des vibrations faisant appel à trois registres différents : le registre scalaire, le registre vectoriel et le registre complexe.

En deuxième lieu, des concepts relevant de l'optique géométrique sont introduits comme le chemin optique, le principe de Fermat et le théorème de Malus.

En troisième lieu viennent des généralités sur les phénomènes d'interférences en optique. Elles comportent une introduction du « *caractère aléatoire de l'émission lumineuse* » et une précision des conditions d'obtention des interférences (synchronicité et cohérence).

En quatrième lieu, quelques dispositifs interférentiels sont présentés d'une manière brève : trous d'Young, miroirs de Fresnel, bilentille de Billet, biprisme de Fresnel, miroir de Lloyd et interféromètre de Michelson.

En cinquième lieu, une étude quantitative des interférences dues à deux sources en lumière polychromatique est réalisée.

Puis, en sixième lieu vient l'étude quantitative de la cohérence spatiale (en utilisant le dispositif des trous d'Young) et la cohérence temporelle (en utilisant le dispositif du Michelson). Le modèle des trains d'ondes et le modèle spectral sont introduits.

Vient en septième lieu l'étude des interférences avec les lames minces. Elle se divise en deux parties. La première comporte les lames à faces parallèles. La deuxième comporte les lames d'épaisseur légèrement variables. Il y a le cas d'une source monochromatique ponctuelle à l'infini puis à distance finie et le cas de sources étendues monochromatiques.

Contrairement aux classes préparatoires, à l'université, il n'existe pas de TP-cours, mais seulement des TP. Les étudiants ont à manipuler uniquement les dispositifs à division

⁴⁸ Il existe en Tunisie sept facultés des sciences

d'amplitude (le Michelson et le Fabry-Pérot). Plus précisément, le programme des TP comporte :

- L'interféromètre de Michelson : description et réglage en utilisant une lampe à vapeur de sodium comme source primaire, spectre cannelé (interférences en lumière blanche), spectroscopie (avec trois lampes spectrales),
- Les anneaux de Newton (avec un laser),
- La spectrométrie interférentielle par Transformation de Fourier. L'étude de la variation de la visibilité est réalisée avec le Michelson pour une source monochromatique et un doublet. De plus, des exemples de distribution sont présentés comme celle d'une raie monochromatique et la distribution Gaussienne (même pour le doublet),
- Le Fabry-Pérot,
- La diffraction (en utilisant le dispositif d'Young avec une fente puis deux fentes éclairées par une lampe spectrale, et enfin en utilisant le laser comme source),
- Le filtrage-détramage⁴⁹ où l'étudiant est censé étudier les différentes possibilités de l'optique cohérente dans le traitement d'images en utilisant le formalisme de la Transformation de Fourier.

En France, après avoir introduit le chapitre par un rappel sur l'addition des champs électriques et la détection de la lumière, une partie est consacrée à la composition de deux ondes et aux conditions d'interférences⁵⁰. Des exemples de dispositifs à division de front d'onde sont donnés. La cohérence spatiale est introduite par la suite en utilisant le dispositif des trous d'Young. Les réseaux sont étudiés en troisième partie. Puis vient une partie sur les interférences par division d'amplitude. Il y a l'étude de la différence de marche, des lames à faces parallèles et des lames à épaisseur variable. Une application est donnée en utilisant l'interféromètre de Michelson. La dernière partie est consacrée aux interférences avec des sources polychromatiques et à la cohérence temporelle. Le modèle spectral est introduit ainsi que la spectroscopie par la Transformée de Fourier.

⁴⁹ On dispose d'un laser puis d'une lampe blanche et deux lentilles.

⁵⁰ Aucune précision sur la nature des conditions n'est indiquée dans le programme.

3.4. Conclusion partielle

Les programmes d'enseignement de classes préparatoires et d'universités que nous venons de présenter présentent des points communs mais aussi des différences.

En ce qui concerne les ressemblances, nous notons que :

- ils suivent le même ordre thématique
- le dispositif d'Young est utilisé pour l'étude d'une figure d'interférences en éclairage partiellement cohérent spatialement et l'interféromètre de Michelson pour l'étude d'une figure d'interférences en éclairage partiellement cohérent temporellement dans les universités et les classes préparatoires
- les modèles du train d'onde et spectral sont introduits
- le dispositif est éclairé par une radiation monochromatique, un doublet ou une lumière ayant un spectre de profil rectangulaire
- le dispositif du Michelson est le plus étudié en pratique.

En ce qui concerne les différences, celles-ci concernent :

- les dispositifs interférentiels à étudier. Par exemple, les lames minces ne sont pas abordées en classes préparatoires alors qu'elles le sont à l'université
- la nature de l'interprétation à donner. Une approche qualitative est demandée en classes préparatoires
- le raisonnement avec les sources images. Il est utilisé dans le cas d'une lame mince en classes préparatoires et pas à l'université
- l'étude de la cohérence partielle. Elle est réalisée seulement dans les universités
- la notion de largeur de cohérence. Aucune indication de cette notion dans les programmes n'est donnée.

Dans les classes préparatoires, l'étude du Michelson en présence d'une source étendue est abordée en cours seulement pour la section (PT). Cette approche est intéressante car elle permet d'étudier la variation du contraste dans l'espace mais elle pose problème car d'une part le dispositif demande une précision dans le réglage et d'autre part il faut raisonner avec la source étendue.

Un autre point est abordé dans les universités mais omis dans les classes préparatoires, celui de la formalisation de la cohérence partielle.

4. Analyse des manuels d'enseignement supérieur

Nous venons de voir que les programmes du supérieur, bien que proches les uns des autres, ont des approches différentes et que certaines d'entre elles ont des avantages alors que d'autres peuvent poser problèmes. Nous allons voir dans ce qui suit qu'il en est de même des manuels. Nous ne ferons pas une analyse exhaustive des manuels. Nous nous intéressons aux manuels de cours (et non d'exercice et de TP), disponibles dans les bibliothèques universitaires, utilisés en France en deuxième et troisième années, en Tunisie en maîtrise et en classes préparatoires. Les manuels utilisés dans le supérieur en France et en Tunisie sont identiques.

Nous organisons nos remarques selon plusieurs directions d'analyse déterminées par les études précédemment présentées. Elles visent à répondre aux questions suivantes :

* La définition des interférences lumineuses : De quel type est-elle (expérimentale ou théorique) ? Pose-t-elle problème ? Existe-t-il des analogies ?

* Les dispositifs interférentiels : Lesquels sont étudiés ? Dans quel ordre ? Sont-ils schématisés et expliqués ? Dans quel but sont-ils exploités ?

* L'interprétation des interférences lumineuses : Comment est-elle introduite ? Quels sont les registres utilisés (sinus, complexe, graphe, vecteur...) ?

- Les conditions d'obtention : Comment sont-elles données (la totalité ou une partie) ? Sont-elles interprétées ? Si oui, de quelle manière et à quel moment ?
- La cohérence : Le terme est-il défini et si oui comment ? Fait-on la différenciation entre la cohérence temporelle et la cohérence spatiale ? Quels sont les modèles utilisés pour interpréter chaque type de cohérence ? Quand sont-ils utilisés ?

4.1. Définition des interférences lumineuses

Les auteurs considèrent le phénomène d'interférences comme une caractéristique très importante du mouvement ondulatoire. Pourtant, sa définition diffère d'un auteur à un autre. Par exemple, le phénomène d'interférences « *peut se produire dans une région de l'espace où les ondes émises par plusieurs sources se superposent. Ce phénomène se traduit par des modulations spatiales de l'intensité énergétique appelées franges d'interférence* » (1) (Sarmant 1981, p. 156). Ou bien ce phénomène existe lorsque « *deux ou plusieurs mouvements oscillatoires coexistent dans l'espace et dans le temps* » (2) (Alonso et Finn

1977, p. 455) ou quand « *des ondes provenant de plusieurs sources ajoutent leurs effets en un même point de l'espace* » (3) (Bertin et al 1986, p. 56).

Nous remarquons que seule la première définition précise ce qui est observé, les autres restent théoriques et de plus il n'y a pas de schéma qui accompagnent la définition. Nous constatons également que la deuxième définition se réfère à la mécanique alors que cette dernière constitue un champ de la physique différent de celui de l'optique physique. Enfin, nous notons que le vocabulaire utilisé renvoie à des interprétations différentes. En effet, si l'expression « deux ondes coexistent » renvoie simplement à l'idée d'existence simultanée, les termes « ajoutent » et « superposent » renvoient à l'idée d'addition. Ces deux termes restent ambigus car il n'est pas précisé s'il faut parler de superposition d'amplitude ou d'intensité. Il est enfin à noter qu'il n'est pas dit que le phénomène d'interférences se produit dans certaines conditions (Alonso et Finn 1977 ; Desmeules et Raymard 1997).

Dans certains manuels, les interférences lumineuses sont introduites en référence à l'expérience d'Young (Charmont 2000 ; Desmeules et Raymard 1997) ou de Fresnel (Alonso et Finn 1986). Mais dans la majorité, les interférences sont introduites sans référence à l'expérience et grâce à un calcul utilisant le registre complexe (Bertin et al 1986 ; Quaranta 1998 ; Pérez 1991 ; Charmont 2000), le phaseur ou le vecteur tournant (Klein et Furtak 1986 ; Alonso et Finn 1986 ; Moussa et Ponsonnet 1977), le registre algébrique : $y = a \sin(\omega t - \varphi)$ (Léna et Blanchard 1990 ; Martin 1998 ; Alonso et Finn 1986 ; Desmeules et Raymard 1997 ; Cours de licence de Paris 7).

La diversité des registres employés pour interpréter les interférences lumineuses (Cours de maîtrise à Monastir, Alonso et Finn 1986) peut être considérée comme un point positif puisqu'on n'est pas restreint à un seul registre. Toutefois, elle peut être aussi source de difficultés car un étudiant devra connaître la manipulation de tous ces registres.

4.2. Dispositifs interférentiels

4.2.1. Ordre d'apparition et utilisation des dispositifs

Parmi les manuels consultés, quelques-uns débutent l'étude des interférences lumineuses en utilisant le dispositif « classique » des trous d'Young (Quaranta 1998 ; Giancoli 1989 ; Charmont 2000 ; Desmeules et Raymard 1997 ; Cours de maîtrise à Monastir ; Cours de licence de Paris 7). Mais le fait de démarrer par les trous peut être source

de difficulté pour les étudiants. D'une part, ils ne raisonnent qu'avec deux sources secondaires et peuvent retenir qu'il n'y a pas de possibilités d'interférences avec plus de deux sources, d'autre part ils vont se heurter à un autre phénomène qui est la diffraction. Après l'étude des interférences avec les trous, certains manuels s'intéressent ou bien à l'interféromètre de Michelson (Giancoli 1989), ou bien aux lames (Charmont 2000 ; Cours de licence de Paris 7), ou bien aux miroirs de Fresnel (Desmeules et Raymard 1997 ; Cours de maîtrise à Monastir).

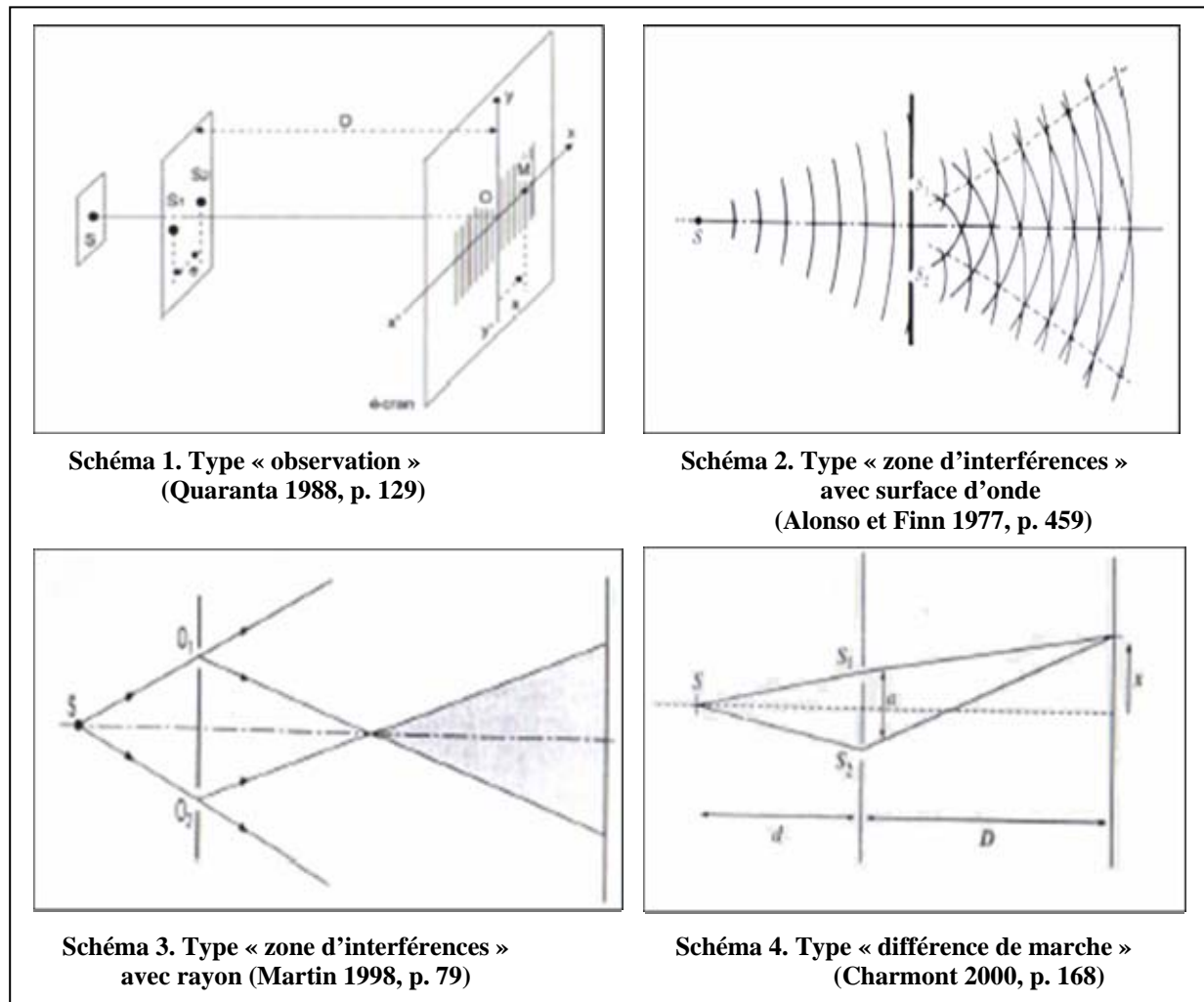
D'autres manuels ne suivent pas cet ordre. Par exemple, l'étude des interférences est fondée sur le dispositif de Michelson (Léna et Blanchard 1990). D'autres mettent les trous d'Young en dernière position après avoir étudié le biprisme de Fresnel, les miroirs de Fresnel, la bilentille de Billet (Moussa et Ponsonnet 1977). Le fait de commencer par le Michelson peut être avantageux : il n'y a ni diffraction, ni réfraction comme dans les lames minces.

Le dispositif des trous d'Young est considéré comme « *simple (...) et qui prouve la nature ondulatoire de la lumière* » (Alonso et Finn 1977, p. 532). Malgré la "simplicité" de cette expérience, certains auteurs préviennent quand même qu'il existe un « *problème spécifique lié à la nature même des sources lumineuses et du mécanisme d'émission de lumière* » (Quaranta 1988, p. 119).

Ce dispositif est utilisé pour donner la relation de la différence de marche (et par suite déduire celle de l'interfrange) et pour introduire la notion de cohérence spatiale (Charmont 2000 ; Martin 1998 ; Cours de maîtrise de Monastir). Il est aussi présenté éclairé en lumière blanche (Quaranta 1998, Alonso et Finn 1977). Pour introduire la cohérence temporelle, un seul manuel se réfère au dispositif du Michelson (Martin 1998), les autres (le Cours de licence de Paris 7 également) le font sans tenir compte de la nature du dispositif interférentiel à division du front d'onde ou d'amplitude

4.2.2. Interprétation de l'expérience : schéma

Plusieurs schémas sont donnés pour le dispositif d'Young dans les manuels (Encadré 37). Chacun d'eux est relatif à un raisonnement spécifique. En effet, le premier schéma de type « observation » présente des franges d'interférences. Les deux schémas suivants font référence à la zone d'interférences. Dans le deuxième, il y a superposition de surfaces d'ondes. Le troisième est de type « rayons » puisqu'il y a utilisation des « rayons » lumineux. Le quatrième est utile pour le calcul de la différence de marche.

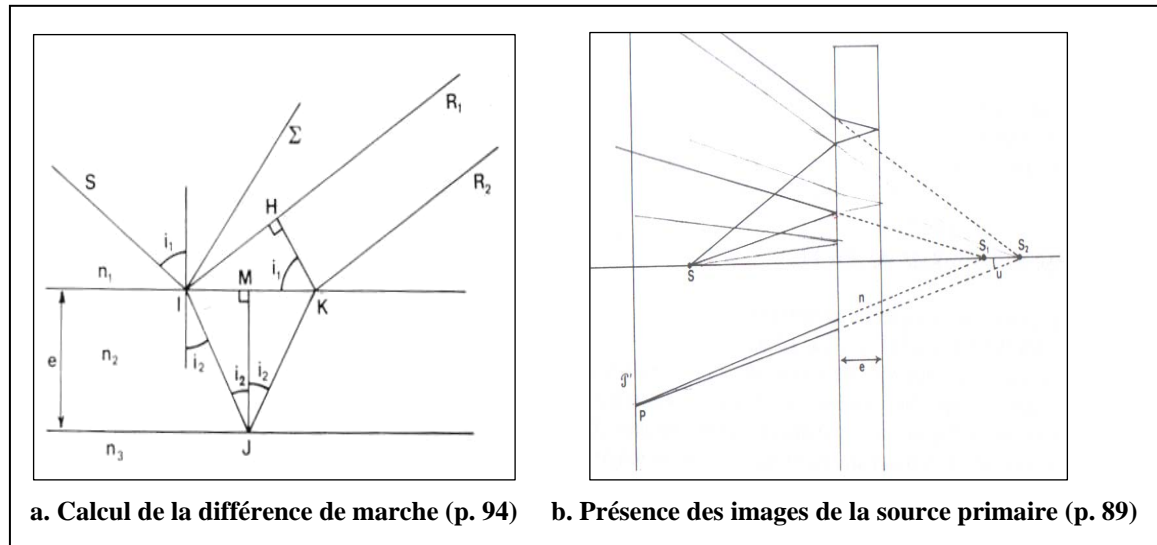


Encadré 37. Exemples de schémas illustrant le dispositif d'Young

Cette diversité de schémas pourrait engendrer chez l'étudiant une certaine difficulté. L'étudiant est censé savoir qu'à chaque raisonnement correspond un schéma spécifique. Or dans les manuels, on ne précise pas que suivant le contexte, il y a tel ou tel schéma à utiliser.

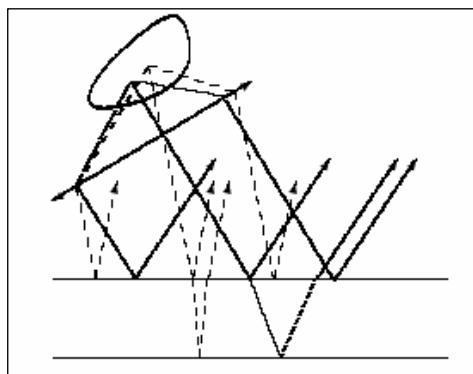
Ce même problème se retrouve avec les lames minces. En fait, dans les manuels, il existe plusieurs types de schémas pour les lames qui ont des fonctions différentes et donnent lieu à des raisonnements différents. La majorité des manuels ne considèrent pas qu'il existe des sources secondaires (Charmont 2000 ; Alonso et Finn 1986 ; Cours de maîtrise de Monastir). On s'intéresse à établir la différence de marche entre deux rayons émergents issus d'un même rayon incident sans que soit nécessairement préciser si la source est étendue ou ponctuelle. Nous n'avons trouvé que deux cours (Provost et Provost 1980 ; licence de Paris 7) donnant un schéma faisant apparaître les sources secondaires et un schéma utilisé pour le

calcul de la différence de marche. Il est à noter que dans un cas les sources secondaires sont ponctuelles et que dans l'autre la source S n'est pas représentée (Encadré 38).



Encadré 38. Différentes présentations des lames minces (Provost et Provost 1980)

Rares sont les manuels (Cours de licence de Paris 7) qui schématisent les lames à faces parallèles en présence d'une source étendue placée au foyer objet d'une lentille convergente (Encadré 38bis). Il est à noter que ce schéma ne présente pas les sources secondaires. Seule la réflexion et la réfraction partielle sont représentées. Deux points de la source primaire sont sélectionnés, le trajet de la lumière issu de ces deux sources est distingué (en trait continu et en pointillés) et trois rayons issus de chacun de ces points sources arrivent aux deux faces de la lame. La zone d'interférences n'apparaît pas.

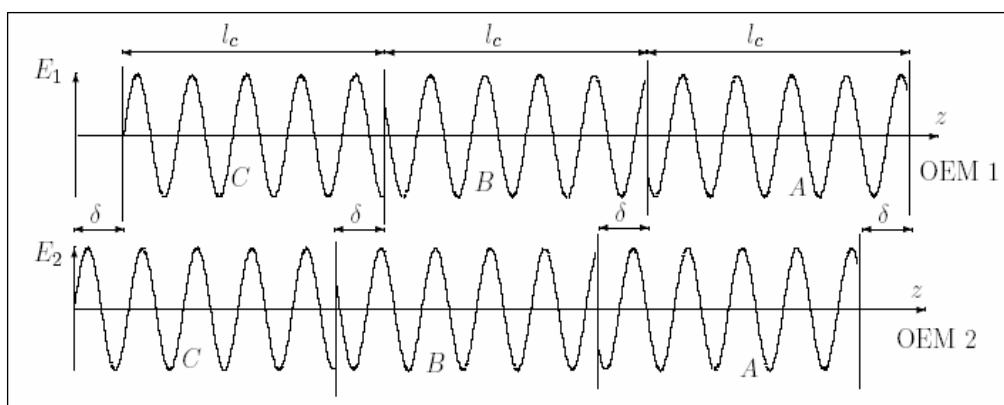


Encadré 38bis. lame à faces parallèles en présence d'une source étendue placée au foyer d'une lentille

4.3. Conditions d'obtention des interférences lumineuses et cohérence

En ce qui concerne les conditions qui permettent d'obtenir le phénomène d'interférences lumineuses, on rencontre : « *on doit faire interférer deux ondes (ou plus) provenant de sources cohérentes, de même fréquence ; ces ondes doivent avoir leurs vibrations quasi parallèles. Dans la pratique, ces ondes sont issues d'une même source (S) soit par division du front d'onde, soit par division d'amplitude* » (Bertin et al 1986, p. 178). Cette citation propose que, pour avoir les interférences, il faut que les vibrations lumineuses soient issues d'une même source primaire et qu'elles aient la même fréquence, mais rien n'est donné sur la largeur de la source. De plus, le terme cohérent n'est pas défini.

Dans le cours de licence de Paris 7, on introduit les conditions dès le départ. Elles sont au nombre de trois : « *même source primaire* » (c'est-à-dire les sources doivent être synchrones), « *composantes parallèles* » (c'est-à-dire que le produit scalaire des champs n'est pas nul, ils ont pratiquement la même direction car on est en champ lointain) et « *recouvrement des trains d'ondes* » (c'est-à-dire que la différence de marche entre deux trains d'ondes est inférieure à la longueur d'un train d'ondes). Pour la troisième condition, on parle de cohérence partielle : « *la disparition des interférences est progressive, il y a des interférences tant qu'une partie des trains d'ondes se recouvrent* ». Le schéma donné en accompagnement (Encadré 39) montre une onde correspondant à une succession de train d'ondes n'ayant pas le même point de départ (donc pas le même déphasage) et ayant la même amplitude et la même longueur. Les deux ondes sont en phase au cours de la propagation.



Encadré 39. Cohérence partielle (Cours de licence de Paris 7)⁵¹

⁵¹ Dans le cours de maîtrise de Monastir, aucun schéma n'est donné pour les conditions d'obtention d'interférence.

D'autres manuels introduisent les conditions d'obtention des interférences plus tard, après avoir traité la superposition des ondes, et en utilisant la notion de cohérence (Quaranta 1998 ; Martin 1998). Cette notion est définie **théoriquement** en mettant l'accent sur la source (Giancoli 1989) : deux sources secondaires sont cohérentes quand la « *phase est stationnaire, elle ne dépend que des chemins optiques* » (Quaranta 1998, p. 124) ou **expérimentalement** puisque « *deux sources thermiques distinctes ne permettent pas l'observation du phénomène. On dit que les sources sont incohérentes* » (Martin 1998, p. 74) ou « *on dit que les sources sont incohérentes car elles n'interfèrent pas* » (Charmont 2000, p. 169). La dissociation de la définition des interférences lumineuses et des conditions d'obtention peut poser problème puisque les étudiants pourraient retenir seulement que deux sources sont nécessaires.

Certains manuels font une étude approfondie de la cohérence spatiale et de la cohérence temporelle dans un chapitre à part (Roig 1967 ; Provost et Provost 1980 ; Cours de maîtrise de Monastir).

4.3.1. Cohérence spatiale

Certains auteurs ont analysé les manuels du supérieur concernant le thème des interférences et en particulier celui de la cohérence. Par exemple, Maurines, dans son habilitation à diriger les recherches (2001), a remarqué qu'il y a une tendance à considérer la cohérence spatiale comme une **caractéristique intrinsèque de la source**. En effet, elle a trouvé que :

- Certains manuels du supérieur n'étudient que l'influence de la largeur de la source sur la localisation des franges (Suardet 1985 ; Benson 1996).

- Certains manuels ne s'intéressent qu'à la façon dont varie le facteur de visibilité des franges d'interférences en fonction de la largeur de la source (Bertin et al. 1986 ; Charmont 2000).

- Les manuels qui ne se focalisent pas sur la source n'explicitent pas toujours le fait que la cohérence spatiale de l'onde varie avec la distance à la source. Ainsi, certains disent uniquement que la distance entre les deux sources secondaires de lumière doit être plus petite que la largeur de cohérence spatiale pour que des franges d'interférence puissent être observées (Quaranta 1998).

- Si certains manuels explicitent le fait que « *des points incohérents de la source primaire sont capables de produire, du fait de la propagation des ondes lumineuses, une cohérence des*

deux points S_1 et S_2 qu'ils éclairent » (Pérez 1991), Maurines regrette que la discussion ne soit pas plus approfondie.

Ainsi, parmi les livres qu'elle a consultés (et nous de même), elle n'a rencontré qu'un manuel d'expériences explicitant le fait que la cohérence des deux sources secondaires dépend de leur distance à la source primaire (Sextant 1997). De même, elle n'a trouvé que deux manuels mettant en avant le fait que la cohérence des deux sources secondaires varie avec leur écartement (Hecht⁵² 2002 ; Sextant 1997). Ajoutons que deux manuels introduisent la notion de largeur de cohérence (Quaranta 1998 ; Pérez 1991) alors qu'elle est absente dans les autres.

De notre côté, nous avons constaté que, dans une première étape, la cohérence spatiale est parfois traitée par une étude qualitative (Cours de maîtrise de Monastir). Ainsi dans le cas des trous d'Young, l'étudiant aborde l'influence de la position d'une source ponctuelle et de la largeur d'une source étendue en faisant déplacer à chaque fois la source sur l'un des trois axes, ou encore l'emploi d'une fente source étendue et dans ce cas, les intensités s'ajoutent en P . Dans une deuxième étape, l'enseignant introduit le théorème de Van Cittert Zernike (en faisant la démonstration), mais sans indiquer ni son utilité ni le fait qu'il permet d'étudier des situations de cohérence spatiale partielle.

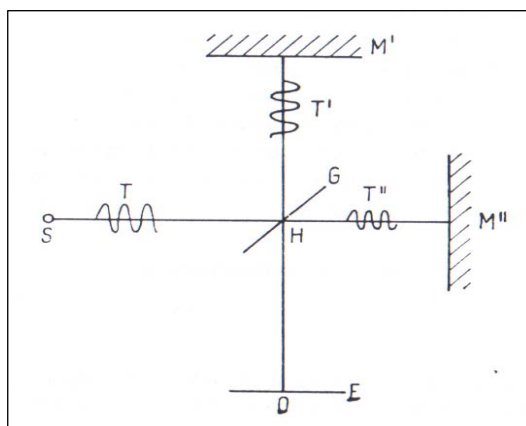
On cherche parfois à préciser la notion de « source ponctuelle » dans le cas d'une source primaire double (seulement en licence de Paris 7). La largeur de cohérence spatiale est définie comme « *la distance entre les deux sources primaires qui produit une différence de marche de λ entre les sources secondaires* ». Aucune figure explicative n'est donnée et la largeur de cohérence spatiale est ici une grandeur qui caractérise la source et non l'onde. On ne mentionne pas explicitement que la différence de marche entre les deux sources secondaires varie avec leur écartement et leur distance à la source, ni donc que la largeur de cohérence de la source dépend des sources secondaires considérées. Dans le cas d'une source étendue, il est mis en avant le fait qu'une source est considérée comme ponctuelle, si son étendue est négligeable devant la largeur de cohérence.

⁵² Dans notre analyse, nous nous sommes contentée d'analyser les manuels écrits en langue française et non en langue anglaise et des manuels de cours et non d'expériences.

4.3.2. Cohérence temporelle

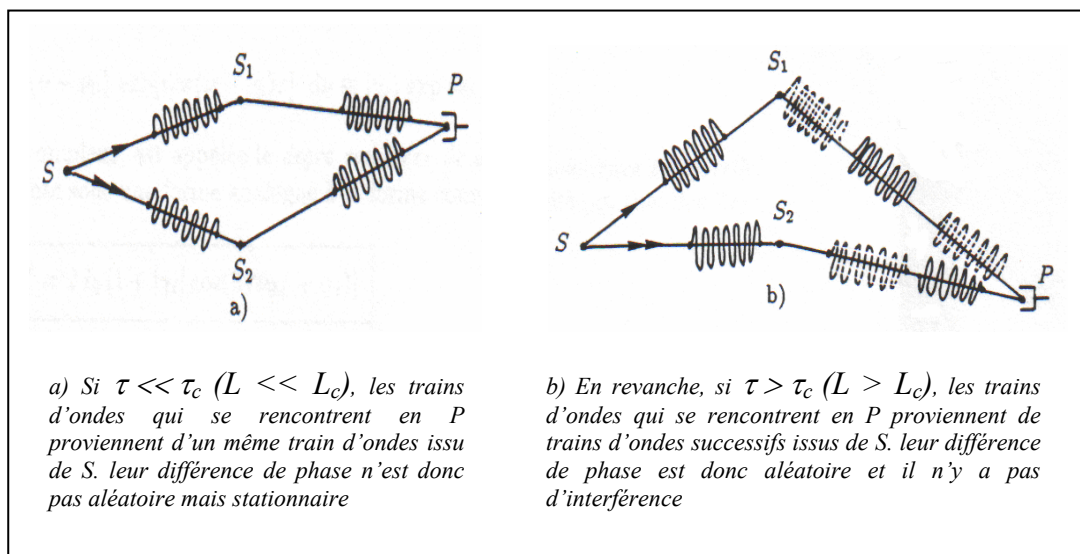
Le modèle des trains d'ondes, utilisé fréquemment dans le cas de la cohérence temporelle, est parfois absent dans quelques livres de physique (Moussa et Ponsonnet 1977 ; Alonso et Finn 1977 ; Kane et Sternheim 1986 ; Martin 1998 ; Charmont 2000). Il est à noter que les trains d'onde ne sont pas toujours représentés de la même façon. Ils peuvent avoir la même amplitude, être amortis.

Dans certain manuel (Encadré 40), le modèle du train d'ondes (d'amplitude constante) est utilisé pour expliquer la formation des ondes secondaires dans le dispositif du Michelson. Nous pouvons nous demander si ce qui est présenté est bien un train d'onde.



Encadré 40. Train d'ondes se propageant avec une amplitude constante (avec le Michelson)
(Françon et al 1969, p. 42)

Il y a un seul manuel qui utilise le modèle du train d'ondes pour expliquer l'existence ou l'absence d'interférences. Il distingue le cas où la longueur de cohérence temporelle est inférieure ou supérieure à la différence des durées de propagation (Encadré 41).



Encadré 41. Conditions sur la longueur de cohérence (Pérez 1991, p. 254)

Par ailleurs, le modèle des trains d'ondes n'est pas souvent utilisé pour expliquer la disparition des franges d'interférences lors de l'introduction d'une lame à faces parallèles devant l'un des trous d'Young dans le cas des lampes à vapeur de sodium. On se contente de dire que « *l'introduction de la lame transparente sur le trajet de l'onde se traduit par un déphasage supplémentaire entre S_1 et S_2 et donc par un déplacement des franges d'interférence* » (Encyclopédie Quillet 1993, p. 303). Ajoutons qu'un seul manuel utilise le modèle du train d'onde pour expliquer le fait que la largeur du champ d'interférences dépend de la nature de la source primaire ponctuelle, plus précisément de la nature du spectre de la lumière émise (Provost et Provost 1980).

Enfin, on rencontre parfois des expressions erronées. Ainsi, un manuel parle de « *largeur de cohérence temporelle* » (Quaranta 1998) au lieu de « *longueur de cohérence temporelle* ».

Quelques auteurs font le lien entre le modèle du train d'onde et le modèle spectral (Quaranta 1998 ; Françon et Slansky 1965). Par exemple, l'interférogramme est donné pour chaque type de source et on réalise la correspondance entre type de source- spectre – interférogramme (Cours de licence de Paris 7, TP de maîtrise de Monastir). De plus, on fait remarquer que « *la largeur spectrale d'une source est inversement proportionnelle à sa longueur de cohérence temporelle* » (Cours de licence de Paris 7) et on introduit la fonction d'autocorrélation (Cours de licence de Paris 7, TP de maîtrise de Monastir).

D'autres auteurs n'utilisent pas les deux modèles à la fois : chacun de ces modèles est utilisé à part et introduit pour expliquer certains aspects de la cohérence. Le modèle spectral est utilisé pour calculer la répartition de l'intensité (Charmont 2000) et le degré de cohérence temporelle (Pérez 1991) et pour étudier le cas des sources polychromatiques (Cours de licence de Paris 7). Le modèle du train d'onde est utilisé pour expliquer qualitativement l'existence des interférences (Charmont 2000 ; Pérez 1991 ; Cours de licence de Paris 7).

4.3.3. Différenciation des cohérences spatiale et temporelle

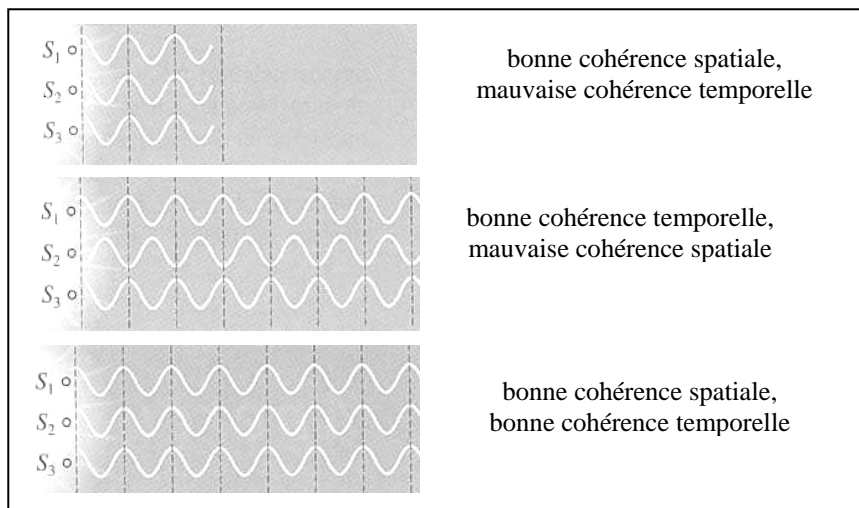
Dans certains manuels, le mot cohérence renvoie à la cohérence temporelle (Kane et Sternheim 1986 ; Moussa et Ponsonnet 1977 ; Giancoli 1993 ; Alonso et Finn 1977). Les auteurs distinguent les sources cohérentes des sources incohérentes par leur déphasage variant au cours du temps.

D'autres manuels mettent sur le même plan la cohérence temporelle et la cohérence spatiale en la présentant comme une corrélation entre deux fonctions : « *pour la cohérence temporelle, on compare une onde lumineuse avec elle-même à un instant différent. Pour la cohérence spatiale, on compare deux ondes qui se trouvent à des endroits de l'espace différents (...). La lumière peut augmenter sa cohérence lors de la propagation (...). La cohérence et l'incohérence ne sont donc pas des propriétés de la source lumineuse* » (Lauterborn et al 1997, p. 46-47).

Pour montrer que le raisonnement à utiliser dans le cas de la cohérence spatiale est voisin de celui à utiliser dans le cas de la cohérence temporelle, certains auteurs rapprochent les deux démarches consistant à décomposer une source étendue en points et une largeur spectrale en radiations monochromatiques. Ainsi, dans le cas de la cohérence spatiale, il est dit : « *le fait que la source ne soit pas ponctuelle [mais de largeur b], fait qu'elle est juxtaposition, [sur une longueur b], de source ponctuelle. Ces dernières ne sont pas spatialement au même endroit, on n'a pas au point M d'observation le même déphasage selon que l'émission est issue de telle ou telle source. Ainsi se superpose en un point d'observation des ordres d'interférences différents, ce qui tend à "brouiller" : on dit que le facteur de visibilité ou de contraste diminue [et ce d'autant plus que b est élevé]* » (Damman 2002, p. 298). Dans le cas de la cohérence temporelle, il est dit : « *le fait que la source ne soit pas monochromatique [mais de largeur spectrale $\Delta\nu$], fait qu'elle est juxtaposition, [sur une longueur b], de source monochromatique. Ces dernières ne donnent pas le même ordre d'interférence en un point M d'observation le même déphasage selon que l'émission est issue de telle ou telle source. Ainsi se superposent en un point d'observation des ordres d'interférences différents, ce qui tend à "brouiller" : on dit que le facteur de visibilité ou de contraste diminue* » (idem.). Dans ces explications, l'auteur ne parle pas du caractère aléatoire de l'émission lumineuse et du modèle du train d'onde. De plus, il parle de source au lieu de radiation.

Nous avons trouvé un seul manuel qui explique qualitativement la cohérence spatiale à l'aide du modèle du train d'onde et montre que l'on peut avoir une bonne cohérence spatiale et une mauvaise cohérence temporelle et réciproquement en utilisant le modèle des trains d'ondes (Encadré 42). Il explique qu'« *une bonne cohérence spatiale (ou latérale) signifie que des points différents d'une source étendue sont cohérents. Une bonne cohérence temporelle (ou longitudinale) signifie que les trains d'ondes provenant de chaque source*

ponctuelle sont longs » (Benson 1996, p. 183). Dans la première situation, les trains d'ondes sont en phase mais courts. Dans la deuxième situation les trains d'ondes sont en opposition de phase (S_1 et S_2 ; S_2 et S_3). Dans la troisième situation, les trains d'ondes sont en phase et longs. La question qui se pose c'est comment prévoir qu'il y a cohérence dans le cas où on dispose d'une infinité de points émettant une onde monochromatique avec un déphasage aléatoire.



Encadré 42. Cohérence temporelle et cohérence spatiale (Benson 1996, p. 183)

5. Conclusion partielle

L'analyse des programmes du supérieur destinés aux étudiants tunisiens et français nous permet de dire qu'ils sont quasi équivalents en ce qui concerne l'ordre et les thèmes abordés. Cependant il existe des différences concernant les dispositifs étudiés et les interprétations données. Certaines sont susceptibles de soulever des problèmes.

Concernant la définition des interférences lumineuses, elle diffère d'un manuel à un autre : parfois elle est théorique, parfois elle se réfère à des champs de la physique différents de celui de l'optique physique et d'autre fois, elle renvoie à des interprétations différentes.

Pour ce qui est des conditions d'obtention des interférences lumineuses, elles ne sont pas toutes données. De plus, dans la plupart des manuels, elles ne sont pas citées au début.

Le modèle des trains d'ondes sert à l'interprétation de la condition sur la source unique mais il n'est plus utilisé après. Il est présenté d'une manière qualitative. Le modèle spectral est présent pour expliquer l'aspect quantitatif de la cohérence. Pour la cohérence spatiale, on s'intéresse particulièrement à l'étendue de la source. Et parfois, il n'existe pas de différenciation claire entre la cohérence temporelle et la cohérence spatiale.

Concernant les dispositifs interférentiels, ils présentent des inconvénients et des avantages. Ils sont utilisés dans un but précis (trous d'Young pour l'étude de la cohérence spatiale, Michelson pour l'étude de la cohérence temporelle).

L'analyse que nous venons de présenter nous a permis de pointer les endroits susceptibles de poser problème ; il nous faut maintenant formuler ces difficultés sous forme d'hypothèses, afin de pouvoir les tester.

QUESTIONS DE RECHERCHE

Les thèmes et questions de recherche précises à explorer ont été déterminés par l'étude du savoir savant que nous venons de présenter ainsi que par une analyse à priori des difficultés susceptibles d'être rencontrées par les étudiants inspirée par les résultats des recherches sur les raisonnements communs dans le domaine des ondes, et plus généralement en physique.

Comme nous l'avons dit en introduction, notre recherche a comporté trois étapes. Dans la première, nous nous sommes essentiellement intéressée aux conditions d'obtention des interférences lumineuses et aux situations présentées au début de l'enseignement des interférences lumineuses, celles qui concernent les interférences en éclairage totalement cohérent. Dans la seconde, nous nous sommes essentiellement centrée sur l'interprétation des conditions d'obtention, autrement dit sur la notion de lumière cohérente, et sur des situations plus délicates abordées plus tard dans l'enseignement, celles des interférences en éclairage partiellement cohérent. Dans la troisième, nous avons rapproché les résultats obtenus lors de ces différentes études et avancé un modèle de raisonnement.

Nous présentons ci-dessous l'ensemble des questions auxquelles nous avons cherché à apporter des éléments de réponse au cours des deux études expérimentales et les hypothèses que nous avons cherchées à tester :

1) Les étudiants savent-ils que deux sources lumineuses indépendantes et ponctuelles, autres que des lasers ne peuvent donner des interférences ? Comment l'expliquent-ils ?

Rencontrent-ils les mêmes difficultés que Young autrefois à propos de ces conditions ? Utilisent-ils le modèle du train d'onde introduit par Fresnel ?

2) Pour les étudiants, l'existence des interférences dépend-elle du dispositif interférentiel, trous d'Young, miroir de Fresnel, lames à faces parallèles ou en coin ? Comment les étudiants expliquent-ils l'existence d'interférences pour chacun de ces dispositifs éclairé par une source totalement cohérente (elle est ponctuelle et émet une lumière monochromatique) ?

Compte tenu de leur tendance à favoriser les éléments perceptifs d'une situation, les étudiants n'ont-ils pas plus de difficultés à identifier l'existence d'interférences dans le cas de sources secondaires virtuelles obtenues par réflexion et réfraction que dans le cas de sources secondaires obtenues par diffraction ?

Dans le cas des lames à faces parallèles, la difficulté à envisager l'existence simultanée des phénomènes de réflexion et réfraction partielle mise en évidence par Singh et Butler n'entraîne t-elle pas les étudiants à nier la formation d'interférences par division d'amplitude ?

Dans le cas des trous d'Young, retrouve t-on la tendance à considérer la figure d'interférences comme la superposition ou la juxtaposition de deux figures de diffraction mises en évidence par Ambrose et al ainsi que Wosilait et al aux Etats-Unis ?

Dans le cas des lames à faces parallèles, retrouve t-on la tendance de Newton à suivre l'onde incidente dans son trajet à travers la lame et à considérer les interférences comme une modification de l'onde incidente ?

3) Pour les étudiants, l'existence des interférences dépend-elle de la forme des sources de lumière qui éclaire le dispositif interférentiel, ponctuelle ou étendue ?

Savent-ils que dans le cas des dispositifs à division du front d'onde, la source primaire doit être de petite dimension et que dans le cas des dispositifs à division d'amplitude, la source primaire peut-être ponctuelle ou étendue ?

Ont-ils la même tendance à ne pas tenir compte de la dimension de la source que Young ?

4) Pour les étudiants, l'existence des interférences dépend-elle de la position des sources de lumière qui éclaire le dispositif interférentiel, à distance finie ou à l'infini ?

L'accent mis par le début du programme d'optique ondulatoire sur la superposition d'ondes sphériques ne les conduit-il pas à refuser l'existence d'interférences par superposition d'ondes planes ?

5) *Comment les étudiants relient-ils les grandeurs caractérisant la figure observée sur un écran (position des franges, écartement, contraste, couleur, largeur du champ observé, etc.) et les grandeurs caractérisant les sources (intensité, fréquence, déphasage, position, largeur du spectre, nombre..) ?*

Retrouve t-on la tendance mise en évidence par Maurines à lier la position des franges et l'intensité d'une onde ? Retrouve t-on la difficulté dégagée par Wosilait et al à utiliser correctement la relation liant l'interfrange, la distance entre les sources secondaires et la distance sources-écran d'observation ? Les étudiants justifient-ils leurs réponses en comparant le trajet parcouru par les deux ondes ou raisonnent-ils sur le trajet moyen comme Wosilait et al l'ont constaté aux Etats-Unis ?

6) *Comment les étudiants utilisent-ils le principe de superposition des ondes lorsque la lumière n'est pas cohérente spatialement (deux sources primaires ponctuelles ou une source primaire étendue) ?*

Retrouve t-on les tendances mises en évidence par Maurines à ne pas décomposer la source lorsqu'elle est étendue ?

7) *Comment les étudiants utilisent-ils le principe de superposition des ondes lorsque la lumière n'est pas cohérente temporellement (la source primaire émet deux radiations monochromatiques ou une lumière blanche) ?*

Retrouve t-on les tendances mises en évidence par Maurines dans le cas de la cohérence spatiale à ne pas décomposer la lumière émise par la source ?

8) *Quelles grandeurs caractéristiques des trains d'ondes émis par deux sources (durée, amplitude, déphasage...) les étudiants associent-ils à la cohérence temporelle ?*

9) *Les étudiants connaissent-ils les différentes grandeurs caractérisant la cohérence temporelle (durée d'un train d'onde, largeur du spectre en fréquence) et la cohérence spatiale (largeur de la source, largeur de cohérence) ? Les différencient-ils ou les confondent-ils ? Font-ils un lien entre les deux grandeurs caractérisant la cohérence temporelle ? Font-ils un lien entre les deux grandeurs caractérisant la cohérence spatiale ?*

Devant cette multiplicité de grandeurs, n'ont-ils pas tendance à les confondre ou à ne pas les relier ? Ne favorisent-ils pas les grandeurs plus « concrètes » car pouvant être associées à quelque chose de perceptif : la largeur de la source, la longueur d'un train d'onde ? N'ont-ils pas tendance à confondre une représentation temporelle d'un train d'onde avec une représentation spatiale et donc à confondre les deux types de cohérence ?

10) *Comment les étudiants raisonnent-ils dans des situations d'éclairage partiellement cohérent ? Utilisent-ils le modèle du train d'onde pour expliquer la limitation du champ d'interférence due à la cohérence temporelle limitée de la lumière ?*

Retrouve t-on la tendance à considérer la cohérence comme caractérisée uniquement par la largeur de la source primaire étendue mise en évidence par Maurines ?

11) Pour les étudiants, comment sont les vitesses de propagation, la longueur d'onde et la fréquence de la lumière dans la zone de croisement de deux faisceaux cohérents et en dehors de cette zone ? Comment se comportent les rayons lumineux ?

Retrouve t-on la tendance vers un raisonnement mécaniste mise en évidence par Maurines ?

PARTIE 3
METHODOLOGIE

1. Introduction

Nous avons débuté notre recherche sur les difficultés soulevées par l'étude de l'optique ondulatoire lors de notre DEA en 2001 en nous intéressant au concept de déphasage. Nous avons commencé une analyse de contenu sur l'histoire de ce concept et sur son utilisation en optique et avons également examiné le cours dispensé à l'université. Nous avons réalisé une mini-enquête auprès d'étudiants tunisiens ayant reçu un enseignement à l'aide d'un questionnaire papier-crayon. Ce questionnaire comportait plusieurs questions. Une partie des questions portaient sur le déphasage résultant de la propagation de l'onde dans différents milieux matériels, l'autre partie portait sur le déphasage entre deux ondes dans différentes situations d'interférences lumineuses. Si les réponses à la première partie des questions ont pu être exploitées, celles aux questions portant sur les situations d'interférences lumineuses n'ont pu l'être. Les réponses obtenues n'étaient en effet pas assez nombreuses et explicites.

Nous avons alors décidé de poursuivre notre recherche en prenant comme thématique centrale non pas celle du déphasage mais celle des interférences lumineuses et des conditions de leur obtention. Nous avons poursuivi l'analyse du domaine conceptuel et de son histoire ainsi que celle des programmes et manuels d'enseignement entreprises lors du DEA. Cette étude théorique nous a conduite à dégager plusieurs points susceptibles d'être délicats pour les étudiants. Certains portent sur le phénomène des interférences : ils concernent les caractéristiques d'une figure d'interférences et les facteurs dont elle dépend, les conditions d'obtention d'une figure, le principe de fonctionnement des dispositifs interférentiels. D'autres portent sur les concepts, principes et modèles à utiliser pour rendre compte de ce phénomène et concernent le principe de superposition des ondes et les grandeurs caractérisant la cohérence d'un faisceau lumineux.

L'étude expérimentale a été faite en deux temps et a donné lieu à deux séries de questionnaires constituant deux niveaux d'étude du phénomène. Elle a été réalisée essentiellement à l'aide de questionnaires. Tout au long de ces années d'étude, nous avons cherché, d'une part à augmenter le nombre d'étudiants interrogés pour qu'il soit significatif ; et d'autre part, à préciser certaines questions pour faire d'autres questionnaires afin d'analyser le plus finement possible les conceptions des étudiants.

L'interprétation des réponses obtenues aux questionnaires a également été réalisée en deux temps. Nous avons tout d'abord effectué un bilan des difficultés rencontrées par les

étudiants après chaque série de questionnaires et avons présenté les résultats obtenus lors de deux communications en 2003 et 2005. Nous avons ensuite cherché à dégager un modèle de raisonnement que nous présentons dans la partie 5 de ce mémoire. Nous détaillons ci-dessous notre méthodologie.

2. Les questionnaires

2.1. Elaboration des questionnaires

Nous avons choisi la méthode des questionnaires car c'est « *un outil de communication (...) ayant comme objectif fondamental la collecte de l'information pertinente au problème à résoudre* » (Perrien et al 1984, p. 122). Ils permettent d'obtenir rapidement les réponses d'un assez grand nombre d'apprenants et leur utilisation en classe ou en amphithéâtre est aisée. Ils ont l'avantage de constituer une trace permanente ne nécessitant pas de transcription avant dépouillement mais aussi le défaut de fournir des réponses qui ne sont pas toujours claires et détaillées. Ils peuvent être facilement transmis aux enseignants et être réutilisés comme exercices. Pour élaborer les questionnaires, nous avons eu recours à des précis de méthodologie tels ceux de Ghiglione et Matalon (1978) ainsi que Perrien et al (1984).

Les questions de la première série de questionnaires portent sur les caractéristiques des figures d'interférences en cohérence totale, les conditions d'observation des interférences lumineuses avec divers dispositifs (lampes, trous d'Young, lames minces, etc.), l'utilisation du principe de superposition des ondes, les grandeurs caractérisant la propagation d'une onde (Annexe 2). Nous les avons tout d'abord définies par l'analyse théorique puis testées une première fois lors d'entretiens puis ajustées et précisées. Ces entretiens, élaborés en ayant recours aux précis de méthodologie tels ceux de Blanchet et Gotman (1992), Michelat (1975), ont été réalisés auprès de cinq étudiants volontaires : il s'agit d'étudiants tunisiens de maîtrise, ayant suivi un enseignement sur les interférences lumineuses. Ils ont duré environ vingt minutes. Comme il s'agissait d'une phase exploratoire, la discussion a été guidée par des questions ouvertes et conduite de manière à laisser le maximum d'occasions au raisonnement de l'étudiant de se manifester. Nous avons également parfois demandé aux étudiants interviewés de faire des schémas pour expliquer leur pensée. Quelques questionnaires de cette première série ont été de nouveau distribués parallèlement aux questionnaires de la deuxième série, certains tels quels, d'autres ayant subi des modifications au niveau de la forme (par

exemple, au lieu de mettre de longues phrases décrivant une situation donnée, nous avons introduit des schémas).

Les questions de la deuxième série de questionnaires portent sur les caractéristiques des figures d'interférences en cohérence partielle et sur les grandeurs caractérisant la cohérence de la lumière. Elles n'ont pas été testées en entretiens, mais passées directement aux étudiants. En effet, les questions portant sur les figures d'interférences en cohérence partielle n'étaient pas nouvelles, mais tirées de l'HDR de Maurines (2001) et celles sur les grandeurs caractérisant la cohérence de l'onde avaient été définies par une analyse à priori jugée suffisante.

Comme notre objectif n'était pas uniquement de faire un bilan des difficultés des étudiants et d'établir un ensemble disparate de questions-réponses, nous avons construit des familles de questions possédant une caractéristique commune, d'autres paramètres pouvant varier par ailleurs. L'apparition d'un même type de réponses dans un ensemble de telles familles est en effet tout autant significatif sinon plus qu'un taux élevé de réponses à une seule question. Elle montre en effet que les difficultés des étudiants sont liées à l'existence de raisonnements possédant une certaine cohérence interne qui leur donne un caractère général et prédictif. Un type de raisonnement n'existant pas en soi mais dépendant de la perturbation qui l'a suscité, nous devons tenir compte des deux. Nous cernons ainsi le raisonnement et son domaine d'utilisation. Nous avons suivi en cela la méthodologie détaillée par des chercheurs tels que Closset et Viennot (1989).

Les questionnaires sont au nombre d'une dizaine et comportent en moyenne quatre à cinq questions. En effet, comme le phénomène des interférences fait intervenir un grand nombre de paramètres, nous avons été amenée à élaborer un grand nombre de questions pour avoir une vue d'ensemble des difficultés susceptibles d'être rencontrées par les étudiants. Pour éviter que les questionnaires soient trop longs ou trop nombreux, nous avons dû regrouper un petit nombre de questions.

2.2. Typologie des questions

Dans les questionnaires que nous avons élaborés, nous avons eu recours à différents types de questions : questions ouvertes et questions semi-ouvertes. Toutes les questions sont *qualitatives* ce qui fait que même les questions qui pourraient être '*classiques*' (car utilisées dans l'enseignement) ne le sont pas. Toutes les questions demandent une justification de la réponse et très souvent que celle-ci soit accompagnée d'un schéma. Ces demandes de

justifications permettent à l'étudiant de s'exprimer et sont susceptibles de nous informer sur le raisonnement qui a conduit celui-ci à choisir une réponse plutôt qu'une autre. Notons que les questions que nous avons posées sont toutes nouvelles. Seulement deux d'entre elles ont été reprises des travaux déjà réalisés sur les interférences lumineuses et la diffraction (Ambrose et al 1999a ; Maurines 2001). Une autre question est inspirée d'un travail effectué sur les interférences lumineuses (Wosilait et al 1999).

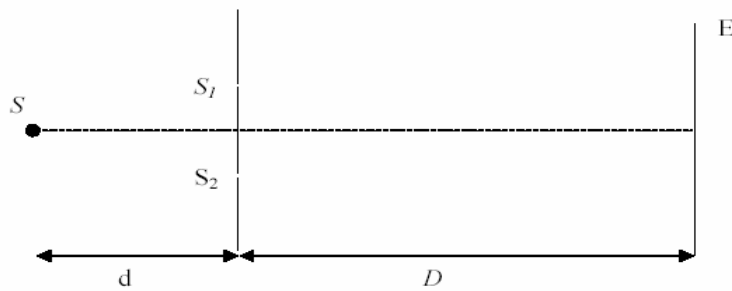
2.2.1. Questions ouvertes

Les questions ouvertes ont de nombreux avantages par rapport aux questions fermées. D'abord, ces questions laissent des possibilités d'initiatives et de choix. Ensuite, elles permettent à l'interrogé de répondre en utilisant son propre vocabulaire et de ce fait, elles peuvent être révélatrices de ses conceptions. C'est pourquoi elles ont été utilisées par les chercheurs travaillant sur les conceptions des étudiants (comme Viennot 1979 ; Maurines 1986 ; etc.). Ces questions utilisées dans les étapes préliminaires pour dégager les obstacles rencontrés par les étudiants peuvent permettre ensuite d'élaborer des questions fermées visant à confirmer les hypothèses émises.

Certaines questions ont été présentées uniquement sous forme verbale, d'autres ont aussi été accompagnées de schémas. Ces schémas donnent une représentation simplifiée d'une situation expérimentale. Ils permettent de résumer rapidement la situation et ainsi d'éviter une description longue pouvant être ennuyeuse pour certains étudiants. Toutefois, il faut tenir compte du fait que les schémas peuvent induire des lectures non désirées et poser des problèmes d'analyse.

Comme exemple de question ouverte, celle posée dans le questionnaire Q₁ (Annexe 2), présentée comme suit (Encadré 43) :

Situation de référence On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E est " D "



1) *Qu'observe-t-on sur l'écran ? Représentez la figure observée. Expliquez pourquoi on observe cette figure en vous aidant d'un schéma.*

Encadré 43. Énoncé d'une question ouverte

2.2.2. Questions semi-ouvertes

Pour faire s'exprimer les étudiants sur des points précis apparus comme problématiques, nous avons aussi élaboré des questions semi-ouvertes. Voici l'exemple d'une question (Encadré 44) permettant de faire facilement le compte des réponses à caractère "vrai-faux" posée dans le questionnaire Q₂ (Annexe 2) :

| Dans l'expérience | vrai | faux | Pourquoi ? |
|---|------|------|------------|
| a. la distance entre les franges diminue quand on éloigne l'écran | | | |

Encadré 44. Énoncé d'une question semi-ouverte

Pour d'autres questions, les possibilités de choix étaient plus nombreuses, comme par exemple dans le questionnaire Q₃ (Encadré 45).

1) On recouvre l'un des trous d'Young par une lame de verre d'épaisseur faible e . Cochez les cases correspondant aux modifications observées sur l'écran et indiquez éventuellement si d'autres modifications se produisent. Précisez si cette (ces) modification (s) a (ont) lieu sur tout l'écran ou seulement sur une partie. Justifiez vos réponses.

- *la figure d'interférence est translaturée
- *la distance entre les franges sombres est modifiée
- *les franges sont moins contrastées (elles se brouillent)
- *l'intensité des franges augmente
- *les franges disparaissent
- *Autres.....

Encadré 45. Énoncé d'une question semi-ouverte avec choix multiples

Les questions semi-ouvertes ont toujours été accompagnées d'une demande de justification de la réponse donnée afin de limiter le risque d'une interprétation abusive de la réponse.

2.3. Catégorisation des questions

Les questions proposées aux étudiants font appel à deux contextes différents. L'un est qualifié d'*expérimental* car les questions reposent sur la présentation de dispositifs interférentiels tels que les trous d'Young, les miroirs de Fresnel, les lames minces à faces parallèles, les lames en coin. Ces dispositifs ont été présentés aux étudiants sous une forme modélisée et les questions ne présentent donc pas de véritables situations expérimentales. C'est pourquoi nous mettons aussi dans cette catégorie les questions qui portent sur la situation « prototypique » à deux sources ponctuelles. Les autres questions sont qualifiées de *théoriques* car elles reposent sur la représentation d'éléments d'un modèle, par exemple des trains d'ondes se propageant au cours du temps et des spectres d'intensité.

Les questions peuvent être rattachées à sept thèmes différents :

Thème 1 : Les conditions d'obtention d'une figure d'interférences

Thème 2 : L'obtention d'une figure d'interférences avec différents dispositifs interférentiels

Thème 3 : Les caractéristiques d'une figure d'interférences en éclairage totalement cohérent

Thème 4 : La cohérence des ondes et le principe de superposition

Thème 5 : Les grandeurs caractérisant la propagation d'une onde

Thème 6 : Les caractéristiques d'une figure d'interférences en éclairage partiellement cohérent

Thème 7 : Les grandeurs caractérisant la cohérence spatiotemporelle d'une onde

Chaque question est donc caractérisée par un contexte, un thème et le problème exploré (par exemple l'effet de la variation de la longueur d'onde de la lumière sur l'interfrange). Dans le tableau 11, nous avons indiqué les problèmes explorés dans les différentes questions en les regroupant par thème et en précisant le questionnaire où elle se trouve (indiqué par la lettre Q suivie de son numéro). Nous avons également mentionné la nature du contexte. Pour les questions expérimentales, nous avons désigné par **T** les trous d'Young, **M** les miroirs de Fresnel, **L** les lames minces et **C** la lame en coin. Lorsque le dispositif interférentiel n'est pas précisé et que l'énoncé présente la situation prototypique à deux sources, nous avons utilisé **D**. Les questions théoriques sont désignées par **Th**.

Tableau 11. Caractérisation des questions

| Thèmes | Problèmes explorés | Questionnaires |
|--|--|--|
| 1. Conditions d'obtention d'une figure d'interférences | Un trou | (Q ₁) |
| | Deux lampes identiques | (Q ₅) |
| | Deux lampes à fréquences différentes | (Q ₅) |
| | Deux lasers à faisceaux divergents | (Q ₅) |
| | Deux lasers à faisceaux parallèles | (Q ₅) |
| | Source unique | (Q ₈) |
| 2. Figures d'interférences avec différents dispositifs interférentiels | Miroirs de Fresnel (avec source ponctuelle proche/à l'infini) | (Q ₁₁) |
| | Lame à faces parallèles (avec source ponctuelle/étendue/proche/à l'infini) | (Q ₁₂), (Q ₁₃), (Q ₁₄) |
| | Lame en coin | (Q ₁₄), (Q ₁₅) |
| 3. Caractéristiques d'une figure d'interférences en éclairage cohérent | Effet de la variation des distances D et a | (Q ₂) |
| | Effet de la variation de l'intensité | (Q ₇) |
| | Effet de la variation de la phase des sources secondaires | (Q ₇) |
| | Effet de la variation de la longueur d'onde | (Q ₇) |
| | Effet de l'introduction d'une lame mince | (Q ₃) |
| 4. Cohérence des ondes et principe de superposition | Trois trous | (Q ₁) ; (Q ₂) |
| | Deux trous élargis | (Q ₁) ; (Q ₂) |
| | Deux sources primaires ponctuelles | (Q ₁) ; (Q ₂) |
| | Deux radiations monochromatiques | (Q ₇) |
| | Deux filtres différents devant les trous | (Q ₃) |
| 5. Caractérisation de la propagation d'une onde | Grandeurs caractérisant la propagation d'une onde | (Q ₆) |
| 6. Figures d'interférences en éclairage partiellement cohérent | Largeur du champ interférentiel | (Q ₈) |
| | Lame mince devant une source secondaire | (Q ₈) |
| | Source étendue | (Q ₁) ; (Q ₂) |
| | Source étendue et variation de d et de a | (Q ₄) |
| 7. Caractérisation de la cohérence spatio-temporelle d'une onde | Modèle du train d'onde | (Q ₆) |
| | Grandeurs caractérisant la cohérence d'une onde | (Q ₁₀) |

3. Population étudiée et mode de passation

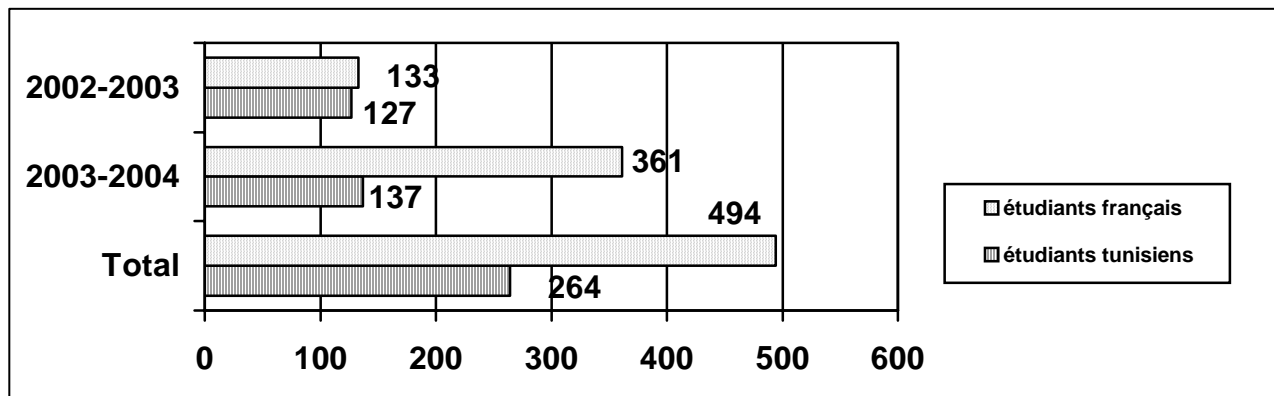
3.1. Populations d'étudiants

Nous avons réalisée notre recherche auprès d'étudiants ayant reçu un enseignement sur les interférences lumineuses, en Tunisie et en France. Nous souhaitons en effet voir si les difficultés rencontrées par ces deux types de population sont similaires ou non. Ces étudiants appartenaient à différentes universités et instituts (Faculté des Sciences de Monastir, Paris 7, Marne la Vallée, Créteil, etc.) et classes préparatoires (ENIN, ENIM, Lycée Raspail, etc.), étaient à différents niveaux d'études, comme indiqué dans le tableau ci-dessous (Tableau 12) :

Tableau 12. Nombre des étudiants suivant le niveau des études pour différents établissements

| Niveau des études | Etablissement | Nombre |
|---|----------------------------------|--------|
| DEUG de sciences de la matière 2 ^{ème} année | Université Paris 13 | (19) |
| Licence en sciences physiques | Université Marne La Vallée | (60) |
| | Université Paris 7 | (27) |
| Maîtrise en sciences physiques | Faculté des sciences de Monastir | (159) |
| Classes préparatoires 2 ^{ème} année | Nabeul (ENIN) | (87) |
| | Monastir (ENIM) | (18) |
| | Saint Denis | (12) |
| | Lycée Raspail | (52) |
| | Lycée Schweitzer | (60) |
| Capes de sciences physiques | IUFM de Paris | (139) |
| | IUFM de Créteil | (110) |
| | IUFM de Versailles | (15) |

L'échantillon est ainsi composé de 494 étudiants français et de 264 étudiants tunisiens. D'où l'effectif total des étudiants est égal à 758. Ces étudiants ont suivi un enseignement sur les interférences lumineuses durant l'année universitaire 2002-2003 et 2003-2004 (Graphe 1).



Graphique 1. Répartition des étudiants tunisiens et français au cours des années 2002-2003 et 2003-2004

Le fait d'avoir une population hétérogène présente à la fois des avantages et des inconvénients. L'inconvénient majeur réside dans le double travail à faire (puisque'il faut faire une analyse exhaustive pour chaque niveau) et le temps supplémentaire que cela nécessite. L'avantage est que cela permet de comparer les difficultés de populations différentes et d'avoir une meilleure idée de leur importance. En effet, lorsque nous n'observons pas de différence entre les réponses fournies par des étudiants ayant suivi un cours différent et que celles-ci sont erronées, nous pouvons supposer que l'erreur est la manifestation d'une tendance forte de raisonnement.

3.2. Passation

La durée de passation des questionnaires a varié de 15 minutes à 25 minutes en fonction de la longueur du questionnaire proposé. Le nombre d'étudiants interrogés par questionnaire est compris entre 21 et 116 (Tableau 13). Notons que quelquefois, nous avons pu distribuer plus d'un questionnaire aux étudiants : c'est pourquoi le nombre total de questionnaires est différent de celui des étudiants interrogés.

Tableau 13. Nombre total des étudiants suivant le questionnaire proposé

| Questionnaire | Q ₁ | Q ₂ | Q ₃ | Q ₄ | Q ₅ | Q ₆ | Q ₇ | Q ₈ | Q ₉ | Q ₁₀ | Q ₁₁ | Q ₁₂ | Q ₁₃ | Q ₁₄ | Q ₁₅ |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Nombre | 57 | 104 | 65 | 21 | 47 | 58 | 76 | 58 | 116 | 83 | 48 | 78 | 28 | 44 | 58 |

Comme notre population est hétérogène, nous avons pris certaines précautions dans la distribution des questionnaires. Nous avons ainsi donné aux 19 étudiants de DEUG 2 que nous avons interrogés au début de notre recherche et qui avaient eu un cours succinct sur les

interférences lumineuses des questions « de base » portant sur des points abordés par l'enseignant. Ces mêmes questions ont aussi été proposées à d'autres étudiants à d'autres niveaux d'enseignement à des fins de comparaison. Par la suite, nous avons choisi de n'interroger que des étudiants ayant eu un enseignement conséquent sur les interférences lumineuses. Ils étaient en classes préparatoires en deuxième année ou en licence ou maîtrise à l'université.

4. Traitement des données

Les questionnaires ont d'abord été dépouillés question par question en tenant compte à la fois de la réponse brute et de la justification, de la réponse « verbale » et du schéma s'il était demandé. Nous avons ainsi dégagé des catégories significatives de réponses en nous appuyant sur l'analyse à priori des difficultés susceptibles d'être rencontrées par les étudiants et en tenant compte aussi de difficultés non prévues.

Vu qu'il existe quelques différences entre les programmes des classes préparatoires et ceux de l'université, nous les avons prises en considération. En premier lieu, nous avons séparé les populations interrogées à une même question lorsqu'on était en droit d'attendre des résultats différents. Par exemple, pour le questionnaire sur les lames à faces parallèles, on mentionne dans le programme des classes préparatoires (en Tunisie comme en France), qu'« *on raisonne par les sources images secondaires* » alors que ceci est absent dans le programme (et même dans le cours) de la maîtrise en Tunisie. Comme nous n'avons obtenu que quelques schémas faisant apparaître des sources secondaires, nous avons regroupé les deux populations. Nous avons opéré ainsi chaque fois que l'on pouvait s'attendre à des résultats différents.

Nous n'avons pas fait d'étude statistique systématique des réponses obtenues car nous cherchions avant tout dans cette étude exploratoire sur les interférences lumineuses à mettre en évidence des typologies de difficultés et à proposer les premiers éléments d'interprétation. Les pourcentages associés à chaque catégorie significative de réponse ne peuvent être interprétés qu'en tant que tendances majoritaires ou minoritaires. Un pourcentage de 20% de réponses erronées après enseignement peut être le signe d'une difficulté s'il était légitime d'attendre un pourcentage nul ; il en est de même d'un pourcentage élevé de non-réponses.

Les questionnaires de la deuxième étude sur les grandeurs caractérisant la cohérence de la lumière ont été soumis à un traitement statistique afin de mieux apprécier le degré de

difficultés rencontrées par les étudiants pour chaque type de cohérence, temporelle ou spatiale.

Après avoir réalisé un bilan des difficultés rencontrées par les étudiants, nous avons rapproché les résultats des questionnaires portant sur les conditions d'obtention des interférences, sur les dispositifs interférentiels et sur les caractéristiques d'une figure d'interférences en cohérence totale. Nous avons alors fait une synthèse des tendances de raisonnement observées et élaboré un modèle de raisonnement des étudiants. Nous avons ensuite mis à l'épreuve ce modèle de raisonnement à l'aide des questionnaires portant sur le principe de superposition et la cohérence des sources, sur les grandeurs caractérisant la propagation d'une onde et à l'aide d'un questionnaire portant sur une lame en coin éclairée en lumière blanche. Nous avons enfin constaté que le modèle permettait aussi d'interpréter les résultats de l'étude complémentaire sur la cohérence.

PARTIE 4
PREMIERES ETUDES
EXPERIMENTALES :
Les interférences lumineuses

1. Introduction

Comme nous l'avons mentionné dans la partie méthodologie, certains points ont été étudiés à l'aide de différentes versions de la même question. Aussi, lorsqu'il s'agissait de versions quasi-identiques (par exemple, quand nous avons remplacé un mot dans l'énoncé afin d'éclaircir plus la situation), nous avons groupé les résultats. Cela était d'autant plus justifié qu'il n'y a pas eu de différence notable entre les résultats ou de remarques de la part des étudiants. Lorsque les versions sont différentes (par exemple par la présentation de la situation initiale), nous présenterons soit les résultats de la question la plus représentative, soit de différentes versions lorsqu'elles apportent des informations complémentaires.

Nous donnerons la réponse correcte attendue ; ensuite, les pourcentages des réponses brutes et ceux des différentes catégories de justifications données par les étudiants. L'effectif avec lequel est calculé le pourcentage est indiqué à chaque fois entre parenthèse puisqu'il varie selon les questionnaires. Il correspond au nombre d'étudiants interrogés qui peuvent être tunisiens et/ou français et à différents niveaux d'étude. Des exemples de réponses d'étudiants sont donnés pour chaque catégorie de justification.

Notons qu'il faut se référer à chaque fois à l'annexe 2 pour voir en détail les différentes questions exploitées.

2. Conditions d'obtention d'une figure d'interférences

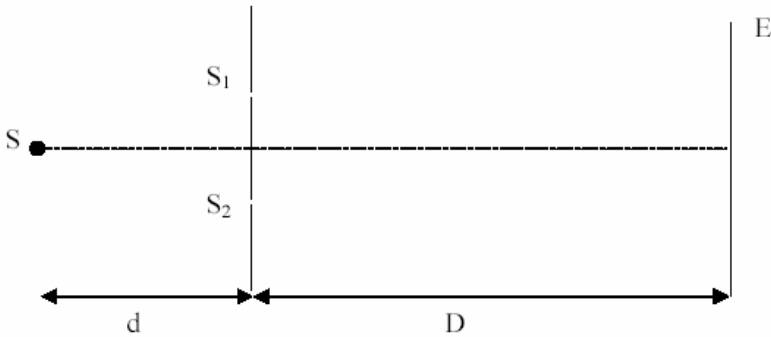
Les interférences lumineuses n'existent que dans certaines conditions pour lesquelles les ondes (à faisceaux divergents ou parallèles) sont dites cohérentes : elles doivent être *synchrones* (avoir la même fréquence) et *être obtenues à partir d'une source unique*. Cette source doit de plus être de *petite dimension*. Les étudiants d'université connaissent-ils ces conditions ? Comment les expliquent-ils ?

Pour répondre à ces questions, une série de situations leur a été proposée au travers de trois questionnaires. Elles concernent les possibilités d'obtention des interférences lumineuses en présence d'une source (ici un trou éclairé), de deux lampes identiques ou différentes, de deux lasers à faisceaux divergents ou parallèles, de deux sources secondaires.

2.1. Avec une source

En utilisant le dispositif des trous d'Young, nous avons proposé aux étudiants⁵³ une situation (Q₁T, N = 57) où au lieu d'avoir deux trous S_1 et S_2 (Situation de référence, Encadré 46), nous avons seulement le trou S_2 (Encadré 46bis).

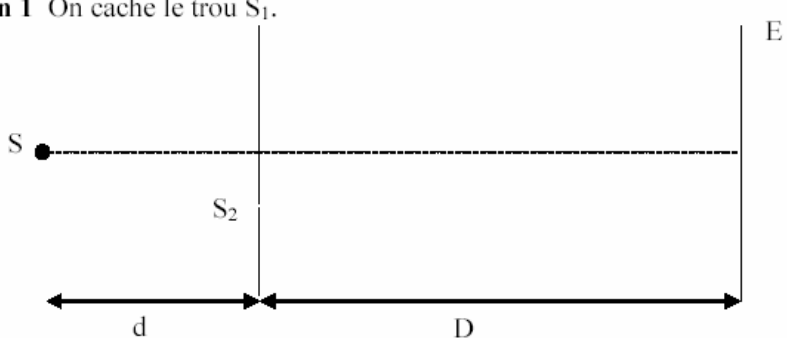
Situation de référence On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E est " D ".



1) Qu'observe-t-on sur l'écran ? Représentez la figure observée. Expliquez pourquoi on observe cette figure en vous aidant d'un schéma.

Encadré 46. Situation de référence

Situation 1 On cache le trou S_1 .



La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- Oui Pourquoi ?
- Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.

Encadré 46bis. Présence d'un trou au lieu de deux trous d'Young

⁵³ 10 étudiants de DEUG, 27 étudiants de Licence, 20 étudiants de Maîtrise.

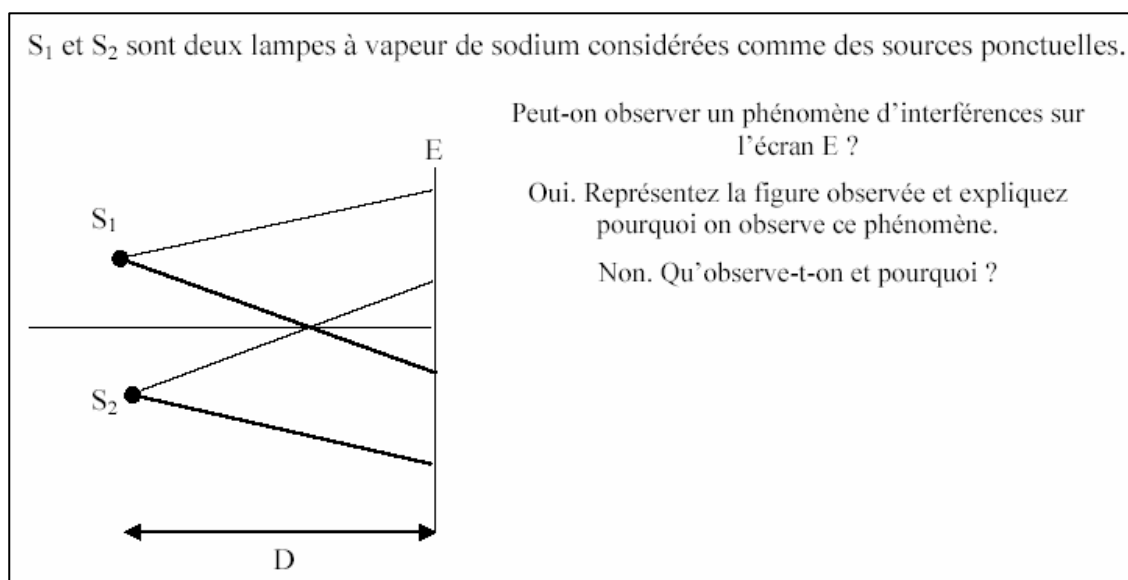
Les résultats à cette question reprise de l'étude d'Ambrose (1999a) sont différents de ceux qu'il a obtenus. En effet, pratiquement **tous** les étudiants interrogés (N = 57) donnent une réponse **correcte** à savoir qu'**il n'y a pas d'interférences** avec un trou alors que 40 % (N = 200) des étudiants interrogés par Ambrose affirment qu'il y a un phénomène d'interférences.

Une première hypothèse sur l'origine de cette différence serait que les réponses des étudiants dépendent de la forme des questions. En effet, pour notre part, nous avons proposé aux étudiants une seule situation, celle des trous d'Young, alors qu'Ambrose a d'abord présenté la situation de diffraction par une fente puis la situation des fentes d'Young. Ce faisant, il a obtenu deux types de réponse : pour la première, la figure d'interférences semble être la **superposition** de deux figures moins lumineuses produites par chaque fente « *chaque fente produit à elle seule la même figure, mais celle-ci est moins lumineuse* » ; pour la deuxième, la figure d'interférences semble être la **juxtaposition** de deux figures aussi lumineuse mais moins larges « *chaque fente produit à elle seule la moitié de la figure produite par deux fentes* ». Sur ce type de réponses, la figure observée sur l'écran ne résulte pas de l'utilisation du principe de superposition des ondes mais d'une règle d'addition des intensités des figures produites par chaque fente. Ces étudiants semblent ramener le phénomène d'interférences à celui de diffraction, ce qui aurait pu être accentué par le fait que la figure de diffraction par une fente et la figure d'interférences par deux fentes présentent la même symétrie.

Une deuxième hypothèse sur l'origine de cette différence serait que les réponses des étudiants dépendent de l'enseignement reçu. En effet, le dispositif d'Young peut être étudié soit dans le chapitre consacré aux interférences lumineuses, soit dans le chapitre consacré à la diffraction. Dans le premier cas, l'accent est mis sur la nécessité d'avoir deux faisceaux, dans le second, l'accent est mis sur la modification de l'onde incidente. L'analyse des manuels français montre que le dispositif d'Young est le plus souvent abordé dans le chapitre sur les interférences et que ce chapitre est avant celui sur la diffraction. Il serait à vérifier si l'enseignement reçu par les étudiants interrogés par Ambrose est identique à l'enseignement français ou s'il présente le dispositif d'Young au moment de l'étude de la diffraction. Retenons que pour nos étudiants, **il est nécessaire d'avoir deux sources pour produire une figure d'interférences** et que la formulation de la question posée par Ambrose pourrait accentuer cette association diffraction-interférences.

2.2. Avec deux lampes identiques

Un autre questionnaire⁵⁴ porte sur les conditions d'obtention d'interférences avec deux sources primaires. La première situation propose aux étudiants⁵⁵ deux lampes à vapeur de sodium, considérées comme des sources ponctuelles (Q_5D , $N = 47$). Nous avons demandé aux étudiants s'ils observent une figure d'interférences dans ce cas (Encadré 47).



Encadré 47. Les deux sources sont deux lampes à vapeur au sodium identiques

La réponse **correcte** est que les deux lampes à vapeur de sodium **ne peuvent pas donner des interférences lumineuses**. En effet, deux sources quasi monochromatiques, identiques et indépendantes, peuvent donner lieu à des interférences uniquement si la durée des trains d'ondes est supérieure au temps de réponse du récepteur. Comme ceci n'est pas vrai pour deux lampes à vapeur de sodium, nous ne pouvons pas avoir des interférences sans la présence d'un dispositif interférentiel à division de front d'onde ou d'amplitude.

Moins de la moitié des étudiants répondent correctement (36 %, $N = 47$). Les 16 justifications fournies mentionnent le fait que les sources sont incohérentes d'une part (56 %) et non monochromatiques d'autre part (19 %). Par contre, un nombre important d'étudiants donnent une réponse fautive en disant qu'on peut observer des interférences (57 %, $N = 47$). Les 17 justifications font référence au fait que les lampes à vapeur de sodium sont « *ponctuelles* » (41 %), ou « *cohérentes* » (29 %), ou les deux (28 %). Elles nous conduisent à

⁵⁴ Inspiré par les exercices proposés dans les documents d'accompagnement du programme de terminale S de 1995.

⁵⁵ 18 étudiants de DEUG, 10 étudiants de Licence, 19 étudiants de Maîtrise.

nous demander si **les étudiants ne confondent pas les critères de cohérence temporelle et de cohérence spatiale** puisqu'ils se réfèrent à la ponctualité de la source et non à la durée des trains d'ondes.

2.3. Avec deux lampes de longueurs d'onde différentes

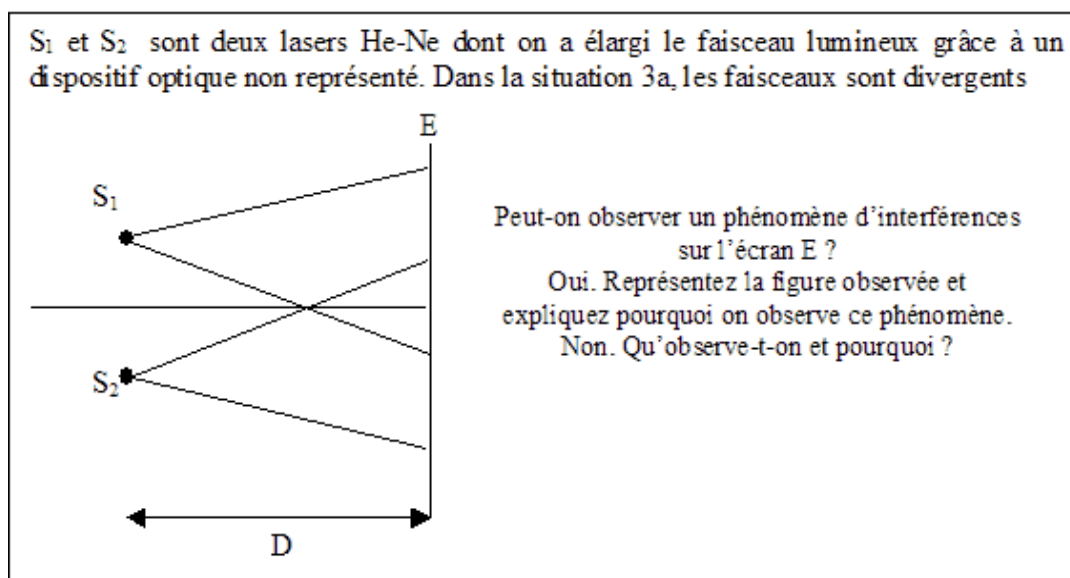
Toujours en considérant que les lampes sont des sources ponctuelles (Encadré 47), nous avons proposé dans une deuxième situation des lampes « *émettant des lumières de longueurs d'onde différentes* » (Q₅D, N = 47). Dans ce cas, la réponse **correcte** est que **nous n'avons plus d'interférences lumineuses** puisque les sources ne sont pas cohérentes.

Un nombre non négligeable d'étudiants répondent de manière incorrecte en disant qu'on peut observer des interférences (23 %, N = 47). Sur les 6 justifications fournies, les caractéristiques des deux sources ne sont pas comparées. Les étudiants se focalisent sur celles d'une source et tout semble se passer comme si une source pouvait donner des interférences : « *chaque longueur d'onde a son propre système de franges* ». Une majorité d'étudiants (68 %, N = 47) répondent correctement en disant qu'il n'y a pas d'interférences. 3 d'entre eux précisent que « *les sources ne sont pas synchrones* » et 4 autres qu'« *elles sont incohérentes* ».

2.4. Avec deux lasers à faisceaux divergents

Au lieu des lampes à vapeur de sodium, nous avons proposé dans une troisième situation deux lasers (Q₅D, N = 47). Cette expérience est réalisable en pratique dans des laboratoires spéciaux et permet d'obtenir une figure d'interférences⁵⁶. Dans cette situation, les lasers sont à faisceaux divergents (Encadré 48).

⁵⁶ Pour plus de détails, voir la partie théorique sur le laser.

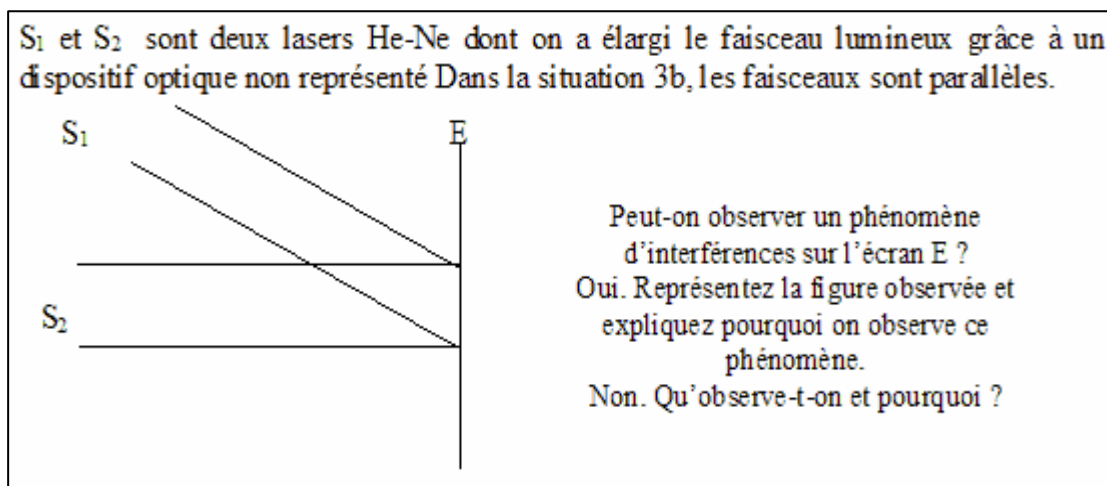


Encadré 48. Les deux sources sont deux lasers à faisceaux divergents

La plupart des étudiants répondent correctement en disant qu'il existe des interférences dans le cas de deux lasers (68 %, $N = 47$) alors que pour deux lampes à sodium, ils ne sont que 36 % à donner une réponse correcte (pas d'interférences). Certaines des 19 justifications fournies sont similaires à celles données pour les lampes à vapeur de sodium : il est fait mention de la cohérence du laser, de la ponctualité des sources, de leur synchronicité (21 %, 16 %, 21 %). Beaucoup d'étudiants (58 %) insistent sur le fait que les deux faisceaux se superposent « zone commune ». Un petit nombre d'étudiants (6 %) répondent qu'il n'y a pas d'interférences car « les sources ne sont pas cohérentes ». Toutefois, un nombre non négligeable d'étudiants (26 %) ne donnent pas de réponse à cette question.

2.5. Avec deux lasers à faisceaux parallèles

La quatrième situation (Q_5D , $N = 47$) présente deux lasers à faisceaux parallèles (Encadré 49).



Encadré 49. Les deux sources sont deux lasers à faisceaux parallèles

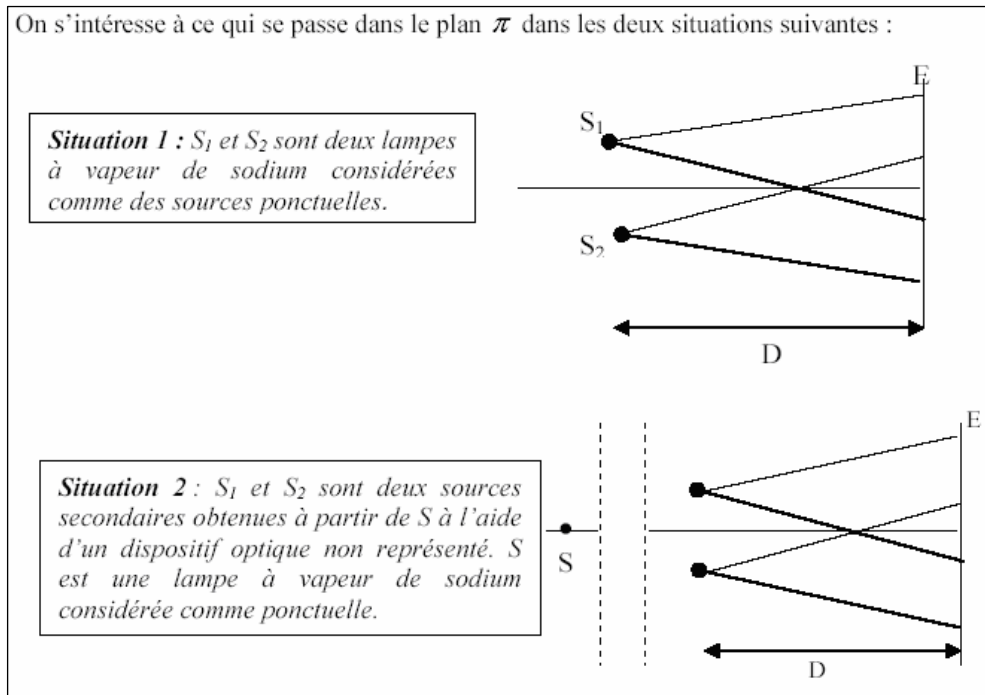
Contrairement à la situation précédente, seulement 23 % ($N = 47$) des étudiants répondent qu'il y a interférences. Deux étudiants le justifient par le fait qu'« *il y a une zone commune* ». Un nombre important d'étudiants (37 %, $N = 47$) répondent qu'il n'y a pas d'interférences car « *les rayons sont parallèles et ne se superposent pas* ». De plus, 40 % d'entre eux ne répondent pas à cette question.

Cette situation montre que les étudiants ont des difficultés à interpréter le schéma et à repérer l'existence d'une zone commune aux deux faisceaux parallèles ou le fait qu'un point de l'écran peut être l'intersection de deux rayons provenant des deux sources S_1 et S_2 . On peut alors s'interroger sur la difficulté des étudiants à **envisager l'existence d'interférences par superposition d'ondes planes ou quand les sources ne sont pas apparentes**.

2.6. Deux source secondaires

Un autre questionnaire⁵⁷ (Q_8D , $N = 58$) aborde la question de savoir pourquoi l'observation de franges d'interférences n'est pas possible dans le cas des lampes à vapeur de sodium (Situation 1, Encadré 50) alors que c'est possible dans le cas d'un dispositif interférentiel en présence d'une lampe de vapeur à sodium (Situation 2, Encadré 50). La première situation est semblable à celle donnée dans le questionnaire précédent (Q_5D).

⁵⁷ 5 étudiants de DEUG, 37 étudiants de classes préparatoires, 16 étudiants de Maîtrise.



Encadré 50. Situations avec les lampes à vapeur de sodium

Pour la première situation, 16 % (N = 58) des étudiants ne répondent pas. La majorité des réponses fournies par les autres étudiants font référence à l'incohérence des sources (47 %, N = 58). Cette incohérence est due au fait que « *les trains d'ondes sont aléatoires* » (12 %). D'autres étudiants font référence à ce qu'« *il n'existe pas de source primaire* » (12 %).

Pour la deuxième situation, 19 % (N = 58) des étudiants ne répondent pas. Par ailleurs, nous avons remarqué que, sur les 42 réponses données, les conditions nécessaires pour obtenir les interférences sont énoncées mais jamais **au complet par un étudiant**. Il y a aussi des erreurs. En particulier, nous pouvons noter que le concept de cohérence apparaît dans leurs justifications puisque 52 % (N = 58) des étudiants y ont recours. Parmi eux, 24 % explicitent la présence d'« *une cohérence temporelle* » et une minorité (7 %) utilisent le modèle des trains d'ondes « *les ondes qui interfèrent proviennent du même train d'onde et la différence de marche est inférieure à la longueur du train qui est égale à la largeur de cohérence* ». Ce qui est souligné n'est pas correct car il y a une confusion entre 'la largeur de cohérence' et 'la longueur de cohérence'. Quelques étudiants (4%) s'intéressent à la forme des faisceaux lumineux pour expliquer l'existence des franges en disant que « *le dispositif dédouble la zone d'interférence où il y a superposition* » ou « *il y a diffraction* ».

2.7. Premier bilan

Nous donnons, dans le tableau 14, un récapitulatif des résultats portant sur les questions posées sur les conditions d'obtention des interférences lumineuses. Nous indiquons en gras la réponse correcte.

Tableau 14. Résultats récapitulatifs des réponses des étudiants sur les conditions d'obtention des interférences lumineuses

| Situation | Pas d'interférences | Interférences | Non-réponse |
|---|---------------------|---------------|-------------|
| Trous d'Young avec une source (N = 57) | 100 % | 0 % | 0 % |
| Deux lampes à vapeur de sodium identiques (N = 47) | 36 % | 57 % | 7 % |
| Deux lampes à vapeur de sodium différentes (N = 47) | 68 % | 23 % | 9 % |
| Deux lasers à faisceaux divergents (N = 47) | 6 % | 68 % | 26 % |
| Deux lasers à faisceaux parallèles (N = 47) | 37 % | 23 % | 40 % |

Le test de chi 2 réalisé sur le tri à plat des questions portant sur les lampes à vapeur de sodium permet de dire que la question sur les lampes identiques est plus difficile que celle sur les lampes différentes au risque de 15%.

Le test de chi 2 réalisé sur le tri à plat des questions portant sur les lasers permet de dire que la question sur les faisceaux parallèles est plus difficile que la question sur les faisceaux divergents au risque de 5%.

Les résultats obtenus montrent que les étudiants savent qu'il faut deux sources pour obtenir des interférences contrairement aux étudiants interrogés par Ambrose et al (1999). Cependant ils rencontrent des difficultés sur les conditions d'obtention des interférences lumineuses, à savoir pour eux :

- Les sources ne sont pas nécessairement des sources secondaires : des sources indépendantes identiques ou non peuvent donner lieu à des interférences.

- Les interférences existent à condition que les faisceaux soient non parallèles. On peut se demander si la présence de deux sources ponctuelles « visibles » n'est pas une condition nécessaire pour avoir des interférences. On peut alors supposer que les étudiants auront davantage de problèmes avec les dispositifs interférentiels éclairés par une onde plane.

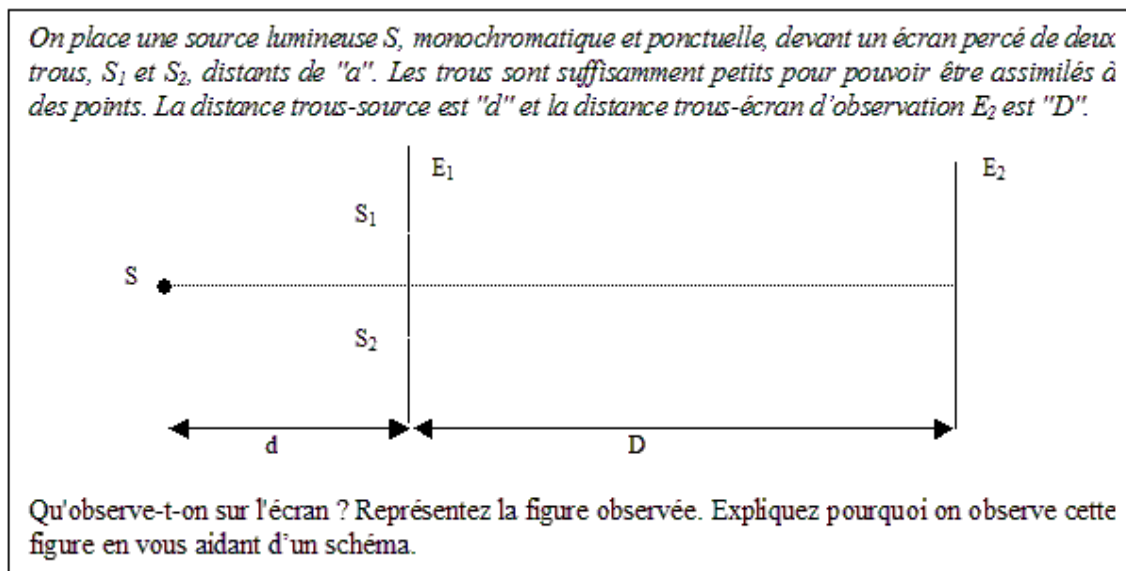
- La moitié des étudiants seulement font appel à la notion de cohérence. Ce terme reste imprécis pour la moitié d'entre eux, les autres spécifiant à juste titre que c'est la cohérence temporelle qui est en cause. Une minorité d'étudiants utilisent le modèle du train d'ondes dans leurs justifications.

3. Dispositifs interférentiels, largeur et position de la source primaire : descriptions « spontanées » des interférences lumineuses

3.1. Trous d'Young

3.1.1. Avec une source ponctuelle

Nous avons proposé aux étudiants le dispositif des trous d'Young (Encadré 51) éclairé par une source ponctuelle et nous leur avons demandé ce qu'ils observent sur l'écran (Q_1T , $N = 57$).

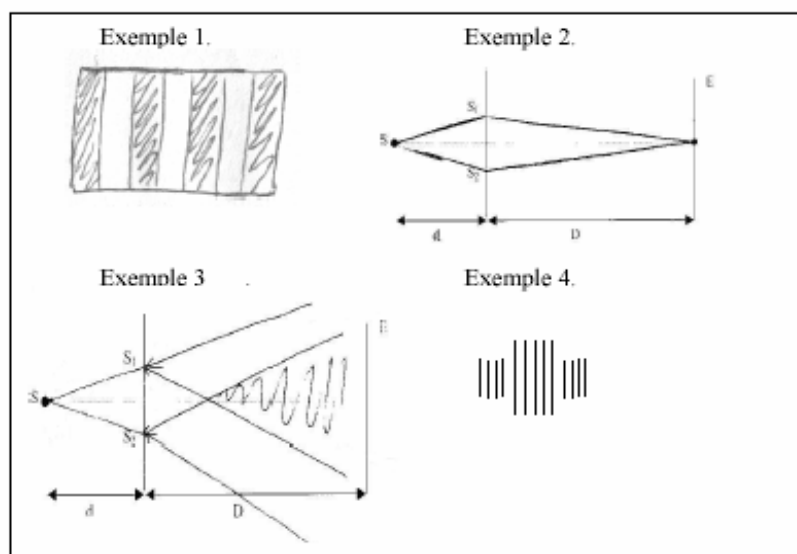


Encadré 51. Situation de référence

Compte tenu de ce que les étudiants ont vu en cours, on peut s'attendre à ce qu'ils disent que l'on observe des franges d'interférences rectilignes sur l'écran car les deux trous-sources sont cohérents temporellement puisqu'ils sont éclairés par une source ponctuelle et que la différence de marche entre les ondes issues des deux trous dépend du point d'observation sur l'écran. On peut aussi s'attendre à ce que les étudiants explicitent cette cohérence temporelle des trous-sources en faisant appel au modèle des trains d'ondes et en disant qu'ils sont éclairés par un même train d'onde incident. Enfin, bien que la formulation de la question ne le supposait pas explicitement, on peut supposer que les étudiants expliquent qu'il existe une zone commune aux faisceaux lumineux issus de chaque trou car ils sont petits et que la diffraction ne peut être négligée.

La quasi totalité des 57 étudiants interrogés (91 %, $N = 57$) disent que des franges d'interférences sont observées sur l'écran. Parmi eux, 63 % ($N = 57$) précisent la forme des franges **verbalement** : elles sont « *rectilignes* » pour 61 % des étudiants ou sous forme d'« *anneaux* » pour 2 % d'entre eux. Les autres étudiants observent « *un point* ».

Pour ce qui est des **dessins** (Encadré 52), la question demandait deux schémas de types différents : un de type descriptif et un de type explicatif. 87 % ($N = 57$) des étudiants donnent un ou plusieurs schémas. Parmi eux, 19 % des étudiants réalisent des schémas correspondant à une description d'alternance de franges sombres et brillantes (exemple 1). 19 % fournissent un schéma de type explicatif montrant l'intersection de deux rayons issus de la source et passant par les trous (exemple 2) ou d'une zone de recouvrement renfermant des franges rectilignes pour 16 % (exemple 3). D'autres étudiants (26 %) donnent deux types de schémas, un descriptif comme l'exemple 1 et un explicatif comme l'exemple 2. Un nombre moindre d'étudiants (7 %, $N = 57$) dessinent des franges semblant être modulées par la courbe donnant l'intensité d'une figure de diffraction en fonction de l'ordre d'interférences (exemple 4).



Encadré 52. Exemples de dessins obtenus pour le dispositif des trous d'Young

En ce qui concerne les justifications de l'existence des franges d'interférences, il est tout d'abord à noter que très peu d'étudiants mentionnent ce que la question supposait à savoir la *cohérence* des trous-sources (7%) et la différence de marche entre les ondes issues des deux trous (14 %). Notons par contre que 26% mentionnent la *diffraction* de la lumière au niveau des trous.

Notons aussi que nous avons trouvé quelques réponses rappelant celles obtenues par Ambrose (1999). Par exemple, un étudiant semble ne pas voir que les interférences résultent de la superposition de deux faisceaux et dit : « *chaque trou produit son propre système d'interférence* ». Un deuxième ne fait référence qu'à l'intensité et parle « *d'addition des intensités* ».

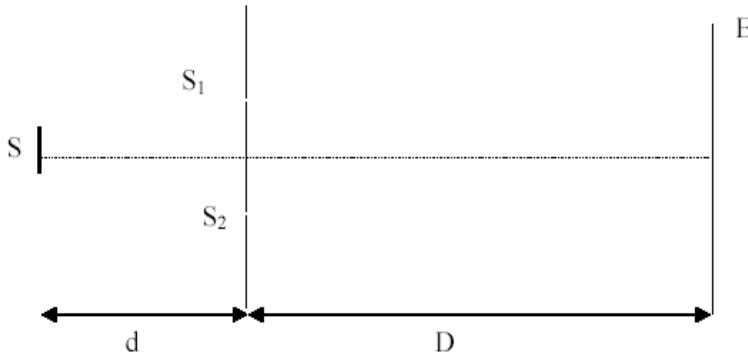
3.1.2. Source étendue

Cette question a été présentée sous deux formes, tout d'abord sous une forme ouverte (Q₁T) pour laquelle les étudiants doivent dire si la figure obtenue avec une source étendue est différente ou non de celle obtenue avec une source ponctuelle, puis sous une forme semi-ouverte (Q₂T) pour laquelle ils doivent dire si « *Les franges sont plus lumineuses quand on utilise une source monochromatique étendue* » et pourquoi.

3.1.2.1. Question ouverte

L'encadré 53 présente la question proposée à 57 étudiants. Avec les trous d'Young, une source large va donner lieu à une juxtaposition de franges décalées, incohérentes entre elles, d'où un affaiblissement du contraste. Cette diminution peut être nulle dans certaines régions de l'espace.

Situation 6 La source S n'est plus ponctuelle mais elle a une largeur s



La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- Oui Pourquoi ?
- Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.

Encadré 53. Les trous d'Young en présence d'une source étendue

La majorité des étudiants (80 %, $N = 57$) répondent qu'il y a un changement de la figure d'interférences dans cette situation par rapport à la situation de référence. 16 % d'entre eux mentionnent que « *le contraste diminue* ». Parmi les justifications données, 22 % des étudiants disent qu'« *il n'y a pas d'interférence* » parce que « *les sources sont incohérentes* ». Mais aucun étudiant ne parle de superposition des figures d'interférences données par chaque source ponctuelle composant la source étendue. 7 % des étudiants disent que c'est « *plus lumineux* ». Un nombre moindre d'étudiants (16 %, $N = 57$) ne répondent pas à cette question.

3.1.2.2. Question semi-ouverte

La question présentée à l'encadré 54 a été proposée à 81 étudiants⁵⁸.

Situation de référence On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E_2 est " D ". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E_2 .

Répondre aux questions suivantes en cochant la case correcte et en justifiant la réponse à chaque fois. Détaillez également les modifications observées éventuellement sur l'écran.

| Dans l'expérience | Vrai | Faux | Pourquoi ? |
|--|------|------|------------|
| Les franges sont plus lumineuses quand on utilise une source monochromatique étendue et non ponctuelle | | | |

Encadré 54. Les trous d'Young en présence d'une source étendue

La réponse correcte est que les franges ne seront pas plus lumineuses avec la présence d'une source étendue (donc il faut cocher la case « *faux* »). Plus de la moitié des étudiants (60%, $N = 81$) répondent correctement. Seuls 5 % d'entre eux précisent que « *le contraste*

⁵⁸ 71 étudiants de Capes, 7 étudiants de classes préparatoires.

diminue ». Par ailleurs, nous constatons de nouveau que les justifications se rapportant à la cohérence sont données par un petit nombre d'étudiants (23%) : « *il n'y a pas de cohérence* ». Signalons là encore qu'il n'est pas précisé de quel type de cohérence il s'agit.

Les étudiants qui disent que les franges sont plus lumineuses (40 %, N = 81), font appel à « *la cohérence des sources* » (6 %). Nous retrouvons le recours explicite à l'addition des intensités pour 2 % des étudiants : « *les sources sont incohérentes et il y a addition des intensités* ».

Ces résultats laissent supposer l'existence de deux associations : source étendue- source incohérente- pas d'interférences et source étendue -plus de sources -plus de lumière et franges plus lumineuses. Notons également que la source étendue est considérée « globalement ».

3.2. Les miroirs de Fresnel

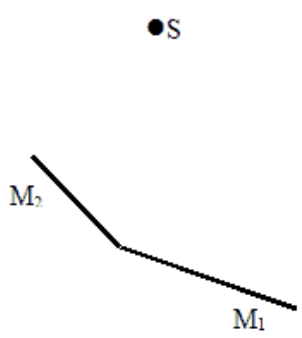
Le questionnaire que nous avons élaboré sur les miroirs de Fresnel présente aux étudiants⁵⁹ deux situations pour lesquelles ils doivent dire s'il existe des interférences et pourquoi (Q₁₁, N = 48). Elles concernent la possibilité d'obtenir des interférences lumineuses avec une source ponctuelle placée à distance finie ou infinie. Les questions demandaient une réponse verbale et la réalisation d'un schéma.

3.2.1. Avec une source ponctuelle

La situation classiquement présentée dans les exercices des miroirs de Fresnel éclairés par une source ponctuelle (Encadré 55) est celle que nous avons donnée aux étudiants (Q₁₁M).

⁵⁹ 12 étudiants de DEUG, 27 étudiants de Maîtrise, 9 étudiants des classes préparatoires.

On éclaire deux miroirs plans M_1 et M_2 qui font entre eux un angle α (de quelques minutes) grâce à une lampe monochromatique ponctuelle S . Dans la situation 1, la source est placée devant les miroirs, dans la situation 2, la source est placée au foyer objet d'une lentille.



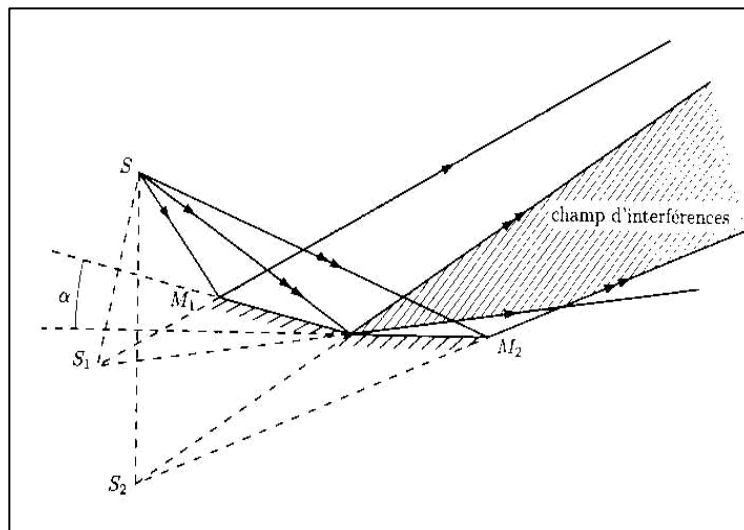
Peut-on observer un phénomène d'interférences dans la situation 1 ?

- Oui. Représentez la figure observée sur un écran E dont vous préciserez la position. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma.
- Non. Qu'observe-t-on et pourquoi ?

Encadré 55. Source ponctuelle devant les miroirs

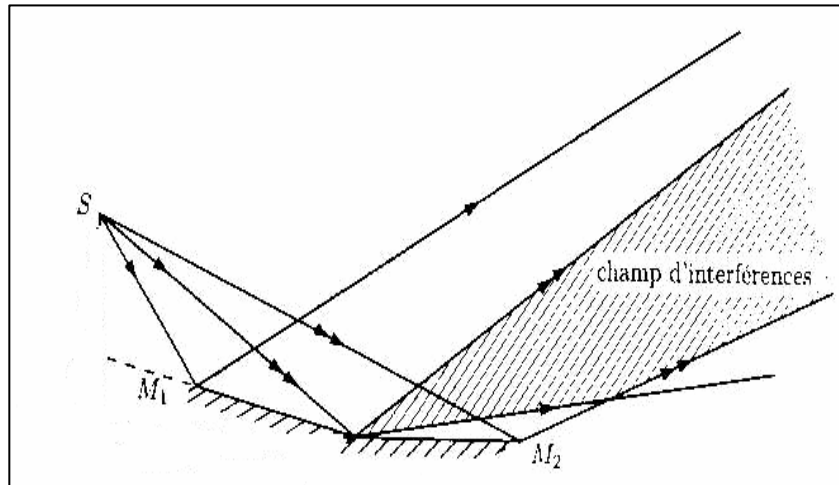
Par réflexion sur les deux miroirs, nous obtenons des franges d'interférences lumineuses dans la zone commune aux faisceaux réfléchis sur les miroirs M_1 et M_2 et provenant respectivement des sources secondaires S_1 et S_2 . Plusieurs types de schémas mettant l'accent sur des points différents peuvent être considérés comme corrects :

- ceux faisant apparaître la superposition de deux faisceaux réfléchis construits à partir des lois de la réflexion de Descartes et issus de *deux sources secondaires* (Encadré 56),



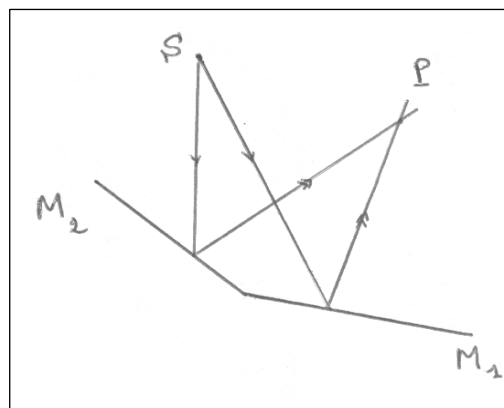
Encadré 56. Interférences lumineuses par les miroirs de Fresnel obtenues par superposition des faisceaux issus des deux sources secondaires (Gouzerh 1996, p. 19)

- ceux faisant apparaître *la superposition* de deux faisceaux réfléchis construits à partir des lois de la réflexion de Descartes (Encadré 56bis),



Encadré 56bis. Interférences lumineuses par les miroirs de Fresnel avec superposition des faisceaux réfléchis

- ceux montrant qu'il existe *en un point donné* du champ d'interférences *deux rayons réfléchis* provenant de chacun des miroirs (Encadré 56ter),



Encadré 56ter. Interférences lumineuses par les miroirs de Fresnel en un point P

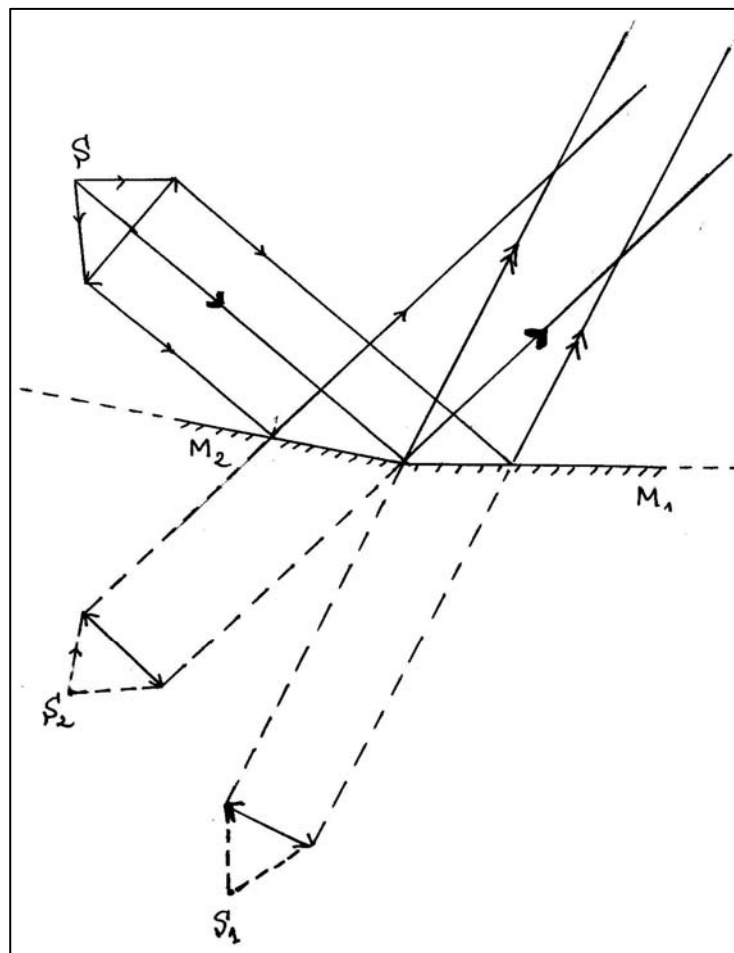
15 % des étudiants (N = 48) ne répondent pas à cette question. La majorité des étudiants (73 %, N = 48) ont pu identifier le phénomène des interférences lumineuses. Seul un étudiant précise qu'« *il y a intersection des rayons réfléchis* » pour obtenir les interférences. Un quart des étudiants indiquent que la figure d'interférences est composée de « *franges rectilignes* ». En ce qui concerne les schémas présentés, 69 % d'entre eux sont considérés comme corrects. 48% sont du premier type (Encadré 50) puisque les sources secondaires sont présentées, la loi de la réflexion est bien réalisée et la région d'interférences existe. 21% sont du deuxième type (Encadré 50bis), les sources secondaires n'existent pas et seule apparaît la superposition de

deux faisceaux réfléchis. Notons qu'aucun étudiant ne fournit de schéma de type 3. 4 % des schémas sont considérés comme incorrects puisqu'il n'y a pas de réflexion sur les miroirs.

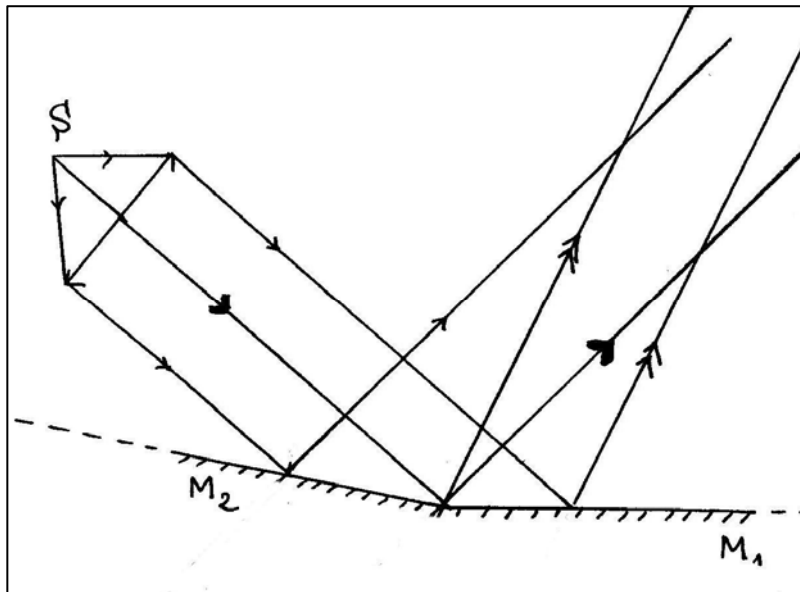
12 % des étudiants qui répondent à la question, ne font pas de schémas.

3.2.2. Avec une source ponctuelle placée devant une lentille

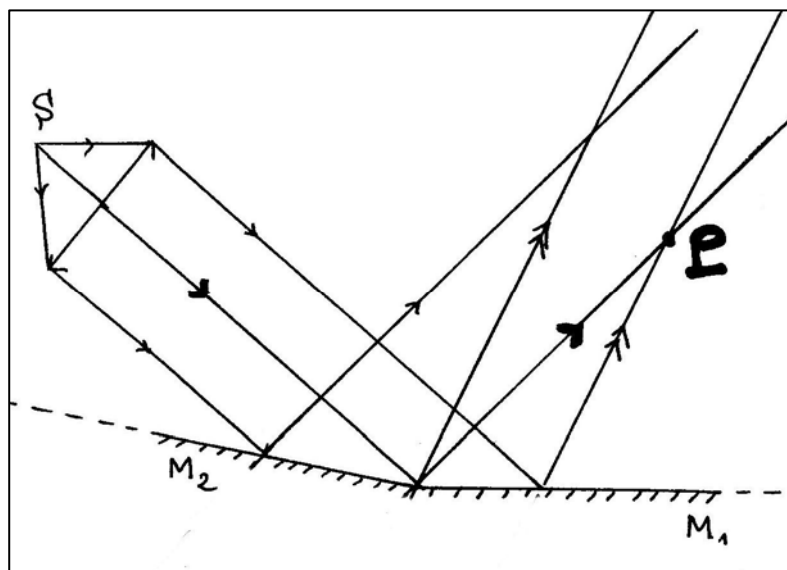
Nous avons changé dans cette situation ($Q_{11}M$) la position de la source ponctuelle puisqu'elle est placée maintenant au foyer objet d'une lentille (Encadré 55). Nous avons dans ce cas des interférences d'ondes planes. Nous obtenons des franges rectilignes, équidistantes dans la zone d'intersection des faisceaux réfléchis. Là encore, il existe plusieurs types de schémas. Le premier présente la superposition des faisceaux réfléchis par les miroirs (Encadré 57), le deuxième présente en plus des faisceaux superposés, les sources secondaires considérées comme sources ponctuelles (Encadré 57bis). Le troisième montre deux rayons réfléchis par chacun des miroirs se coupant en un point quelconque du champ d'interférences (Encadré 57ter).



Encadré 57. Interférences lumineuses par les miroirs en présence d'une source ponctuelle placée devant une lentille obtenues par intersection des faisceaux réfléchis par les deux faces



Encadré 57bis. Interférences lumineuses par les miroirs en présence d'une source ponctuelle placée devant une lentille obtenues par superposition des faisceaux issus des sources secondaires

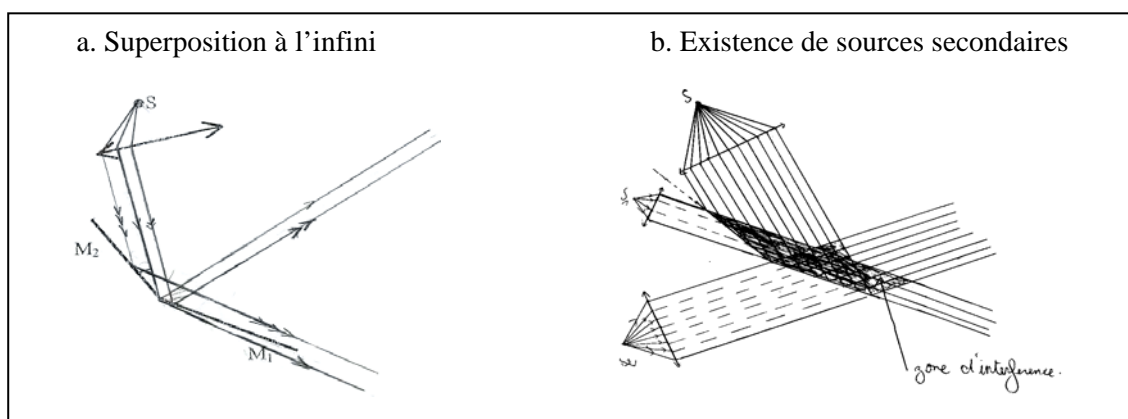


Encadré 57ter. Interférences lumineuses par les miroirs en présence d'une source ponctuelle placée devant une lentille obtenues en un point P

Cette question révèle des difficultés. En effet, 22 % (N = 48) des étudiants ne fournissent pas de réponse. Alors que 73 % des étudiants répondent à la question précédente qu'il y a des interférences, ils ne sont plus que 58 % à le faire ici. Il est à noter qu'ils précisent que le lieu d'observation des franges est « à l'infini ou dans le plan focal image d'une lentille convergente » alors que le champ d'interférences se trouve dans la zone de superposition des faisceaux. Pour 6 % d'entre eux, « le champ d'interférence est plus large » et pour 4 % « les interférences sont localisées ».

20 % des étudiants nient l'existence des interférences pour diverses raisons : soit à cause « des rayons parallèles qui ne vont pas se couper » (6 %), soit à cause de « la source qui est loin » (4%).

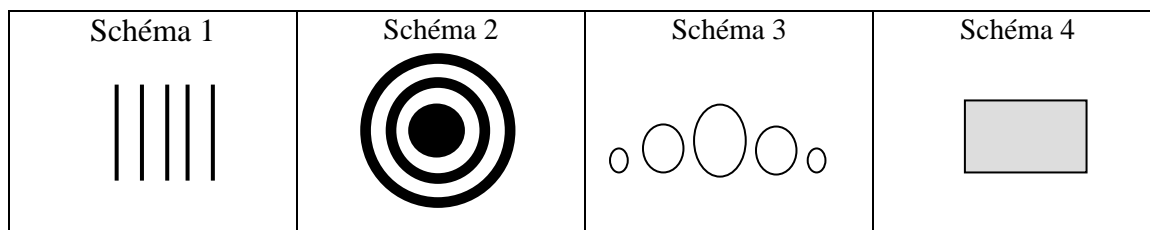
En ce qui concerne les schémas donnés (37 %, N = 48), la majorité des étudiants (25 %) réalisent des schémas où les rayons réfléchis *par un seul miroir* semblent se superposer à l'infini (Encadré 58a). Les interférences ne semblent pas résulter de la superposition de deux ondes. Pour 8 % des étudiants, la réflexion des faisceaux n'existe pas. Seuls 4 % des étudiants font apparaître les sources secondaires et présentent la superposition de faisceaux (Encadré 58b).



Encadré 58. Quelques exemples de schémas réalisés par les étudiants

3.3. Les lames minces

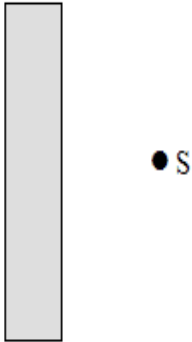
Nous avons élaboré plusieurs questionnaires sur les lames minces à faces parallèles (Q₁₂L, Q₁₃L, Q₁₄L) afin d'explorer des questions analogues à celles que nous venons de voir avec les miroirs de Fresnel : interférences avec une source ponctuelle à distance finie ou infinie. Nous avons également abordé la question des interférences avec une source étendue. Les questionnaires se présentent sous deux formes. L'une présente plusieurs situations expérimentales et demande aux étudiants s'il est possible d'observer des interférences et pourquoi, de préciser la zone de localisation des interférences et la forme des interférences. L'autre demande aux étudiants d'associer à différentes situations la figure d'interférences observée (Encadré 59). Pour la présentation des résultats, nous avons regroupé les justifications des étudiants s'attachant à une même situation expérimentale quelle que soit la forme du questionnaire.

Encadré 59. Exemple de figures données aux étudiants dans le questionnaire Q₁₃L

3.3.1. lame à faces parallèles et source ponctuelle

La première situation des questionnaires Q₁₂L, Q₁₃L, Q₁₄L (Encadré 60) porte sur les interférences produites par une lame mince. Elle a été proposée à 99 étudiants. Nous nous intéressons en premier lieu à leurs réponses "verbales" puis nous analyserons les différents schémas donnés.

On éclaire une lame de mica à faces parallèles grâce à une source lumineuse S monochromatique. Dans la situation 1, la source est ponctuelle et placée devant la lame.



Peut-on observer un phénomène d'interférences dans la situation 1 ?

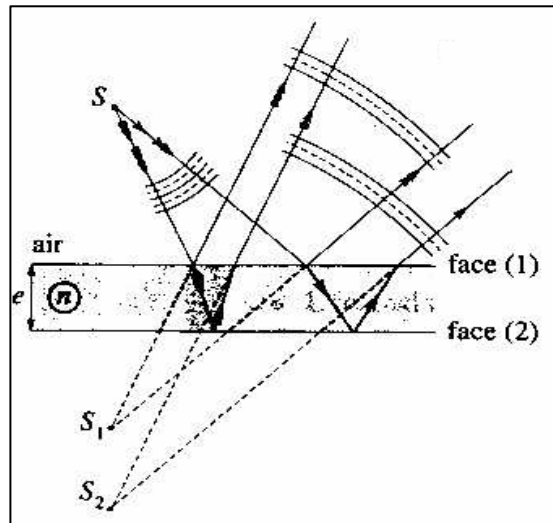
- Oui. Représentez la figure observée sur un écran E dont vous préciserez la position. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma.
- Non. Qu'observe-t-on et pourquoi

Encadré 60. Source ponctuelle devant une lame à faces parallèles

Le point d'observation P n'étant pas précisé, on peut envisager des interférences par réflexion ou transmission.

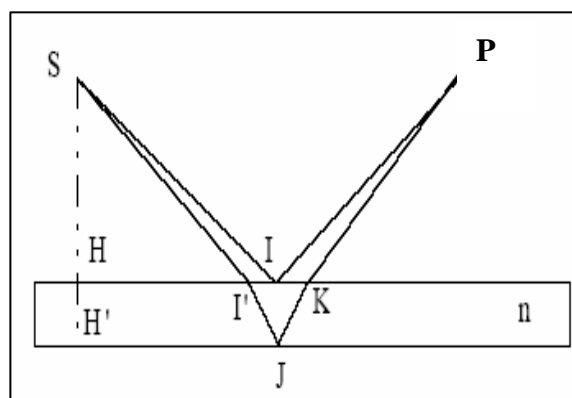
Intéressons-nous au premier cas. Les franges d'interférences résultent de la superposition des faisceaux lumineux produits par la réflexion de la lumière sur chaque face de la lame. Ces faisceaux semblent être issus des images S_1 et S_2 de la source primaire données par chaque face (Encadré 61). Comme dans toutes les situations où les interférences sont produites par deux sources ponctuelles, les franges sont non localisées. Sur un écran

parallèle à la lame, on observe des anneaux centrés sur la droite S_1S_2 , et des franges rectilignes perpendiculaires à la droite S_1S_2 sur un écran perpendiculaire à la lame.



Encadré 61. Interférences données par les lames minces avec deux sources secondaires S_1 et S_2
(Pérez 1991, p. 275)

Pour déterminer l'état d'interférence en un point P situé du même côté de la lame que la source S , il est nécessaire de s'intéresser au trajet suivi par la lumière jusqu'à P . P est à l'intersection de deux rayons réfléchis : l'un SIP réfléchi par la première face de la lame, l'autre $SI'JKP$ réfléchi par la deuxième face (Encadré 61bis). Ces deux rayons présentent une différence de marche et produisent donc en P un état d'interférence donné.



Encadré 61bis. Les interférences au point P (Bouhifd 1998, p. 39)

Un raisonnement analogue peut être fait pour les franges observées par transmission. Les faisceaux mis en jeu semblent dans ce cas provenir des images⁶⁰ obtenues par la réfraction de la lumière sur chaque face de la lame.

⁶⁰ Compte tenu de la dimension de la pupille de l'œil, les conditions de stigmatisme approché sont réalisées.

A la question portant sur l'existence d'interférences, un nombre non négligeable d'étudiants ne donnent pas de réponse (22 %, N = 99) ou nient l'existence des interférences (33 %). Les raisons évoquées sont diverses : « faisceaux parallèles » (5 %), « pas de sources secondaires cohérentes » ou existence d'autres phénomènes comme « la diffraction » (2 %) (alors qu'elle n'est pas à prendre en compte ici) ou « la réflexion » (2 %).

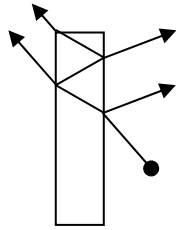
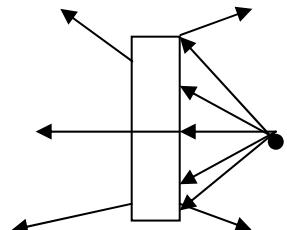
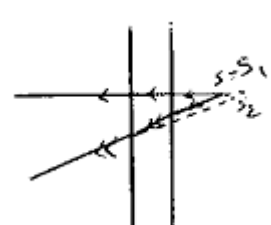
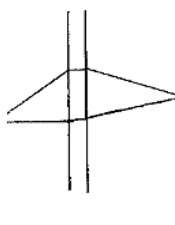
Le nombre d'étudiants qui affirme l'existence d'interférences dans cette situation est moins élevé qu'avec les miroirs de Fresnel, 45 % (N = 99). En ce qui concerne la figure observée, 21 % des étudiants mentionnent que nous obtenons des anneaux et 9 % d'entre eux ajoutent qu'« ils sont localisés à l'infini ». D'autres étudiants (18 %) disent simplement qu'« il y a des franges » et 6 % d'entre eux ajoutent qu'« elles sont à l'infini ».

Les schémas fournis par les étudiants (31 %, N = 99) ont été groupés en deux catégories (Tableau 15).

La première (19 %) comprend des schémas faisant apparaître une réflexion et une réfraction partielle à chaque dioptré. Les rayons réfléchis et transmis proviennent d'un seul rayon incident et obéissent aux lois de Descartes. Les rayons sont parallèles et interfèrent à l'infini. Les interférences semblent bien provenir de la superposition de deux ondes différentes, celle transmise directement par la lame et celle ayant subi deux réflexions à l'intérieur de la lame.

Dans l'autre catégorie (12 %), les réflexion et réfraction partielles ne sont pas prises en compte et plusieurs rayons arrivent sur le premier dioptré. Les interférences semblent se produire entre les rayons d'une même onde issue de la source primaire S.

Tableau 15. Quelques exemples de schémas des étudiants

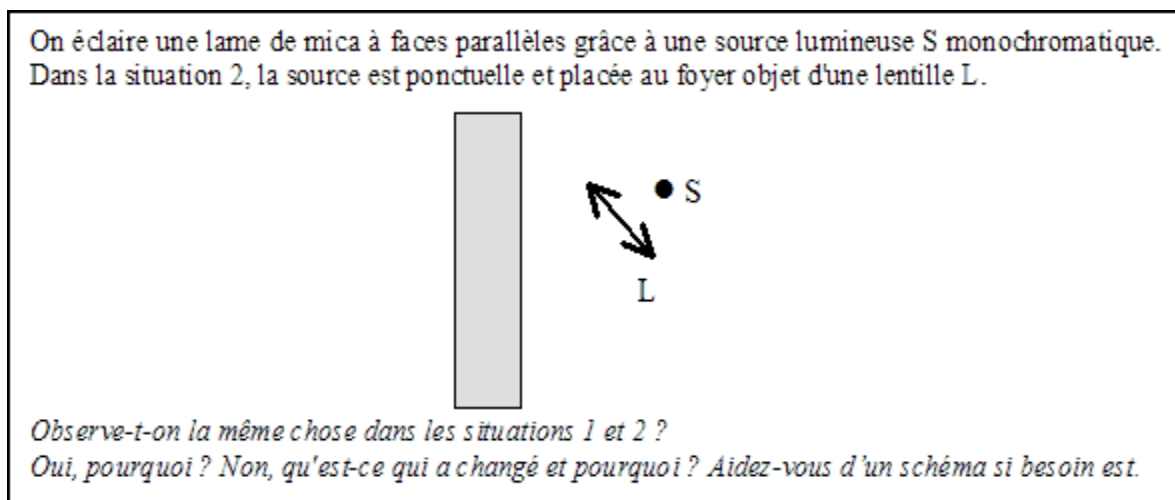
| Catégorie 1 | Catégorie 2 | | |
|---|--|---|--|
|  <p data-bbox="287 1814 351 1848">19 %</p> |  <p data-bbox="622 1848 670 1881">4 %</p> |  <p data-bbox="925 1848 973 1881">2 %</p> |  <p data-bbox="1212 1848 1260 1881">6 %</p> |

Signalons que la majorité des schémas correspondent à l'observation de franges par transmission. De plus, pour certains étudiants, la zone d'interférences correspond à un point

(« interférence en un point ») et ce point correspond à l'intersection de deux rayons. Signalons également que les sources secondaires ne sont quasiment jamais mentionnées et quand elles le sont, leur position n'est pas toujours correcte.

3.3.2. lame à faces parallèles et source ponctuelle au foyer objet d'une lentille

Cette situation, tout aussi peu « classique » que la précédente (Encadré 62) a été proposée dans les questionnaires Q₁₂L et Q₁₃L. Dans l'enseignement, elle est proposée lors de l'étude de l'interféromètre du Michelson (en cours et en TP, en Tunisie, comme en France). Les étudiants (N = 72) devaient comparer ce qui était observé dans cette situation avec ce qui était observé dans la situation précédente (lame à faces parallèles et source ponctuelle).



Encadré 62. Source ponctuelle au foyer objet d'une lentille devant une lame à faces parallèles

Il existe aussi des interférences dans ce cas mais elle ne se manifeste pas par des franges. En effet, comme les rayons incidents sur la lame n'ont qu'une seule direction, la différence de marche entre les rayons réfléchis ou transmis est constante. L'état interférentiel est identique partout et on obtient une teinte uniforme brillante ou sombre selon l'état d'interférence. Nous considérons qu'un raisonnement est correct si l'étudiant mentionne qu'il y a observation d'une teinte.

7 % (N = 72) des étudiants ne répondent pas et 22 % disent qu'il n'y a pas d'interférences car « les rayons ne vont pas se croiser et par suite il n'y a pas d'interférence ».

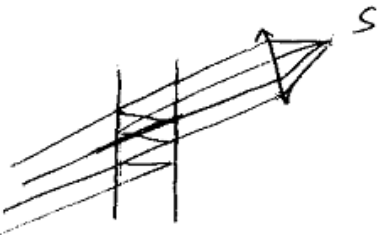
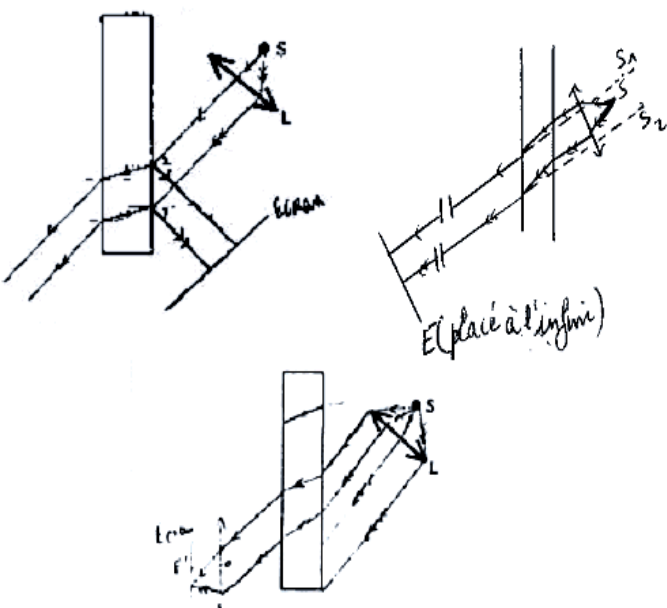
Parmi les étudiants qui ont répondu qu'il existe des interférences (71 %, $N = 72$), 64 % ($N = 72$) réalisent des schémas (Tableau 16). Nous les avons groupés en deux catégories.

La première catégorie réunit les schémas sur lequel les phénomènes de réfraction et de transmission partielles sont représentés (39 %) selon les lois de Descartes. Les interférences semblent bien résulter de la superposition de deux ondes différentes, celle transmise directement par la lame et celle ayant subi deux réflexions.

La deuxième catégorie regroupe les schémas où les réfraction et réflexion partielles ne sont pas prises en compte. Les interférences semblent se produire entre deux rayons de la même onde issue de la source primaire S .

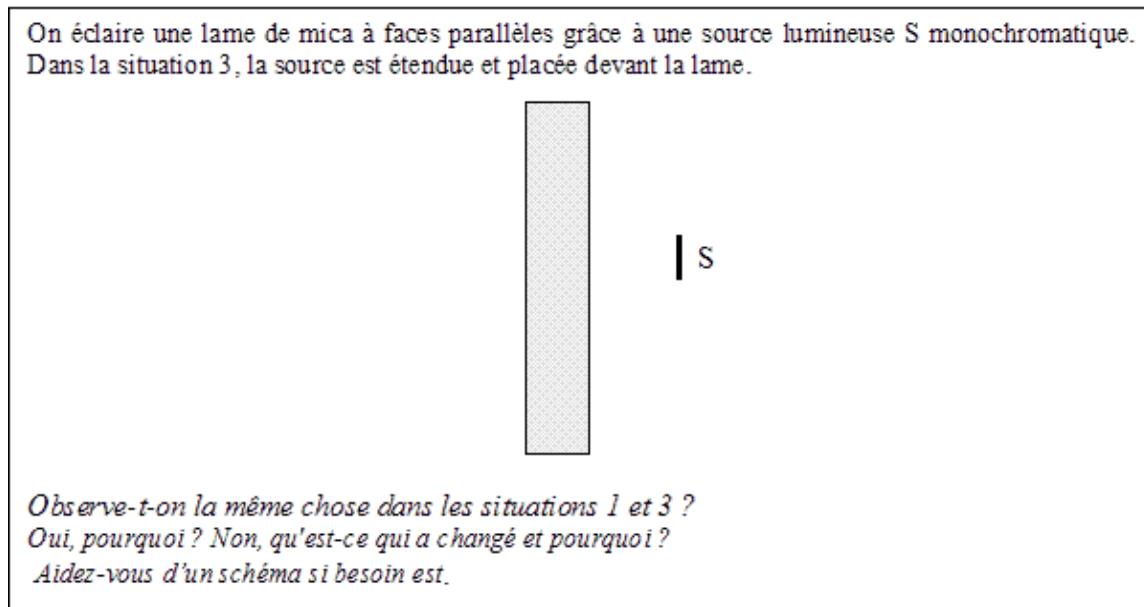
Nous pouvons noter par ailleurs que la majorité des schémas des deux catégories correspondent à l'observation d'interférences par transmission et que certains étudiants précisent la place de l'écran. Pour 14 % il se trouve au foyer image d'une lentille convergente, pour 14 % il se trouve à l'infini. Un seul étudiant introduit les sources secondaires relatives à la source S tout en les plaçant incorrectement. Un seul étudiant, qui a répondu qu'il n'existe pas d'interférences, mais une teinte, fait un schéma de la première catégorie.

Tableau 16. Exemples de schémas des étudiants

| Catégorie 1 | Catégorie 2 |
|---|--|
|  |  |

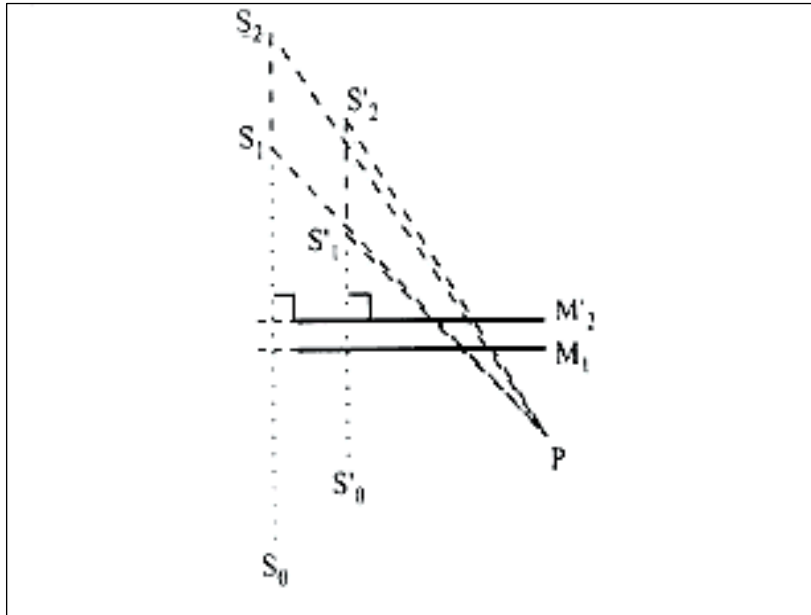
3.3.3. lame à faces parallèles et source étendue

La situation « classique » d'une source étendue placée devant une lame mince à faces parallèles a fait partie des questionnaires Q₁₂L et Q₁₃L. Elle a été proposée à 99 étudiants. (Encadré 63).



Encadré 63. Source étendue devant une lame à faces parallèles

Pour expliquer ce qui se passe dans cette situation, nous devons décomposer la source de lumière en points incohérents et considérer que la figure observée résulte de la superposition des figures d'interférences produites par chaque point de la source. La figure observée sur un plan parallèle à la lame produite par un point de la source est constituée d'anneaux centrés sur la normale à la surface passant par ce point. La figure résultant de la superposition des anneaux produits par chaque point de la source dépend de la dimension de la source. Si la source est très petite, les anneaux associés à chaque point de la source sont très proches les uns des autres car la différence de marche S_1M-S_2M est pratiquement égale à la différence de marche $S'_1M-S'_2M$ (Encadré 64). La figure résultant de leur superposition est constituée d'anneaux. Ceux-ci sont cependant moins contrastés que lorsque la source est ponctuelle. Si nous augmentons les dimensions de la source S , les anneaux associés à chaque point de la source se décalent de plus en plus, la figure résultant de leur superposition se brouille et les anneaux disparaissent ; cependant ils gardent un très bon contraste à grande distance de la lame. Les anneaux d'interférences sont observables à l'infini, en plaçant l'écran à grande distance ou dans le plan focal d'une lentille mince convergente.



Encadré 64. lame éclairée par deux points sources S_0 et S'_0 (Desmeules et al 1997, p.121)

En ce qui concerne les justifications verbales, environ la moitié des étudiants (55 %, $N = 99$) répondent correctement à savoir qu'il y a des interférences.

Plus exactement, 39 % des étudiants disent qu'il y a des **interférences**. Sur l'écran, on observe « *des franges* » (7 %) ou « *des anneaux* » (12 %) qui peuvent être à l'infini pour 8% d'entre eux.

D'autres étudiants (16 %) ajoutent le fait qu'il y a **brouillage**. Plusieurs raisons sont invoquées, par exemple : « *la différence de marche est différente* » (3 %), « *superposition des interférences* » (2%), « *contraste faible, franges floues* » (4 %).

Les étudiants semblent utiliser un principe de superposition des intensités des figures d'interférences, de manière explicite pour 3 % (« *il existe une superposition des interférences* ») et implicite pour les autres « *l'éclairement augmente* » (10 %). Nous retrouvons ici l'association « plus de sources, plus d'intensité ».

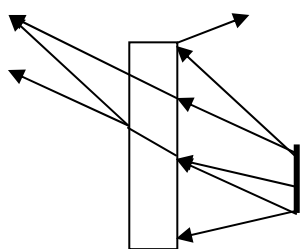
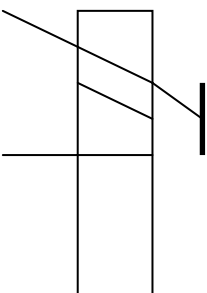
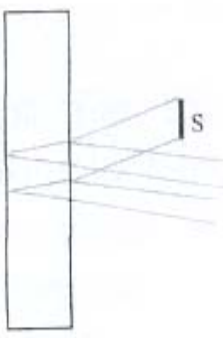
Moins nombreux (26 %) sont les étudiants qui **nie**nt l'existence des interférences parce qu'ils se focalisent sur la source en disant que « *la source n'est pas ponctuelle* » (6 %) ou qu'« *il existe un problème de cohérence spatiale et temporelle* » (4 %) comme si avec une source étendue, nous ne pouvons pas obtenir des interférences. D'autres (9 %) répondent qu'« *il y a diffraction* ».

Plusieurs étudiants (19 %) ne répondent pas à cette question.

Les 27 schémas élaborés par les étudiants sont classés dans les tableaux ci-dessous suivant deux critères de classement différents :

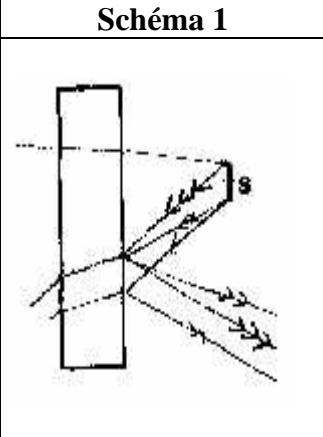
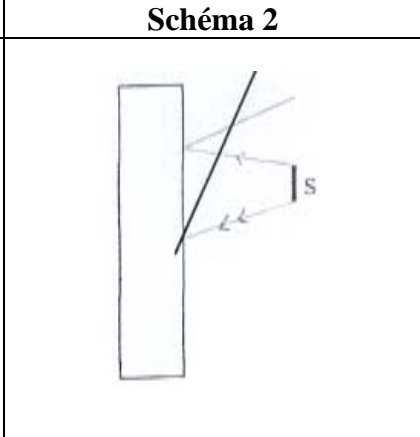
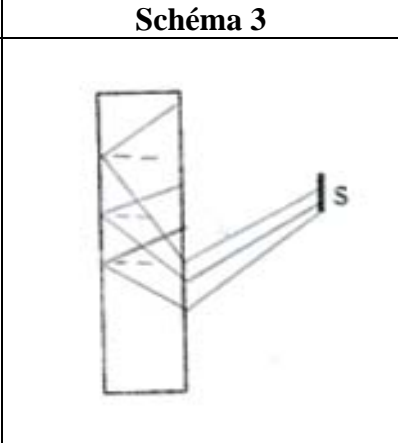
1. La décomposition de la source étendue (Tableau 17) : elle est réalisée par 30 % des étudiants qui donnent un schéma comportant un (19 %) ou plusieurs points (11 %) émettant plusieurs rayons (schéma 1). Dans ce cas, la source étendue est décomposée en plusieurs points sources. Pour 70 % des étudiants, la décomposition de la source étendue pose problème, les étudiants schématisent un seul rayon pour un seul point de la source (15 %, schéma 2) ou un seul rayon pour deux points de la source (55 %, schéma 3) et donnent ainsi des schémas analogues à ceux qu'ils font en optique géométrique pour la formation de l'image d'une source étendue et correspondant à des schémas de type 'projection'. Dans ces deux cas, l'étudiant ne se préoccupe pas de la non-cohérence des points sources. Signalons que donner un schéma de type 1 pour la source ne signifie pas que l'étudiant tient compte de non-cohérence des points-sources. Ainsi, sur le schéma 1, les rayons qui semblent interférer, c'est-à-dire ceux qui se coupent, proviennent de deux points différents de la source.

Tableau 17. Schémas relatifs à la décomposition de la source

| Schéma 1 | Schéma 2 | Schéma 3 |
|---|---|--|
|  |  |  |

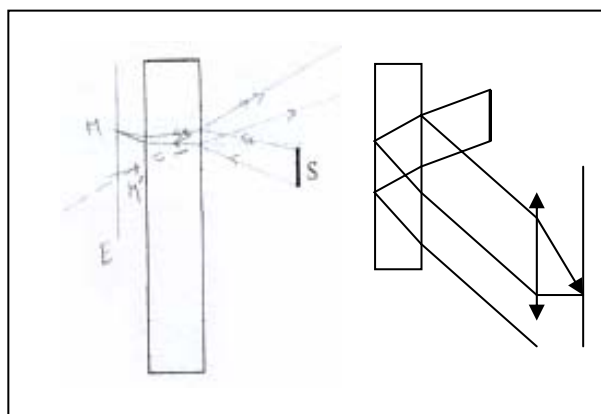
2. L'existence de la réflexion (et transmission) et réfraction partielle (Tableau 18) : pour 52 % des étudiants (schéma 1) elle est représentée, alors que 19 % des étudiants ne tracent que des rayons réfléchis (schéma 2 : pas de transmission à l'intérieur de la lame) et 14 % ne tracent pas les rayons transmis hors de la lame (schéma 3). Il est à noter que les schémas de type 1 ne sont pas nécessairement tous corrects. Ainsi le schéma 1 ne fait apparaître au second dioptre que la transmission si bien que les rayons qui interfèrent proviennent de la même onde incidente.

Tableau 18. Schémas relatifs au critère de l'existence de réflexion et réfraction partielle

| Schéma 1 | Schéma 2 | Schéma 3 |
|---|---|--|
|  |  |  |

Remarquons enfin que les étudiants n'ont pas eu recours aux sources secondaires pour réaliser leurs schémas.

Pour ce qui est de la position de l'écran, elle est donnée par 33 % d'étudiants (Encadré 65). Il est placé du côté des rayons réfléchis et/ou transmis pour 22 % ou au foyer image d'une lentille convergente pour 11 %.

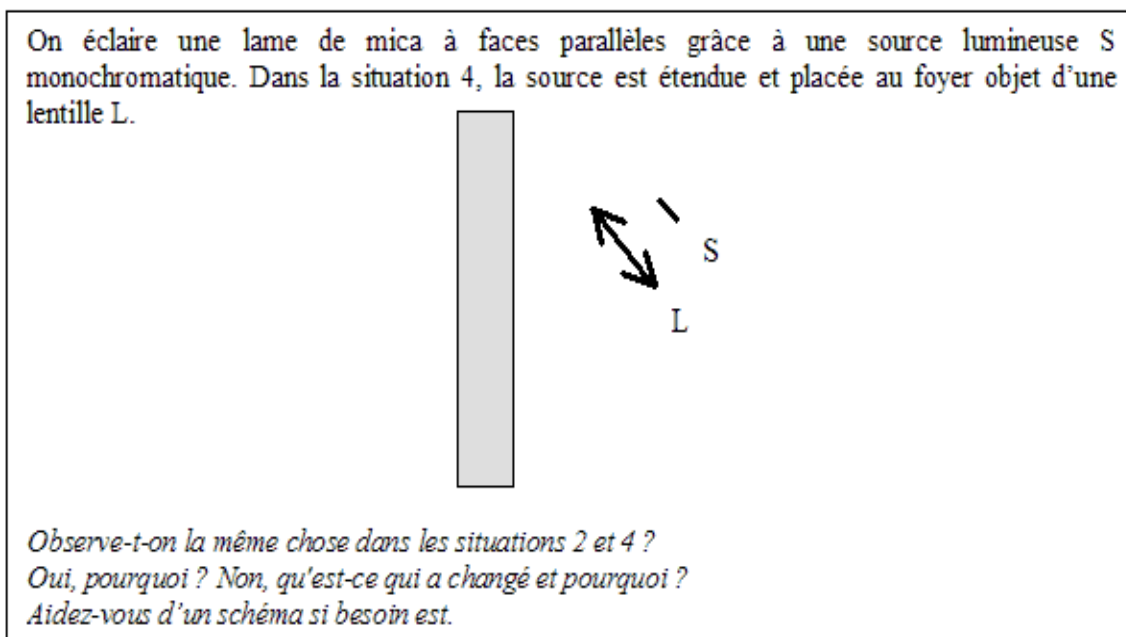


Encadré 65. Position de l'écran

3.3.4. lame à faces parallèles et source étendue à l'infini

Dans cette situation (Encadré 66), nous éclairons une lame à faces parallèles à l'aide d'une source étendue très éloignée ou placée au foyer objet d'une lentille convergente afin que les rayons lumineux arrivent sur la lame parallèlement. Nous avons introduit cette situation dans les questionnaires Q₁₂L et Q₁₃L (N = 44). Notons que cette situation est peu utilisée dans l'enseignement⁶¹.

⁶¹ On la retrouve seulement dans le cours de licence de Paris 7 et réalisée en T.P. pour les classes préparatoires.



Encadré 66. Source étendue à l'infini devant une lame à faces parallèles

Les faisceaux issus de deux points différents de la source abordent la lame sous des angles différents. Un faisceau incident issu d'un point donné de la source produit à la sortie de la lame deux ondes à faisceaux parallèles réfléchis (ou transmis) qui se propagent dans la même direction et qui sont déphasés l'un par rapport à l'autre. Leur superposition donne lieu à un état d'interférence particulier dans une direction donnée à l'infini (voir 3.3.2) ou en un point donné situé dans le plan focal d'une lentille. A la sortie de la lame, il y a un ensemble de faisceaux qui se propagent dans des directions différentes, chaque direction correspondant à un point donné de la source. La figure observée à l'infini ou dans le plan focal d'une lentille résulte de la superposition des figures produites par chaque point de la source et est constituée d'anneaux.

Le pourcentage de non-réponse atteint les 32%.

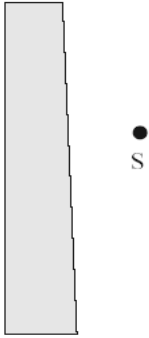
Plus de la moitié des étudiants (54 %) disent qu'il y a des interférences lumineuses. Une minorité d'étudiants (7 %) précisent que ce sont des anneaux. 20% des étudiants parlent de franges et pour 9 % d'entre eux, elles « *sont de moins en moins visibles à cause de la superposition des franges* ».

Moins nombreux sont les étudiants (14 %) qui nient l'obtention des interférences car « *les faisceaux sont parallèles* » (7 %). Nous remarquons qu'il y a 5 % des étudiants qui évoquent la diffraction alors que ce phénomène n'existe pas pour cette situation. Deux étudiants seulement donnent un schéma sans tenir compte des lois de Descartes.

3.3.5. lame en coin et lumière monochromatique

Nous retrouvons cette situation dans le questionnaire Q₁₄L (N = 44). Nous éclairons une lame à faces non parallèles avec une source ponctuelle (Encadré 67).

On éclaire une fine lame de mica grâce à une source de lumière monochromatique S considérée comme ponctuelle.
 Dans la situation 1, les deux faces de la lame de mica sont parallèles et dans la situation 2, elles ne le sont pas.



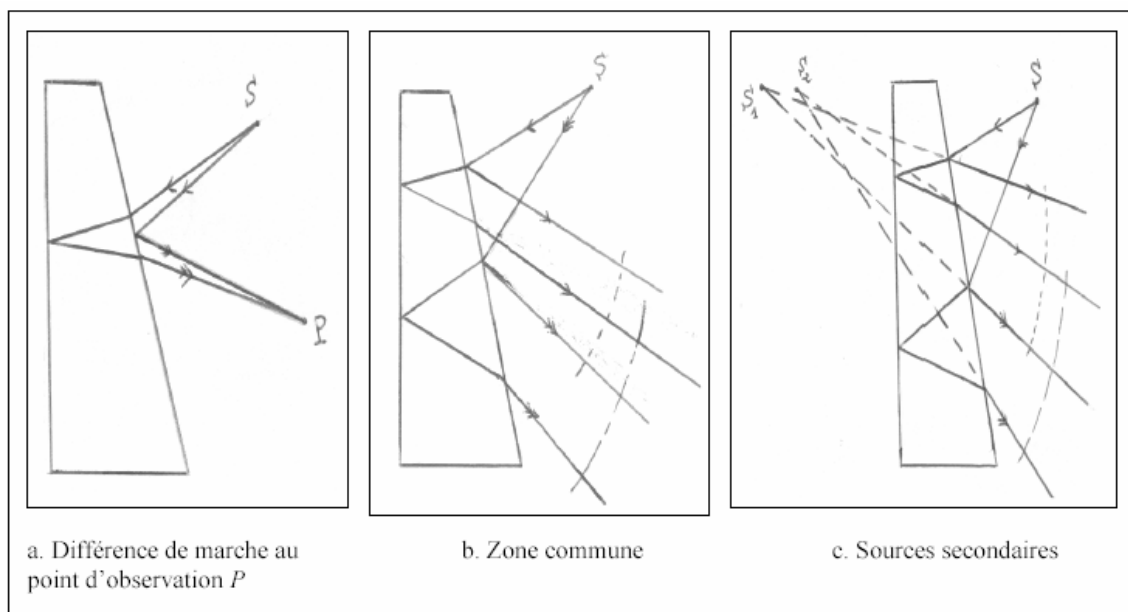
The diagram shows a vertical rectangular plate with a slightly wavy right edge, representing a mica plate with non-parallel faces. To the right of the plate is a small black dot labeled 'S', representing a point source of light.

Observe-t-on la même chose dans les situations 1 et 2 ?

- *Oui, pourquoi ?*
- *Non, qu'est ce qui a changé et pourquoi ?*

Encadré 67. Source ponctuelle devant une lame à faces non parallèles

Les franges sont **non localisées** puisque la source lumineuse est ponctuelle. Elles ont la forme d'hyperboloïdes dont les foyers sont les sources secondaires. Sur un écran placé parallèlement à la lame, on observe des franges parallèles à l'arête de la lame. Ces franges ne sont pas équidistantes : elles varient selon l'épaisseur de la lame. Il existe trois types de schémas possibles (Encadré 68). Ces derniers sont construits à partir des lois de la réflexion sur les deux faces de la lame et de la réfraction sur le premier dioptre. Le premier met l'accent sur la différence de marche au point d'observation P , le second sur l'existence de deux faisceaux réfléchis ayant une zone commune, le troisième fait de plus apparaître les sources secondaires d'où semblent provenir ces faisceaux.



Encadré 68. Trois types de schémas pour les interférences avec une lame à faces non parallèles

Presque la moitié des étudiants (45 %, N = 99) affirment qu'il existe des interférences lumineuses sous forme de franges. Aucun étudiant ne fournit une réponse correcte à propos de la localisation : pour 16 % des étudiants, les franges sont localisées (« *d'égale épaisseur et localisées* ») alors qu'elles ne le sont pas. Elles sont localisées à l'infini pour 7 % des étudiants et « *se situent au voisinage de la lame* » pour 8 %.

8 % des étudiants nient l'existence des interférences pour des raisons liées à la géométrie de la situation : « *la lame est à faces non parallèles* » (1 %) ou « *les réflexions sont non parallèles* » (2 %). Quelques étudiants invoquent le fait qu'« *il y a une seule source ponctuelle* » (2 %).

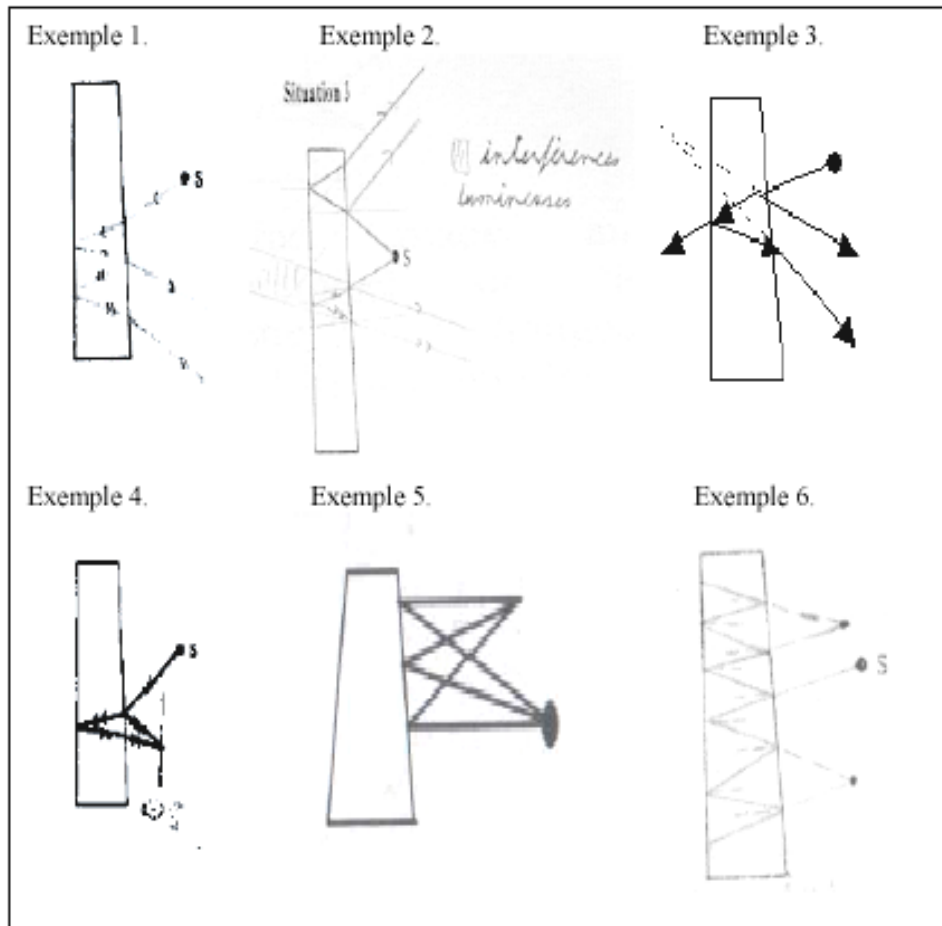
Quelques étudiants (16 %) donnent un schéma sans l'accompagner d'explication. Le pourcentage de non-réponses est de 31% (N = 99).

64 % des étudiants réalisent des schémas. Sur 50 % des schémas, un seul rayon part de la source ponctuelle (Exemple 1 de l'encadré 69). Alors que pour le reste (14 %), deux rayons au moins partent de la source (Exemples 2 et 5). Ils conduisent à des schémas sur lesquels les rayons émergents ne proviennent pas du même incident (Exemple 5), et d'autres où les rayons proviennent du même incident (Exemple 1, 3 et 4). Ces schémas sont similaires à ceux donnés pour la localisation à l'infini que l'on donne pour une source étendue alors qu'elle est ponctuelle.

48% des étudiants tiennent compte de la réflexion et de la réfraction partielle (Exemples 2, 3 et 4 de l'encadré 69) et 16% n'en tiennent pas compte (Exemples 1, 5 et 6).

9% des étudiants représentent les sources secondaires (Exemple 3 de l'encadré 69).

Les rayons à la sortie du dispositif sont parallèles pour 16 % des étudiants (Exemple 1), convergents sans se couper pour 14% (Exemple 2) et divergents (Encadré 3) pour 16 %. 7% des étudiants font se couper deux rayons émergents de la lame en un point, indiquant ainsi que les interférences sont localisées à son voisinage (Exemple 4).



Encadré 69. Exemples de schémas des étudiants

3.4. Deuxième bilan

Pour avoir une idée du degré de difficulté de chaque situation, un tableau récapitulatif des résultats est donné ci-dessous (Tableau 19). Nous indiquons, dans la catégorie « interférences », le pourcentage de schémas qu'on considère comme correct (en bas, à droite du deuxième cadran), c'est-à-dire ceux qui correspondent à une superposition de deux faisceaux et non à une onde incidente modifiée.

Tableau 19. Résultats récapitulatifs des différentes situations

| Situation | Interférences | Pas d'interférences | Non-réponse |
|---|---------------|---------------------|-------------|
| Trous d'Young avec Source primaire ponctuelle (N = 57) | 91 % | 0 % | 9 % |
| Trous d'Young avec Source primaire étendue (N = 57) | 80 % | 4 % | 16 % |
| Miroirs de Fresnel avec Source ponctuelle (N = 48) | 73 % / 48 % | 12 % | 15 % |
| Miroirs de Fresnel avec Source ponctuelle et Lentille (N = 48) | 58 % / 4 % | 20 % | 22 % |
| Lame à faces parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 45 % / 19 % | 33 % | 22 % |
| Lame à faces parallèles avec Source ponctuelle et Lentille (N = 72) | 71 % / 39 % | 22 % | 7 % |
| Lame à faces parallèles avec Source étendue (N = 99) | 55 % / 30 % | 26 % | 19 % |
| Lame à faces parallèles avec Source étendue et Lentille (N = 44) | 54 % / 0 % | 14 % | 32 % |
| Lame à faces non parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 45 % / 14 % | 8 % | 47 % |

Pour vérifier si la question sur les trous d'Young avec une source étendue est plus difficile que la question avec une source ponctuelle, nous utilisons de Test de χ^2 (voir annexe 5). D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ (2.61) est inférieure à celle théorique : $\chi^2 = 2.71$ avec une probabilité d'erreur de 10%. On constate donc que la différence des résultats n'est pas significative.

Pour vérifier si la question sur les miroirs de Fresnel avec une source ponctuelle et une lentille est plus difficile que la question avec une source ponctuelle, nous utilisons de Test de χ^2 (voir annexe 5). D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ (2.27) est inférieure à celle théorique : $\chi^2 = 4.6$ avec une probabilité d'erreur de 10%. On constate donc que la différence des résultats n'est pas significative.

Pour vérifier si la question avec une lame en coin est plus difficile que la question avec une lame à faces parallèles (dans les deux cas les lames sont éclairées par une source ponctuelle), nous utilisons de Test de χ^2 (voir annexe 5). D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ (3.156) est voisine de celle théorique : $\chi^2 = 3.219$ avec une probabilité d'erreur de 20%. On constate donc que la différence des résultats n'est pas significative.

Pour vérifier si la question avec une lame à faces parallèles éclairées par une source étendue est plus difficile que la question avec une lame à faces parallèles éclairée par une source ponctuelle, nous utilisons de Test de χ^2 (voir annexe 5 : valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ 0.392). Celui-ci montre que la différence des résultats n'est pas significative.

Nous retenons que :

- Lors d'une description des interférences lumineuses avec la " *situation classique*" des trous d'Young, toutes les conditions d'existence des franges d'interférences ne sont pas évoquées. En particulier, la cohérence temporelle des sources apparaît rarement, ainsi que le fait qu'il y a un recouvrement des faisceaux diffractés et une variation de la différence de marche entre les deux ondes sur l'écran,
- Dans le cas d'un dispositif éclairé par une source étendue, il semble exister deux associations source étendue-source incohérente-pas d'interférence et source étendue-plus de lumière-franges plus lumineuses,
- Dans le cas des lames minces, l'existence simultanée des phénomènes de réflexion et réfraction partielle à la même interface n'est pas perçue si bien que les interférences ne semblent pas résulter de la superposition de deux ondes mais de la modification d'une seule onde,
- Les interférences par superposition d'ondes planes ne sont pas toujours reconnues que ce soit dans le cas des miroirs de Fresnel ou des lames minces,
- Dans le cas des interférences produites par une source large, les étudiants ont tendance à considérer globalement la source étendue comme ils le font en optique géométrique si bien que ce sont les rayons de deux points incohérents de la source qui interfèrent,
- Pour les lames en général, la quasi-totalité des étudiants interrogés ne font pas appel aux sources secondaires alors que parmi eux il y en a qui sont censés avoir vu cette méthode.

Nous pouvons dire que le dispositif d'Young ne semble pas poser de problèmes pour les étudiants tandis que les Miroirs de Fresnel en posent un peu et les lames encore plus. Le pourcentage de non-réponse est élevé pour la situation où la lame n'est pas à faces parallèles. La situation de la lame à faces parallèles avec une source ponctuelle et une lentille est la seule situation dont le pourcentage de réponse correcte est important. Cela pourrait être dû au fait que les étudiants voient cette situation quand ils manipulent le Michelson.

4. Paramètres dont dépend une figure d'interférences

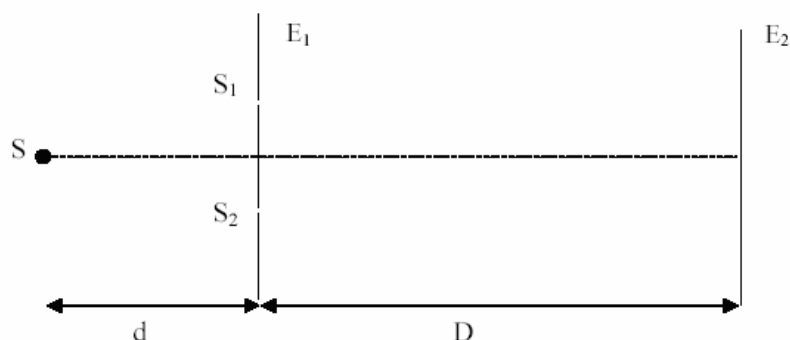
Nous avons voulu examiner si les étudiants savent que l'aspect d'une figure d'interférences dépend de l'écartement des sources secondaires et de la distance les séparant de l'écran d'observation, et de la longueur d'onde de la lumière. Nous avons aussi voulu voir s'ils utilisent le concept de différence de marche ou de déphasage, et s'ils établissent un lien erroné entre les concepts de déphasage et d'intensité de la lumière. Enfin, nous nous sommes demandée si les étudiants comprennent qu'un changement au niveau d'une des sources secondaires affecte l'ensemble de la figure d'interférences et non seulement une partie de cette figure.

Nous avons utilisé deux types de situations. Le premier type présente un schéma du dispositif des trous d'Young (T). Le deuxième type n'indique aucun dispositif interférentiel particulier (D).

4.1. Effet de la variation des distances D et a

Afin de voir si les étudiants interrogés manipulent bien la relation existant entre l'interfrange (i_0), la distance séparant les trous de l'écran (D) et la distance entre les trous (a), nous avons donné une situation classique des trous d'Young (Q₂T, N = 104) suivie d'un tableau comportant plusieurs affirmations, parmi lesquelles « *la distance entre les franges diminue quand on éloigne l'écran* » et « *les franges disparaissent quand on augmente la distance entre les deux trous S_1 et S_2* » (Encadré 70). Les étudiants doivent répondre en cochant une case de type *vrai-faux* et en justifiant leur réponse.

Situation de référence On place une source lumineuse S, monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S₁ et S₂, distants de "a". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est "d" et la distance trous-écran d'observation E₂ est "D". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E₂.



Répondre aux questions suivantes en cochant la case correcte et en justifiant la réponse à chaque fois. Détaillez également les modifications observées éventuellement sur l'écran

| Dans l'expérience | vrai | faux | Pourquoi ? |
|--|------|------|------------|
| a. la distance entre les franges diminue quand on éloigne l'écran | | | |
| c. les franges disparaissent quand on augmente la distance entre les deux trous S ₁ et S ₂ | | | |

Encadré 70. Situation posée aux étudiants avec les questions semi-ouvertes correspondantes

La réponse correcte à la première question est que la distance entre les franges augmente quand on éloigne l'écran car dans la relation reliant l'interfrange à la longueur d'onde

$i_0 = \frac{\lambda D}{a}$, nous pouvons dire que lorsque D augmente alors i_0 augmente.

La plupart des étudiants (79 %, N = 104) répondent correctement (en cochant la case *faux*) à cette question en utilisant et en mentionnant tous correctement la relation entre D et i_0 . Pour les 19 % d'entre eux qui ne sont pas arrivés à répondre correctement (ils cochent la case *vrai*), nous remarquons que, parmi les 12 étudiants qui fournissent une justification, certains **n'utilisent pas correctement la relation qui relie l'interfrange à la distance trous-écran**

« D augmente et i_0 diminue car $i_0 = \frac{\lambda D}{a}$ » ou en donnent une erronée « $i_0 = \frac{\delta a}{D}$ quand D augmente i_0 diminue ».

Passons à la deuxième question. La question telle qu'elle était formulée n'était pas assez précise pour conduire à une seule réponse correcte. En effet, l'augmentation de la distance a n'étant pas davantage spécifiée, deux situations pouvaient être envisagées. Si l'augmentation de a est "importante", les faisceaux diffractés ne se superposent plus sur l'écran et il n'y a plus d'interférences. Par contre, si cette augmentation n'est pas trop grande, les faisceaux se superposent toujours sur l'écran, il existe des interférences et la distance a étant plus grande que dans la situation de référence, l'interfrange est plus petit. Les franges peuvent être observées à l'œil à condition que l'interfrange ne soit pas inférieur à la limite de résolution de l'œil, sinon l'œil percevra un éclaircissement uniforme. Si la distance a diminue, les faisceaux diffractés se superposent toujours, il existe des franges et l'interfrange augmente. Les franges sont observables si l'interfrange est plus petit que la largeur de la zone commune aux deux faisceaux interceptée par l'écran.

Pour ce qui est des réponses à la question "vrai/faux", sur 104 réponses, 44 % des étudiants cochent la case *faux* (ce qui est correct) et 45 % cochent la case *vrai*. 11 % des étudiants ne répondent pas.

Parmi les 30 justifications des étudiants associées à la réponse « franges ne disparaissant pas », 13 % ajoutent que « *comme l'interfrange est inversement proportionnel à cette distance, alors quand a augmente, i_0 diminue et par suite les franges se resserrent jusqu'à disparition* ». Avec le même raisonnement, quelques étudiants (3 % des justifications données) ajoutent que « *la distance entre les franges diminue mais elles ne disparaissent pas* ». Pour 6 % des justifications des étudiants, « *i_0 diminue pour une certaine valeur de a à respecter et à ne pas dépasser* ». 22 % de ces justifications font donc apparaître une utilisation correcte de la relation $i_0 = \frac{\lambda D}{a}$.

Pour les étudiants qui disent que les franges disparaissent, 7 % **utilisent une relation erronée entre l'interfrange et la distance entre les trous** « *i_0 est proportionnel à a* ». 5 % des étudiants ont recours à des **arguments de nature "géométrique"** disant qu'il n'y a pas de zone commune aux faisceaux diffractés : « *pas d'interférence donc pas d'intersection* ». D'autres étudiants (12 %, N = 104) raisonnent à partir de la relation $i_0 = \frac{\lambda D}{a}$: « *a augmente, i_0 diminue donc franges disparaissent* ».

En conclusion, 79 % des étudiants connaissent la relation $i_0 = \frac{\lambda D}{a}$ et l'utilisent correctement pour prévoir la variation de l'interfrange en fonction de D . Mais seulement 34 %

l'utilisent pour prévoir la variation de l'interfrange en fonction de a , sans doute car la question ne portait pas directement sur la variation de l'interfrange.

4.2. Variation de la longueur d'onde de la source primaire

Avec la même situation de référence du questionnaire Q₇D de l'encadré 71, la nouvelle situation donnée est que « *la lumière émise par la source primaire S, à l'origine des sources secondaires S₁ et S₂, est une lumière monochromatique "verte" et non "rouge"* ». La longueur d'onde de la lumière de couleur "verte" est différente de celle de la lumière "rouge", par suite **l'interfrange** et la **position** des franges changent ainsi que leur **couleur** qui devient verte.

Le tableau 20 précise le nombre de fois où la variation d'une grandeur est mentionnée. Notons que le total des pourcentages donnés dans ce tableau dépassent 100 % car une grandeur est mentionnée seule ou avec une autre grandeur par l'étudiant. Si la majorité des étudiants citent la **couleur** (89 %, N = 38), il y en a moins qui précisent le changement de l'interfrange et de position (60 %). Il se pourrait qu'une question formulée en termes de longueur d'onde donne des résultats différents, les étudiants privilégiant alors une variation de l'interfrange au lieu de la couleur. Quelques étudiants fournissent des réponses erronées de nature énergétique (21 % : luminosité et contraste).

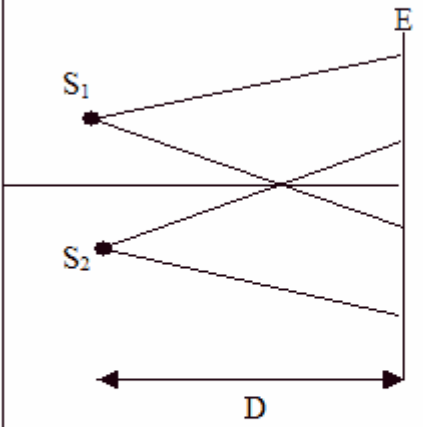
Tableau 20. Les pourcentages pour chaque grandeur

| | | | |
|-------------------|-------------|----------------|-------------|
| Forme | 11 % | Luminosité | 13 % |
| Position | 21 % | Contraste | 8 % |
| Écartement | 39 % | Couleur | 89 % |

4.3. Variation de l'intensité de la source primaire ou des sources secondaires

Nous avons présenté aux étudiants deux situations où nous avons fait varier l'intensité de la source primaire pour la première (Q₇D, N = 38) et l'intensité d'une des sources secondaires pour la deuxième (Q₇D, N = 76). Nous avons proposé un tableau comportant une liste des caractéristiques de la figure d'interférences lumineuses (forme des franges, direction, position, écartement, luminosité, contraste, couleur, autre chose) et demandé à l'étudiant de choisir parmi elles (Encadré 71).

Situation de référence
 S_1 et S_2 sont deux sources secondaires obtenues à partir d'une source primaire ponctuelle monochromatique S , à l'aide d'un dispositif optique non représenté. On suppose que S_1 et S_2 ont la même intensité lumineuse et sont en phase et que la source primaire S émet une lumière "rouge".



E est un écran placé parallèlement à la ligne des sources. On observe sur l'écran E des franges d'interférences, c.-à-d. des lignes alternativement brillantes et sombres, de couleur rouge, distantes de i_0 , perpendiculaires au plan du schéma ci-contre.

Pour chacune des situations suivantes, indiquez si la figure observée sur l'écran est identique ou non à celle de la situation de référence. Si elle est différente, précisez par une croix dans le tableau donné ci-dessous ce qui a changé (direction des franges, écartement, position, luminosité, contraste...). Expliquez pourquoi en dessous du tableau.

Situation 5 La lumière émise par la source primaire S est plus intense.
Situation 2 L'intensité de la source S_1 est deux fois plus grande que l'intensité de la source S_2 au lieu de lui être égale.

Encadré 71. Variation de l'intensité de la source primaire et l'une des sources secondaires

Lorsque l'intensité de la source primaire est modifiée, les franges ont la même forme, mais les franges brillantes sont plus intenses et les franges sombres toujours aussi noires. Le contraste est identique, maximal et égal à 1. Lorsque l'intensité d'une des sources secondaires augmente, les franges sombres ne sont plus aussi noires, les franges brillantes sont plus intenses et le contraste est plus petit. Il est à signaler que bien répondre sur le contraste nécessite de prendre en compte à la fois les franges brillantes et obscures et que le contraste dont nous parlons est un contraste « mathématique » ne prenant pas en compte la perception de l'œil.

Le raisonnement de la plupart des étudiants est basé sur **l'intensité**. En effet, 87 % ($N = 38$) d'entre eux disent que la luminosité sera différente « *l'intensité lumineuse sera plus forte puisque la lumière de départ est plus intense* ». 37 % ajoutent que le contraste change aussi et « *devient plus fort* ». Certains évoquent une relation explicite entre intensité et contraste : « *le contraste varie puisque l'intensité varie* ». On peut alors se demander s'ils ne font pas allusion à un **aspect physiologique**.

Un nombre moindre d'étudiants **donnent des arguments de nature géométrique**. En effet, 11 % (N = 38) d'entre eux répondent que la forme des franges est différente sans expliquer pourquoi : « *franges rectilignes* ». Les autres étudiants (12 %) ne répondent pas à cette question.

En ce qui concerne la deuxième situation sur la variation de l'intensité d'une des sources secondaires, seuls **l'intensité et le contraste des franges changent**.

Un nombre non négligeable d'étudiants (20 %, N = 76) n'a pas répondu à cette question. Leurs réponses peuvent être classées en deux catégories : celles qui sont liées à la variation d'une grandeur énergétique, celles qui sont liées à la variation d'une grandeur spatiale.

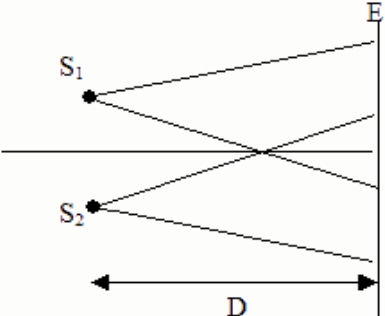
Nous avons compté le nombre de fois où une grandeur est dite subir un changement. Comme la réponse d'un étudiant peut porter sur plus d'une grandeur, le total des pourcentages des réponses données sera différent de 100 %. En ce qui concerne les arguments liés à **l'énergie**, 62 % des étudiants constatent que la luminosité change : « *la luminosité augmente* » ou « *l'intensité augmente* ». D'autres étudiants (42 %, N = 76) considèrent que c'est le contraste qui change. Il diminue pour 2 étudiants et augmente pour 7 autres (cette dernière justification est fautive). Ces derniers étudiants raisonnent implicitement sur l'intensité maximale (I_{\max}). Un nombre moindre d'étudiants (9 %) remarque que ce changement agit sur les franges noires « *franges sombres moins nettes* », ce qui peut être considéré comme correct.

12 % des étudiants (N = 76) envisagent la variation d'une grandeur **géométrique**, c'est-à-dire, de la position des franges : « *car la différence de marche entre les sources S_1 et S_2 va changer* » ou de l'écartement « *écartement des franges différent* ». Nous retrouvons ici dans une faible mesure la relation incorrecte entre la position des franges et l'intensité mise en évidence par Maurines (2001).

4.4. Variation de la phase des sources secondaires

Toujours avec la même situation de référence du questionnaire Q₇D de l'encadré 72, nous avons interrogé les étudiants sur l'effet de la variation de la phase des sources secondaires.

Situation de référence
 S_1 et S_2 sont deux sources secondaires obtenues à partir d'une source primaire ponctuelle monochromatique S , à l'aide d'un dispositif optique non représenté. On suppose que S_1 et S_2 ont la même intensité lumineuse et sont en phase et que la source primaire S émet une lumière "rouge".



E est un écran placé parallèlement à la ligne des sources. On observe sur l'écran E des franges d'interférences, c.-à-d. des lignes alternativement brillantes et sombres, de couleur rouge, distantes de i_0 , perpendiculaires au plan du schéma ci-contre.

1) Pour chacune des situations suivantes, indiquez si la figure observée sur l'écran est identique ou non à celle de la situation de référence. Si elle est différente, précisez par une croix dans le tableau donné ci-dessous ce qui a changé (direction des franges, écartement, position, luminosité, contraste...). Expliquez pourquoi en dessous du tableau

Situation 3 La source S_1 n'est plus en phase avec la source S_2 mais en opposition de phase.

Encadré 72. Variation de la phase des sources secondaires

Plusieurs étudiants (24 %, $N = 76$) ne répondent pas à cette question. Les autres étudiants répondent que la figure d'interférences change et se répartissent en deux catégories. Il n'existe pas d'interférences pour 28 % des étudiants et il existe des interférences pour 48 % d'entre eux. Seulement deux étudiants disent qu'elle ne change pas.

Les 28 % d'étudiants qui disent qu'il n'y a « pas d'interférence » justifient leurs réponses par le fait que « les sources ne sont pas cohérentes » (4 %) ou que « les sources ne sont pas en phase » (5 %). Pour ces derniers étudiants, la différence de phase entre deux ondes semble constante durant la propagation et être une **caractéristique des sources**. Pour les premiers, "cohérence" semble associé à "en phase".

Parmi les 48 % d'étudiants qui répondent qu'il y a des interférences lumineuses, seulement 25 % mentionnent un changement de la position des franges (ce qui est correct) : « la position des franges sombres qui va prendre la place des franges brillantes » (13 %) ou « les franges seront décalées » (12 %). Les autres étudiants précisent des changements erronés concernant soit une autre caractéristique géométrique (forme 14 %, écartement 11 %, direction 4 %), soit une caractéristique énergétique (luminosité 12 %, contraste 13 %). Un nombre moindre font référence à la couleur (5 %).

Si les étudiants savent que la phase d'une onde ne dépend pas de son intensité, ils ont quand même quelques difficultés avec le concept de phase.

4.5. Introduction d'une lame mince

Toujours avec le dispositif des trous d'Young, nous nous sommes intéressée au cas où une lame de verre est placée devant l'un des trous d'Young (Encadré 73). Plusieurs réponses possibles sont exposées aux étudiants qui sont amenés à cocher la réponse qu'ils jugent correcte (Q₃T, N = 65). Celles-ci visent à voir si les étudiants utilisent les concepts de différence de marche ou de déphasage entre deux ondes et en concluent que la figure d'interférence est translatée, ou bien s'ils envisagent d'autres modifications (distance entre franges sombres modifiée, frange moins contrastée, intensité des franges augmente, franges disparaissent, autres).

On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E_2 est " D ". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E_2 .

On recouvre l'un des trous d'Young par une lame de verre d'épaisseur faible " e ". Cochez les cases correspondant aux modifications observées sur l'écran et indiquez éventuellement si d'autres modifications se produisent. Précisez si cette (ces) modification (s) a (ont) lieu sur tout l'écran ou seulement sur une partie. Justifiez vos réponses

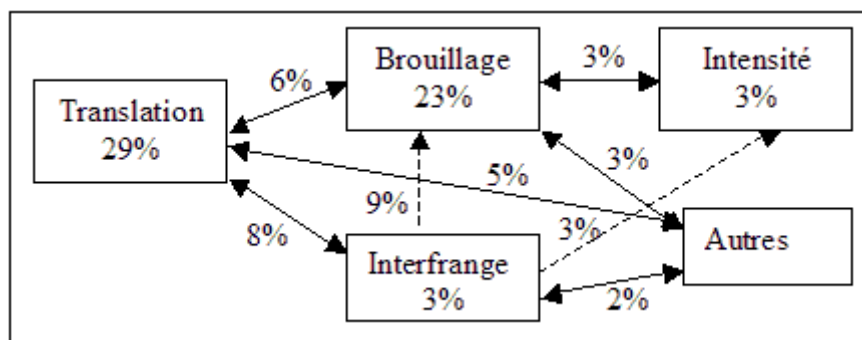
| | |
|---|--------------------------|
| *la figure d'interférence est translatée | <input type="checkbox"/> |
| *la distance entre les franges sombres est modifiée | <input type="checkbox"/> |
| *les franges sont moins contrastées (elles se brouillent) | <input type="checkbox"/> |
| *l'intensité des franges augmente | <input type="checkbox"/> |
| *les franges disparaissent | <input type="checkbox"/> |
| *Autres..... | <input type="checkbox"/> |

Encadré 73. Différentes réponses données aux étudiants pour le cas d'une lame de verre devant un trou d'Young

La lumière étant monochromatique, la réponse correcte est que **la figure d'interférences est translatée**. En effet, l'introduction de la lame de verre sur le trajet de l'un

des faisceaux entraîne un déplacement de la frange centrale d'une certaine valeur $h = \frac{D(n-1)e}{a}$ (avec e l'épaisseur de la lame et n son indice). En effet, il y a une nouvelle différence de marche à cause de la réfraction dans la lame de verre et par suite un retard de phase.

Nous avons présenté les réponses des étudiants (Encadré 74). Dans chaque rectangle, nous indiquons le pourcentage des étudiants qui ont répondu par un seul paramètre ; et sur la flèche, nous montrons le pourcentage des étudiants qui ont donné plus qu'un paramètre. C'est pour cela que le total des pourcentages est différent de 100 %. La flèche en trait continu se rapporte à 'translation' et celle en pointillés à 'l'interfrange'



Encadré 74. Réponses des étudiants en pourcentage

La majorité des étudiants (56 %, N = 65) répondent qu'il y a une **translation** de la figure d'interférences. 12 % précisent qu'« *il y a une différence de marche supplémentaire* », d'autres que « *la position de la frange centrale change* ». Un nombre important d'étudiants (44%) ne la prennent pas en compte. Nous remarquons que le brouillage est cité par 41 % des étudiants (sans justification) dont deux mentionnent la possibilité de disparition des franges. On peut se demander si ici nous ne retrouvons pas le raisonnement « dissipatif » que nous avons mis en évidence dans notre DEA dans une situation de propagation au travers d'une lame mince. On peut aussi noter finalement qu'ils donnent une réponse qui serait vraie si la lumière était quasi-monochromatique mais ce n'est pas le cas.

9 % des étudiants indiquent que l'intensité augmente sans donner de justification.

Beaucoup d'étudiants (25 %) **ajoutent que l'interfrange va changer** à cause du « *changement du milieu et d'indice* ». Tout se passe comme si pour eux, le dispositif était dans un autre milieu.

4.6. Troisième bilan

Nous retenons les points suivants, comme possibles "germes de difficultés" pour une bonne compréhension des interférences lumineuses.

- Lors d'une description des interférences lumineuses "*en situation classique*", il y a une mauvaise maîtrise de la relation qui relie l'interfrange aux paramètres géométriques a et D , soit du point de vue mathématique, soit du point de vue plus conceptuel de la représentation de la situation physique,
- Le terme "contraste" semble être source de difficulté de par sa définition objective qui ne traduit pas la réalité "subjective" (!) d'un observateur,
- Lors d'un changement de la longueur d'onde de la source, les étudiants se concentrent sur une seule variable (la couleur) et réduisent par conséquent le nombre de variables.
- La question de la phase relative des sources semble une condition "initiale" d'obtention d'interférences. Une opposition de phase des sources est manifestement pour certains étudiants une condition "anti-interférences". On peut s'interroger sur la compréhension et la différenciation des termes et concepts de "cohérence" et "en phase",
- Lors d'une introduction d'une lame de verre devant l'un des trous d'Young, les étudiants ont une vision syncrétique et non différenciée du système. En effet, tout se passe comme si tout le dispositif se trouvait dans un autre milieu. De plus, les étudiants pourraient avoir un raisonnement dissipatif pour expliquer la disparition des interférences lumineuses.

PARTIE 5
MODELE DE RAISONNEMENT DES
ETUDIANTS

1. Introduction

Nous pouvons donner sens aux résultats que nous venons de présenter à l'aide d'un modèle de raisonnement, c'est-à-dire d'une description organisée et synthétique des principales tendances de raisonnement observées. Nous verrons dans le chapitre suivant que ce modèle est prédictif.

Nous allons tout d'abord préciser les caractéristiques de ce modèle qui sont propres au thème des interférences lumineuses et qui permettent de répondre à deux questions : pour les étudiants, comment obtient-on des interférences ? pour les étudiants, à quoi correspond le phénomène d'interférence lumineuse ?

Nous allons ensuite présenter les caractéristiques de ce modèle qui se retrouvent de manière transversale dans d'autres domaines des ondes. Il s'agit des difficultés liées au raisonnement à plusieurs variables, de la tendance à privilégier un aspect perceptif des situations présentées, des difficultés de lecture et d'interprétation des schémas.

Ces différentes caractéristiques du raisonnement des étudiants sont interdépendantes.

Pour faciliter la lecture de cette partie, nous indiquerons le numéro du questionnaire dont nous parlons ainsi que les pages où les réponses obtenues sont présentées, sachant que nous avons regroupé tous les questionnaires à l'annexe 2.

2. Comment obtient-on les interférences ?

Pour les étudiants, deux sources ponctuelles suffisent pour obtenir les interférences lumineuses. En effet, il n'est pas nécessaire d'avoir deux sources identiques ou deux sources secondaires puisque avec deux sources de fréquences différentes ou deux sources indépendantes, les étudiants prévoient d'obtenir des interférences (Q₅D, p. 166). De plus, pour les étudiants, il n'y a pas d'interférences en présence d'un seul trou (Q₁T, p. 164), ni avec une source étendue (Q₁T ; Q₂T, pp. 174-176).

Par ailleurs, pour les étudiants, les sources doivent être à distance finie car il n'existe pas d'interférences avec des faisceaux parallèles (Q₅D, p. 168). Autrement dit, les étudiants prévoient l'existence d'interférences quand les sources ponctuelles sont représentées sur le schéma ou quand la zone commune à deux faisceaux est facilement identifiable. Cela explique que le nombre d'étudiants affirmant l'existence d'interférences diminue lorsqu'on

passé des trous d'Young, aux miroirs de Fresnel (Q₁₁M, pp.176-179) et aux lames minces (Q₁₂L ; Q₁₃L, Q₁₄L, pp. 182-192).

3. A quoi correspondent les interférences ?

Nous considérons que le raisonnement « spontané » consiste à suivre l'onde incidente depuis la source jusqu'au dispositif, à créer un objet (des interférences, autrement dit une onde modulée en intensité) au niveau du dispositif et à suivre l'onde modulée depuis le dispositif jusqu'à l'écran. Les interférences ne résultent pas d'une « combinaison » en un point donné de l'espace de deux ondes cohérentes créées au niveau du dispositif interférentiel : le principe de superposition des ondes fondé sur une addition algébrique n'est pas utilisé.

Deux conceptions se manifestent. Dans l'une, l'onde modulée qui se propage depuis le dispositif interférentiel est l'onde incidente modifiée. Dans l'autre, l'onde modulée qui se propage depuis le dispositif interférentiel est la superposition incohérente de deux ondes modulées. Ces deux conceptions relèvent du *raisonnement* « *géométrique* » avancé par Maurines (2001) dans le cas de la diffraction par une fente et la formation des images en éclairage cohérent : il ne s'appuie pas sur le concept de phase et le principe de superposition des amplitudes, mais sur une règle d'addition des intensités.

La première conception se rencontre principalement chez les étudiants qui ont eu à répondre aux questionnaires sur les lames minces (Q₁₂L ; Q₁₃L, Q₁₄L, pp. 182-192). Les étudiants ne prennent pas en compte les phénomènes de réfraction et réflexion partielles et tout se passe comme si la réflexion de la lumière incidente sur la lame (ou la transmission à travers la lame) s'accompagnait de l'apparition de franges.

On peut se demander si le fait que les étudiants ne font pas appel au concept de différence de marche entre deux ondes pour justifier leurs réponses dans les questionnaires sur les trous d'Young ne traduit pas aussi une tendance à suivre l'onde incidente et à la moduler au niveau du dispositif. Leurs réponses seraient ainsi analogues à celles obtenues par Maurines dans le cas de la diffraction par une fente.

Par ailleurs, cette conception permettrait d'interpréter le fait que les étudiants interrogés par Ambrose et al (1999) à propos de la façon dont varie l'état d'interférences en un point donné de l'espace en fonction de la position de ce point, raisonnent sur la direction moyenne « sources-point d'observation ».

La deuxième conception se rencontre chez les étudiants interrogés par Ambrose et al à propos de l'effet de la suppression d'une fente dans le dispositif d'Young. Rappelons qu'un grand nombre d'étudiants répondent qu'il existe toujours des interférences, qu'une moitié d'entre eux envisagent une figure aussi étendue mais moins lumineuse (tout se passe comme si chaque fente créait une figure de même largeur mais moins lumineuse) et l'autre moitié envisagent une figure aussi lumineuse mais tronquée d'un côté (tout se passe comme si chaque fente créait une moitié de la figure d'interférences).

A la même question portant sur les trous d'Young, nous avons trouvé des résultats différents de ceux trouvés par Ambrose : les étudiants que nous avons interrogés savent qu'il faut deux sources pour avoir des interférences. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées sur l'origine de cette différence. Elle pourrait provenir du fait que nous n'avons interrogé les étudiants que sur cette situation des trous d'Young alors qu'Ambrose et al ont auparavant questionné les étudiants sur la diffraction par une fente. Elle pourrait aussi provenir de l'enseignement reçu. En effet, un regard sur les manuels montre que le dispositif d'Young peut être étudié dans le chapitre sur les interférences ou dans celui sur la diffraction. Cela correspond à deux façons différentes de nommer ce qui se passe avec ce dispositif et deux regards différents. Nous pouvons rencontrer les interférences par les fentes d'Young (l'accent est mis sur la nécessité d'avoir deux faisceaux) mais aussi la diffraction par les fentes d'Young (l'accent est mis sur la modification de l'onde incidente). Cela peut sans doute induire des visions différentes du phénomène d'interférences par le dispositif d'Young.

Cependant, notons que si les étudiants que nous avons interrogés savent qu'il faut deux trous pour avoir des interférences, ils ne précisent rien sur la cohérence des sources secondaires.

Le raisonnement consistant à créer une figure d'interférences au niveau du dispositif et à la suivre ne se manifeste pas chez les étudiants que nous avons interrogés dans la situation classique des trous d'Young. Cependant, dans des situations moins classiques, ce raisonnement réapparaît. Il en est ainsi dans les thèmes portant sur les caractéristiques des figures d'interférences et sur les dispositifs interférentiels.

Lorsque les deux sources sont en opposition de phase (Q_{7D}, p. 202), les étudiants considèrent qu'il n'y a pas d'interférences. Leur raisonnement pourrait consister à penser que comme au niveau des sources, l'état d'interférence est destructif, il n'est pas possible d'avoir un état d'interférence constructif par la suite car comment avoir quelque chose à partir de rien.

Il pourrait aussi consister à penser que si deux sources sont en opposition de phase, les ondes émises sont en opposition de phase partout. Il est à noter que dans les deux cas, les ondes ne sont effectivement comparées qu'une fois, au niveau des sources.

Lorsqu'on place une lame devant un trou (Q₃T, p. 204), les étudiants pensent que l'interfrange varie. Ils ne semblent pas considérer que l'interfrange est la distance entre deux franges brillantes dont la position est déterminée par la différence de marche entre deux ondes mais utiliser la relation donnant l'interfrange de manière globale et en se centrant sur ce qui se passe au niveau des sources.

Avec des dispositifs interférentiels autres que les trous d'Young, nous obtenons moins d'interférences avec les miroirs de Fresnel et encore moins pour les lames.

Les conceptions que nous venons de décrire s'observent dans le cas d'un dispositif éclairé par une source ponctuelle. Elles se manifestent aussi dans le cas d'un dispositif éclairé par une source étendue. Les étudiants dans ce cas ne décomposent pas toujours la source étendue en points-sources et tracent des schémas de type projection analogues à ceux qu'ils utilisent en optique géométrique. Les interférences semblent alors résulter de la superposition de deux ondes incohérentes comme sur les réponses fournies aux questionnaires sur les lames minces.

Les tendances de raisonnement que nous venons de présenter se rapprochent par certains côtés de ceux utilisés par les scientifiques autrefois et s'en éloignent par d'autres. Ainsi, si la tendance à considérer les interférences comme l'onde incidente modulée en intensité par le dispositif se rencontre chez Newton dans le cas des lames minces, celle à associer l'existence d'interférences à la présence de sources ponctuelles ne se rencontre pas chez Young.

4. Tendances transversales de raisonnement

Toutes ces conceptions sont activées au travers de tendances de raisonnement qui se manifestent de manière transversale à différents domaines de la physique.

4.1. Difficultés liées au raisonnement à plusieurs variables

Interpréter un phénomène physique nécessite de dégager les grandeurs pertinentes à l'étude du phénomène et d'établir des relations entre ces grandeurs. Les étudiants rencontrent

des difficultés de deux ordres. Les premières sont liées à la différentiation des grandeurs physiques, les deuxièmes à l'existence de relations mettant en jeu plus de deux grandeurs physiques. Selon la question posée, un type de difficulté ou l'autre se manifesterà.

4.1.1. Vision synchrétique et indifférenciée

Les réponses aux questions portant sur l'explication du phénomène d'interférences montrent que les étudiants ont une vision synchrétique du phénomène d'interférences lumineuses. Celui-ci n'est pas analysé comme résultant de la superposition de deux ondes. L'état d'interférences en un point donné de l'espace dépend de la direction moyenne « sources-point d'observation » et non pas de la différence de marche entre les ondes issues de ces sources et le point d'observation. Les rayons parallèles issus d'une lame mince ne sont pas différenciés : ils semblent appartenir à la même onde plane.

Par ailleurs, dans le cas d'interférences produites par une source étendue, la source est considérée globalement et non pas comme un ensemble de points-sources.

4.1.2. Centration sur un concept ou un aspect de la situation

Sur les réponses aux questions portant sur les caractéristiques d'une figure d'interférences, on constate que les étudiants ont des difficultés à dire ce qui se passe quand un paramètre varie (par exemple Q_2T , pp. 199-204) la distance trous-écran, la distance entre les trous, la longueur d'onde, l'intensité). Le raisonnement dans ce cas est de type « une cause/ un effet ».

Dans le cas des dispositifs éclairés par une source étendue, les étudiants peuvent se focaliser sur la source et dire qu'il n'y a pas d'interférences ou bien sur le dispositif et dire qu'il y a interférences.

4.2. Aspects perceptifs privilégiés

Les questionnaires sur les conditions d'obtention des interférences permettent de dire que les étudiants raisonnent sur une grandeur spatiale et non temporelle. Ils établissent ainsi une association entre cohérence et source ponctuelle qui traduit aussi une non différenciation des concepts de cohérence temporelle et spatiale.

Un autre aspect perceptif se rencontre dans les questions faisant intervenir l'intensité des sources primaire ou secondaire. Celui-ci concerne le contraste. Quand les étudiants parlent de contraste, certains répondent sur une grandeur perceptive (contraste physiologique) et non mathématique (tel qu'il est défini traditionnellement).

4.3. Lecture des schémas

Aux difficultés précédentes, se rajoutent des difficultés liées à la lecture et l'interprétation des schémas, notamment ceux avec des rayons parallèles.

Ainsi deux faisceaux lasers parallèles ne peuvent pas produire des interférences car la zone commune aux deux faisceaux n'est pas facilement identifiable.

Cette difficulté est encore plus grande dans le cas des lames minces. Les étudiants ne voient pas qu'en fait les rayons tracés à la sortie de la lame correspondent à plusieurs ondes différentes et qu'il y aura un déphasage entre ces ondes à cause du trajet supplémentaire dans la lame. Ils semblent raisonner à partir de la face de sortie de la lame et pas à partir d'un front d'onde de l'onde incidente, perpendiculaire aux rayons incidents. Cette difficulté à percevoir l'existence de plusieurs ondes pourrait être renforcée par le fait que les schémas des manuels ne font pas toujours apparaître les différents faisceaux transmis et réfléchis.

PARTIE 6
MISE A L'EPREUVE DU MODELE DE
RAISONNEMENT

1. Introduction

Nous allons montrer dans ce qui suit que le modèle de raisonnement proposé permet de prévoir les réponses des étudiants à d'autres questions.

Tout d'abord, nous avons vu que, pour les étudiants, il est suffisant d'avoir deux sources (secondaires ou non, identiques ou non) pour obtenir des interférences lumineuses et qu'en présence d'une source large, ou bien les franges deviennent plus lumineuses, ou bien il n'y a pas d'interférences lumineuses. La question qui se pose dans ces conditions est celle de savoir comment les étudiants raisonnent dans des situations où ils doivent déterminer la cohérence des sources pour prévoir l'existence ou non d'interférences. Pour répondre à cette question, quatre situations ont été choisies :

- Une présente des sources secondaires cohérentes temporellement et spatialement bien qu'étendues. La tendance des étudiants à considérer que les interférences n'existent pas en présence d'une source étendue et à ne retenir qu'un aspect de la situation ne les conduira t-elle pas à nier l'existence des interférences ou bien à dire que les interférences sont plus lumineuses ?
- Une autre présente deux sources secondaires ponctuelles incohérentes temporellement car émettant chacune une lumière de longueur d'onde donnée ; la tendance à considérer qu'il suffit d'avoir deux sources ponctuelles pour avoir des interférences ne les conduira t-elle pas à prévoir l'existence d'interférences ?
- Une autre encore présente des sources secondaires ponctuelles éclairées par deux sources primaires ponctuelles monochromatiques. La tendance à considérer qu'il n'existe pas d'interférences en présence d'une source étendue ou bien que les interférences sont plus lumineuses se manifestent elles dans ce cas ?
- Une autre enfin présente des sources secondaires ponctuelles éclairées par une source émettant deux radiations monochromatiques. Retrouve t-on un raisonnement analogue à celui mis en évidence dans le cas de la cohérence spatiale consistant à associer l'existence d'interférences au cas de la cohérence totale et donc à dire ici qu'il n'y a pas d'interférences car la lumière n'est pas monochromatique ?

Ensuite, nous avons vu que les étudiants ont tendance à ne pas expliquer la formation de la figure en termes de superposition de deux ondes cohérentes et ne font pas de lien entre les caractéristiques de la figure et le dispositif. Le dispositif semble être une boîte noire qui crée

une figure qui s'agrandit en se propageant. Cette figure peut correspondre à une onde modulée ou à la superposition incohérente de deux ondes modulées et créées chacune par une source secondaire. La question qui se pose alors est celle de savoir si la figure d'interférences dépend du dispositif et comment les étudiants raisonnent quand il y a plus de deux sources secondaires. Pour explorer cette question, un dispositif d'Young modifiée (il comporte trois trous et non deux) a été retenu. Les étudiants vont-ils considérer les interférences comme la superposition de trois ondes modulées créées par chaque trou ou vont-ils se ramener à des interférences à deux ondes en prenant deux à deux les trous ?

Par ailleurs, dans le cas des lames minces, les étudiants ne considèrent pas les phénomènes de réfraction et réflexion partielles. Tout se passe comme si l'onde incidente était transmise ou réfléchi par la lame avec une modulation d'intensité. La question qui se pose alors est celle de savoir comment ils interprètent les interférences en lumière blanche dans le cas d'une lame mince en coin. Correspond-elle à une simple déviation et décomposition de la lumière blanche ?

Enfin, si pour les étudiants, les interférences correspondent à une simple modification de l'onde incidente ou à la superposition de deux ondes modifiées, la question qui se pose est celle de savoir si le changement peut correspondre à autre chose qu'à une modulation d'amplitude ou d'intensité. Cette question se pose d'autant plus que les étudiants utilisent des raisonnements mécanistes dans le cas des ondes. Retrouve-t-on ici les tendances mises en évidence par Maurines à faire varier la longueur d'onde, la fréquence et la vitesse de l'onde ? Une situation présentant la superposition de deux faisceaux a été retenue.

2. Cohérence des sources et principe de superposition

Nous aborderons tout d'abord les questions mettant en jeu la cohérence spatiale des sources puis celles mettant en jeu leur cohérence temporelle.

2.1. Cohérence spatiale

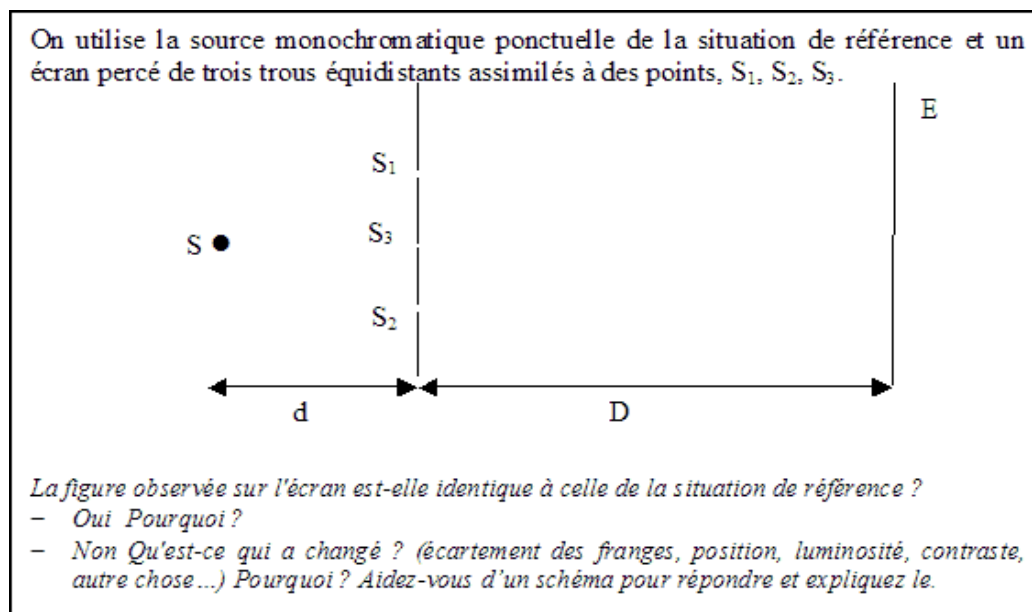
Un premier questionnaire se rapportant au dispositif des trous d'Young et à questions ouvertes a été élaboré (Q₁T). Comme les étudiants ont tendance à se focaliser sur un aspect de

la situation et ont des difficultés à prendre en compte toutes les modifications possibles, nous avons construit un deuxième questionnaire à questions semi-ouvertes afin de voir si malgré tout ils envisagent la variation d'une grandeur non prise en compte dans la version ouverte (Q₂T).

2.1.1. Trois sources secondaires cohérentes ponctuelles

2.1.1.1. Question ouverte

L'encadré 75 présente la situation donnée à 57 étudiants. Un troisième trou est intercalé entre les deux autres du dispositif des trous d'Young (Q₁T). Les étudiants doivent dire s'il y a un changement par rapport à la situation de référence des deux trous d'Young. Cette situation est considérée comme « classique » puisque nous l'avons retrouvée dans les travaux dirigés consultés en Tunisie et en France. Il est cependant à noter que la formulation qualitative que nous avons utilisée pour la question n'est pas habituelle pour les étudiants puisque dans leur TD, il leur est demandé de calculer l'intensité de la figure d'interférences.



Encadré 75. Dispositif d'Young avec trois trous

La figure d'interférences est différente de celle obtenue avec deux trous. Si les franges d'intensité maximale sont au même endroit que dans le cas de deux trous, il y a, en plus, entre deux franges consécutives, une frange brillante d'intensité moindre entourée de deux franges sombres.

Beaucoup d'étudiants ne répondent pas (23 %, N=57) ou donnent une réponse incorrecte. En effet, pour 23 % des étudiants, la figure d'interférences n'a pas changé. Pour quelques-uns, ce n'est qu' « *une figure d'interférence à trois trous* » (9 %). Quelques justifications (4 %) sont proches de celles obtenues par Ambrose (1999) où la figure d'interférences semble être la **superposition des figures de diffraction produites par un trou** « *chaque source produit son propre système d'interférence* ».

Beaucoup d'étudiants parmi les 54 % (N = 57) qui ont répondu que la figure d'interférences a changé, considèrent que l'**intensité augmente**. On rencontre trois types de raisonnement qui ne s'appuient pas sur le principe de superposition des ondes mais sur une règle d'addition des intensités des figures d'interférences :

- La figure correspondant aux trois trous semble être la superposition des figures produites par chaque trou « $I=I_1+I_2+I_3$ ». On retrouve ici un type de justification également fourni par les étudiants qui disent que la figure n'a pas changé.
- La figure correspondant aux trois trous correspond à la superposition de deux figures produites par deux trous : « *superposition de deux systèmes d'interférences l'un formé par S_3 et S_1 et l'autre par S_3 et S_2* ».
- La figure correspondant aux trois trous est une figure d'interférences à deux trous à laquelle on ajoute la figure d'interférences à un trou.

Quel que soit le raisonnement précédent utilisé, les étudiants établissent une association : « plus de sources- franges plus lumineuses ». On retrouve ici une association voisine de celle rencontrée dans les premières études avec les dispositifs interférentiels éclairés par une source étendue (trous d'Young, lame mince à faces parallèles).

Notons par ailleurs qu'il n'y a que 7 % des étudiants qui disent qu'il existe un phénomène d'interférence « *avec augmentation de nombres de franges* ».

2.1.1.2. Question semi-ouverte

La question semi-ouverte demande si « *les franges sombres se resserrent quand on perce un troisième trou entre les deux autres sur E_1* ». Les étudiants (Q₂T, N = 104) doivent répondre par « vrai ou faux » tout en justifiant leur choix (Encadré 75bis).

Situation de référence On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E_2 est " D ". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E_2 .

Répondre aux questions suivantes en cochant la case correcte et en justifiant la réponse à chaque fois. Détaillez également les modifications observées éventuellement sur l'écran.

| Dans l'expérience... | vrai | faux | Pourquoi ? |
|--|------|------|------------|
| Les franges sombres se resserrent quand on perce un troisième trou entre les deux autres sur E_1 | | | |

Encadré 75bis. Dispositif d'Young avec trois trous

La réponse correcte est que les franges sombres se resserrent à l'ajout d'un troisième trou (donc il faut cocher la case « *vrai* »). Ce resserrement est dû au fait qu'il existe entre les maximums principaux, d'autres maximums secondaires.

Environ la moitié des étudiants (44 %, $N = 104$) répondent correctement à cette question et affirment que les franges se resserrent par l'ajout du troisième trou. La moitié d'entre eux donnent des justifications. Nous retenons celles qui apparaissent significatives.

7% expliquent ceci par « *l'ajout de franges* » ou « *le nombre de franges augmente* ». Seulement 2 de ces étudiants remarquent l'existence de maximums secondaires. 2 % comparent cette situation à « *un réseau* » et 6 % mentionnent le fait qu'il y aura une simple « *interférence à trois sources, l'un formé par S_1 et S_3 et l'autre par S_2 et S_3* » donc « *deux autres phénomènes d'interférences* ». On retrouve ici un raisonnement analogue à celui mis en évidence avec la question ouverte. Notons enfin que nous retrouvons un étudiant qui se justifie par le fait de « *l'existence d'un phénomène supplémentaire : diffraction* ». Cet étudiant semble associer la présence de deux trous aux seules interférences et la présence d'un trou à la diffraction. Il n'arrive pas à concilier ces deux phénomènes dans le cas des trous d'Young.

30 % des étudiants ($N = 104$) ne sont pas d'accord (qui cochent la case « *faux* ») sur le resserrement des franges. 22 justifications sont fournies. Elles font appel au fait qu'au

contraire, « *l'interfrange augmente* » ou « *les franges s'élargissent* » (9 %) et au fait que « *l'intensité des pics secondaires diminue* » (3 %). Par ailleurs, quelques étudiants (4 %) nient la présence d'interférences. Les justifications font apparaître des raisonnements analogues à ceux déjà mis en évidence :

- Une association « plus de trous-plus de lumière » : « *les trous vont nous éblouir* »
- L'idée que les interférences ne sont produites que par deux sources : « *on n'a pas deux sources* »
- L'idée que la figure d'interférences est la superposition de deux figures d'interférences produites par deux sources « *il y a superposition de deux systèmes d'interférence* »

Notons enfin qu'un nombre non négligeable d'étudiants (26 %) ne répondent pas à cette question, comme pour la situation précédente.

2.1.2. Deux sources secondaires cohérentes étendues

2.1.2.1. Question ouverte

La situation proposée est celle du dispositif d'Young dans lequel les deux trous ont été élargis (Encadré 76). Les étudiants doivent dire s'il y a un changement par rapport à la situation de référence des deux trous d'Young considérés comme ponctuels (Q₁T, N = 57).

On utilise la source ponctuelle monochromatique S et un écran percé de deux trous S₁' et S₂'. Ces trous sont petits mais on ne peut plus les considérer comme des points.

La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- Oui Pourquoi ?
- Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.

Encadré 76. Dispositif d'Young avec deux trous élargis

Quand nous élargissons les trous, le nombre de franges visibles diminue. En effet, la figure d'interférences est modulée par la figure de diffraction d'un trou : nous observons des franges rectilignes à l'intérieur d'une tache circulaire entourée d'anneaux (c'est-à-dire de la figure de diffraction d'un trou). La largeur du champ d'interférences observé sur l'écran sera d'autant plus grande que le diamètre des trous est petit.

Presque la totalité des étudiants (81 %, N = 57) affirment qu'il y a un changement, mais en regardant de près leurs justifications, nous avons trouvé 23 % d'étudiants qui nient l'existence de la figure d'interférences : « *disparition d'interférence* » car « *il n'y a pas de cohérence* » ou « *mauvais contraste* ». **Nous retrouvons ici l'association source étendue - source incohérente - pas d'interférences.**

Pour 16% des étudiants, « *la figure est plus intense* ». Nous retrouvons ici l'association source étendue-franges plus lumineuses.

18 % des étudiants affirment qu'il existe des interférences telle que « *la position des franges change* ». Nous retrouvons ici les difficultés mises en évidence par Wosilait et al (1999), à savoir celles de relier les caractéristiques de la figure d'interférences à celles du dispositif d'Young (écartement et largeur des sources secondaires). Seul un étudiant a parlé d'une modification de la zone d'interférences.

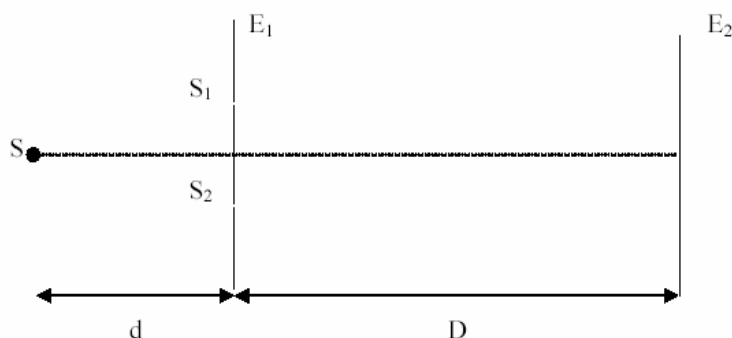
Enfin, pour 23 % des étudiants, c'est le phénomène de diffraction qui domine : « *les trous ne sont plus ponctuels dans ce cas on ne peut pas négliger le phénomène de diffraction* ».

16 % des étudiants ne répondent pas à la question et 3 % disent qu'il n'y a pas de changement et qu' « *on obtient une figure d'interférences identique à la première* ».

2.1.2.2. Question semi-ouverte

La question semi ouverte demande aux étudiants (Q₂T, N = 104) si « *les franges disparaissent quand on élargit les trous* ». Ils doivent répondre par « *vrai ou faux* » tout en justifiant leur choix (Encadré 76bis).

Situation de référence On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E_2 est " D ". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E_2 .



Répondre aux questions suivantes en cochant la case correcte et en justifiant la réponse à chaque fois. Détaillez également les modifications observées éventuellement sur l'écran.

| Dans l'expérience... | vrai | faux | Pourquoi ? |
|---|------|------|------------|
| Les franges disparaissent quand on élargit un peu les trous | | | |

Encadré 76bis. Trous d'Young avec des trous larges

La réponse considérée comme correcte est que les franges ne disparaissent pas à la suite d'un **petit** élargissement des trous donc il fallait cocher la case « *faux* ».

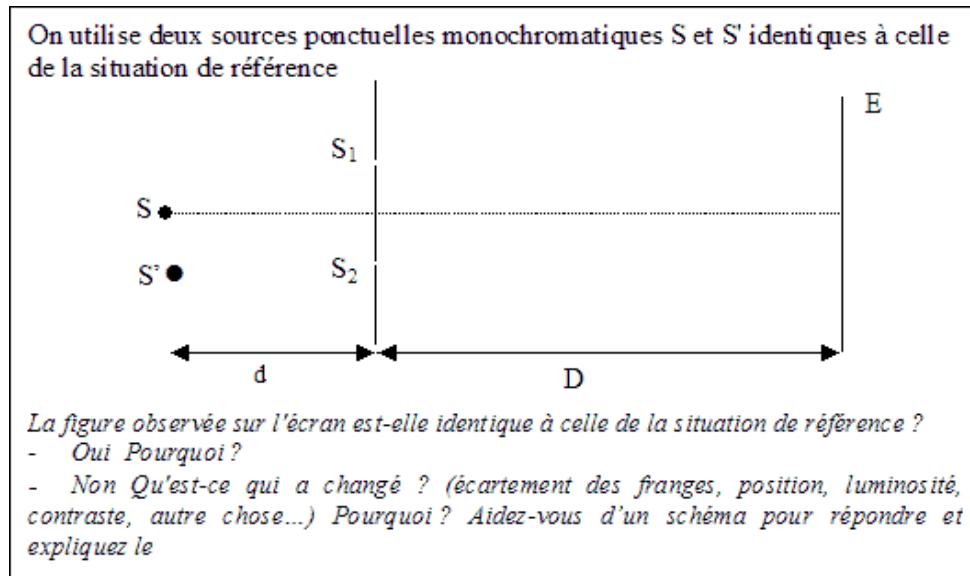
La majorité des étudiants (70 %, $N = 104$) considèrent que les franges disparaissent totalement (ils ont répondu par « *vrai* »). Parmi les justifications, on retrouve l'idée que des interférences ne sont produites que par des sources ponctuelles : « *pas d'interférence* » (6 %). On rencontre quelques étudiants qui semblent considérer les sources secondaires cohérentes comme incohérentes : « *le contraste diminue* » (11 %). Enfin, la diffraction n'est plus prise en compte par 11 % des étudiants dès que les trous sont élargis : « *il n'y a pas de diffraction* ». Seulement 27 % ($N = 104$) des étudiants répondent qu'il y a bien une figure d'interférences. 17 % donnent une justification satisfaisante à savoir que « *la figure d'interférence dépend de l'élargissement des trous* » et 4 % ajoutent qu'« *il existe aussi le phénomène de diffraction* ».

2.1.3. Deux sources primaires ponctuelles incohérentes

2.1.3.1. Question ouverte

Nous avons donné aux étudiants une situation où nous avons inséré une deuxième source primaire ponctuelle dans le dispositif d'Young (Encadré 77). Les étudiants doivent

dire s'il y a un changement par rapport à la situation de référence des trous d'Young (Q_1T , $N = 57$).



Encadré 77. Trous d'Young en présence de deux sources primaires

Quand on a deux sources primaires au lieu d'une, la figure observée sur l'écran peut être considérée comme la superposition des figures d'interférences données par chaque source primaire (cela revient à additionner les intensités de chaque figure d'interférences). Les figures d'interférences étant décalées l'une par rapport à l'autre, le contraste des franges observées sur l'écran varie, ces dernières pouvant même disparaître si les maxima d'une figure coïncident avec les minima de l'autre quand $\frac{l}{d} = \frac{i_0}{2D}$. De plus, un certain élargissement des franges est à envisager.

Pratiquement, tous les étudiants ont prédit qu'il y a un changement (92 %, $N = 57$). En ce qui concerne les justifications, 31 % portent sur le « déplacement » des franges. Ces étudiants semblent avoir raisonner uniquement sur la source supplémentaire et ne disent pas qu'il y a une différence de marche supplémentaire.

61 % des étudiants semblent utiliser un principe de superposition des figures d'interférences, de manière implicite pour 27 % en faisant appel à la variation de contraste, « pas d'interférence et brouillage » et de manière explicite : pour 20 %, « les intensités de S et S' s'additionnent », pour 5 % « il y a superposition de plusieurs figures d'interférences » et pour 9 % « la luminosité est plus grande ».

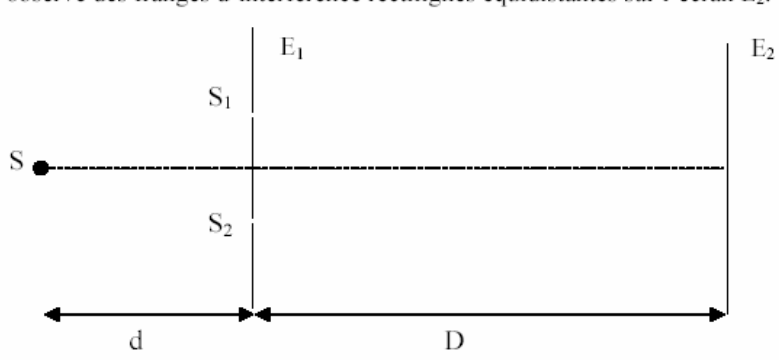
Quelques étudiants (8 %, $N = 57$) répondent qu'il n'y a pas de changement et ceci est dû à ce que « *on va avoir deux systèmes de franges, l'un par rapport à S et l'autre à S'* » ou que « *chaque source va donner ces franges sombres et brillantes* ». Ces étudiants ne prennent pas en compte la différence de marche supplémentaire entre S' et les trous.

Ainsi, les explications fournies par une majorité d'étudiants (61 %) sont compatibles avec le fait que la figure observée sur l'écran est la superposition des figures d'interférences produites par chaque source ponctuelle. Cependant, un nombre non négligeable d'étudiants (30%) **semblent raisonner uniquement sur la source qui a été rajoutée** puisque leurs explications sont focalisées sur le déplacement des franges. Nous retrouvons ici la tendance à se centrer sur un aspect de la situation et la difficulté à prendre tous les aspects en compte. Notons par ailleurs que très peu d'étudiants (5 %) justifient cette réponse par l'introduction d'une différence de marche supplémentaire.

2.1.3.2. Question semi-ouverte

A la question semi ouverte, nous demandons aux étudiants (Q_2T , $N = 104$) si « *Les franges se déplacent vers le haut quand on ajoute une autre source S' au-dessus de S* ». Les étudiants doivent répondre par « *vrai ou faux* » tout en justifiant leur choix (Encadré 77bis).

Situation de référence On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E_2 est " D ". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E_2 .



Répondre aux questions suivantes en cochant la case correcte et en justifiant la réponse à chaque fois. Détaillez également les modifications observées éventuellement sur l'écran

| | | | |
|---|--|--|--|
| e. les franges se déplacent vers le haut quand on ajoute une autre source S' au-dessus de S | | | |
|---|--|--|--|

Encadré 77bis. Trous d'Young en présence de deux sources primaires

La réponse correcte est que les franges ne se déplacent pas vers le haut (donc « faux »). Les justifications doivent prendre en compte le fait que la figure observée sur l'écran est la superposition de deux figures, l'une centrée et l'autre décalée vers le bas. Les franges sont moins contrastées et peuvent apparaître déplacées vers le bas ou élargies.

Nous avons trouvé que la majorité des étudiants (80 %, N = 104) répondent correctement. Parmi ces étudiants, 47 % ajoutent qu'« *il y a un déplacement vers le bas* ». Ces étudiants n'explicitent pas la différence de marche supplémentaire introduite. Comme à la question précédente, ils semblent se centrer sur la source supplémentaire.

8 % des étudiants précisent que ce déplacement résulte de la superposition de deux figures d'interférences « *superposition de deux figures d'interférences* » et 10 % des étudiants disent que « *les deux sources sont incohérentes* ».

7 % des étudiants donnent la réponse de type « vrai » (et c'est incorrect) et 13 % ne donnent pas de réponse.

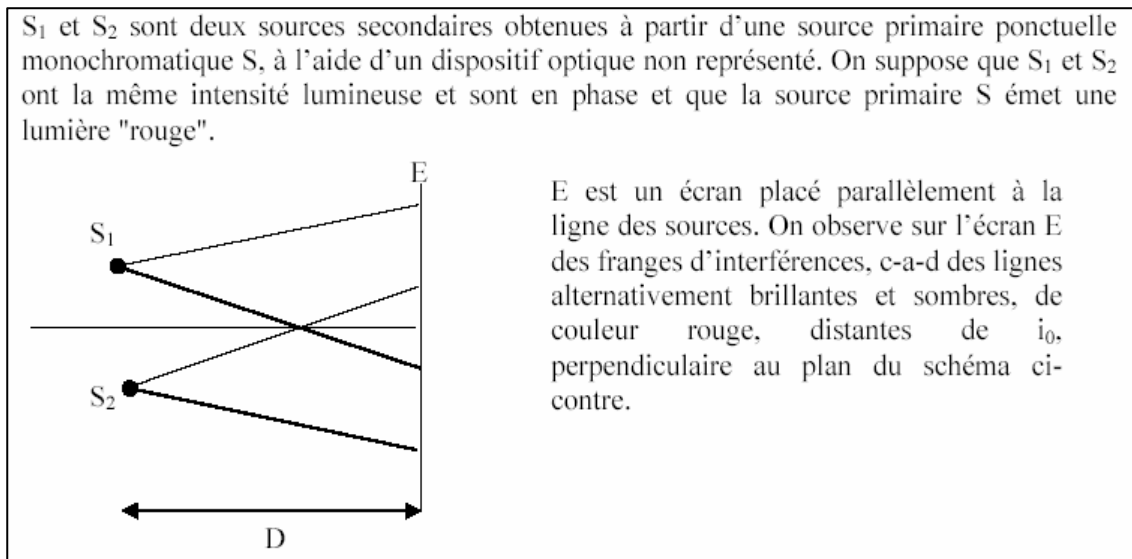
Nous remarquons que, comme à la situation précédente du questionnaire Q₁T, la majorité des étudiants se focalisent sur le **déplacement des interférences** et une minorité font référence au principe de superposition.

2.2. Cohérence temporelle

Deux questionnaires ont été élaborés. Le premier présente la situation prototypique à deux sources secondaires produites à partir d'une lumière constituée de deux radiations monochromatiques. Le deuxième propose le dispositif des trous d'Young devant lesquels sont placés deux filtres différents.

2.2.1. Deux radiations monochromatiques

La situation de référence présente deux sources secondaires ponctuelles obtenues à partir d'une source ponctuelle émettant une lumière « rouge » par l'intermédiaire d'un dispositif interférentiel. Sur un écran, nous pouvons observer des franges d'interférences (Encadré 78).



Encadré78. Situation de référence

Puis, nous avons demandé aux étudiants⁶² (Q_7D , $N = 76$) de prévoir ce qui se passe dans le cas où la source primaire S est composée de deux radiations de couleurs différentes : « *La lumière émise par la source primaire S , à l'origine des sources secondaires S_1 et S_2 , est composée de deux radiations monochromatiques au lieu d'une seule. Les fréquences correspondent à des lumières "rouge" et "verte" » (Encadré 78bis).*

1) *Pour chacune des situations suivantes, indiquez si la figure observée sur l'écran est identique ou non à celle de la situation de référence. Si elle est différente, précisez par une croix dans le tableau donné ci-dessous ce qui a changé (direction des franges, écartement, position, luminosité, contraste...). Expliquez pourquoi en dessous du tableau.*

Situation 1 La lumière émise par la source primaire S , à l'origine des sources secondaires S_1 et S_2 , est composée de deux radiations monochromatiques au lieu d'une seule. Les fréquences correspondent à des lumières "rouge" et "verte".

Encadré 78bis. Source émettant une lumière constituée de deux radiations

Nous observons sur l'écran une frange centrale jaune encadrée d'une frange sombre, puis de quelques franges jaunes bordées de vert et rouge, puis de jaune. Pour expliquer cela, nous considérons que chaque radiation donne sa figure d'interférences et que la figure observée sur l'écran résulte de la superposition d'une figure aux franges brillantes rouges et d'une figure aux franges brillantes vertes. Ces deux figures n'ayant pas le même interfrange, seules les franges centrales des figures coïncident. Comme cette dernière résulte de la superposition d'une frange brillante rouge et d'une frange brillante verte, elle paraît jaune.

⁶² 8 étudiants de DEUG, 31 étudiants de Licence, 24 étudiants des classes préparatoires, 13 étudiants de Maîtrise.

La plupart des étudiants (84 %, N = 76) répondent que la figure d'interférences a changé. Les étudiants citent plusieurs grandeurs à la fois. Nous obtenons :

- Pour la couleur (41 %). 28 % précisent la couleur (rouge et verte 22 %, verte 3 %, jaune 3 %)
- Pour l'écartement (30 %)
- Pour la luminosité (17 %) et le contraste (14%).
- Pour la forme (13 %) et la position (11 %).

Les justifications des étudiants montrent que 33 % des étudiants semblent se focaliser sur la figure d'interférences de la radiation rajoutée par rapport à la situation de référence : « *interférence entre la même couleur (qui est la couleur verte)* » ou « *écartement change car il dépend de la longueur d'onde* ».

34% des étudiants considèrent les figures d'interférences des deux radiations. Pour une partie d'entre eux (16 %), les figures semblent juste intercalées : « *les franges sont rouges et vertes* », il y a « *deux séries de franges décalées* » ou « *deux systèmes de franges* ». Pour les autres (18%), la figure observée sur l'écran semble correspondre à l'addition des figures d'interférences. Cette addition est implicite pour certains, « *superposition des figures d'interférence rouge avec les franges d'interférence vertes* », et entraîne pour d'autres la « *disparition des franges, changement du contraste et observation de franges irisées* ». Cette addition est explicitée uniquement par 6 étudiants : 4 étudiants utilisent une règle d'addition des intensités, « *les intensités s'ajoutent* », et 2 étudiants qui tiennent compte de l'effet perceptif, « *il y a des franges irisées, la frange centrale est jaune et entourée de franges irisées rouges et vertes* ».

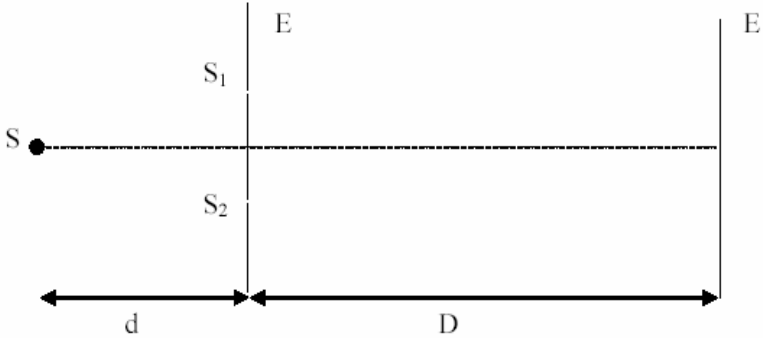
Les autres étudiants (16 %, N = 76) ne répondent pas à la question.

Comme à la question similaire portant sur la cohérence spatiale, les étudiants se centrent sur un aspect de la situation en tenant compte uniquement de la radiation rajoutée. Si les autres étudiants prennent en compte les deux radiations, ils ne semblent pas tous utiliser une règle d'addition des intensités des figures d'interférences. Par ailleurs, ils ne justifient pas leur réponse en disant que les deux radiations sont incohérentes (un seul étudiant parle « *d'existence de problème de cohérence temporelle* »).

2.2.2. Deux filtres différents devant les trous

La situation propose deux sources ponctuelles incohérentes temporellement. Elles sont obtenues à partir d'une source primaire ponctuelle émettant de la lumière blanche et de deux filtres de couleurs différentes placés devant les sources secondaires. Nous avons demandé aux étudiants (Q₃D, N = 65) de choisir parmi les réponses données (franges jaunes ou rouges ou vertes, pas de franges) celle qui leur semble correcte (Encadré 79).

Situation de référence On place une source lumineuse S, monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S₁ et S₂, distants de "a". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est "d" et la distance trous-écran d'observation E₂ est "D". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E₂.



2) La source primaire S est ponctuelle mais émet de la lumière blanche. On place un filtre rouge devant l'un des trous, un vert devant l'autre. Indiquez par une (des) croix si on observe sur l'écran :

- *des franges brillantes jaunes
- *des franges brillantes rouges
- *des franges brillantes vertes
- *il n'y a pas de franges
- *Autres.....

Justifiez votre réponse et précisez si les franges sont identiques sur tout l'écran.

Encadré 79. Présence de filtres devant les trous

La réponse correcte est qu'**il n'y a pas de franges**. En effet, chaque trou éclaire l'écran avec une lumière de couleur donnée, rouge ou verte. La couleur de l'écran résultera de la superposition de ces deux couleurs, l'oeil le percevra jaune.

Si 40 % (N = 65) des étudiants donnent une réponse correcte en disant qu'il n'y a pas d'interférences, il y en a tout autant qui donnent une réponse fautive en disant qu'il y a des franges (Tableau 21).

Peu d'étudiants qui donnent une réponse correcte justifient leur réponse. On retrouve des justifications faisant appel au concept de *cohérence* sans qu'il soit mentionné de quel type de cohérence il s'agit (7 %, N = 65). On constate par ailleurs que 7 % des étudiants n'ont pas compris que les sources secondaires étaient incohérentes car ils envisagent l'existence de deux figures d'interférences : « *chaque longueur d'onde va donner son propre système d'interférence* ». Nous retrouvons ici une tendance à considérer qu'une seule onde peut produire des interférences.

Tableau 21. Réponses des étudiants en pourcentage

| | |
|----------------------|------|
| Existence de franges | 49 % |
| Pas de franges | 40 % |
| Pas de réponse | 11 % |

Les étudiants qui répondent qu'il existe des franges (49 %, N = 65) envisagent des couleurs différentes (Tableau 22).

Tableau 22. Réponses des étudiants pour l'existence des franges

| | |
|---|------|
| Franges brillantes jaunes | 22 % |
| Franges brillantes rouges | 2 % |
| Franges brillantes vertes | 0 % |
| Franges brillantes vertes et rouges | 15 % |
| Franges brillantes jaunes, rouges et vertes | 2 % |
| Autres couleurs | 8 % |

39% des étudiants semblent considérer que la figure observée sur l'écran est la superposition de deux figures d'interférences. Seul une partie d'entre eux (24% sur la population totale) semblent utiliser une règle d'addition de l'intensité des figures d'interférences tout en tenant compte du récepteur œil en disant qu'il existe des franges « *jaunes* ». Pour les autres (15%), les franges sont « *vertes et rouges* ». La question se pose de savoir s'ils utilisent implicitement une règle d'addition des intensités sans tenir compte du récepteur œil ou bien s'ils ne l'utilisent pas en considérant deux figures intercalées.

Un petit nombre d'étudiants (8 %) rencontrent des difficultés avec la notion de filtre coloré. Ils répondent en effet que « *toutes les couleurs existent sauf le rouge et le vert car le filtre rouge absorbe le rouge et de même pour le filtre vert* » (4 %) ; les couleurs observées sont alors « *franges bleues* » (2 %) et « *d'après le cercle de couleur, chaque couleur donne en sortie la correspondante* » (2 %).

En conclusion, 49 % des étudiants n'ont pas pu reconnaître que les sources secondaires sont incohérentes et ont envisagé l'existence de figures d'interférences.

2.2.3. Bilan

Nous retrouvons bien dans les résultats de ces questionnaires les difficultés que le modèle de raisonnement proposé laissait prévoir.

- Les étudiants ne savent pas identifier les sources cohérentes et incohérentes. Une source large est nécessairement incohérente même s'il s'agit d'une source secondaire produite par une source ponctuelle. Cette interprétation erronée du schéma donne lieu à deux associations : source étendue-pas d'interférences, source étendue-franges plus lumineuses. De même, les deux trous du dispositif d'Young sont nécessairement cohérents même si deux filtres différents sont placés devant.

- Les étudiants tendent à considérer qu'il est possible d'avoir des interférences avec une seule source secondaire. Dans le cas de la situation à trois sources secondaires ponctuelles, l'intensité de la figure d'interférences peut être du type $I = I_1 + I_2 + I_3$ ou $I = I_{(1+2)} + I_3$. Dans le premier cas, les interférences correspondent à la superposition de trois ondes modulées créées par chaque trou, dans l'autre elles résultent de la superposition de la figure d'interférences créée par deux trous et d'une onde modulée créée par un trou. Compte tenu du dispositif choisi, il y a une confusion entre diffraction et interférences. La question se pose de savoir si les étudiants donneraient le même type de réponse avec trois sources cohérentes.

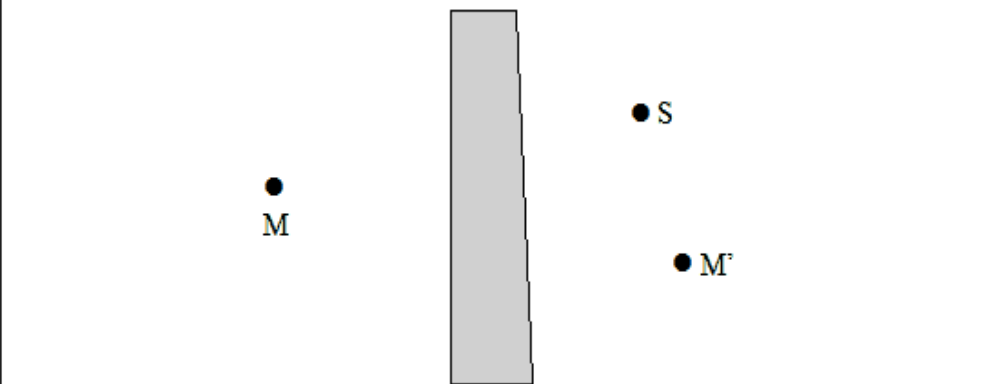
- Les étudiants ont des difficultés à prendre en compte tous les aspects d'une situation si bien que dans des situations de cohérence partielle, ils tendent à se centrer sur un point source ou une radiation uniquement.

3. Raisonnement géométrique

Pour tester l'existence d'un raisonnement géométrique chez les étudiants, nous avons proposé aux étudiants⁶³ (N = 58) un questionnaire se rapportant au dispositif d'une lame en coin éclairée par une lumière blanche (Q_{15C}). Il est demandé aux étudiants si dans cette situation, nous observons une figure d'interférences (Encadré 80). Nous prévoyons que les étudiants diront que la lumière est simplement déviée et décomposée lors de la traversée de la lame.

⁶³ 7 étudiants de DEUG, 44 étudiants des classes préparatoires, 7 étudiants de Maîtrise.

On éclaire une fine lame de mica grâce à une source lumineuse S de lumière blanche considérée comme ponctuelle. Les faces de la lame de mica ne sont pas parallèles. On observe la lame en se plaçant en M ou en M'.



Peut-on observer un phénomène d'interférences ?

- Oui. Représentez la figure observée sur un écran E dont vous préciserez la position. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma.
- Non, qu'observe-t-on et pourquoi ?

Encadré 80. Source de lumière blanche devant une lame à faces non parallèles

La lumière blanche qui vient rencontrer une lame mince d'épaisseur variable produit des franges multicolores. L'obtention de ces franges s'explique en considérant la lumière blanche comme une superposition de lumières monochromatiques caractérisées par une longueur d'onde donnée et la figure observée en lumière blanche comme la superposition des figures d'interférences produites par chaque lumière monochromatique. La superposition de figures d'interférence constituées de franges rectilignes dont la couleur et l'interfrange dépendent de la longueur d'onde de la lumière permet d'interpréter les couleurs observées sur l'écran et leur disparition lorsqu'on s'éloigne de l'ordre d'interférence nul.

L'existence des interférences lumineuses est affirmée par une majorité des étudiants (43%, N = 58) et niée par un nombre non négligeable d'entre eux (28 %, N = 58). Il est à noter qu'un nombre important d'étudiants ne répondent pas à cette question (29 %, N = 58).

Les étudiants affirmant qu'il y a des interférences fournissent trois types de justifications.

Quelques étudiants (2 %) décrivent une figure d'interférences « *blanc d'ordre supérieur (frange centrale blanche et de part et d'autre des franges multicolores)* »

D'autres (20 %) font *référence à la superposition de figures d'interférences* : « *la superposition des franges* »

D'autres encore (21 %) *confondent franges d'interférences colorées et spectre* en disant qu'« *on obtient un spectre de la lumière blanche* » (10 %) ou « *une décomposition de la lumière* » (3 %) ou « *un spectre de lumière blanche cannelé au voisinage de la lame* » (3 %). De plus, certains étudiants considèrent « *la lame comme un prisme* » (5 %).

Seuls 9 % des étudiants précisent la localisations des interférences en disant qu'« *on observe des anneaux localisés à l'infini* » (ce qui est faux).

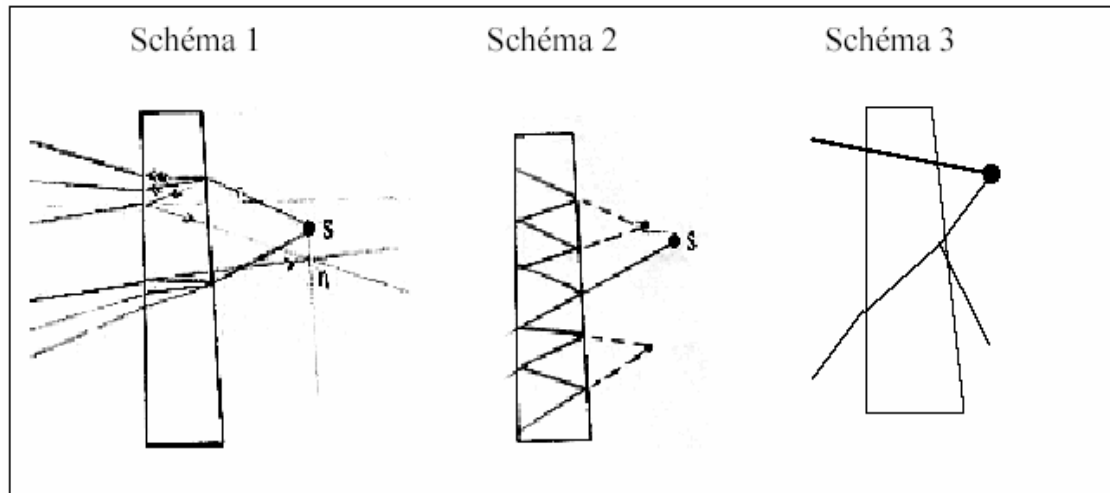
Un nombre important d'étudiants (28 %, N = 58) répondent qu'il n'y a pas d'interférences.

Plusieurs d'entre eux ont recours à d'autres phénomènes comme la dispersion « *après réfraction, la lumière est dispersée* » (7 %).

Pour d'autres, « *les rayons sont non parallèles, donc brouillage* » (3 %). Un étudiant utilise la superposition des interférences comme cause de cette non-existence « *la source étant polychromatique, comme l'interfrange est fonction de la longueur d'onde, la figure d'interférence est la superposition de plusieurs systèmes associés chacun à une longueur d'onde d'où on n'observe pas de franges alternativement sombres et brillantes* ».

Un autre répond qu'« *il faut utiliser un filtre de couleur pour observer les franges* » sans préciser la place de ce filtre.

17 % des étudiants fournissent des schémas (Encadré 81). 5% correspondent à des étudiants qui disent qu'il y a des interférences (Schéma 1), 9 % à des étudiants qui disent qu'il n'y a pas d'interférences (Schéma 2) et 3 % à des étudiants qui ne précisent rien (Schéma 3). On retrouve sur ces schémas la non prise en compte de la réflexion et de la réfraction partielles si bien que les interférences semblent correspondre à la modification de l'onde incidente. Par ailleurs, les lois de Descartes ne sont pas correctement appliquées.



Encadré 81. Schémas des étudiants

Comme nous l'avons prévu, la lame mince est considérée par certains étudiants comme analogue à un prisme. Cette lecture de la situation les conduit à répondre qu'un spectre est observé (il apparaît ici une confusion entre franges polychromatiques et spectre) ou bien qu'il n'y a pas d'interférences car le phénomène mis en jeu est la réfraction.

4. Raisonnement mécaniste

Pour examiner si la tendance vers un raisonnement géométrique s'accompagne également d'un raisonnement mécaniste consistant à faire varier une des grandeurs caractérisant la propagation d'une onde (vitesse de propagation, la longueur d'onde), nous avons élaboré le questionnaire Q₆D (Encadré 82).

On considère deux sources ponctuelles identiques S_1 et S_2 . Elles émettent un faisceau de lumière divergent et sont placées de façon à ce que les faisceaux soient perpendiculaires l'un à l'autre. Dans la situation 1, les deux sources S_1 et S_2 sont des lampes à vapeur de sodium. Dans la situation 2, les deux sources S_1 et S_2 sont des lasers. On rappelle que le phénomène d'interférences lumineuses se produit avec deux sources indépendantes uniquement dans le cas de la lumière laser. Pour chacune des deux situations, complétez les schémas correspondant à ce qui se passe lorsque les deux sources émettent ensemble. Indiquez comment est le trajet de la lumière avant que les faisceaux se croisent et une fois qu'ils se sont croisés. Indiquez également ce qui se passe dans la zone de croisement. Expliquez.

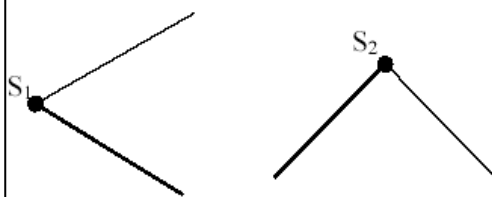
Situation 1 : deux lampes à vapeur de sodium

Situation 2 : deux lasers

S_1 émet seule

S_2 émet seule

S_1 et S_2 émettent ensemble



Comparez les valeurs de la vitesse de la lumière, de la fréquence, de la longueur d'onde dans la zone de croisement des faisceaux à leur valeur avant que les faisceaux se sont croisés. Comparez les valeurs de la vitesse de la lumière, de la fréquence, de la longueur d'onde après que les faisceaux se sont croisés à leur valeur avant que les faisceaux se sont croisés. Expliquez.

Situation 1/ Situation 2

Zone de croisement des faisceaux lumineux

Vitesse de la lumière

Fréquence

Longueur d'onde

Intensité

Après le croisement des faisceaux lumineux

Vitesse de la lumière

Fréquence

Longueur d'onde

Intensité

Encadré 82. L'énoncé du questionnaire Q_{6D}

4.1. Deux lampes à vapeur de sodium

En ce qui concerne ce qui se passe dans la *zone de croisement*, notons tout d'abord que 17 % des étudiants ne répondent pas à cette question et qu'un petit nombre d'étudiants (14 %, N = 52) nient l'énoncé et affirment l'existence d'interférences.

Les étudiants qui se placent dans le cadre de l'énoncé (69 %, N = 58) précisent leur réponse de deux manières. Certains font appel à la cohérence des sources : « *les sources ne sont pas cohérentes* » (14 %). Les autres (38 %, N = 52) semblent utiliser **une règle d'addition des intensités** en le disant explicitement, « *intensité augmente* » ou « *s'additionnent* » (16 %), ou implicitement « *les sources s'additionnent* » (5%), et en pouvant faire parfois une confusion intensité- amplitude « *somme des amplitudes* » (3 %).

Pour la zone *de croisement*, en ce qui concerne les grandeurs « vitesse de propagation, longueur d'onde, fréquence », notons tout d'abord que 26% des étudiants ne répondent pas à cette question et que pour la majorité des étudiants (48 %), les grandeurs citées ci-dessus sont **constantes** puisqu' « *il n'y a pas d'interférence* ».

26 % des étudiants proposent un changement *après croisement*. Pour 16%, c'est l'intensité qui change, soit « *l'intensité diminue* » (10 %), soit « *l'intensité augmente : somme des éclairements* » (6 %). Seuls 10% des étudiants donne un changement sur les autres grandeurs : « *longueur d'onde diminue* » (4 %) ou « *fréquence diminue* » (4 %) ou encore « *vitesse diminue* » (2 %).

4.2. Deux lasers

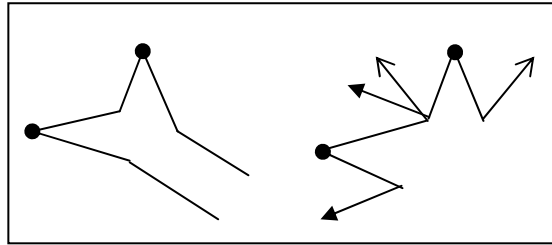
En ce qui concerne la *zone de croisement*, un petit nombre d'étudiants (19 %, N=52) nient l'énoncé en disant qu'il n'y a pas d'interférences, alors qu'un nombre non négligeable d'étudiants (22 %) ne répondent pas à cette question.

Les étudiants qui se placent dans le cadre de l'énoncé (59 %) disent qu'il y a interférences. Quelques précisions sur les grandeurs sont données. 4 % des étudiants font référence à un changement de l'intensité seule : « *l'intensité diminue* » (2 %) ou « *les amplitudes s'additionnent* » (2 %). 9 % des autres répondent que plus d'une grandeur subit un changement : « *somme des vitesses, fréquence diminue et l'intensité augmente* » (7 %) et « *vitesse, fréquence et longueur d'onde augmentent* » (2 %).

En ce qui concerne les grandeurs susceptibles de changer *après la zone de croisement*, notons tout d'abord que 33% des étudiants ne répondent pas et que pour 47 % des étudiants, les différentes grandeurs sont constantes. 20% des étudiants envisagent des changements. Pour la plupart (8 %), c'est l'intensité qui change après le croisement des deux faisceaux

lasers (diminue 3 %, augmente 5 %), suivie de la longueur d'onde (7 %) et de la fréquence (diminue 2 %, augmente 3 %).

En ce qui concerne les schémas et le trajet suivi par la lumière, un problème surgit lors des croisements des rayons : ils rebondissent pour 10 % des étudiants (Encadré 83).



Encadré 83. Les rayons rebondissent

Pour les étudiants, l'onde subit un changement après la traversée d'un dispositif interférentiel. Que ce soit, pour le laser ou les lampes de sodium, en moyenne 23 % des étudiants changent une grandeur et 13 % font rebondir les rayons lors de croisement des rayons. Par ailleurs, un nombre non négligeable d'étudiants ne répondent pas et un petit nombre contredisent l'énoncé dans le cas des lampes à vapeur de sodium en considérant qu'il y a interférences.

PARTIE 7
DEUXIEMES ETUDES
EXPERIMENTALES : La
cohérence de la lumière

1. Introduction

Nous avons réalisé cette étude complémentaire sur la cohérence pour examiner si les étudiants connaissent le modèle des trains d'ondes et les critères de cohérence temporelle et spatiale car les enquêtes précédentes montrent que les étudiants ont des difficultés à énoncer les conditions d'obtention des interférences et mentionnent rarement le modèle des trains d'onde. Par ailleurs, nous avons cherché aussi à voir s'ils savent raisonner dans des situations de cohérence partielle en décomposant la source étendue en sources élémentaires et une lumière polychromatique en radiations monochromatiques.

2. Caractérisation de la cohérence spatiotemporelle d'une onde

Pour expliquer pourquoi l'on peut obtenir des interférences lumineuses dans certaines situations et non dans d'autres, nous devons nous intéresser à la nature de la lumière émise. La cohérence temporelle d'une lumière peut être caractérisée par la durée des trains d'ondes ou la largeur du spectre. Quant à la cohérence spatiale d'une lumière, elle est caractérisée par la grandeur appelée « la largeur de cohérence ». Celle-ci dépend non seulement de la largeur de la source mais aussi de la distance entre la source et les sources secondaires, de la distance entre les sources secondaires et le lieu d'observation.

Deux questionnaires ont été élaborés. Le premier porte sur la comparaison des trains d'ondes émis par deux sources ponctuelles, le deuxième porte sur les grandeurs caractérisant la cohérence d'une lumière, quelle soit temporelle ou spatiale.

2.1. Modèle du train d'onde

Nous avons réalisé deux questionnaires en nous inspirant d'un énoncé de T.P. Le T.P initial est réalisé par Chantal Duprez : l'un, le plus proche de la réalité physique, présente des trains d'ondes émis à des instants aléatoires ; l'autre ne s'intéresse qu'à certains aspects du modèle des trains d'onde (phase, amplitude des trains) et présente des trains d'ondes émis au même instant. Ce dernier questionnaire (Q₉D) présente six situations de propagation de trains d'ondes cohérents ou incohérents. Il a été donné à 116 étudiants.

Dans la situation de référence, nous avons donné la description temporelle Y_{S1} des trains d'onde émis par la source S_1 et nous avons demandé aux étudiants d'indiquer à chaque fois si cette source est cohérente avec une source S_2 émettant des trains d'ondes qui peuvent avoir une amplitude ou une période différente, ou bien être déphasés (Encadré 84).

Les schémas représentent des trains d'ondes émis par deux sources ponctuelles S_1 et S_2 . Précisez pour chaque cas si les sources sont cohérentes et pourquoi

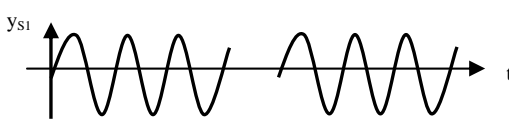
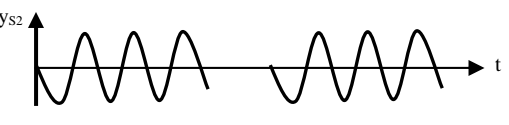
Encadré 84. Question posée aux étudiants

Compte tenu du cours reçu, nous nous attendons à ce que les étudiants se rappellent la condition nécessaire et suffisante de cohérence de deux sources différentes, à savoir que le déphasage entre les trains d'ondes qu'elles émettent soit constant au cours du temps. De plus, les trains d'ondes doivent avoir la même fréquence. Notons que l'amplitude des trains d'ondes n'influence pas la cohérence temporelle.

2.1.1. Situations de cohérence temporelle

Dans la situation 1 (Tableau 23), les trains d'onde Y_{S2} sont toujours en opposition de phase par rapport aux trains d'onde Y_{S1} . Nous pouvons dire que les sources sont cohérentes temporellement puisque les trains d'onde gardent le même déphasage au cours du temps.

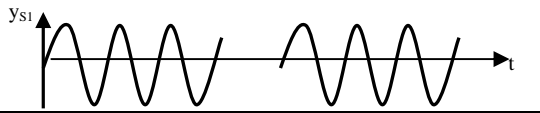
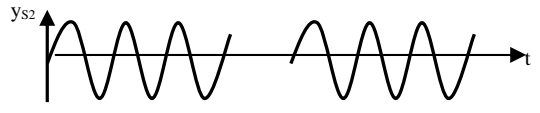
Tableau 23. Les deux trains d'ondes sont en opposition de phase

| Situation de référence |  | Oui | Non | Non Réponse |
|------------------------|--|------|------|-------------|
| Situation 1 (N = 116) |  | 71 % | 24 % | 5 % |

Dans cette situation, 71 % (N = 116) des étudiants répondent correctement à savoir que les deux sources sont cohérentes. Une partie d'entre eux (44 % sur la population totale) le justifient par le fait que « *le déphasage est constant au cours du temps* ». La majorité des 24 % des étudiants qui donnent une réponse incorrecte (non cohérent), justifient ceci par « *les deux trains d'ondes sont en opposition de phase* » (19%).

Dans la situation 3 (Tableau 24), les deux trains d'ondes sont toujours en phase au cours du temps, par suite les sources sont cohérentes temporellement.

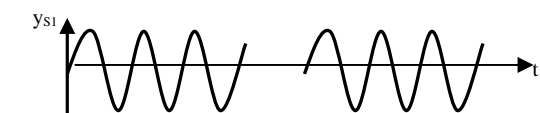

Tableau 24. Les deux trains d'ondes sont en phase

| Situation de référence |  | Oui | Non | Non Réponse |
|------------------------|--|------|-----|-------------|
| Situation 3 (N = 116) |  | 97 % | 0 % | 3 % |

La quasi-totalité des étudiants (97 %, N = 116) répondent correctement, à savoir que les deux trains d'ondes sont cohérents temporellement et le justifient par le fait que « *le déphasage est constant* » (44 %).

Dans la situation 4 (Tableau 25), l'amplitude des trains d'onde Y_{S2} est plus grande que celle des trains d'onde Y_{S1} . Sachant qu'il n'y a pas de lien entre l'amplitude d'une onde et la cohérence temporelle et que les deux trains d'ondes sont en phase au cours du temps, on peut dire que les sources sont cohérentes temporellement.

Tableau 25. L'amplitude du deuxième train d'onde est plus grande que le premier

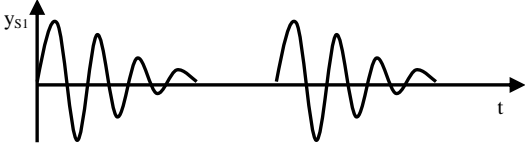
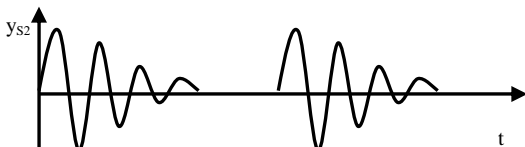
| Situation de référence |  | Oui | Non | Non Réponse |
|------------------------|--|------|------|-------------|
| Situation 4 (N = 116) |  | 83 % | 13 % | 4 % |

A la quatrième situation où l'amplitude des trains d'ondes est plus grande que dans la situation de référence, la majorité des étudiants (83 %, N = 116) répondent correctement. Sur les justifications données, seulement 10 % des étudiants mentionnent explicitement que « *l'amplitude n'influence pas la cohérence temporelle* ». De plus, 16 % le justifient par le fait que « *le déphasage est constant au cours du temps* ».

Les 13 % des étudiants qui répondent qu'il n'y a pas de cohérence temporelle, établissent une relation entre la cohérence temporelle et l'amplitude « *l'amplitude a augmenté* ».

Dans la situation 6 (Tableau 26), bien que les trains d'ondes soient amortis (l'amplitude décroît au cours du temps), les sources sont cohérentes.

Tableau 26. Les trains d'ondes sont amortis

| Situation de référence |  | Oui | Non | Non réponse |
|------------------------|--|------|------|-------------|
| Situation 6 (N = 116) |  | 78 % | 13 % | 9 % |

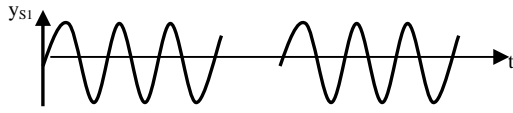
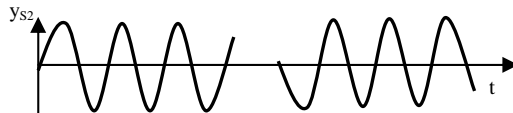
Pour cette situation, 78 % (N = 116) des étudiants répondent correctement mais le nombre de justifications est faible. 13 % justifient la cohérence des sources par le fait que « *le déphasage est constant* » et seulement 2 % des étudiants indiquent que « *l'amplitude n'influence pas la cohérence temporelle* ».

Pour les 13 % d'étudiants qui donnent une réponse incorrecte, les deux sources ne sont pas cohérentes car « *il y a amortissement* » (3 %) ou « *la période diminue* » (4 %). Notons que cette situation a obtenu le nombre de non réponse le plus élevé (9 %).

2.1.2. Situations d'incohérence temporelle

Dans la situation 2 (Tableau 27), les trains d'ondes Y_{S2} sont tantôt en phase avec les trains d'ondes Y_{S1} et tantôt en opposition de phase. Les deux sources sont donc incohérentes temporellement car les trains d'onde ne gardent pas le même déphasage au cours du temps.

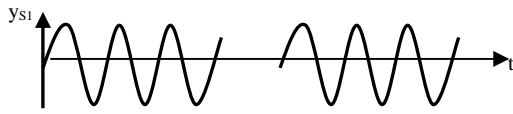

Tableau 27. Les deux trains ont un déphasage non constant au cours du temps

| Situation de référence |  | Oui | Non | Non Réponse |
|------------------------|--|------|------|-------------|
| Situation 2 (N = 116) |  | 14 % | 85 % | 1 % |

Dans cette situation, un petit nombre d'étudiants (14 %) répondent en disant que les sources sont cohérentes temporellement. Sur les 10 justifications fournies, les étudiants font référence à des critères spatiaux, comme par exemple « *même longueur d'onde* », alors qu'il fallait utiliser des critères temporels. Cependant la plupart des étudiants (86 %) répondent qu'il n'y a pas de cohérence temporelle dans ce cas.

Dans la situation 5 (Tableau 28), la période des trains d'ondes Y_{S2} est moins grande que celle des trains d'ondes Y_{S1} . Sachant qu'il y a un lien entre la fréquence d'une onde et la cohérence temporelle, les deux sources ne sont pas cohérentes temporellement.

Tableau 28. Les deux trains d'ondes n'ont pas la même période

| Situation de référence |  | Oui | Non | Non Réponse |
|------------------------|--|------|------|-------------|
| Situation 5 (N=116) |  | 28 % | 67 % | 5 % |

Dans cette situation, la plupart des étudiants (67 %, N = 116) répondent de manière correcte à savoir que les sources ne sont pas cohérentes temporellement, puisque « *la période du deuxième train d'onde est différente du premier* ». Il y a cependant un nombre important de réponses erronées (28 %), les justifications se concentrant surtout sur le fait que « *le déphasage est constant au cours du temps* » (9 %).

Nous remarquons que les situations 1, 4, 5 (catégorie 1) et 6 (catégorie 2) fournissent les pourcentages de bonnes réponses les plus faibles. Pour savoir si les étudiants ont plus de difficultés avec la période et l'opposition de phase qu'avec l'amplitude comme le suggère l'analyse qualitative des résultats, nous avons réalisé des Tests de χ^2 .

Le test réalisé (Annexe 5) pour comparer les résultats des situations 1 et 4 conduit à $\chi^2_{calculée} = 4.874$. Les tables indiquent que, pour un degré de liberté ici égal à 2, la valeur de $\chi^2_{calculée}$ est supérieure à la valeur théorique : $\chi^2 = 4.60$ avec une probabilité d'erreur de 10%. On constate donc que la différence des résultats est significative. Nous pouvons dire que les étudiants ont bien plus de difficultés avec les trains d'ondes en opposition de phase qu'avec une grande amplitude.

Le test réalisé pour comparer les situations 4 et 5 conduit à $\chi^2_{calculée} = 8.1$. La valeur de $\chi^2_{calculée}$ est supérieure à la valeur théorique : $\chi^2 = 4.6$ avec une probabilité d'erreur de 10%. On constate une différence significative donc nous pouvons dire que les étudiants ont plus de difficultés avec des trains d'ondes de fréquence différente qu'avec l'amplitude.

2.1.3. Bilan

Ce questionnaire montre que les étudiants connaissent partiellement le modèle des trains d'ondes. Ils savent que deux sources sont cohérentes temporellement si les trains d'ondes émis présentent un déphasage constant au cours du temps et qu'il n'y a pas de lien entre l'amplitude des trains d'onde et leur cohérence. Cependant, ils rencontrent deux difficultés : ils tendent à associer *cohérent* à *en phase* de sorte que deux trains d'ondes en opposition de phase ne peuvent être cohérents. Ils ne semblent pas faire de différence entre les battements et les interférences, le son et la lumière, de sorte que deux trains d'onde de fréquences différentes sont cohérents. Nous retrouvons ici deux difficultés dégagées dans les enquêtes précédentes.

2.2. Grandeurs caractérisant la cohérence d'une onde

Afin de voir si les étudiants différencient les grandeurs caractérisant la cohérence d'une onde, nous avons construit un questionnaire (Q_{10D}, N = 83) présentant plusieurs fiches (Encadré 85). Chacune d'elle caractérise la cohérence temporelle ou la cohérence spatiale d'une source lumineuse. Les fiches portant sur la cohérence temporelle présentent des trains d'ondes (de longueur, d'amplitude ou de fréquence différentes) ou des spectres d'intensité ; les fiches portant sur la cohérence spatiale présentent des sources de différentes dimensions (ponctuelle ou étendue) et largeurs de cohérence (associées à des ondes sphériques ou planes).

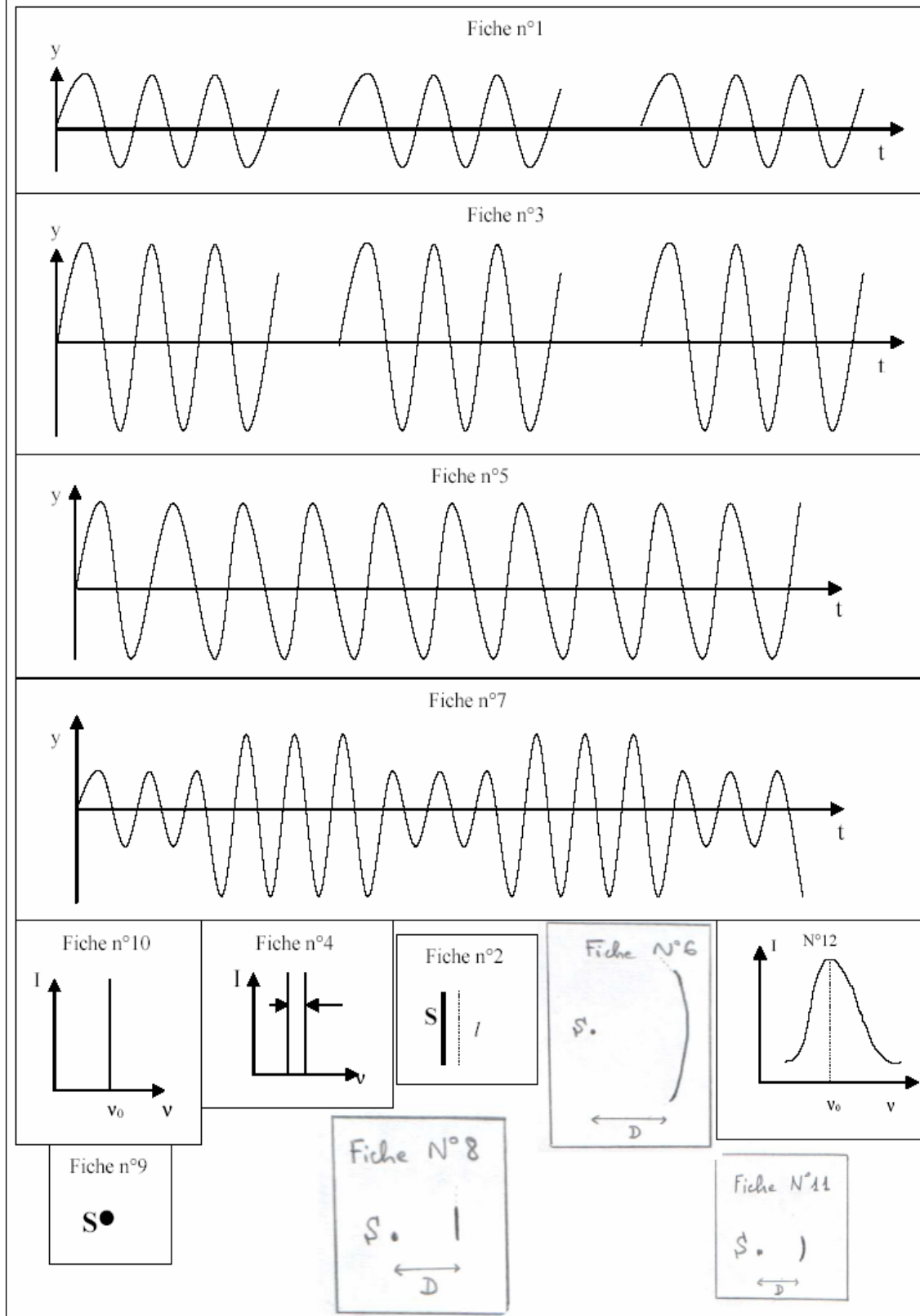
En fait, comme l'analyse des manuels montre que :

- La cohérence spatiale d'une lumière est plus souvent caractérisée par la largeur de la source que par la "largeur de cohérence",
- Le lien entre la longueur des trains d'onde et la largeur du spectre est le plus souvent implicite,

nous nous attendons à un nombre de non-réponse non négligeable. De plus, nous avons préféré de pas introduire le terme « largeur de cohérence » mais la définir. Nous avons ainsi réalisé un premier questionnaire en la définissant par "la portion de la surface d'onde à une distance donnée D de la source où l'amplitude de l'onde n'est pas nulle". Comme cette formulation pose problème car elle n'est valable que pour une source étendue cohérente, nous avons modifié le questionnaire en mettant « *l'ensemble des points situés à une distance donnée D de la source pour lesquels le trajet des ondes émises par les différents points de la source est constant* ». Nous avons obtenu des résultats similaires aux deux formulations et aucune remarque des étudiants.

Le questionnaire comporte trois questions. Dans la première, nous avons demandé aux étudiants ($N = 83$) de déterminer les fiches caractéristiques de la cohérence temporelle (Encadré 85bis). Dans la deuxième question, nous leur avons demandé de déterminer les fiches caractéristiques de la cohérence spatiale. Dans ces deux questions, nous leur avons demandé en plus, de classer les sources par ordre de cohérence croissant. Dans la troisième question, nous leur avons demandé si plusieurs fiches peuvent caractériser une même source et de l'indiquer dans le tableau (Encadré 85ter).

On dispose de plusieurs sources lumineuses et de plusieurs fiches (représentées ci-dessous) sur lesquelles sont donnés des renseignements concernant ces sources. Ce sont : l'élongation de l'onde émise par la source au cours du temps $y(t)$ (fiches n°1,3,5,7), le spectre de l'onde $I(\nu)$ (fiches n°4,10,12), la dimension de la source (fiches n°2,9), la portion de la surface d'onde à une distance donnée D de la source où l'amplitude de l'onde n'est pas nulle (fiches n°6,8,11).



Encadré 85. Les fiches présentant des sources de cohérences temporelle et spatiale différentes

Questions : Indiquez par une croix la (les) fiche(s) qui donne(nt) un renseignement sur la cohérence temporelle des sources. Expliquez.

S'il y en a plusieurs, classez les par ordre de cohérence temporelle croissant. Expliquez.

| Fiche n° | | | Classement par ordre de cohérence temporelle croissant |
|----------|--|----|--|
| 1 | | 7 | |
| 2 | | 8 | |
| 3 | | 9 | |
| 4 | | 10 | |
| 5 | | 11 | |
| 6 | | 12 | |

Encadré 85bis. Question sur la cohérence temporelle posée aux étudiants

3) Plusieurs fiches peuvent-elles caractériser une même source ?

Non, pourquoi ?

Oui, pourquoi ? Lesquelles ? Pour indiquer que deux fiches peuvent caractériser une même source, mettez une croix dans le tableau ci-dessous. Expliquez comment vous l'avez rempli.

| Fiche n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | |

Encadré 85ter. Fiches caractérisant une même source

2.2.1. Cohérence temporelle

Pour ce qui est de la cohérence temporelle, nous considérons qu'une réponse est correcte si les étudiants cochent les fiches 1, 3, 5, et 7 pour les trains d'ondes et/ou les fiches 4, 10, 12 pour le spectre (Tableau 29). Nous voulons voir si les étudiants savent ou non les critères de cohérence temporelle.

Tableau 29. Réponses portant sur la totalité des fiches (à la question sur la cohérence temporelle)

| <i>Fiches</i> | <i>Correct</i> | <i>Faux</i> | <i>Rien</i> |
|---|----------------|-------------|-------------|
| <i>Trains d'onde</i> <i>N°1,3,5,7</i> | 58 | | 2 |
| <i>Spectre</i> <i>N°4,10,12</i> | 50 | | 2 |
| <i>Largeur source</i> <i>N°9,2</i> | | 13 | 2 |
| <i>Largeur cohérence</i> <i>N°6,8,11</i> | | 10 | 2 |

Pour savoir combien il y a d'étudiants qui considèrent deux critères (liés au spectre et au train d'onde), nous avons réalisé le tableau 29bis.

Tableau 29bis. Pourcentage de réponse sur la cohérence temporelle

| | | | |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <i>N = 83</i> | <i>Trains uniquement</i> | <i>Spectre uniquement</i> | <i>Trains et spectre</i> |
| <i>Pourcentage des réponses</i> | 34 % | 17 % | 43 % |

Ces deux tableaux montrent qu'en ce qui concerne la cohérence temporelle, 94 %⁶⁴ (N = 83) des étudiants choisissent des fiches à critères temporels, mais certains peuvent les associer à des fiches à critères spatiaux. Plus précisément, 82 % des étudiants répondent d'une manière correcte (sans fiches à critère spatial). 51 % d'entre eux ne citent qu'un critère (trains d'ondes pour 34% ou spectres pour 17 %) et 43 % ont compris qu'il existe un lien entre les différentes représentations en donnant les deux critères à la fois.

Pour savoir si les étudiants *ont plus de difficultés avec les spectres qu'avec les trains d'ondes*, nous réalisons le Test de χ^2 (Annexe 5). Nous trouvons $\chi^2_{\text{calculée}} = 4.6$ avec une probabilité d'erreur de 5%. D'après la table, la valeur calculée est supérieure à la valeur théorique : $\chi^2 = 3.841$ avec $\nu = 1$. La différence est significative dans ce cas. Nous pouvons dire que les fiches sur les spectres sont plus difficiles à traiter que les fiches sur les trains d'ondes.

Les fiches illustrant la cohérence temporelle sont à classer comme suit : "1=3<7<5" et "12<4<10" et celles de la cohérence spatiale : "2<9" et "11=8<6". Seulement 26 % des étudiants qui ont donné des fiches correctes pour la cohérence temporelle (n = 54) donnent un

⁶⁴ Pour le calcul de ce pourcentage, on s'est intéressé aux fiches à critère temporel. Rappelons que l'étudiant coche en plus les autres fiches sur la cohérence spatiale.

ordre exact pour le degré de cohérence temporel : 9 % pour les trains d'ondes, 12 % pour les spectres, 4 étudiants pour les deux. Les autres étudiants n'ont pas classé (32 %) ou bien ont donné un ordre faux (54 %).

2.2.2. Cohérence spatiale

Pour ce qui est de la cohérence spatiale, nous considérons qu'une réponse est correcte si les étudiants cochent les fiches 9 et 2 pour la largeur de la source et/ou les fiches 6, 8, 11 pour la largeur de cohérence (Tableau 30). Nous voulons voir si les étudiants savent ou non les critères de cohérence spatiale.

Tableau 30. Réponses portant sur la totalité des fiches (à la question sur la cohérence spatiale)

| <i>Fiches</i> | <i>Correct</i> | <i>Faux</i> | <i>Rien</i> |
|---------------------------------------|----------------|-------------|-------------|
| <i>Trains d'ondes N°1,3,5,7</i> | | 22 | 11 |
| <i>Spectre N°4,10,12</i> | | 17 | 11 |
| <i>Largeur source N°2,9</i> | 45 | | 11 |
| <i>Largeur cohérence N°6,8,11</i> | 38 | | 11 |

Pour savoir combien il y a d'étudiants qui considèrent deux variables (largeur source et largeur de cohérence), nous avons réalisé le tableau 30bis.

Tableau 30bis. Pourcentages des réponses sur la cohérence spatiale

| | | | |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|--|
| N = 83 | <i>Largeur source</i> | <i>Largeur cohérence</i> | <i>Largeur source et largeur cohérence</i> |
| <i>Pourcentage des réponses</i> | 23 % | 16 % | 30 % |

69 % citent les fiches à critère spatial. Plus précisément, pour les 50 % des étudiants qui ont répondu correctement, plus de la moitié d'entre eux (39 %) se focalisent sur un seul critère (la largeur de la source 23 %, la largeur de cohérence pour 16 %) et 30 % considèrent deux critères. Un nombre non négligeable d'étudiants (13 %) ne répondent pas à la question.

Pour savoir si les étudiants *ont plus de difficultés avec la largeur de cohérence qu'avec la largeur de source*, nous réalisons le test de χ^2 (Annexe 5). Nous trouvons

$\chi^2_{calculée} = 0.54$. Donc la différence n'est pas significative. Nous ne pouvons pas dire qu'il y a plus de difficultés pour la largeur de cohérence que pour la largeur de la source.

En ce qui concerne le classement des fiches selon un degré de cohérence croissant, 9 étudiants seulement donnent un ordre correct en privilégiant le critère de dimension de la source ('2<9') ; 11 étudiants donnent un ordre faux et 16 autres n'arrivent pas à le faire.

2.2.3. Comparaison des réponses sur la cohérence temporelle et la cohérence spatiale

En regardant les réponses des étudiant pour la cohérence temporelle et la cohérence spatiale, nous pouvons dire que tout se passe comme si les étudiants ne comprennent pas que l'élongation de l'onde émise au cours du temps est une caractéristique temporelle et non spatiale. Nous retrouvons la confusion entre les critères de la cohérence temporelle et la cohérence spatiale due sans doute à la confusion entre les descriptions spatiale et temporelle d'une onde.

Pour savoir si les fiches sur la cohérence spatiale soulèvent plus de difficultés que les fiches sur la cohérence temporelle, on réalise le tableau 31 pour le calcul du Test de χ^2 .

Tableau 31. Total des réponses sur les cohérences temporelle et spatiale

| N = 83 | Correct | Faux / Rien | Total L _i |
|--|---------|-------------|----------------------|
| Cohérence temporelle (Train d'onde) | 58 | 15 | 73 |
| Cohérence spatiale (Largeur de la source) | 45 | 33 | 78 |
| Total C_i | 103 | 48 | 151 |

Le test réalisé conduit à un $\chi^2_{calculée} = 8.24$ supérieure à la valeur théorique : $\chi^2 = 6.63$. Donc la différence est significative. Nous pouvons dire que les fiches sur la cohérence spatiale soulèvent plus de difficultés que celles sur la cohérence temporelle.

Pour voir si un étudiant a effectivement plus de difficultés avec la cohérence spatiale qu'avec la cohérence temporelle, nous réalisons le tableau croisé (Tableau 31bis) des résultats de ces deux questions.

Tableau 31bis. Effectifs observés

| Question 1 \ Question 2 | Correct | Faux | Rien | Total Li |
|-------------------------|---------|------|------|----------|
| Correct | 43 | 0 | 1 | 44 |
| Faux | 27 | 1 | 0 | 28 |
| Rien | 10 | 0 | 1 | 11 |
| Total Cj | 80 | 1 | 2 | 83 |

L'analyse du tableau croisé montre que 37 étudiants qui répondent correctement à propos de la cohérence temporelle donnent une réponse fausse (ou ne répondent pas) à propos de la cohérence spatiale et qu'il n'y a qu'un seul étudiant qui donne une réponse fausse à la première question et une réponse incorrecte à la seconde. Nous pouvons donc dire que les étudiants ont plus de difficultés avec la cohérence spatiale qu'avec la cohérence temporelle.

2.2.4. Caractérisation d'une source par plusieurs fiches

A la question sur la caractérisation d'une source par plusieurs fiches, nous avons trouvé les résultats suivants (Tableau 32) :

Tableau 32. Réponses des étudiants à la troisième question

| N = 83 | Oui | Non | Rien |
|--------------------------------------|------|-----|------|
| Caractérisation par plusieurs fiches | 76 % | 5 % | 19 % |

Un nombre non négligeable d'étudiant (23 %, N = 83) ne répondent pas à cette question.

La moitié des étudiants réalisent des correspondances entre les différentes fiches. Un tableau croisé (Tableau 33) est réalisé pour voir comment ils associent les différentes fiches pour une source donnée.

Tableau 33. Association cohérence temporelle - cohérence spatiale

| Correspondance entre fiches | Largeur de la source | Largeur de cohérence | Train d'onde | Spectre |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|--------------|---------|
| Largeur de la source | 4 | | | |
| Largeur de cohérence | 25 | 12 | | |
| Train d'onde | 116 | 104 | 26 | |
| Spectre | 59 | 39 | 161 | 9 |

L'analyse des 555 associations faites par les 60 étudiants révèle un certain nombre de difficultés. En effet, 51 associations font correspondre à la même source deux fiches de même nature (plus précisément, 27 étudiants font au moins une association, pour une même source, de deux fiches de même nature et 3 autres ne donnent que ce genre d'association). Par ailleurs, 25 associations relatives à 20 étudiants uniquement font correspondre à la même source une fiche sur la largeur de la source à une fiche sur la largeur de cohérence. Cependant 318 associations (avec 52 étudiants) font correspondre à la même source une fiche à critère spatial et, au moins, une fiche à critère temporel et 161 associations (avec seulement 38 étudiants qui réalisent cette association) font correspondre à la même source une fiche du type « train d'onde » à une fiche du type « spectre ». Il semble donc que les étudiants sachent que les notions de cohérence temporelle et spatiale peuvent caractériser une même source et que le modèle des trains d'onde est relié au modèle spectral.

2.3. Bilan

A partir de ces résultats, nous pouvons dire que les étudiants ont une maîtrise limitée des critères de cohérence. En effet :

- une minorité caractérise la cohérence temporelle par deux critères et réussit à classer les sources dans un ordre croissant de cohérence temporelle,
- comme dans les situations expérimentales présentées dans le bilan précédent, les étudiants confondent les critères de cohérences spatiale et temporelle. Cependant, contrairement à ces situations où la dimension de la source était le critère retenu et où "cohérent" semblait correspondre à "ponctuel", les étudiants associent la cohérence spatiale à la description temporelle d'une onde. Signalons par ailleurs que très peu d'étudiants classent les sources dans un ordre croissant de cohérence spatiale et caractérisent cette cohérence par deux critères.

3. Figure d'interférences en cohérence partielle

Afin d'étudier le raisonnement des étudiants sur les interférences lumineuses en éclairage partiellement cohérent, nous avons construits deux questionnaires de type expérimental se rapportant aux trous d'Young⁶⁵. Le premier traite de la cohérence temporelle partielle et s'intéresse à la largeur du champ d'interférence et à l'effet de l'introduction d'une lame mince devant une source secondaire. Le deuxième traite de la cohérence spatiale partielle.

3.1. Cohérence temporelle partielle

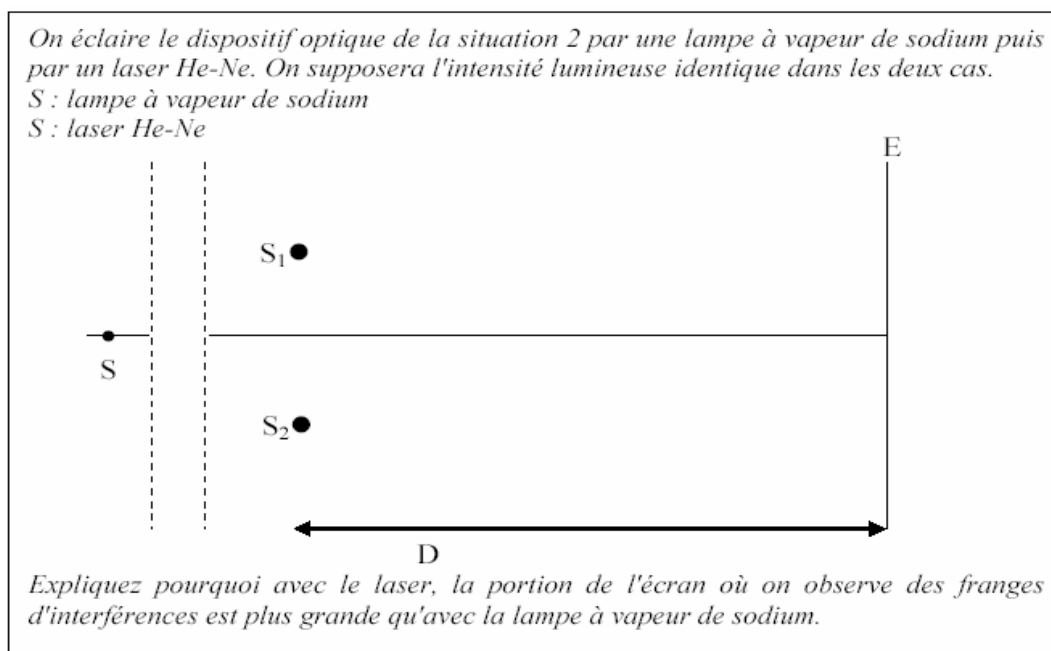
Dans une situation de cohérence totale, les franges sont identiques et bien contrastées, le champ d'interférences n'est limité que par des raisons relevant de l'optique géométrique (autrement dit par la grandeur de la zone commune à deux faisceaux lumineux issues de deux sources secondaires) et énergétique. Dans les situations de cohérence temporelle partielle, le contraste des franges varie avec l'ordre d'interférence (la façon dont il varie dépend du spectre de la source). De plus, il existe une limitation du champ d'interférences supplémentaire liée à la longueur de cohérence de l'onde. Par ailleurs, lorsqu'on introduit une lame mince devant une des deux sources secondaires, la différence de marche supplémentaire introduite produit non seulement un déplacement des franges comme dans le cas de la cohérence totale mais peut aussi provoquer leur disparition.

Nous avons construit un questionnaire (Q₈D) pour voir si les étudiants connaissent cette différence entre ces deux types de situation de cohérence temporelle et s'ils savent l'expliquer par le modèle du train d'onde.

3.1.1. Largeur du champ d'interférences

La première question du questionnaire (Q₈D) se rapporte à la largeur du champ d'interférences. Les étudiants (N = 58) doivent dire pourquoi la largeur du champ d'interférences est plus grande quand le dispositif est éclairé avec un laser qu'avec la lampe à vapeur de sodium (Encadré 86).

⁶⁵ Ces questionnaires ont été inspirés par ceux contenus dans le HdR de Maurines



Encadré 86. Questionnaire illustrant la variation de la largeur du champ d'interférence selon la source primaire

82 % (N = 58) des étudiants répondent à cette question. Trois catégories de justifications peuvent être dégagées.

La première catégorie (64 %) concerne **la cohérence temporelle** de la lumière. 19 % des étudiants donnent en vrac *toutes* les caractéristiques du laser, à savoir sa « *monochromaticité, directivité, cohérence* » et ne prennent pas celle la plus adéquate à la situation. Alors que quelques-uns (4 %) comparent les **fréquences** en disant que « *le laser est formé de plusieurs longueurs d'ondes* », d'autres parlent de « *monochromaticité du laser* » (32 %). Seulement 9 % ont recours au **modèle du train d'onde** en disant que « *la longueur de cohérence temporelle du laser (ou le temps de cohérence temporelle) est plus grande que celle du sodium* ».

La deuxième catégorie de justification relève d'un raisonnement "**géométrique**" puisque les étudiants se concentrent sur la figure. 16 % des étudiants répondent que l'« *interfrange pour une lumière laser est plus grand que pour la lumière du sodium (car la longueur d'onde du laser est plus grande que celle du sodium)* ».

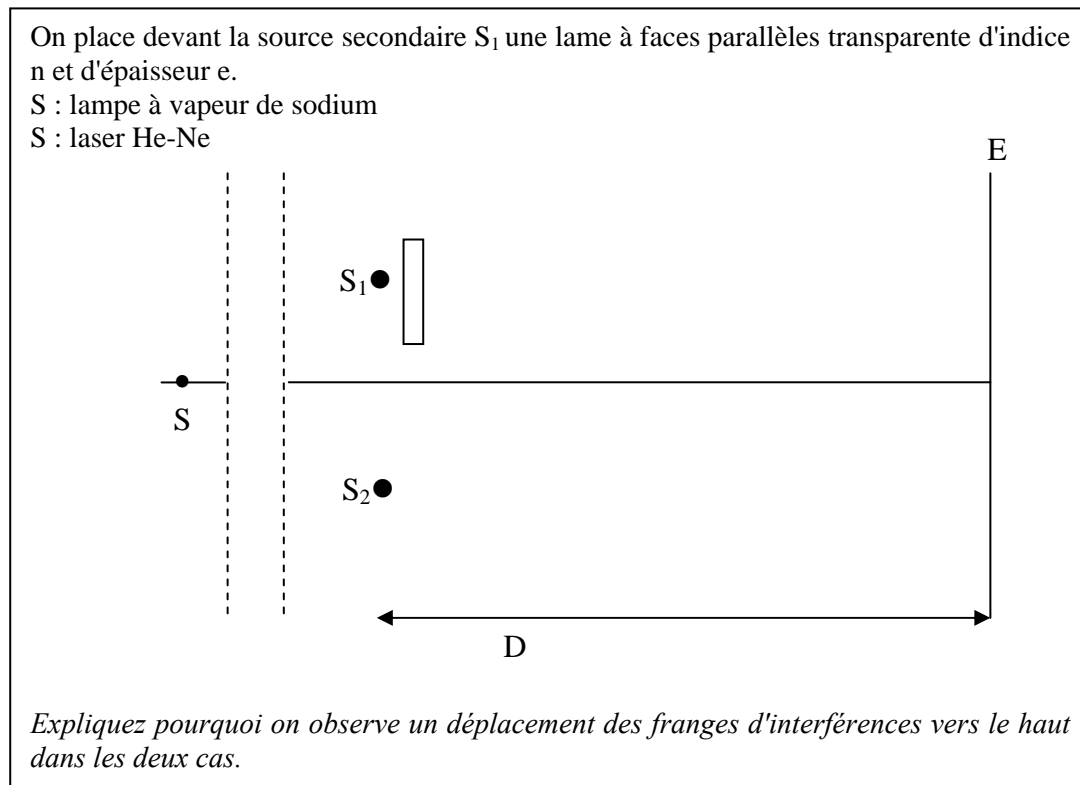
La troisième catégorie de justification relève d'un raisonnement énergétique. Les étudiants se concentrent sur **l'intensité** (12 %) en disant que « *l'intensité du laser est supérieure à celle de la lampe à sodium* ».

Un nombre moindre d'étudiants (18 %, N = 58) ne répond pas à cette question.

Nous retenons tout d'abord que la notion de largeur de champ d'interférences pose problème puisqu'un nombre non négligeable d'étudiants le confondent avec l'interfrange. Par ailleurs, nous notons que les étudiants, même s'ils donnent les caractéristiques propres du laser, ne savent pas celle qui est à utiliser pour une situation spécifique et que le modèle des trains d'onde est très peu utilisé.

3.1.2. lame de verre devant une source secondaire

La deuxième question du questionnaire demande aux étudiants d'expliquer le déplacement des franges d'interférences vers le haut lorsqu'une lame mince est placée devant une source secondaire, que le dispositif soit éclairé par un laser ou une lampe à vapeur de sodium (Q₈D, N = 58, Encadré 87).



Encadré 87. Une lame de verre placée devant S_1 avec une lampe à sodium puis un laser comme source primaire

La troisième question du questionnaire demande aux étudiants d'expliquer la disparition des interférences pour une lame de verre plus petite dans le cas de la lampe que dans le cas du laser (Q₈D, N = 58, Encadré 87bis).

On reprend les deux situations de la question 3. On place successivement des lames d'épaisseurs différentes devant S_1 . On constate que les franges se déplacent mais peuvent aussi disparaître.

Expliquez pourquoi la disparition des franges se produit dans le cas de la lampe à vapeur de sodium pour une lame d'épaisseur plus petite que dans le cas du laser He-Ne.

Encadré 87bis. Situation concernant la disparition de la figure d'interférences

La quasi-totalité des étudiants (90 %, $N = 58$) répondent à la première question. Il y a deux types de justifications : certains étudiants (10 %) raisonnent sur les deux ondes en disant que « *présence de la lame : le rayon lumineux issu de S_1 va être 'retardé' durant la traversée de la lame par rapport au rayon issu de S_2 qui se propage dans l'air* », d'autres (50 %) ne raisonnent que sur une onde en disant que « *le chemin optique augmente* ».

Seuls 10 % ($N = 58$) des étudiants ne répondent pas à cette question.

Pour la deuxième question, le pourcentage des non réponses est considérable (57 %, $N = 58$), mais nous avons analysé quand même les réponses des étudiants.

Pour les étudiants qui ont répondu (43 %, $N = 58$) à cette question, seulement 7 % d'entre eux font référence au **modèle du train d'onde** « *durée des trains d'ondes émis par le laser est considérablement plus grande que celle des trains d'ondes émis par la lampe* » ou « *lorsque l'épaisseur de la lame est trop grande, on dépasse la longueur de cohérence temporelle et alors on n'observe plus des franges. La longueur de cohérence temporelle dépend de la durée du train d'onde* ». Un étudiant préfère la présentation **spectrale** en se justifiant par le fait que « *c'est parce que la largeur spectrale qui influe sur la résolution est plus grande pour la lampe que pour le laser* ».

Quelques uns (5 %) font référence au **champ d'interférence** qui n'est pas le même pour la lampe et le laser « *car son champ d'interférence est plus faible* ».

D'autres justifications renvoient à des difficultés déjà mises en évidence. Certains étudiants raisonnent sur l'interfrange et semblent considérer que tout le dispositif est dans le milieu d'indice n (« *la distance des franges se base sur l'épaisseur de la lame* », 5 %). D'autres tiennent compte du déphasage introduit par la lame et que les deux sources sont en opposition de phase (« *car le déphasage entre les deux ondes qui interfèrent est π* », 3 %). D'autres encore font intervenir le phénomène de la dispersion (« *la disparition est due au phénomène de dispersion* », 5 %). Enfin, 14% des étudiants comparent les **longueurs d'ondes** « *car longueur d'onde du sodium est inférieure à celle du laser* ».

3.2. Cohérence spatiale partielle

La difficulté majeure est de savoir reconnaître si les sources sont cohérentes ou pas. Si elles sont incohérentes, il faut superposer deux systèmes d'interférences et les additionner. Dans ce cas, différentes modifications de la figure d'interférences sont à envisager, comme le déplacement et/ou l'élargissement des franges, une diminution du contraste et dans certains cas leur brouillage.

3.2.1. Source étendue et variation de la distance d

En reprenant le dispositif d'Young, nous avons élaboré un questionnaire (Q₄T, N = 21) où nous nous intéressons à une source primaire étendue et nous faisons varier la distance d (distance séparant la source aux fentes d'Young) (Encadré 88). Nous avons demandé aux étudiants d'expliquer pourquoi les franges disparaissent quand nous diminuons la distance d .

On s'intéresse au dispositif des fentes d'Young. On éclaire la fente source grâce à une lampe à vapeur de sodium et à un condenseur (non représentés). La fente source a une largeur s et les fentes d'Young sont distantes de a . La distance fente source-fentes d'Young est d et la distance fentes d'Young-écran d'observation est D .

On observe sur l'écran des franges d'interférence.
On diminue la distance ' d ', les franges disparaissent. Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma si nécessaire.

Encadré 88. Variation de d dans le cas d'une source primaire étendue

La situation proposée est une situation "classique" de l'enseignement. Pour répondre, il est nécessaire de décomposer la source étendue en une infinité de sources ponctuelles incohérentes et de considérer que la figure d'interférences observée sur l'écran est la superposition des figures d'interférences dues à chacune de ces sources. Ces figures ont le même interfrange et sont décalées les unes par rapport aux autres. Les figures d'interférences dues à chacun de ces points-sources se rapprochent tout en gardant le même interfrange : les franges réapparaissent.

Cette question a été déjà posée par Maurines (2001) dont les résultats se trouvent dans son HDR. Nous rappelons qu'elle a trouvé qu'une moitié seulement des étudiants ($N = 40$) justifie la question sur la raison de la disparition des franges en décomposant la source. De plus, un nombre non négligeable d'étudiants considère que la distance d (distance source – fentes d'Young) n'a aucune influence : « *tout se passe comme si la cohérence spatiale était la seule caractéristique de la source* ».

Pour notre part, nous n'avons pu distribué ce questionnaire qu'à un nombre restreint d'étudiants ($N = 21$). Nous ferons quand même son analyse.

24% des étudiants se centrent sur la **source** en insistant sur les conditions de Gauss (« *avoir les conditions des Gauss* », 5 %) et sur la largeur de la source (« *il faut que $a \ll d$ pour qu'on peut faire l'approximation sur θ* », 9 %). 10 % font un raisonnement physiologique : ils remarquent l'influence de l'extension de la source sur la visibilité des franges (« *visibilité diminue* »). Mais aucun étudiant ne fait appel à la décomposition de la source étendue en sources élémentaires ponctuelles.

24 % des étudiants raisonnent sur la **figure** d'interférences. 14% font référence à l'interfrange, mais parfois ils utilisent des relations erronées : « *l'interfrange dépend de 'd' par $i_0 = \frac{\lambda(d+D)}{a}$* ». 10% font référence au champ d'interférence : « *le champ d'interférence qui diminue* ».

Un petit nombre d'étudiants (10 %, $N = 21$) ne répond pas à cette question.

3.2.2. Source étendue et variation de la distance a

En utilisant la même situation de référence que précédemment, nous avons posé aux étudiants la question suivante : « *Peut-on en diminuant l'écartement "a" des fentes faire réapparaître les franges ? oui non pourquoi ? Aidez vous d'un schéma si nécessaire* » (Q₄T, $N = 21$).

L'interfrange des figures d'interférences dues à chaque point-source augmente et les figures restent centrées sur les mêmes maximums correspondant aux ordres d'interférences zéro. Cela revient à dire que le décalage entre les figures d'interférences devient négligeable devant leur périodicité : les franges réapparaissent.

La majorité des étudiants (76 %, N = 21) affirment que l'on peut faire réapparaître les franges en diminuant la distance a . La plupart utilisent un raisonnement "**géométrique**". Par exemple, 10 % des étudiants disent que « les *rayons des deux fentes se coupent de nouveau* » et 14 % d'entre eux disent que « *l'angle d'incidence doit diminuer* ». Un autre raisonnement se réfère à l'**interfrange**. En effet, un nombre important d'étudiants (38 %) donnent une condition pour apparaître les franges « *si on a une proportionnalité entre la diminution de "a" et la diminution de "d"* » ou donne la relation reliant l'interfrange à la distance a (parfois avec une relation fautive $i_0 = \frac{\lambda(d+D)}{a}$).

3.2.3. Bilan

Le questionnaire sur la largeur du champ d'interférences et l'effet d'une lame mince montre que le modèle des trains d'ondes n'est pas opératoire.

Le questionnaire sur la cohérence spatiale partielle montre de nouveau que les étudiants ont des difficultés à décomposer la source étendue en points-sources et à utiliser correctement la relation donnant l'interfrange. Par ailleurs, la question se pose d'une assimilation des conditions de Gauss aux conditions de cohérence spatiale.

PARTIE 8
PROPOSITIONS PEDAGOGIQUES

1. Introduction

Les recherches en didactique des sciences se sont développées à partir de l'étude des conceptions des élèves ou des étudiants. Ces travaux ont montré à quel point la présence de ces conceptions pouvait constituer des obstacles à l'apprentissage. Si certains de ces obstacles peuvent être évités car induits ou renforcés par l'enseignement, d'autres ne le peuvent pas. Comme le recommande Martinand (1993), il est alors souhaitable d'en tenir compte pour définir des objectifs d'enseignement.

L'analyse des programmes et manuels d'enseignement a montré une grande variété d'approches. En avançant les quelques suggestions pédagogiques qui suivent, nous mettons l'accent sur des points qui nous paraissent importants et qui ne sont pas toujours explicités ou pris en compte dans l'enseignement actuel.

Rappelons auparavant que les recherches en didactique des sciences mettent l'accent sur l'importance de ne pas introduire un modèle de manière frontale et théorique aux étudiants. Il est souhaitable de leur présenter des expériences et si possible de leur permettre de les réaliser eux-mêmes en travaux pratiques. Il est souhaitable également de les aider à mettre en relation le modèle et le champ expérimental auquel il se rapporte en interrogeant une situation grâce à des questions qualitatives. Nous signifions par là qu'il est souhaitable d'explicitier les différentes grandeurs physiques dont dépend une situation et les liens qu'elles entretiennent ou n'entretiennent pas. Les différents questionnaires que nous avons élaborés pour notre recherche peuvent être utilisés à cette fin. Ils proposent des questions pouvant contribuer à la définition d'un contenu d'enseignement. Les questions peuvent être posées à différents moments de l'apprentissage, en cours, en séances de travaux pratiques ou de travaux dirigés.

Les recherches en didactique soulignent également l'importance d'utiliser différents systèmes sémiotiques et d'aider les étudiants à faire des liens entre eux. C'est pour cela que nous suggérons d'utiliser non seulement le registre algébrique mais aussi le registre graphique et l'utilisation de simulations.

Nous allons à présent faire quelques propositions en suivant l'ordre de présentation que nous avons choisi pour le chapitre sur la physique des interférences lumineuses.

2. Définition et conditions d'obtention

Lors de l'étude des interférences lumineuses, nous proposons de donner aux étudiants une définition accompagnée des conditions d'obtention. Le mieux est que cette définition soit de type expérimental, mentionnant l'existence de plusieurs types de situations d'interférences. Ainsi, on peut obtenir des interférences avec deux sources ponctuelles à distance finie et émettant des ondes sphériques, mais aussi avec deux sources ponctuelles à l'infini et émettant des ondes planes. Il est nécessaire de souligner que ces deux sources ne peuvent être indépendantes que dans le cas de deux lasers identiques et que dans le cas général, elles sont obtenues à partir d'un dispositif interférentiel à partir d'une source primaire qui peut émettre une lumière monochromatique ou non, être ponctuelle ou non. Il nous semble alors indispensable d'accompagner la donnée de ces conditions expérimentales du phénomène d'interférences de la description de l'allure de la figure d'interférences. C'est une approche que nous avons rencontrée chez Hecht (2005). Ainsi, pour la première condition, qui est *d'avoir la même fréquence*, il est précisé que dans le cas d'une lumière blanche, la figure globale en lumière blanche « *ne sera pas aussi fine ni aussi étendue qu'un motif monochromatique, mais la lumière blanche peut produire des interférences observables* » (op. cit. p. 406).

Pour la deuxième condition qui concerne l'amplitude, condition qui est d'ailleurs rarement mentionnée par les autres manuels, il est dit que quand les ondes superposées ont les mêmes amplitudes (ou des amplitudes presque égales), « *on obtient les figures les plus nettes (...). Les régions centrales des franges sombres et claires correspondent alors respectivement à des interférences complètement destructives et constructives, ce qui produit un contraste maximum* » (idem.).

Pour la troisième condition qui est d'avoir deux sources secondaires ayant un déphasage constant au cours du temps, l'auteur mentionne qu'« *il n'est pas nécessaire que les deux sources soient en phase. On obtiendra une figure d'interférence quelque peu déplacée, mais néanmoins identique à la précédente s'il existe une différence de phase initiale entre les sources, tant que celle-ci demeure constante* » (idem.). Toutefois, nous remarquons que la condition sur la petitesse de la source n'est pas évoquée. Il nous semble qu'il aurait été préférable de préciser que dans certaines conditions, des interférences peuvent être obtenues avec une source primaire étendue, et que la largeur de la source joue également sur le contraste et la localisation des franges.

Par ailleurs, nous suggérons aussi de montrer aux étudiants dès le début que non seulement le temps de réponse du récepteur mais aussi son pouvoir de résolution intervient

dans l'observation des interférences lumineuses. Ainsi, des interférences non visibles à l'œil peuvent l'être à l'aide d'une loupe.

3. Dispositifs interférentiels

Pour n'importe quel dispositif interférentiel, l'idée essentielle est de *se ramener à chaque fois à la situation des interférences lumineuses produites par deux sources*. Comme nous l'avons vu, cela n'est pas toujours fait par les manuels, surtout dans le cas des lames minces. Il nous semble alors indispensable dans ces conditions *de faire au préalable un travail spécifique relevant du cours d'optique géométrique* qui est celui de chercher les images de la source primaire données par les dispositifs interférentiels. Bien souvent, les étudiants voient pour la première fois lors de l'étude des interférences lumineuses qu'une lentille coupée en deux (bilentilles de Billet, de Meslin) ou que deux prismes accolés (biprismes de Fresnel) peuvent produire deux images d'une source primaire. Il nous semble que ce travail préparatoire réalisé en lumière totalement incohérente pourrait aider les étudiants à identifier les sources secondaires dans une situation d'interférences.

Par ailleurs, comme Maurines (2001) a montré que les étudiants ont tendance à considérer que l'existence d'une image ne peut s'expliquer qu'à l'aide de l'optique géométrique et qu'ils donnent sens au concept de rayon au travers d'une théorie corpusculaire de la lumière, il nous semble souhaitable d'inscrire la recherche des sources secondaires dans une vision ondulatoire de la lumière. Nous signifions par là qu'il nous semble souhaitable de préciser aux étudiants que l'optique géométrique trouve son sens dans le cadre d'une théorie ondulatoire de la lumière et que la notion d'image peut être utilisée dans le cas d'une onde qui se réfléchit sur un miroir ou se propage à travers une lentille. Nous souscrivons ainsi aux propositions de Maurines d'utiliser conjointement les concepts de rayon et de surface d'onde et à la démarche suivie par Hecht pour la formation des images (les schémas proposés font apparaître des rayons et des surfaces d'onde).

Si ce que nous suggérons était fait, les étudiants aborderaient le cours sur les interférences lumineuses en sachant qu'une onde lumineuse peut donner deux ondes par réflexion ou réfraction. Il resterait alors à s'intéresser à ce qui se passe dans la zone de superposition des ondes secondaires et à montrer que le résultat observé dépend de la cohérence des ondes secondaires.

La question peut se poser de *choisir le dispositif* qui donnerait lieu à la première étude du phénomène d'interférences lumineuses. Nous rappelons que les dispositifs interférentiels ont chacun des avantages et des inconvénients. Le dispositif d'Young est celui qui pourrait sembler le plus simple car les sources secondaires sont visibles mais il fait intervenir la diffraction qui n'est pas toujours différenciée du phénomène d'interférences par les étudiants. Les lames minces font intervenir le phénomène de réflexion et de réfraction partielles qui n'est pas souvent pris en compte par les étudiants. Le Michelson ne fait pas intervenir ce phénomène mais est un dispositif de géométrie complexe et délicat à manipuler. Les miroirs de Fresnel est un dispositif pour lequel il n'y a ni diffraction, ni réflexion et réfraction partielles. Cependant, il fait intervenir des sources secondaires virtuelles et les étudiants ont des difficultés⁶⁶ avec la formation de ce type d'image.

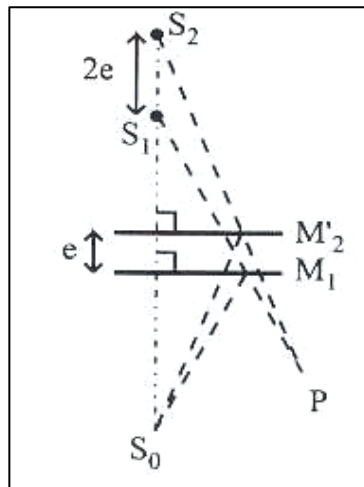
Si nous avons à choisir un dispositif pour introduire les interférences, nous prendrions les lentilles de Meslin ou de Billet car elles permettent d'avoir des sources secondaires réelles et non virtuelles. Ensuite, nous retiendrons celui des miroirs de Fresnel car il ne fait intervenir que la réflexion de la lumière, phénomène supposé connu des étudiants lors de l'introduction des interférences lumineuses. Il nous semble en effet préférable dans le cadre d'un programme dans lequel l'étude des interférences précède l'étude de la diffraction de ne pas introduire le dispositif d'Young qui fait intervenir le phénomène de diffraction dans le chapitre sur les interférences. Nous suivrions en cela la méthode suivie par Biot (1824).

Dans le chapitre sur la diffraction, nous ne négligerions pas le dispositif des trous d'Young car les figures de diffraction par un trou et d'interférences produites par deux sources n'ont pas la même symétrie. Cela n'est pas toujours fait par les manuels et pourtant cela pourrait aider les étudiants à mieux différencier les phénomènes de diffraction et d'interférences.

Lors de *l'interprétation* de la production d'une figure d'interférences par chacun de ces dispositifs, il serait préférable d'utiliser *différents schémas*. Par exemple, le premier mettrait l'accent sur le fait que les interférences sont produites par deux sources et que deux faisceaux se superposent, le deuxième mettrait en avant qu'un point du champ d'interférences est le point de concours de deux rayons issus des deux sources secondaires. Il serait utilisé pour calculer la différence de marche entre les ondes émises par les deux sources ou mettre en

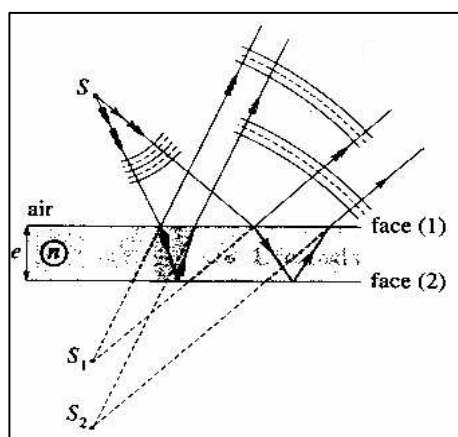
⁶⁶ De même, Mistrioti (2003) a trouvé que les étudiants de licence ont des difficultés avec les miroirs plans : ils ne dessinent pas l'image virtuelle d'un objet.

évidence le lieu de localisation des interférences. Ainsi, pour les lames minces à faces parallèles, nous pourrions réaliser le schéma donné dans l'encadré 89 sur lequel les *sources secondaires* apparaissent.



Encadré 89. Interférences avec une lame à faces parallèles avec sources secondaires
(Desmeules 1997, p. 120)

Nous suggérons de faire *l'étude des interférences produites par les miroirs de Fresnel avec une source à distance finie et infinie*, c'est à dire de faire l'étude des interférences par superposition d'ondes planes avec ce dispositif. Cela devrait aider les étudiants à aborder par la suite l'étude des interférences avec les dispositifs à division d'amplitude. Dans le cas des lames minces et du Michelson, il est souhaitable de choisir des schémas permettant aux étudiants de comprendre qu'il y a une superposition de plusieurs ondes. Ceux avec des rayons et des surfaces d'ondes nous semblent permettre de le montrer (Encadré 90).



Encadré 90. Superposition de plusieurs ondes avec les lames minces (Pérez 1991, p. 275)

En ce qui concerne la forme d'une *figure d'interférences*, il nous semble important de proposer aussi aux étudiants des questions qualitatives leur demandant de prévoir ce que

devient une figure si tel ou tel paramètre est modifié. Le même travail peut être fait à propos de la localisation des franges et de l'effet de l'élargissement de la source.

4. La cohérence

4.1. Cohérence temporelle et cohérence spatiale

En ce qui concerne la **cohérence temporelle**, il serait souhaitable, comme l'a indiqué Maurines (2001), d'explicitier l'existence de deux types d'analyse : dans le premier, l'onde peut être modélisée par une succession de trains d'ondes, de fréquence ν_0 et de durée τ . Dans le deuxième, l'onde résulte de la superposition d'ondes monochromatiques ayant des fréquences comprises dans une bande de largeur $\Delta\nu$ et centrée autour de la fréquence ν_0 . Il nous semble ainsi nécessaire de préciser l'existence de deux modèles et le lien entre la largeur spectrale et la durée d'un train d'onde.

Il serait souhaitable que les étudiants connaissent le modèle du train d'onde mais sachent aussi l'utiliser pour interpréter différents faits expérimentaux : largeur du champ d'interférences, variation du contraste, disparition des interférences quand une lame mince est introduite devant un des trous d'Young.

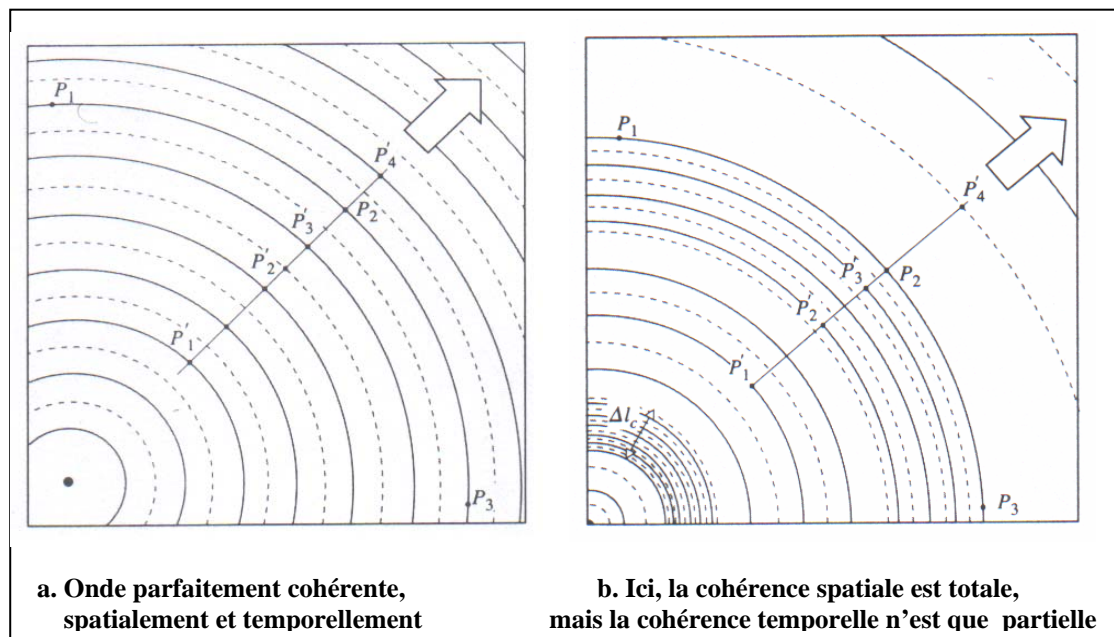
En ce qui concerne la cohérence spatiale, nous adhérons aux propositions de Maurines (2001) : « *souligner que la cohérence spatiale n'est pas une caractéristique de la source mais du système {source-dispositif interférométrique-point d'observation}* ». Cela pourrait être réalisé en proposant aux étudiants des questions qualitatives sur l'influence des différents facteurs susceptibles d'intervenir sur l'observation d'une figure d'interférences en accompagnement d'expériences visant à explorer ce point.

4.2. Différentiation cohérences spatiale et temporelle

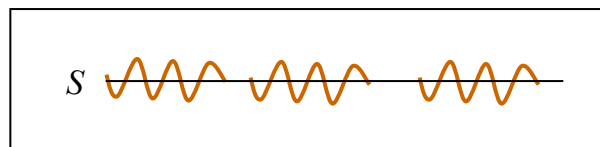
Nous avons rencontré un manuel dans lesquels des schémas sont proposés pour mettre en évidence la différence entre la cohérence temporelle et la cohérence spatiale.

Pour une onde cohérente spatialement, c'est à dire une onde issue d'une source ponctuelle, Hecht (2005) représente des surfaces d'onde centrées sur un point (Encadré 91). La flèche indiquée sur le schéma précise qu'il faut s'intéresser à ce qui se passe le long d'un

rayon (Encadré 92) lorsqu'on s'intéresse à la cohérence temporelle. Lorsque la source garde toujours la même fréquence (Encadré 91a), il y a une corrélation entre les points P_1' et P_4' : la cohérence temporelle est totale. Lorsque la source change de fréquence au cours du temps (Encadré 91b), il n'y a plus de corrélation et la cohérence temporelle est partielle. Des schémas inspirés de ceux-ci pourraient être envisagés pour l'émission de trains d'ondes. Ils correspondraient à des surfaces d'onde en « paquets ».



Encadré 91. Cohérences spatiale et temporelle (Hecht 2005, p. 407)



Encadré 92. Propagation d'un train d'onde le long d'un rayon issu de S

Terminons en disant qu'il nous semble préférable de souligner que les deux notions de cohérence temporelle et spatiale sont à considérer simultanément pour tout dispositif interférentiel et que ce n'est que par simplification que l'on ne tient compte que de l'une ou de l'autre quand on étudie une figure d'interférences. Rappelons en effet que la pratique habituelle des manuels consiste à introduire chaque notion avec un dispositif donné (la cohérence spatiale avec le dispositif d'Young et la cohérence temporelle avec l'interféromètre de Michelson) et à ne pas présenter une vue d'ensemble des facteurs influant sur le contraste de la figure d'interférences⁶⁷.

⁶⁷ Nous n'avons trouvé qu'un manuel dans lequel cette discussion est faite : Provost et Provost (1980)

5. Les simulations

Lorsqu'il n'est pas possible de faire des expériences, l'enseignant peut avoir recours aux simulations. Elles peuvent d'ailleurs être utilisées également en travaux pratiques par les étudiants car elles permettent à l'apprenant de tester les limites du modèle par rapport à la réalité et les limites de sa propre compréhension du modèle. Parmi les différentes simulations sur les interférences lumineuses que nous avons examinées, nous en avons trouvé quelques unes qui ont retenu notre attention.

Ainsi, nous avons trouvé un site⁶⁸ qui permet de réaliser l'expérience des trous d'Young et d'agir sur les différentes grandeurs mises en jeu, à savoir la distance séparant les trous de l'écran, la distance entre les trous, la nature de la lumière, etc. Ce qui a particulièrement retenu notre attention, c'est l'étude du lien entre la nature de la lumière émise par la source primaire et le contraste de la figure d'interférences. La lumière émise par la source primaire est modélisée sous de forme de trains d'ondes dont on peut faire varier la fréquence et la durée, les photos des figures d'interférences sont données. Il faudrait cependant enrichir le travail proposé aux étudiants avec d'autres exemples portant sur la cohérence spatiale.

Une autre simulation, inspirée des travaux réalisés en didactique de la physique (Méheut1996 ; Buty 2000), est celui du modèle physique créé par Viudez (2003) et nommé EnvIA (Environnement Informatique d'Apprentissage). Son objectif est de « *ne pas substituer l'environnement à l'enseignant mais de compléter la démarche de ce dernier. Il permet aux étudiants de manipuler une représentation en "3D" ou en "projection 2D"* » (op. cit. p. 151). L'idée est de travailler le modèle abstrait, en permettant aux étudiants d'agir sur certains paramètres physiques. Ainsi, en les modifiant, ils pourront visualiser l'évolution d'une grandeur, d'une figure ou d'un objet. Par exemple, l'étudiant pourra se rendre compte, en comparant la simulation aux phénomènes réels, de l'écart qui existe du point de vue de la répartition de l'intensité: « *les maximums ne sont pas des traits et le contraste n'est pas constant, là encore car les franges sont définies comme étant des intersections de plans* » (ibid. p. 154). Outre ces avantages, ce genre de manipulation permet à l'étudiant :

⁶⁸ www.u-bourgogne.fr/condorcet/ancien/labovirtuel.html.

« - de voir un ensemble minimal de combinaisons potentielles et ainsi d'envisager les paramètres de la manipulation (à quels paramètres correspondent les différentes possibilités),

- d'acquérir le modèle qualitatif du dispositif proposé dans l'application, et de le mettre en lien avec le modèle quantitatif de référence (mettre en relation l'utilisation d'une lentille en entrée avec la valeur de l'angle d'incidence par exemple),

- de voir qu'il y a un écart entre ce que l'étudiant peut envisager avec cette application et la mise en place concrète des configurations ; par exemple, mettre en place une source au niveau de l'application ne demande qu'un simple "clic" alors qu'il faut veiller dans la réalité au bon alignement de la lampe avec les miroirs,

- de voir que l'on peut obtenir des phénomènes non prescrits par le polycopié, et faire ainsi la distinction entre le champ expérimental de référence et sa restriction institutionnelle. Ainsi, il est possible d'observer des franges de coin d'air avec la lampe au sodium, même si, dans le document polycopié de TP, on utilise, pour cette partie du TP la lampe au mercure » (ibid. p. 155). Bien que la simulation ait été appliquée à l'interféromètre de Michelson, elle peut être utilisée pour l'étude des coins d'air. Cette simulation pourrait servir de base à l'élaboration d'autres simulations mettant en jeu d'autres dispositifs interférentiels.

Dans une recherche effectuée par Dourlent (1998), l'auteur présente un programme de simulation écrit en langage symbolique Maple. Il montre notamment que :

- « avec le dispositif d'Young, l'interfrange ne dépend pas du nombre de sources » (op. cit. 1845),
- « les franges claires deviennent de plus en plus étroites à mesure que le nombre de sources augmente lorsqu'on se trouve au voisinage du cas « interférences à l'infini » » (idem.).

Cette simulation est intéressante dans la mesure où elle permet de montrer aisément la modification de la figure d'interférences lors de l'introduction d'un troisième trou. Les étudiants seront ainsi mieux à même de décrire ce qui se passe sur l'écran d'observation.

Le Rille (2002) utilise aussi le programme Maple pour expliquer le phénomène d'interférences de deux ondes monochromatiques synchrones. L'ajout positif est que ce programme permet de tracer rapidement des courbes (variation de l'intensité en fonction du déphasage). Et c'est « plus qu'une analogie, c'est, du point de vue théorique, formellement le même phénomène d'onde électromagnétique sinusoïdale qui intervient pour la lumière et à l'oscilloscope » (op. cit. p. 395).

6. Histoire des sciences

La question se pose à présent d'examiner ce que l'histoire des interférences lumineuses peut apporter comme éléments de réflexion sur l'enseignement à dispenser sur les interférences lumineuses. Notons tout d'abord que des textes relevant de l'histoire des interférences peuvent être présentés aux étudiants afin de leur montrer comment les concepts utilisés de nos jours se sont peu à peu construits. Nous ne détaillerons pas plus ce point car l'élaboration d'une séquence de ce type nécessite une réflexion approfondie qui pourrait constituer le prolongement de l'analyse historique que nous avons réalisée.

Par ailleurs, on peut souligner deux points.

Les scientifiques autrefois, notamment Young et Fresnel, faisaient des analogies entre le son, la lumière, les rides à la surface de l'eau. On peut se demander s'il ne serait pas souhaitable d'introduire le phénomène d'interférences en premier lieu avec les ondes mécaniques et de s'appuyer sur l'interprétation de ce phénomène pour introduire l'interprétation des interférences lumineuses. Nous suivrions en cela la méthode suivie actuellement par le programme de terminale S dans le cas de la diffraction. Il ne semble pas que ce soit la méthode actuellement suivie à l'université : les interférences ne sont abordées uniquement qu'en optique. Pourtant, cette méthode aurait l'avantage de montrer que les ondes de diverses natures peuvent donner lieu au phénomène d'interférences mais que, dans le cas de la lumière, les conditions d'obtention sont particulières.

Les scientifiques s'appuyaient sur des schémas pour expliquer ce qui se passe. Si certains de ceux-ci subsistent dans l'enseignement, d'autres ont disparu. Il en est ainsi des schémas utilisés par Young lors de l'introduction du principe de superposition des ondes et l'étude qualitative des interférences. Il en est ainsi aussi des schémas utilisés par Fresnel pour expliquer où se trouvent les franges obscures et brillantes obtenues avec le dispositif des miroirs de Fresnel. Ces schémas sont susceptibles pourtant d'aider les étudiants à donner du sens aux calculs analytiques.

A titre d'indication, nous pouvons mentionner qu'une des manières de comprendre l'obtention des franges d'interférences avec le miroir de Fresnel serait de donner un schéma explicitant que les franges sont aux intersections des rayons réfléchis qui viennent des images de la source, comme celui qui a été fait par Fresnel (voir figure 4, p. 104).

CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé pour le mémoire de DEA sur le concept de déphasage nous a conduit à centrer le domaine d'étude de notre thèse sur le phénomène des interférences lumineuses. C'était en effet un domaine peu exploré sur le plan de la didactique et réputé difficile à enseigner. Nous avons décidé de nous intéresser aux difficultés rencontrées par les étudiants au niveau de l'enseignement supérieur en Tunisie et en France.

En partant de l'hypothèse que les difficultés soulevées par l'étude des interférences lumineuses peuvent relever du type d'onde (lumière), de modèle (ondulatoire), de situation (superposition cohérente des ondes) ainsi que de la façon de produire deux sources secondaires à partir d'une source primaire (donc du trajet suivi par la lumière dans un dispositif optique donné) et à l'envisager en présence d'interférences, nous avons fait une revue des travaux réalisés en didactique de la physique sur les conceptions des apprenants dans le domaine des ondes. Nous avons ainsi constaté que deux tendances de raisonnement spécifiques des ondes avaient été dégagées : un raisonnement mécaniste qui consiste à assimiler l'onde qui se propage à un objet matériel en mouvement et un raisonnement géométrique qui consiste à ne pas utiliser le concept de phase et le principe de superposition des ondes. Nous avons aussi remarqué que les difficultés inhérentes au raisonnement à plusieurs variables se manifestaient également et qu'il existait des difficultés liées à l'interprétation des schémas utilisés dans le cas de la diffraction. Nous avons alors supposé que des tendances similaires de raisonnement devaient exister dans le cas des interférences lumineuses.

Pour pouvoir dégager et analyser les difficultés des étudiants, nous avons besoin d'un cadre de référence sur la physique des interférences lumineuses. Le constat que la physique des interférences lumineuses est un domaine dont la présentation dans les manuels apparaît souvent comme éclatée, nous a conduit à en donner une vision unifiée et organisée autour d'un petit nombre de connaissances. Nous avons également été amenée à expliciter certains points délicats et à en rectifier d'autres.

Plusieurs travaux en didactique soulignant l'intérêt d'un détour par l'histoire des sciences pour avancer des hypothèses sur les difficultés susceptibles d'être rencontrées par les étudiants aujourd'hui, nous nous sommes intéressée à l'histoire des interférences lumineuses et avons parcouru des textes de natures différentes (textes originaux et études historiques).

Nous avons ainsi noté que Newton expliqua les couleurs produites par les lames minces dans le cadre d'une théorie corpusculaire de la lumière en suivant la lumière incidente et en n'utilisant pas le principe de superposition des ondes. Nous avons aussi remarqué que Young, en s'appuyant sur les travaux réalisés en acoustique, a introduit le principe de superposition des ondes dans le domaine de l'optique et a ainsi pu interpréter les couleurs des lames minces grâce à une étude graphique. Nous avons par ailleurs constaté que Fresnel a réalisé une étude algébrique des phénomènes d'interférences et de diffraction, qu'il a dégagé les conditions d'obtention des interférences en distinguant les dispositifs à division du front d'onde et ceux à division d'amplitude et a rendu compte de la condition sur la source unique en introduisant le modèle du train d'onde. Nous avons enfin noté que les successeurs de Fresnel ont mis du temps à s'approprier son travail.

L'étude des programmes nous a permis de préciser les points étudiés par les étudiants et de montrer qu'il existe une similarité dans les programmes tunisiens et français concernant l'ordre et les thèmes abordés. Cependant, l'étude des manuels révèle une diversité d'approches possibles et que certaines d'entre elles peuvent être à l'origine de difficultés. Par exemple, alors qu'il nous est apparu que l'explication de l'existence d'une figure d'interférences nécessite l'explication de la cohérence d'une onde et donc l'utilisation de plusieurs modèles et concepts (pour la cohérence temporelle : le modèle spectral, le modèle des trains d'ondes et par suite la longueur de cohérence ; pour la cohérence spatiale : la largeur de cohérence), ces concepts et modèles ne sont pas toujours introduits et quand ils le sont ne sont pas toujours utilisés par la suite.

L'étude empirique a consisté en deux séries d'enquêtes constituant chacune un niveau d'étude du phénomène. La première enquête a essentiellement porté sur les interférences lumineuses en éclairage totalement cohérent et sur les conditions d'obtention des interférences. La deuxième enquête a porté sur les grandeurs caractérisant la cohérence d'une onde et sur les figures d'interférences en éclairage partiellement cohérent. Ces enquêtes ont été réalisées à l'aide de questionnaires papiers-crayons portant sur les sept thèmes suivants :

Thème 1 : Les conditions d'obtention d'une figure d'interférences

Thème 2 : L'obtention d'une figure d'interférences avec différents dispositifs interférentiels

Thème 3 : Les caractéristiques d'une figure d'interférences en éclairage totalement cohérent

Thème 4 : La cohérence des ondes et le principe de superposition

Thème 5 : Les grandeurs caractérisant la propagation d'une onde

Thème 6 : Les caractéristiques d'une figure d'interférences en éclairage partiellement cohérent

Thème 7 : Les grandeurs caractérisant la cohérence spatiotemporelle.

Un bilan partiel a été effectué après chaque enquête. Le rapprochement des résultats obtenus à la première enquête nous a conduit à dégager un modèle de raisonnement de sens commun dans le domaine des interférences lumineuses. Ce modèle comprend plusieurs caractéristiques liées les unes aux autres. Deux d'entre elles sont spécifiques au domaine des interférences lumineuses, les autres se rencontrent de manière transversale dans différents domaines de la physique.

En ce qui concerne les caractéristiques propres aux interférences lumineuses, les étudiants tendent à penser qu'il suffit d'avoir deux sources ponctuelles pour avoir des interférences. Ainsi, pour eux, il peut y avoir des interférences avec deux sources indépendantes (deux lampes à vapeur de sodium ou deux lampes de fréquences différentes), et il ne peut pas y en avoir avec deux sources secondaires étendues même si celles-ci sont cohérentes (deux trous d'Young éclairés par une onde monochromatique). Par ailleurs, les étudiants n'utilisent pas le principe de superposition des ondes : tout se passe pour eux comme si les interférences étaient créées au niveau du dispositif et que l'onde incidente ainsi modulée en amplitude se propageait en se dilatant. Si ce raisonnement ne semble pas apparaître chez les étudiants que nous avons interrogés pour le dispositif des trous d'Young, il se manifeste chez ceux interrogés par Ambrose et al. aux Etats-Unis. Il se révèle cependant un peu pour les miroirs de Fresnel et beaucoup pour les lames minces et à des questions inhabituelles portant sur les facteurs influant sur l'allure d'une figure d'interférences. Ce raisonnement est voisin de celui dégagé par Maurines pour la diffraction et de celui utilisé autrefois par Newton.

En ce qui concerne les caractéristiques se manifestant de manière transversale aux différents domaines de la physique, nous constatons que les étudiants tendent à avoir une pensée syncrétique ou à se focaliser sur un aspect de la situation qui leur est proposée, à favoriser les éléments perceptifs et qu'ils rencontrent des difficultés à lire les schémas avec des rayons parallèles.

Après avoir avancé ce modèle de raisonnement commun sur les interférences lumineuses, nous avons montré qu'il permet aussi d'interpréter les autres résultats de la première enquête et de prévoir les difficultés sur la cohérence de la lumière et les figures d'interférences en éclairage partiellement cohérent. Nous avons alors eu confirmation que les étudiants connaissent la condition sur la petitesse de la source et qu'ils ont des difficultés à interpréter les schémas et à prévoir la cohérence ou non cohérence des sources. Nous avons également constaté que le concept de train d'onde est connu par les étudiants, mais qu'il y en a parmi eux qui associent « cohérent » à en phase. Nous avons aussi observé que, dans des situations de cohérence temporelle partielle, le modèle du train d'onde n'est pas opératoire et que, dans des situations de cohérence spatiale partielle, les étudiants ne décomposent pas une source étendue. Par ailleurs, nous avons noté que les étudiants tendent à caractériser la cohérence temporelle ou spatiale d'une onde par un seul critère.

Notre travail débouche sur plusieurs propositions pédagogiques. Il nous a notamment permis de conclure qu'il serait souhaitable de se ramener à la situation prototypique à deux sources secondaires ponctuelles monochromatiques quels que soient le dispositif interférentiel et la source auxquels nous avons affaire. Elle nous a aussi conduite à souligner qu'il est important de donner sens à l'optique géométrique en l'inscrivant dans une théorie ondulatoire de la lumière afin que les étudiants sachent que l'on peut avoir une image avec une onde. Elle nous a également amenée à préciser qu'il est préférable d'énoncer les conditions d'obtention des interférences lumineuses dès le début de l'étude du phénomène et que l'on doit s'intéresser à la cohérence de l'onde en deux points de l'espace et du temps et non uniquement à celle de la source. Elle nous a enfin conduite à dire qu'il est indispensable d'introduire le concept de largeur de cohérence et à faire fonctionner le modèle du train d'onde.

Bien que les résultats obtenus au cours des enquêtes et l'analyse que nous en avons faite valident nos hypothèses de recherche, nous devons préciser les limites de notre travail. En effet, nous n'avons réalisé que quelques entretiens au début de notre recherche afin de tester nos premières questions. Par la suite, nous nous sommes contentée d'utiliser comme outil de travail des questionnaires comportant des questions ouvertes et semi-ouvertes. Il aurait été souhaitable de réaliser également des entretiens auprès d'étudiants afin d'éclaircir des réponses obscures. Par ailleurs, nous avons avancé un modèle de raisonnement commun après

avoir réalisé les deux enquêtes. Bien que ce modèle permet de donner sens à nos résultats et à ceux obtenus par Ambrose et qu'il rejoigne les observations faites par Colin et le modèle proposé par Maurines dans le cas de la diffraction, il serait souhaitable d'élaborer des questions visant à tester spécifiquement la tendance à considérer que les interférences lumineuses sont créées au niveau du dispositif interférentiel. Enfin, nous avons interrogé des populations ayant eu des enseignements différents mais sans avoir une connaissance exacte de cet enseignement. Comme nous n'avons pas observé de différence notable entre les réponses fournies par les différentes populations, nous avons regroupé les résultats obtenus tout en supposant que nous mettions ainsi à jour des tendances fortes de raisonnement commun. Il serait nécessaire de vérifier que les hypothèses faites concernant l'enseignement dispensé sont correctes et de poursuivre le travail entrepris en réunissant cette fois des informations sur l'enseignement effectivement reçu par les étudiants.

Ce travail a porté sur les conceptions et raisonnements de sens commun dans le domaine des interférences lumineuses. Il ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- élaborer, réaliser et valider des séquences d'enseignement
- réaliser des entretiens auprès des enseignants afin d'étudier l'accueil réservé aux propositions pédagogiques.

BIBLIOGRAPHIE
ALPHABETIQUE

A

- ABBOUD, R. (1989). *Difficultés de l'enseignement dans deux domaines de la physique : le phénomène d'induction électromagnétique et la propagation d'ondes mécaniques*. Thèse de Doctorat. Paris. Université Paris 7.
- ALONSO, M. et FINN, E-J. (1977). *Physique générale : champs et ondes*. Tome II. Paris : Interédition.
- AMBROSE, B-S. et SCHAFFER, P-S. et STEINBERG, R-N. et MC DERMOTT, L. (1999a). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double slit-interference. *American Journal of Physics*, 67(2) :146-155.
- AMBROSE, B-S. et HERON, P-R-L. et VOKOS, S. et MC DERMOTT, L. (1999b). Student understanding of light as an electromagnetic wave: relating the formalism to physical phenomena. *American Journal of Physics*, 67(10) :891-898.
- ASTOLFI, J.P. et DAROT, E. et GINSBURGER-VOGEL, Y. et TOUSSAINT, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences. Repères, définitions, bibliographies*. Bruxelles : De Boeck Université.
- ASTOLFI, J.P. et DEVELAY, M. (1996). *La didactique des sciences*. 4^{ème} ed. Paris : PUF.
- ASTOLFI, J-P. et PETERFALVI, B. (1993) Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, (16) :103-141.
- AUDIGIER, Fr. et FILLON, P. (dir.). (1991). *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques*. Paris : INRP.
- AULIAC, G. (1995). *Probabilités et statistiques. Cours et exercices corrigés*. Paris : Ediscience international.

B

- BACHELARD, G. (1971). *Épistémologie*. Paris : PUF.
- BACHELARD, G. (1977). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- BARDIN, L. (1993). *L'analyse de contenu*. 7^{ème} ed. Paris : PUF.
- BARRAI, M.J-A. (dir.) (1858). *Œuvres de François Arago*. Tome 1, 4. Paris : Gide.
- BARTHOLY, M.C. et DESPIN J-P. et GRANDPIERRE, G. (1978). *La science, l'épistémologie générale*. Paris : Magnard.
- BARTON-RAYMER, B. (1979). *Physique : science de l'univers*. 2^{ème} ed. Montréal : HR Wltée.
- BENHASSOUN, S. (1998). Enseignement du son et conceptions des élèves : rôle du milieu physique. Mémoire de DEA, diffusion interne. Tunis. I.S.E.F.C., Université de Tunis.
- BENSEGHIR, A. et CLOSSET, J.L. (1993). Prénance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique : points de vue historique et didactique. *Didaskalia*, (2) :pp. 31-47
- BENSON, H. (1999). *Physique*. vol 3. Bruxelles : De Boeck University.
- BERGMANN, L. et SCHAEFER, C. (1999). *Optics of waves and particles*. Berlin : Walter de Gruyter.
- BERNARD, M. (1981). *La lumière*. Paris : Du Seuil.
- BERON, M.J. et PARRENT, G.B.Jr. (1964). *Theory of partial coherence*. New Jersey : Prentice-Hall.
- BERTIN, M. et FAROUX, J-P. et RENAULT, J. (1986). *Optique et physique ondulatoire : optique géométrique et optique physique, phénomènes de propagation*. Paris : Dunod.
- BERTY, J. et ESCAUT, A. et MARCHAND, P. et MARTIN, L. et OUSTRY, A. (1991). *Physique pratique, optique*. tome 3. Paris : Vuibert Université.
- BIEMONT, L. (1996). *La lumière*. Coll « Que sais-je ? » Paris : PUF.
- BIEZUNSKI, M. (1993). *Histoire de la physique moderne*. Paris : La Découverte.

- BILLET, M.F. (1858). *Traité d'optique physique*. vol 1. Paris : Imprimerie de Mallet-Bachelier.
- BIOT, J-B. (1816). *Traité de physique expérimentale et mathématique*. Tome 3. Paris : Deterville.
- BIOT, J-B. (1824). *Précis élémentaire de physique expérimentale*. Paris : Deterville.
- BLANCHÉ, R. (1969). *La méthode expérimentale et la philosophie de la physique*. Coll. « U₂ ». Paris : Colin.
- BLANCHET, A. et GOTMAN, A. (1992). *L'enquête et ses méthodes : l'entretien*. Paris : Nathan.
- BLAY, M. (1982). Des travaux méconnus sur la lumière blanche à la fin du XIX^èS : La thèse de Georges Gouy (1854-1926). *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (649) :381-390.
- BLAY, M. (2001). *Lumières sur les couleurs, le regard du physicien*. Paris : Ellipses.
- BLAY, M. (2003). Lumière. In Lecourt, D. *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (pp. 595-599). Paris : Quadrige/PUF.
- BORN, M. et WOLF, E. (1999). *Principles of optics*. 7^{ème} ed. Cambridge : Cambridge University Press.
- BOUASSE, H. et CARRIÈRE, Z. (1923). *Interférences*. Paris : Librairie De la Grave.
- BOUHIFD, M. (1998). *Conception d'un capteur interférométrique et sa caractérisation par imagerie numérique*. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur, Strasbourg 1.
- BOUWENS, R.E.A. (1987). Misconceptions among pupils regarding geometrical optics. In J., Novak (Eds). *Procedure of the second international conference on misconceptions and educational strategies in science and mathematics* (pp. 230-238). vol 3. Ithaca, New York : Cornell University.
- BRACCO, CH et al. (2004). *Histoire des idées sur la lumière*. Nice : CRDP (cédérom).
- BROUSSEAU, G. (1983). Les obstacles épistémologiques et les problèmes en Mathématiques. *Revue de Didactique des Mathématiques*, 4(2) :165-198.
- BROUSSEAU, G. (1986). *Théorisation des phénomènes d'enseignement des mathématiques*. Thèse d'état, Bordeaux I.
- BUOTEMPO, U. et al. (1993). A teaching kit on « the transmission of light », Designed for students of 14-16 and their teachers. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 156-160). Braga : Université de Minho.
- BUTY, C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse de doctorat. Université Lyon 2.
- BYNUM, W-F. et BROWNE, E.J. (1985). *MacMillan Dictionary of the history of science*. London : Mac Millen Press.

C

- CABANNES, J. (1954). *Optique ondulatoire*. Paris : Société d'Édition d'Enseignement Supérieur.
- CASSIRER, E. (1977). *Substance et fonction, éléments pour une théorie du concept*. 1^{ère} édition 1910. Paris : Les éditions de minuit.
- CHABCHOUB, A. (2005). *Regards actuels sur les didactiques des disciplines*. Tunis : ATURED.
- CHARMONT, P. (2000). *Leçons de physique*. Paris : Dunod.
- CHARNAY, R. et MANTES, M. (1990-91). De l'analyse d'erreurs en math aux dispositifs de remédiation : quelques pistes..., *Grand N*, (48) :37-64.
- CHAUVET, F. (1993). Conception et premiers essais d'une séquence sur la couleur pour des étudiants d'arts appliqués. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 87(750) :1-28.
- CHAUVET, F. (1994). *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*. Thèse de Doctorat. Université Paris 7
- CHAUVET, F. (1996). Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur. *Didaskalia*, (8) :61-76.
- CLOSSET, J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électricité*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.

- CLOSSET, J.-L. et VIENNOT, L. (1989). Contribution à l'étude du raisonnement naturel en physique. *Communication-Information*, 6(2/3) :399-420.
- COLIN, A. (2002). *Physique*. Coll « Phase ». Paris : Ellipses.
- COLIN, P. (1999). *Deux modèles dans une situation de physique : le cas de l'optique ; difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et proposition pour structurer des séquences d'enseignement*. Thèse de doctorat. Paris. Université Paris 7.
- COLIN, P. et CHAUVET, Fr. et VIENNOT, L. (2002). Reading images in optics: students' difficulties and teachers' views. *International Journal of Science Education*, 24(3) :313-332.
- COLIN, P. et VIENNOT, L. (2000). Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique. *Didaskalia*, (17) :29-54.
- COLIN, P. et VIENNOT, L. (2001). Two models in optics: anticipating teachers' reactions. In R., Pinto et S., Surinach (Eds.). *International Conference Physics Teacher Education Beyond 2000* (pp. 197-200). Paris : Elsevier.
- CRAWFORD, F.S.Jr. (1968). *Waves*. vol 3. Massachusets : Mc Graw-Hill.

D

- DAMMAN, D. (2002). *Réussir en beauté son oral de physique*. Paris : Ellipses.
- DE HOSSON, C. (2005). La controverse historique : un outil didactique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 99(870) :1-14.
- DE SENARMONT, M.M.H., VERDET, E. et FRESNEL, L. (1995). *Œuvres Complètes d'Augustin Fresnel*. 2^{ème} ed. Bordeaux : Bergeret.
- DESMEULES, E. et ROYNARD, D. (1997). *Optique ondulatoire*. Paris : Masson.
- DIMITRACOPOULOU, A. (1995). *Le tutorat dans les systèmes informatisés d'apprentissage : étude de la conception et réalisation d'un tutoriel d'aide à la représentation physique des situations étudiées par la mécanique*. Thèse de didactique des sciences physiques. Université Paris 7.
- DITCHBURN, R.W. (1953). *Light*. London et Glasgow : Blackie et Son Limited.
- DOURLENT, M. (1998). Une application du langage Maple à la physique : la simulation d'interférences lumineuses, 2^{ème} partie : cas de plusieurs sources ponctuelles. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 92(809) :1845-1853.
- DUFFAIT, R. (1997). *Expériences d'optique, agrégation de science physique*. Paris : Bréal.
- DUPIN, J.J. et JOHSUA, S. et al. (1993). *Nouvel autodidactique*. Turin : Quillet.
- DUQUESNE, M. (2001). *La physique*. 2^{ème} ed. Bruxelles : De Boeck Université.
- DUVAL, R. (1988). Ecart sémantiques et cohérence mathématique : introduction aux problèmes de congruence. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, (1) :7-25
- DUVAL, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Berne : Peter Lang.
- DURANDEAU, J.P. et BRAMAND, P. et FAYE, Ph. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Coll. « Durandeaue ». Paris : Hachette.

E

- *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA* (1829). 9^{ème} ed, Chicago : R.S.Peale Company.

F

- FABRY, Ch. (1923). *Les applications des interférences lumineuses*. Paris : Revue d'optique théorique et instrumentale.
- FABRY, Ch. (1929). *Optique*. 3^{ème} ed. Paris : PUF.
- FAWAZ, A. et VIENNOT, L. (1986). Image optique et vision : enquête en classe de 1^{ère} au Liban. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (686) :1125-1146.

- FENELAN, J.P. (1981). *Qu'est ce que l'analyse des données ?* Paris : Lefonen.
- FEYNMAN, R.P. (1987). *Lumière et matière ; une étrange histoire.* Paris : InterEdition.
- FEYNMAN, R.P. et LEIGHTON, R.B. et SANDAS, M. (1972). *The Feynman lectures on physics quantum mechanics.* Massachusetts : Addison-Wesley.
- FICHANT, M. et PÊCHEUX, M. (1997). *Sur l'histoire des sciences.* Paris : Fr. Maspero.
- FINEGOLD, M. et SMIT, J.J.A. (1993). Students' perceptions of models of light and their relationship to learning about light. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 275-284). Braga : Université de Minho.
- FLEURY, P. et MATHIEU, J.P. (1970). *Physique générale et expérimentale.* Tome V. Paris : Eyrolles.
- FONTAINE, G. et al. (1967). *La physique au baccalauréat CDE.* Paris : Nathan.
- FRANÇON, M. (1972). *Optique : formation et traitement des images.* Paris : Masson et Cie.
- FRANÇON, M. (1986). *L'optique moderne et ses développements depuis l'apparition du laser.* Coll. « Liaisons Scientifiques ». Paris : Hachette.
- FRANÇON, M. et KRAUZMAN, N. et al. (1969). *Expériences d'optique physique.* Paris : Gordon et Breach.
- FRANÇON, M. et SLANSKY, S. (1965). *Cohérence en optique.* Paris : Centre National de la Recherche Scientifique.
- FRANK, S. et CRAWFORD, Jr. (1968). *Waves.* vol 3. Massachusetts : Mc Graw-Hill.

G

- GABRIEL, M. et GRANGE, J. (1983). *Comprendre et appliquer l'optique.* vol 2. Paris : Masson.
- GABRIEL, M. et LARCHER, D. (1996). *Optique.* Paris : Masson.
- GALILI, I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, 18(7) :847-868.
- GALILI, I. et HAZAN, A. (2000). Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. *International Journal of Science Education*, 22(1) :57-88.
- GALILI, I. et HAZAN, A. (2001). The effect of an experimental HPS-Based optics course on students' content knowledge and views about science. In R., Pinto et S., Surinah. *Physics Teacher Education Beyond 2000* (pp. 201-204). Paris : Elsevier.
- GHIGLIONE, R. et MATALON, B. (1978). *Les enquêtes sociologiques, théorie et pratique.* Paris : A. Colin.
- GIANCOLI, D.C. (1993). *Physique générale 3 : ondes, optique et physique moderne.* Bruxelles : De Boeck Université.
- GICQUEL, R. (2004). Utilisation pédagogique des simulateurs. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 1(98) :1611-1620.
- GIORDAN, A. et DE VECCHI, G. (1994a). *Les origines du savoir. Des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques.* Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- GIORDAN, A. et GIRAULT, Y. et CLEMENT, P. (1994b). *Conceptions et connaissances.* Berne : Peter Lang.
- GOIX, M. (1997). Grandir : oui mais comment ? *Aster*, (24) :141-170.
- GOLDEBRG, F. M. et MC DERMOTT, L.C. (1987). An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirrors. *American Journal of Physics*, 52(2) :108-119.
- GOUZERH, J. et PERREAU, M. (1996). *Optique ondulatoire.* Toulouse : Diderot Edition.
- GRAYSON, D.J. et MC DERMOTT, L.C. (1996). Use of the computer for research on student thinking in physics. *American Journal of Physics*, 64(5), pp. 557-565.

H

- HABER-SCHAIM, U. et al. (1974). *Physique*. 3^{ème} ed. Canada : Centre Educatif et Culturel Inc.
- HEAVENS, O.S. et DITCHBURN, R. W. (1991). *Insight into optics*. Chichester : John Wiley et Sons.
- HECHT, E. (1975). *Theory and problems of optics*. United States of America : McGraw-Hill.
- HECHT, E. (1999). *Physique*. (traduit par T. Bacherrawy). Bruxelles : De Boeck Université.
- HECHT, E. (2002). *Optics*. 4^{ème} ed. United States of America : Addison Wesley.
- HECHT, E. (2005). *Optique*. 4^{ème} ed. (Traduction française dirigée par Sébastien Matte la Faveur et Jean-Louis Meyzonnette). Paris : Pearson Education.
- HENRIOT, M..F. et MARCHAND, J. et BERNARD, R. (1971). Une expérience d'interférences avec deux fentes perpendiculaires. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (537) :1055-1057.
- HENRY, M. (1981). Interférences à deux ondes, expériences de démonstration. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (632) :799-803.
- HERMANN, F. (1993). An elementary introduction of the concept of coherence. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 324-326). Braga : Université de Minho.
- HOPKINS, H.H. (1957). Applications of coherence theory in microscopy and interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, 47(6) :508-526.
- HUTTEN, E.H. (1969). *Les concepts de la physique*. (traduit par F. Eldin). Coll. « sciences-poche ». Paris : Dunod.

J

- JANDALY, J. (1998). *Histoires de physique et de chimie*. Rouen : CRDP.
- JAUNET, H. (2000). *Histoire des sciences, 1^{ère} partie, de l'antiquité à la fin du 18^{ème} S.* Paris : La Flamboyante.
- JIMENEZ-VALLADARES, J.D. et PERALES-PALACIOS, Fr.J. (2002). Modélisation et représentation graphique de concepts. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (96) :397-417.
- JOHSUA, S. et DUPIN, J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le "débat scientifique" dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne : Peter Lang.
- JOUANISSON, R. (1982). T.P sur les franges d'Young en ondes centimétriques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (649) :375-379.

K

- KALITÉVSKI, N. (1980).). *Optique ondulatoire*. (traduit du russe par S. Medvédev). Moscou : Mir.
- KAMINSKI, W. (1989). Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (716) :973-996.
- KAMINSKI, W. (1991). *Optique élémentaire en classe de 4ème : Raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*. Thèse de doctorat. Paris. Université Paris 7.
- KAMINSKI, W. et MISTRIOTI, Y. (2000). Optique au collège : le rôle de la lumière dans la formation d'image par une lentille convergente. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 94(823) :757-784.
- KANE, J. et STERNHEIM, M. (1986). *Physique*. Paris : InterEditions.
- KIPNIS, N. (1991). *History of the principle of interference of light*. Berlin : Birkhäuser Verlag.
- KIPNIS, N. (1993). *Rediscovering optics*. BENA Press : Minneapolis.
- KLEIN, M.V. et FURTAK, T.E. (1986). *Optics*. 2^{ème} ed. New York : John Wiley et Sons.
- KOCK, W.E. (1971). *Ondes sonores et ondes lumineuses. Notions fondamentales sur les ondes*. (traduit par P. Csillag). Coll. « Science Poche ». Paris : Dunod.

- KUHN, T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Champs, Flammarion.

L

- LAROCHELLE, M. et DESAUTELS, J. (1992). *Autour de l'idée de science ; itinéraires cognitifs d'étudiants*. Canada : Les Presses de l'Université Laval.
- LA ROSA, C. et MAYER, M. et PATRIZI, P. et VICENTINI-MISSONI, M. (1984). Common sense knowledge in optics: Preliminary results of an investigation into the properties of light. *European Journal of Science Education*, 6(4) :387-397.
- LAUGIER, A. et DUMOND, A. (2003). Obstacles épistémologiques et didactiques à la construction du concept d'élément chimique : quelle convergence ? *Didaskalia*, (22) :69-97.
- LAUTERBORN, W. et KURZ, T. et WIESENFELDT, M. (1997). (traduit de l'allemand par G. Bloch). *Optique cohérente, fondements et applications*. Paris : Masson.
- LAVERRIERE, R. (1997). *Capes de science physique 1990-1997*. Rosny : Bréal.
- LAZAR, P. et SCHWARTZ, D. (1994). *Eléments de probabilités et statistiques*. Paris : Flammarion.
- LEARDONNEL, J.-P. et PROUST, B. et VILLAR, J.-G. (dir) (1997). *Physique Chimie seconde*. Coll. « Galiléo ». Paris : Bordas.
- LECARDONNEL, J.P. et BOULABND, A. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Coll. « Galileo ». Paris : Bordas.
- LECOURT, D. (dir.) (2003). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris : Quadrige/PUF.
- LEFÈVRE, R. (1988). *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants de l'université sur le thème de l'optique*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- LÉNA, P. et BLANCHARD, A. (1990). *Lumières : une introduction aux phénomènes optiques*. Paris : InterEditions.
- *Le Petit Robert* (1981). Paris : Dictionnaires Le Robert.
- LEQUEUX, J. (2004). Fresnel et Arago : aux origines de l'optique physique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 1(868) :1621-1630
- LE RILLE, A. (2002). L'électronique au service de l'enseignement de l'optique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 96 :389-395.
- LESTRADE, A.-M. et MAUREL, J. et TINNES, J. et WINTHER, J. (1996). Enquête sur l'enseignement de physique et chimie en classe de seconde. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 90(786) :1-31.
- LINDER, C-J. (1993). University physics students' conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. *International Journal of Science Education*, 15(6) :655-662.
- LINDER, C-J. et ERICKSON, G-L. (1989). A study of tertiary physics students' conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, 11(Special Issue) :491-501.
- LIPSON, S.G. et LIPSON, H. et TANNHAUSER, D.S. (1995). *Optical physics*. 3^{ème} ed. Cambridge : Cambridge University.

M

- MAITTE, B. (1981). *La lumière*. Paris : Du Seuil.
- MALAFOSSE, D. et LEROUGE, A. et DUSSEAU, J-M. (2000). Étude, en inter-didactique des mathématiques et de la physique, de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : espace de réalité. *Didaskalia*, (16) :81-106.
- MALAFOSSE, D. et LEROUGE, A. et DUSSEAU, J-M. (2001). Étude, en inter-didactique des mathématiques et de la physique, de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changement de cadre de rationalité. *Didaskalia*, (18) :61-98.

- MANDEL, L. et WOLF, E. (1995). *Optical coherence and quantum optics*. Cambridge : Cambridge University Press.
- MANUEL DE PHYSIQUE CHIMIE. (1998). *Physique chimie- 3^{ème} année secondaire*. Tunis : C.N.P.
- MANUEL DE PHYSIQUE CHIMIE. (1998). *Physique chimie- 4^{ème} année secondaire*. Tunis : C.N.P.
- MARIE, M-M. (1887). *Histoire des sciences mathématiques et physiques. Tome XI : De Fourier à Arago*. Paris : Gauthier-Villars, imprimeur librairie.
- MARIE, M-M. (1888). *Histoire des sciences mathématiques et physiques. Tome XII : D'Arago à Abel et aux géomètres contemporains*. Paris : Gauthier-Villars, imprimeur librairie.
- MARTIN, G. (1998). *Panorama sur l'optique ; de l'optique géométrique à l'optique quantique*. Paris : Nathan.
- MARTINAND, J.L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne : Peter Lang.
- MARTINAND, J.L. (1989). Des objectifs capacités aux objectifs-obstacles ; deux études de cas. In N., Bednarz et C., Garnier. *Construction des savoirs, obstacles et conflits* (pp. 217-227). Ottawa : CIRADE.
- MASON, S-F. (1956). *Histoire des sciences*. Paris : Colin.
- MASSAIN, R. (1982). *Physique et physiciens*. Paris : Magnard.
- MATHIEU, J.P. (1987). Sur l'histoire de la réfraction des rayons de lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (692) :411-422.
- MATHY, Ph. (1977). *Donner du sens aux cours de science, des outils pour la formation éthique et épistémologique des enseignants*. Belgique : De Boeck.
- MAUREL, A. et BOUCHET, G. (2003). *Optique ondulatoire : rappels de cours et exercices*. Paris : Belin.
- MAURINES, L. (1986). *Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- MAURINES, L. (1991). Raisonnement spontané sur la propagation des signaux : aspect fonctionnel. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 85(733) :669-677.
- MAURINES, L. (1992a). Les élèves et la propagation des signaux sonores. In *Actes du II^{ème} séminaire de Recherche en didactique des sciences Physiques* (pp. 45-56). Sète.
- MAURINES, L. (1992b). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, 14(3) :279-293.
- MAURINES, L. (1995). Les étudiants et la phase d'une onde progressive : résultats d'une enquête exploratoire. In G., Mary et W., Kaminski (Coord.). *Actes du 5^{ème} Séminaire National de Recherche Didactique des Sciences Physiques* (pp. 107-123). Reims : IUFM de Reims-Champagne-Ardenne et IUFM de Reims.
- MAURINES, L. (1997). Raisonnement spontané sur la diffraction. In *Actes du 6^{ème} Séminaire National de Recherche Didactique des Sciences Physiques* (pp. 77-95). Lyon : Université Lyon 1.
- MAURINES, L. (1998). Les élèves et la propagation des signaux sonores. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 92(800) :1-22.
- MAURINES, L. (1999a). La propagation des ondes en dimension 3 : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire. *Didaskalia*, (15) :87-122.
- MAURINES, L. (1999b). Les étudiants et les situations ondulatoires de formation des images. In Durey (coord.) *Actes des premières rencontres scientifiques de l'ARDIST* (pp. 144-149). ENS Cachan.
- MAURINES, L. (2000a). Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent. *Didaskalia*, (17) :55-99.
- MAURINES, L. (2000b). Students and the concept of object in optical imaging. In *Proceedings of the International Conference on Physics Education GIREP* (p. 237). Barcelona, Paris : Elsevier.
- MAURINES, L. (2001a). *Le raisonnement géométrique en terme d'objet dans la physique des ondes*. Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches en didactique des sciences physiques. Université Paris-Sud.

- MAURINES, L. (2001b). Le raisonnement en terme d'objet dans la physique des ondes : cas de la surface d'onde et du principe de Huygens. In *Actes des 2^{ème} rencontres de l'ARDIST* (pp. 225-240). Marseille.
- MAURINES, L. (2001c). Students and the concept of object in optical imaging. In R., Pinto et S., Surinach (Eds.). *International Conference Physics Teacher Education Beyond 2000* (pp. 205-208). Paris : Elsevier.
- MAURINES, L. (2003a). Analyse des difficultés des étudiants à propos des concepts de phase et de surface d'onde, du principe de Huygens. *Didaskalia*, (22) :9-39.
- MAURINES, L. (2003b). Mechanistic reasoning on the concept of wave surface, ans on the Huygens' principle. In D., Psillos et al. (Eds.). *Science Education Research in the Knowledge-Based Society* (pp. 127-135). Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- MAURINES, L. et SALTIEL, E. (1987). *Questionnaires de travail sur la propagation d'un signal*. Disponible au LDSP.
- MAURINES, L. et SALTIEL, E. (1988). Mécanique spontanée du signal. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (707) :1023-1041.
- MAURY, J.P. (1992). *Petite histoire de la physique*. Paris : Larousse.
- MAY, M. (1993). *Introduction à l'optique*. Paris : Dunod.
- MECHLOVA, E. (1993). Studying light with simple apparatus, experimental discovery tasks in optics for pupils. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 230-233). Braga : Université de Minho.
- MEHEUT, M. (1996). Enseignement d'un modèle particulaire cinétique de gaz au collège. Questionnement et simulation. *Didaskalia*, (8) :7-32.
- MICHELAT, G. (1975). Sur l'utilisation de l'entretien non directif en sociologie. *Revue Française de Sociologie*, XVI (2) :229-247.
- MICHELSON, A.A. (1890). On the application of interference methods to astronomical measurements. *Philosophical Magazine*, Série 5, 30(182) :1-21.
- MICHELSON, A.A. (1891). On the application of interference methods to spectroscopic measurements. *Philosophical Magazine*, Série 5, 31(191) :338-346.
- MICHELSON, A.A. (1892). On the application of interference methods to spectroscopic measurements. *Philosophical Magazine*, Série 5, 34(208) :280-299.
- MICHELSON, A.A. (1995). *Studies in optics*. New York : Dover Publications.
- MISTRIOTI, Y. (2003). *Optique géométrique et interprétation de la vision par les étudiants universitaires : un modèle d'interprétation de la vision d'une image virtuelle*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- MESPLÈDE, J. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Paris : Bréal.
- MÉNÉTRIER, M. et al. (2002). *Optique ondulatoire*. Paris : Hachette Supérieur.
- MEYER-ARENDDT, J.R. (1995). *Introduction to classical and modern optics*, 4^{ème} ed. New York : Prentice-hall.
- MOUSSA, A. et PONSONNET, P. (1977). *Cours de physique : optique*. Lyon : André Desvigne.
- MOUCHET, A. (2000). *Apprendre les ondes. Cours et exercices corrigés*. Paris : Dunod.

P

- PAGLIESE, J.S. et RONEN, M. (1993). Workshop on teaching geometrical optics. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 223-227). Braga : Université de Minho.
- PARRENT, G.B.Jr. (1959). On the propagation of mutual coherence. *Journal of the Optical Society of America*, 49(8) :787-793.
- PELLETIER, R. (2001a). Sur quelques expériences d'Optique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 95(831) :365-378.
- PELLETIER, R. (2001b). Sur quelques expériences d'Optique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 95(834) :921-936.

- PERALES PALACIOS, F-J. et NIEVAS CAZORALA, Fr. et CERVANTES, A. (1989). Misconceptions on geometric optics and their associations with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, 11(3) :273-286.
- PÉREZ, J.Ph. (1991). *Optique géométrique, ondulatoire et polarisation*. Paris : Masson.
- PERRIEN, J. et CHERON, E.J. et ZINS, M. (1984). *Recherche en marketing : méthodes et décisions*. Québec : Gaëtan morin.
- PIAGET, J. (1967). *Epistémologie de la physique. Logique et connaissance scientifique*. Paris : La pléiade, Gallimard.
- PIAGET, J. et INHELDER, B. (1980). *La psychologie de l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France.
- POINCARÉ, H. (1970). *La valeur de la science*. Paris : Flammarion.
- PRAT, R. (1962). *L'optique*. Paris : Du Seuil.
- PROGRAMMES OFFICIELS TUNISIENS. (1998). *Sciences physiques, 3^{ème}, Terminale*. Tunis : C.N.P.
- PROVOST, J.P. et PROVOST, P. (1980). *Optique : optique ondulatoire et cohérence*. vol 2. Paris : Cedic/Fernand Nathan.

Q

- QUARANTA, L. (1998). *Introduction à l'optique*. Paris : Masson.

R

- REBMANN, G. et VIENNOT, L. (1994). Teaching algebraic coding: Stakes, difficulties, and suggestions. *American Journal of Physics*, 62(8) :723-727.
- REINER, M. (1992). Patterns of thought on light, and underlying commitments. In R., Duit et F., Goldberg et H., Niedderer (Eds). *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies* (pp. 99-109). Kiel.
- REUHLIN, M. (1987). *Précis de statistique*. Paris : PUF.
- RICHARD, J.F. (1995). *Les activités mentales ; comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris : A. Colin.
- RIOPEL, M. (2005). *Conception et mises à l'essai d'un environnement d'apprentissage intégrant l'expérimentation assistée par ordinateur et la simulation assistée par ordinateurs*. Thèse de doctorat. Université de Montréal.
- RIVAL, M. (1996). *Les grandes expériences scientifiques*. Paris : Du Seuil.
- ROBARDET, G. et GUILLAUD, J.C. (1997). *Eléments de didactique des sciences physiques ; de la recherche à la pratique : théories, modèles, conception et raisonnement spontané*. Coll. « Pédagogie d'aujourd'hui ». Paris : PUF.
- ROIG, J. (1967). *Optique physique, tome 1 : propagation, cohérence, interférences*. Paris : Masson et Cie.
- ROMDHANE, I. (2001). *Conceptions des étudiants tunisiens sur la notion de déphasage : Etude historique et didactique*. Mémoire de DEA. Tunis. I.S.E.F.C., Université de Tunis.
- ROMDHANE, I. et MAURINES, L. (2003). Les étudiants et les interférences lumineuses : résultats d'une enquête exploratoire. In *3èmes Rencontres Scientifiques de l'A.R.D.I.S.T « Recherches en Didactique des Sciences et des Techniques : Questions en débat »* (pp. 165-172). Toulouse : Paragraphic-Groupe Lienhart.
- ROMDHANE, I. et MAURINES, L. (2005). La cohérence de la lumière et les interférences : Histoire des idées et difficultés des étudiants. In *4^{èmes} Rencontres Scientifiques de l'A.R.D.I.S.T* (pp. 309-316). Lyon : INRP.
- RONAN, C. (1988). *Histoire mondiale des sciences*. Paris : Point seuil.
- RONCHI, V. (1966). *L'optique, science de la vision*. Paris : Masson et Cie.
- RONCHI, V. (1996). *Histoire de la lumière*. Paris : J. Gabay.

- ROSMORDUC, J. (1979). *De Thalès à Einstein*. Paris : Études Vivantes.
- ROSMORDUC, J. (1987). L'histoire de la physique peut-elle éclairer les obstacles épistémologiques ? *Aster*, (5) :117-141.
- ROSMORDUC, J. (1995). L'histoire des sciences dans la formation scientifique des maîtres de l'école élémentaire. *Didaskalia*, (7) :91-103.
- ROSMORDUC, J. (1996). *L'histoire des sciences*. coll. « ressources formation ». Paris : CNDP Hachette.
- ROSSING, T.D. et CHIAVERINA, C.J. (1999). *Light science, physics and the visual arts*. New York : Springer-Verlag.
- ROUFFIAC-MISSONNIER, M.F. (2002). *Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves lors d'une ingénierie didactique d'électrocinétique*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- ROUX, P. (1994). *Ondes électromagnétiques, optique*. Paris : Ellipses.
- RUANO-BORBALAN, J.C. (Coord.) (2001). *Eduquer et former. Les connaissances et les débats en éducation et en formation*. Auxerre : Sciences humaines.
- RUMELHARD, G. (1986). *La génétique et ses représentations dans l'enseignement*. Berne : Peter Lang.
- RUSSO, Fr. (1983). *Nature et méthode de l'histoire des sciences*. Paris : Librairie scientifique et technique.

S

- SALTIEL, E. et VIENNOT, L. (1985). What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students? In P., Linjse (Ed.). *The many faces of teaching and learning mechanics*, *GIREP* (pp. 199-214). Utrecht : SVO/UNESCO.
- SARMANT, J.P. (1981). *Dictionnaire de physique*. Rennes : Hachette.
- SCHMID, A.F. (2003). Concept. In Lecourt, D. *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (pp. 224-226). Paris : Quadrige/PUF.
- SECRÉTON, D. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Paris : Didier.
- SEGRÉ, E. (1987a). *Les physiciens classiques et leurs découvertes : de la chute des corps aux ondes hertziennes*. Paris : Fayard.
- SEGRÉ, E. (1987b). *Les physiciens modernes et leurs découvertes : des rayons X aux quarks*. Paris : Fayard.
- SEJOURNE, A. et TIBERGIEN, A. (2002). Conception d'un hypermédia en physique et étude des activités des élèves du point de vue de l'apprentissage. In E. de Vries, J.-P. Pernin et V. Peyrin (Eds.), *Hypermédia et apprentissages, 5^{ème} colloque Grenoble 9-11 avril 2001* (pp. 103-118). Grenoble : coédition EPI-INRP.
- SEMAT, H. et BLUMENTHAL, R.H. (1967). *College Physics/A programmed aid, vol. 4 : light, atomics and nucleonics*. New York : Holt, Rinehart et Winston.
- SERRES, M. et FAROUKI, N. (dir.) (1997). *Le Trésor, dictionnaire des sciences*. Paris : Flammarion.
- SEXTANT. (1997). *Optique expérimentale*. Paris : Hermann.
- SHAMOS, M. H. (1990). *Great experiments in physics, First hand Accounts Galileo to Einstein*. New York : Dover.
- SINGH, A. et BUTLER, Ph. (1990). Refraction: conceptions and knowledge structure. *International Journal of Science Education*, 12(4) :429-442.
- SOUM, G. et DENIZART, M. et JAGUT, R. (1995). *Optique 2 : optique ondulatoire*. Paris : Hachette Supérieur.
- STEEL, W.H. (1967). *Interferometry*. London : Cambridge University Press.
- STÖCKER, H. et JUNDT, Fr. et GUILLAUME, G. (1999). *Toute la physique, 1^{er} et 2^{ème} cycle, Ecoles d'ingénieurs*. Paris : Dunod.
- SUARDET, R. (1985). *Physique ondulatoire*. Paris : Baillière. Technique et Documentation, Lavoisier.
- SWARTZ, C.E. (1981). *Phenomenal Physics*. Canada : John Wiley et Sons.

T

- TATON, R. (1961). *Histoire générale des sciences*. Tome III, vol I. Paris : PUF.
- TIBERGHIE, A. (1984). Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens de la notion de lumière pour les élèves de 10 à 16 ans. *Recherche en Didactique de la physique : Les actes du 1^{er} atelier international, La Londe les Maures* (pp. 125-136). Paris : CNRS.
- TOMASINO, A. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Paris : Nathan.
- TOMASINO, A. et PENIGAUD, A. (1993). *Physique seconde*. Paris : Nathan.
- TOUMA, G. (2005). Un environnement informatisé d'Expérimentation Assistée par Ordinateur intégrant les sciences et les mathématiques. *Skholé*, hors série, (2) :97-102.
- TOUSSAINT, J. (1996). *Didactique appliquée de la physique chimie*. Paris : Nathan.
- TOUSSAINT, J. et GRÉA, J. (1996). Construire des concepts et mettre en oeuvre des raisonnements, ce que peut apporter un regard sur l'histoire des sciences. In J., Toussaint (coord). *Didactique appliquée de la physique-chimie* (pp. 86-118). Paris : Nathan.

U

- ULLMO, J. (1969). *La pensée scientifique moderne*. Paris : Flammarion.

V

- VAN HEEL, A.C.S. et VELZEL, C.H.F. (1967). *Qu'est ce que la lumière ?* (traduit par Gruijs Faucher, C.J.C). Paris : Hachette.
- VERDET, E. (1869). *Leçons d'optique physique*. vol 1. Paris : Imprimerie Impériale.
- VERDET, E. (1872). *Notes et mémoires*. Paris : Masson.
- VERGNAUD, G. et HALBWACHS, Fr. et ROUCHIER, A. (1978). Structure de la matière enseignée, Histoire des sciences et développement conceptuel chez l'élève. *Revue Française de Pédagogie*, (45) :7-15.
- VERKEK, G. et BOUWENS, R.E.A. (1993). Learning optics from seeing light. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 100-121). Braga : Université de Minho.
- VIENNOT, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris : Hermann.
- VIENNOT, L. (1987). Recherche en didactique autour de la transition secondaire-supérieur. Deux exemples : L'optique géométrique. L'algèbrisation des grandeurs et des lois physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (699) :1251-1268.
- VIENNOT, L. (1996). *Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire*. Article interne.
- VIENNOT, L. (2000). Anticipating teachers' reactions to innovative sequences. Examples in optics. In *International Conference on Physics Education, GIREP 2000* (p. 173). Barcelona, Paris : Elsevier.
- VIENNOT, L. (1981). Common practice in elementary algebra. *European Journal of Science Education*, 3(2) :183-194.
- VIENNOT, L. (1992). Raisonnement à plusieurs variables : tendances de la pensée commune. *Aster*, (14) :127-142.
- VIENNOT, L. (1996). *Raisonnement en physique. La part du sens commun*. Bruxelles : De Boeck.
- VIUDEZ, Ch. (2003). Expérimentation d'un environnement informatique dans le cadre de travaux pratiques sur l'interféromètre de Michelson en licence : compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, (23) :147-161.
- VYGOTSKY, L.S. (1934). *Pensée et langage*. Paris : Terrain, Sociales.

W

- WALACE, Ph. R. (1994). Comment on interference fringes between two separates lasers, by F. Louradour et al. *American Journal of Physics*, 62(10) :950.
- WEIL-BARAIS, A. (Coord). (1997). *Méthodes en psychologie*. Paris : Bréal.
- WILLIAMSON, S.J. et CUMMINS, H.Z. (1983). *Light and color in nature and art*. New York : John Wiley et Sons.
- WITTMANN, M.C. (1998a). Making sense of student difficulties with physics: an example from mechanical waves. In M., Meheut et G., Rebmann (Eds.). *Fourth European Science Education Summer School: Theory, methodology and results of research in science education* (pp. 162-164). Paris : Université Denis Diderot (Paris 7).
- WITTMANN, M.C. (1998b). *Making sense of how students come to an understanding of physics: an example from mechanical waves*. Dissertation de Doctorat. Université de Maryland.
- WITTMANN, M.C. (2002). The object coordination class applied to wave pulses: analysing student reasoning in wave optics. *International Journal of Science Education*, 24(1) :97-118.
- WITTMANN, M.C. et STEINBERG, R.N. et REDISH, E.F. (1999). Making sense of how student make sense of mechanical waves. *The Physics Teacher*, (37) :15-21.
- WITTMANN, M.C. et STEINBERG, R.N. et REDISH, E.F. (2003). Understanding and affecting student reasoning about sound waves. *International Journal of Science Education*, 25(8) :991-1013
- WOLF, E. (1982). New theory of partial coherence in the space-frequency domain. Part I: spectra and cross spectra of steady-state sources. *Journal of Optical Society of America*, 72(3) : 343-351;
- WORRALL, J. (1975). *The 19th Century revolution in optics: a case study in the interaction between philosophy of science and history and sociology of science*. Thèse de doctorat. Université de London.
- WOSILAIT, K. et HERON, P.R. et SCHAFFER, P.S. et MC DERMOTT, L.C. (1999). Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. *Physics Education Research, American Journal of Physics*. Supplément, 67(7) :S5-S15.

Y

- YOUNG, Th. (1802a). An account of some cases of the production of colours, not hitherto described. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2(42) :387-397.
- YOUNG, Th. (1802b). The Bakerian Lecture. On the theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1(42) :12-49.
- YOUNG, M. (2000). *Optics and lasers. Including fibres and optical wave guides*. 5^{ème} ed. Paris : Springer.

Z

- ZERNIKE, F. (1938). The concept of degree of coherence and its application to optical problems. *Physica*, 5(8) :785-795.

BIBLIOGRAPHIE
THEMATIQUE

1. Didactique, psychologie, sciences de l'éducation sur les ondes (son, optique géométrique, optique physique)

- ABOUD, R. (1989). *Difficultés de l'enseignement dans deux domaines de la physique : le phénomène d'induction électromagnétique et la propagation d'ondes mécaniques*. Thèse de Doctorat. Paris. Université Paris 7.
- AMBROSE, B-S. et SCHAFFER, P-S. et STEINBERG, R-N. et MC DERMOTT, L. (1999a). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double slit-interference. *American Journal of Physics*, 67(2) :146-155.
- AMBROSE, B-S. et HERON, P-R-L. et VOKOS, S. et MC DERMOTT, L. (1999b). Student understanding of light as an electromagnetic wave: relating the formalism to physical phenomena. *American Journal of Physics*, 67(10) :891-898.
- BENHASSOUN, S. (1998). Enseignement du son et conceptions des élèves : rôle du milieu physique. Mémoire de DEA, diffusion interne. Tunis. I.S.E.F.C., Université de Tunis.
- BOUWENS, R.E.A. (1987). Misconceptions among pupils regarding geometrical optics. In J., Novak (Eds). *Procedure of the second international conference on misconceptions and educational strategies in science and mathematics* (pp. 230-238). vol 3. Ithaca, New York : Cornell University.
- BUOTEMPO, U. et al. (1993). A teaching kit on « the transmission of light », Designed for students of 14-16 and their teachers. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 156-160). Braga : Université de Minho.
- BUTY, C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse de doctorat. Université Lyon 2.
- CHAUVET, F. (1993). Conception et premiers essais d'une séquence sur la couleur pour des étudiants d'arts appliqués. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 87(750) :1-28.
- CHAUVET, F. (1994). *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*. Thèse de Doctorat. Université Paris 7
- CHAUVET, F. (1996). Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur. *Didaskalia*, (8) :61-76.
- COLIN, P. (1999). *Deux modèles dans une situation de physique : le cas de l'optique ; difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et proposition pour structurer des séquences d'enseignement*. Thèse de doctorat. Paris. Université Paris 7.
- COLIN, P. et CHAUVET, Fr. et VIENNOT, L. (2002). Reading images in optics: students' difficulties and teachers' views. *International Journal of Science Education*, 24(3) :313-332.
- COLIN, P. et VIENNOT, L. (2000). Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l'image optique. *Didaskalia*, (17) :29-54.
- COLIN, P. et VIENNOT, L. (2001). Two models in optics: anticipating teachers' reactions. In R., Pinto et S., Surinach (Eds.). *International Conference Physics Teacher Education Beyond 2000* (pp. 197-200). Paris : Elsevier.
- DE HOSSON, C. (2005). La controverse historique : un outil didactique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 99(870) :1-14.
- FAWAZ, A. et VIENNOT, L. (1986). Image optique et vision : enquête en classe de 1^{ère} au Liban. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (686) :1125-1146.
- FINEGOLD, M. et SMIT, J.J.A. (1993). Students' perceptions of models of light and their relationship to learning about light. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 275-284). Braga : Université de Minho.
- GALILI, I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, 18(7) :847-868.
- GALILI, I. et HAZAN, A. (2000). Learners' knowledge in optics: interpretation, structure and analysis. *International Journal of Science Education*, 22(1) :57-88.

- GALILI, I. et HAZAN, A. (2001). The effect of an experimental HPS-Based optics course on students' content knowledge and views about science. In R., Pinto et S., Surinah. *Physics Teacher Education Beyond 2000* (pp. 201-204). Paris : Elsevier.
- GOLDEBRG, F. M. et MC DERMOTT, L.C. (1987). An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirrors. *American Journal of Physics*, 52(2) :108-119.
- GRAYSON, D.J. et MC DERMOTT, L.C. (1996). Use of the computer for research on student thinking in physics. *American Journal of Physics*, 64(5), pp. 557-565.
- HERMANN, F. (1993). An elementary introduction of the concept of coherence. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 324-326). Braga : Université de Minho.
- KAMINSKI, W. (1989). Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (716) :973-996.
- KAMINSKI, W. (1991). *Optique élémentaire en classe de 4ème : Raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*. Thèse de doctorat. Paris. Université Paris 7.
- KAMINSKI, W. et MISTRIONI, Y. (2000). Optique au collège : le rôle de la lumière dans la formation d'image par une lentille convergente. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 94(823) :757-784.
- LA ROSA, C. et MAYER, M. et PATRIZI, P. et VICENTINI-MISSONI, M. (1984). Common sense knowledge in optics: Preliminary results of an investigation into the properties of light. *European Journal of Science Education*, 6(4) :387-397.
- LEFÈVRE, R. (1988). *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants de l'université sur le thème de l'optique*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- LINDER, C-J. (1993). University physics students' conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. *International Journal of Science Education*, 15(6) :655-662.
- LINDER, C-J. et ERICKSON, G-L. (1989). A study of tertiary physics students' conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, 11(Special Issue) :491-501.
- MAURINES, L. (1986). *Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- MAURINES, L. (1991). Raisonnement spontané sur la propagation des signaux : aspect fonctionnel. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 85(733) :669-677.
- MAURINES, L. (1992a). Les élèves et la propagation des signaux sonores. In *Actes du II^{ème} séminaire de Recherche en didactique des sciences Physiques* (pp. 45-56). Sète.
- MAURINES, L. (1992b). Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals. *International Journal of Science Education*, 14(3) :279-293.
- MAURINES, L. (1995). Les étudiants et la phase d'une onde progressive : résultats d'une enquête exploratoire. In G., Mary et W., Kaminski (Coord.). *Actes du 5^{ème} Séminaire National de Recherche Didactique des Sciences Physiques* (pp. 107-123). Reims : IUFM de Reims-Champagne-Ardenne et IUFM de Reims.
- MAURINES, L. (1997). Raisonnement spontané sur la diffraction. In *Actes du 6^{ème} Séminaire National de Recherche Didactique des Sciences Physiques* (pp. 77-95). Lyon : Université Lyon 1.
- MAURINES, L. (1998). Les élèves et la propagation des signaux sonores. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 92(800) :1-22.
- MAURINES, L. (1999a). La propagation des ondes en dimension 3 : analyse des difficultés des étudiants quant au modèle géométrico-ondulatoire. *Didaskalia*, (15) :87-122.
- MAURINES, L. (1999b). Les étudiants et les situations ondulatoires de formation des images. In Durey (coord.) *Actes des premières rencontres scientifiques de l'ARDIST* (pp. 144-149). ENS Cachan.
- MAURINES, L. (2000a). Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent. *Didaskalia*, (17) :55-99.
- MAURINES, L. (2000b). Students and the concept of object in optical imaging. In *Proceedings of the International Conference on Physics Education GIREP* (p. 237). Barcelona, Paris : Elsevier.

- MAURINES, L. (2001a). *Le raisonnement géométrique en terme d'objet dans la physique des ondes*. Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches en didactique des sciences physiques. Université Paris-Sud.
- MAURINES, L. (2001b). Le raisonnement en terme d'objet dans la physique des ondes : cas de la surface d'onde et du principe de Huygens. In *Actes des 2^{ème} rencontres de l'ARDIST* (pp. 225-240). Marseille.
- MAURINES, L. (2001c). Students and the concept of object in optical imaging. In R., Pinto et S., Surinach (Eds.). *International Conference Physics Teacher Education Beyond 2000* (pp. 205-208). Paris : Elsevier.
- MAURINES, L. (2003a). Analyse des difficultés des étudiants à propos des concepts de phase et de surface d'onde, du principe de Huygens. *Didaskalia*, (22) :9-39.
- MAURINES, L. (2003b). Mechanistic reasoning on the concept of wave surface, ans on the Huygens' principle. In D., Psillos et al. (Eds.). *Science Education Research in the Knowledge-Based Society* (pp. 127-135). Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- MAURINES, L. et SALTIEL, E. (1987). *Questionnaires de travail sur la propagation d'un signal*. Disponible au LDSP.
- MAURINES, L. et SALTIEL, E. (1988). Mécanique spontanée du signal. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (707) :1023-1041.
- MECHLOVA, E. (1993). Studying light with simple apparatus, experimental discovery tasks in optics for pupils. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 230-233). Braga : Université de Minho.
- MISTRIOTI, Y. (2003). *Optique géométrique et interprétation de la vision par les étudiants universitaires : un modèle d'interprétation de la vision d'une image virtuelle*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- PAGLIESE, J.S. et RONEN, M. (1993). Workshop on teaching geometrical optics. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 223-227). Braga : Université de Minho.
- PELLETIER, R. (2001a). Sur quelques expériences d'Optique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 95(831) :365-378.
- PELLETIER, R. (2001b). Sur quelques expériences d'Optique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 95(834) :921-936.
- PERALES PALACIOS, F-J. et NIEVAS CAZORALA, Fr. et CERVANTES, A. (1989). Misconceptions on geometric optics and their associations with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, 11(3) :273-286.
- REINER, M. (1992). Patterns of thought on light, and underlying commitments. In R., Duit et F., Goldberg et H., Niedderer (Eds). *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies* (pp. 99-109). Kiel.
- ROMDHANE, I. (2001). *Conceptions des étudiants tunisiens sur la notion de déphasage : Etude historique et didactique*. Mémoire de DEA. Tunis. I.S.E.F.C., Université de Tunis.
- ROMDHANE, I. et MAURINES, L. (2003). Les étudiants et les interférences lumineuses : résultats d'une enquête exploratoire. In *3èmes Rencontres Scientifiques de l'A.R.D.I.S.T « Recherches en Didactique des Sciences et des Techniques : Questions en débat »* (pp. 165-172). Toulouse : Paragraphic-Groupe Lienhart.
- ROMDHANE, I. et MAURINES, L. (2005). La cohérence de la lumière et les interférences : Histoire des idées et difficultés des étudiants. In *4^{èmes} Rencontres Scientifiques de l'A.R.D.I.S.T* (pp. 309-316). Lyon : INRP.
- SINGH, A. et BUTLER, Ph. (1990). Refraction: conceptions and knowledge structure. *International Journal of Science Education*, 12(4) :429-442.
- TIBERGHIE, A. (1984). Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens de la notion de lumière pour les élèves de 10 à 16 ans. *Recherche en Didactique de la physique : Les actes du 1^{er} atelier international, La Londe les Maure* (pp. 125-136). Paris : CNRS.

- VERKEK, G. et BOUWENS, R.E.A. (1993). Learning optics from seeing light. In L., Chainho Pereira et J., Alves Ferreira et H.A., Lopes (Eds.). *Proceedings of International Conference of Physics Education GIREP'93 : Light and Information* (pp. 100-121). Braga : Université de Minho.
- VIENNOT, L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris : Hermann.
- VIENNOT, L. (1987). Recherche en didactique autour de la transition secondaire-supérieur. Deux exemples : L'optique géométrique. L'algèbrisation des grandeurs et des lois physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (699) :1251-1268.
- VIENNOT, L. (1996a). *Le rayon lumineux en optique géométrique et en optique ondulatoire*. Article interne.
- VIENNOT, L. (1996b). *Raisonnement en physique. La part du sens commun*. Bruxelles : De Boeck.
- VIENNOT, L. (2000). Anticipating teachers' reactions to innovative sequences. Examples in optics. In *International Conference on Physics Education, GIREP 2000* (p. 173). Barcelona, Paris : Elsevier.
- VIUDEZ, Ch. (2003). Expérimentation d'un environnement informatique dans le cadre de travaux pratiques sur l'interféromètre de Michelson en licence : compte rendu d'innovation. *Didaskalia*, (23) :147-161.
- WALACE, Ph. R. (1994). Comment on interference fringes between two separates lasers, by F. Louradour et al. *American Journal of Physics*, 62(10) :950.
- WITTMANN, M.C. (1998a). Making sense of student difficulties with physics: an example from mechanical waves. In M., Meheut et G., Rebmann (Eds.). *Fourth European Science Education Summer School: Theory, methodology and results of research in science education* (pp. 162-164). Paris : Université Denis Diderot (Paris 7).
- WITTMANN, M.C. (1998b). *Making sense of how students come to an understanding of physics: an example from mechanical waves*. Dissertation de Doctorat. Université de Maryland.
- WITTMANN, M.C. (2002). The object coordination class applied to wave pulses: analysing student reasoning in wave optics. *International Journal of Science Education*, 24(1) :97-118.
- WITTMANN, M.C. et STEINBERG, R.N. et REDISH, E.F. (1999). Making sense of how student make sense of mechanical waves. *The Physics Teacher*, (37) :15-21.
- WITTMANN, M.C. et STEINBERG, R.N. et REDISH, E.F. (2003). Understanding and affecting student reasoning about sound waves. *International Journal of Science Education*, 25(8) :991-1013
- WOSILAIT, K. et HERON, P.R. et SCHAFFER, P.S. et MC DERMOTT, L.C. (1999). Addressing student difficulties in applying a wave model to the interference and diffraction of light. *Physics Education Research, American Journal of Physics*. Supplément, 67(7) :S5-S15.

2. Autres thèmes

- ASTOLFI, J.P. et DAROT, E. et GINSBURGER-VOGEL, Y. et TOUSSAINT, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences. Repères, définitions, bibliographies*. Bruxelles : De Boeck Université.
- ASTOLFI, J.P. et DEVELAY, M. (1996). *La didactique des sciences*. 4^{ème} ed. Paris : PUF.
- ASTOLFI, J-P. et PETERFALVI, B. (1993) Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, (16) :103-141.
- BENSEGHIR, A. et CLOSSET, J.L. (1993). Prénance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique : points de vue historique et didactique. *Didaskalia*, (2) :pp. 31-47
- BROUSSEAU, G. (1983). Les obstacles épistémologiques et les problèmes en Mathématiques. *Revue de Didactique des Mathématiques*, 4(2) :165-198.
- BROUSSEAU, G. (1986). *Théorisation des phénomènes d'enseignement des mathématiques*. Thèse d'état, Bordeaux I.
- CHABCHOUB, A. (2005). *Regards actuels sur les didactiques des disciplines*. Tunis : ATURED.
- CHARNAY, R. et MANTES, M. (1990-91). De l'analyse d'erreurs en math aux dispositifs de remédiation : quelques pistes..., *Grand N*, (48) :37-64.

- CLOSSET, J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électricité*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- CLOSSET, J.-L. et VIENNOT, L. (1989). Contribution à l'étude du raisonnement naturel en physique. *Communication-Information*, 6(2/3) :399-420.
- DIMITRACOPOULOU, A. (1995). *Le tutorat dans les systèmes informatisés d'apprentissage : étude de la conception et réalisation d'un tutoriel d'aide à la représentation physique des situations étudiées par la mécanique*. Thèse de didactique des sciences physiques. Université Paris 7.
- DOURLENT, M. (1998). Une application du langage Maple à la physique : la simulation d'interférences lumineuses, 2^{ème} partie : cas de plusieurs sources ponctuelles. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 92(809) :1845-1853.
- DUVAL, R. (1988). Ecart sémantiques et cohérence mathématique : introduction aux problèmes de congruence. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, (1) :7-25
- DUVAL, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Berne : Peter Lang.
- GICQUEL, R. (2004). Utilisation pédagogique des simulateurs. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 1(98) :1611-1620.
- GIORDAN, A. et DE VECCHI, G. (1994a). *Les origines du savoir. Des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- GIORDAN, A. et GIRAULT, Y. et CLEMENT, P. (1994b). *Conceptions et connaissances*. Berne : Peter Lang.
- GOIX, M. (1997). Grandir : oui mais comment ? *Aster*, (24) :141-170.
- HENRIOT, M.F. et MARCHAND, J. et BERNARD, R. (1971). Une expérience d'interférences avec deux fentes perpendiculaires. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (537) :1055-1057.
- HENRY, M. (1981). Interférences à deux ondes, expériences de démonstration. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (632) :799-803.
- HOPKINS, H.H. (1957). Applications of coherence theory in microscopy and interferometry. *Journal of the Optical Society of America*, 47(6) :508-526.
- JIMENEZ-VALLADARES, J.D. et PERALES-PALACIOS, Fr.J. (2002). Modélisation et représentation graphique de concepts. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (96) :397-417.
- JOHSUA, S. et DUPIN, J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le "débat scientifique" dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne : Peter Lang.
- JOUANISSON, R. (1982). T.P sur les franges d'Young en ondes centimétriques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (649) :375-379.
- LAROCHELLE, M. et DESAUTELS, J. (1992). *Autour de l'idée de science ; itinéraires cognitifs d'étudiants*. Canada : Les Presses de l'Université Laval.
- LAUGIER, A. et DUMOND, A. (2003). Obstacles épistémologiques et didactiques à la construction du concept d'élément chimique : quelle convergence ? *Didaskalia*, (22) :69-97.
- LE RILLE, A. (2002). L'électronique au service de l'enseignement de l'optique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 96 :389-395.
- MALAFOSSE, D. et LEROUGE, A. et DUSSEAU, J.-M. (2000). Étude, en inter-didactique des mathématiques et de la physique, de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : espace de réalité. *Didaskalia*, (16) :81-106.
- MALAFOSSE, D. et LEROUGE, A. et DUSSEAU, J.-M. (2001). Étude, en inter-didactique des mathématiques et de la physique, de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changement de cadre de rationalité. *Didaskalia*, (18) :61-98.
- MARTINAND, J.L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne : Peter Lang.
- MARTINAND, J.L. (1989). Des objectifs capacités aux objectifs-obstacles ; deux études de cas. In N., Bednarz et C., Garnier. *Construction des savoirs, obstacles et conflits* (pp. 217-227). Ottawa : CIRADE.
- MEHEUT, M. (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège. Questionnement et simulation. *Didaskalia*, (8) :7-32.
- PIAGET, J. et INHELDER, B. (1980). *La psychologie de l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France.

- REBMANN, G. et VIENNOT, L. (1994). Teaching algebraic coding: Stakes, difficulties, and suggestions. *American Journal of Physics*, 62(8) :723-727.
- RICHARD, J.F. (1995). *Les activités mentales ; comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris : A. Colin.
- RIOPEL, M. (2005). *Conception et mises à l'essai d'un environnement d'apprentissage intégrant l'expérimentation assistée par ordinateur et la simulation assistée par ordinateurs*. Thèse de doctorat. Université de Montréal.
- ROBARDET, G. et GUILLAUD, J.C. (1997). *Eléments de didactique des sciences physiques ; de la recherche à la pratique : théories, modèles, conception et raisonnement spontané*. Coll. « Pédagogie d'aujourd'hui ». Paris : PUF.
- ROUFFIAC-MISSONNIER, M.F. (2002). *Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves lors d'une ingénierie didactique d'électrocinétique*. Thèse de doctorat. Université Paris 7.
- RUANO-BORBALAN, J.C. (Coord.) (2001). *Eduquer et former. Les connaissances et les débats en éducation et en formation*. Auxerre : Sciences humaines.
- RUMELHARD, G. (1986). *La génétique et ses représentations dans l'enseignement*. Berne : Peter Lang.
- SALTIEL, E. et VIENNOT, L. (1985). What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning of students? In P., Linjse (Ed.). *The many faces of teaching and learning mechanics, GIREP* (pp. 199-214). Utrecht : SVO/UNESCO.
- SEJOURNE, A. et TIBERGIEN, A. (2002). Conception d'un hypermédia en physique et étude des activités des élèves du point de vue de l'apprentissage. In E. de Vries, J.-P. Pernin et V. Peyrin (Eds.), *Hypermédia et apprentissages, 5^{ème} colloque Grenoble 9-11 avril 2001* (pp. 103-118). Grenoble : coédition EPI-INRP.
- TOUMA, G. (2005). Un environnement informatisé d'Expérimentation Assistée par Ordinateur intégrant les sciences et les mathématiques. *Skholê*, hors série, (2) :97-102.
- TOUSSAINT, J. (1996). *Didactique appliquée de la physique chimie*. Paris : Nathan.
- TOUSSAINT, J. et GRÉA, J. (1996). Construire des concepts et mettre en oeuvre des raisonnements, ce que peut apporter un regard sur l'histoire des sciences. In J., Toussaint (coord). *Didactique appliquée de la physique-chimie* (pp. 86-118). Paris : Nathan.
- VERGNAUD, G. et HALBWACHS, Fr. et ROUCHIER, A. (1978). Structure de la matière enseignée, Histoire des sciences et développement conceptuel chez l'élève. *Revue Française de Pédagogie*, (45) :7-15.
- VIENNOT, L. (1981). Common practice in elementary algebra. *European Journal of Science Education*, 3(2) :183-194.
- VIENNOT, L. (1992). Raisonnement à plusieurs variables : tendances de la pensée commune. *Aster*, (14) :127-142.
- VYGOTSKY, L.S. (1934). *Pensée et langage*. Paris : Terrain, Sociales.
- WOLF, E. (1982). New theory of partial coherence in the space-frequency domain. Part I: spectra and cross spectra of steady-state sources. *Journal of Optical Society of America*, 72(3) : 343-351;
- ZERNIKE, F. (1938). The concept of degree of coherence and its application to optical problems. *Physica*, 5(8) :785-795.

3. Epistémologie et histoire des sciences

- AUDIGIER, Fr. et FILLON, P. (dir.). (1991). *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques*. Paris : INRP.
- BACHELARD, G. (1971). *Épistémologie*. Paris : PUF.
- BACHELARD, G. (1977). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- BARRAI, M.J.-A. (dir.) (1858). *Œuvres de François Arago*. Tome 1, 4. Paris : Gide.
- BARTHOLY, M.C. et DESPIN J.-P. et GRANDPIERRE, G. (1978). *La science, l'épistémologie générale*. Paris : Magnard.
- BERNARD, M. (1981). *La lumière*. Paris : Du Seuil.
- BIEMONT, L. (1996). *La lumière*. Coll « Que sais-je ? » Paris : PUF.

- BIEZUNSKI, M. (1993). *Histoire de la physique moderne*. Paris : La Découverte.
- BILLET, M.F. (1858). *Traité d'optique physique*. vol 1. Paris : Imprimerie de Mallet-Bachelier.
- BIOT, J-B. (1816). *Traité de physique expérimentale et mathématique*. Tome 3. Paris : Deterville.
- BIOT, J-B. (1824). *Précis élémentaire de physique expérimentale*. Paris : Deterville.
- BLAY, M. (1982). Des travaux méconnus sur la lumière blanche à la fin du XIX^èS : La thèse de Georges Gouy (1854-1926). *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (649) :381-390.
- BLAY, M. (2001). *Lumières sur les couleurs, le regard du physicien*. Paris : Ellipses.
- BLAY, M. (2003). Lumière. In Lecourt, D. *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (pp. 595-599). Paris : Quadrige/PUF.
- BRACCO, CH et al. (2004). *Histoire des idées sur la lumière*. Nice : CRDP (cédérom).
- BYNUM, W-F. et BROWNE, E.J. (1985). *MacMillan Dictionary of the history of science*. London : Mac Millen Press.
- CASSIRER, E. (1977). *Substance et fonction, éléments pour une théorie du concept*. 1^{ère} édition 1910. Paris : Les éditions de minuit.
- DE SENARMONT, M.M.H., VERDET, E. et FRESNEL, L. (1995). *Œuvres Complètes d'Augustin Fresnel*. 2^{ème} ed. Bordeaux : Bergeret.
- *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA* (1829). 9^{ème} ed, Chicago : R.S.Peale Company.
- FABRY, Ch. (1923). *Les applications des interférences lumineuses*. Paris : Revue d'optique théorique et instrumentale.
- FABRY, Ch. (1929). *Optique*. 3^{ème} ed. Paris : PUF.
- FICHANT, M. et PÊCHEUX, M. (1997). *Sur l'histoire des sciences*. Paris : Fr. Maspero.
- FLEURY, P. et MATHIEU, J.P. (1970). *Physique générale et expérimentale*. Tome V. Paris : Eyrolles.
- JANDALY, J. (1998). *Histoires de physique et de chimie*. Rouen : CRDP.
- JAUNET, H. (2000). *Histoire des sciences, 1^{ère} partie, de l'antiquité à la fin du 18^{ème} S*. Paris : La Framboisière.
- KIPNIS, N. (1991). *History of the principle of interference of light*. Berlin : Birkhäuser Verlag.
- KUHN, T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Champs, Flammarion.
- LECOURT, D. (dir.) (2003). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris : Quadrige/PUF.
- LEQUEUX, J. (2004). Fresnel et Arago : aux origines de l'optique physique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 1(868) :1621-1630
- MAITTE, B. (1981). *La lumière*. Paris : Du Seuil.
- MARIE, M-M. (1887). *Histoire des sciences mathématiques et physiques. Tome XI : De Fourier à Arago*. Paris : Gauthier-Villars, imprimeur librairie.
- MARIE, M-M. (1888). *Histoire des sciences mathématiques et physiques. Tome XII : D'Arago à Abel et aux géomètres contemporains*. Paris : Gauthier-Villars, imprimeur librairie.
- MASON, S-F. (1956). *Histoire des sciences*. Paris : Colin.
- MASSAIN, R. (1982). *Physique et physiciens*. Paris : Magnard.
- MATHIEU, J.P. (1987). Sur l'histoire de la réfraction des rayons de lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, (692) :411-422.
- MATHY, Ph. (1977). *Donner du sens aux cours de science, des outils pour la formation éthique et épistémologique des enseignants*. Belgique : De Boeck.
- MAURY, J.P. (1992). *Petite histoire de la physique*. Paris : Larousse.
- MICHELSON, A.A. (1890). On the application of interference methods to astronomical measurements. *Philosophical Magazine*, Série 5, 30(182) :1-21.
- MICHELSON, A.A. (1891). On the application of interference methods to spectroscopic measurements. *Philosophical Magazine*, Série 5, 31(191) :338-346.
- MICHELSON, A.A. (1892). On the application of interference methods to spectroscopic measurements. *Philosophical Magazine*, Série 5, 34(208) :280-299.
- MICHELSON, A.A. (1995). *Studies in optics*. New York : Dover Publications.
- PARRENT, G.B.Jr. (1959). On the propagation of mutual coherence. *Journal of the Optical Society of America*, 49(8) :787-793.

- PIAGET, J. (1967). *Epistémologie de la physique. Logique et connaissance scientifique*. Paris : La pléiade, Gallimard.
- POINCARÉ, H. (1970). *La valeur de la science*. Paris : Flammarion.
- PRAT, R. (1962). *L'optique*. Paris : Du Seuil.
- RIVAL, M. (1996). *Les grandes expériences scientifiques*. Paris : Du Seuil.
- RONAN, C. (1988). *Histoire mondiale des sciences*. Paris : Point seuil.
- RONCHI, V. (1966). *L'optique, science de la vision*. Paris : Masson et Cie.
- RONCHI, V. (1996). *Histoire de la lumière*. Paris : J. Gabay.
- ROSMORDUC, J. (1979). *De Thalès à Einstein*. Paris : Études Vivantes.
- ROSMORDUC, J. (1987). L'histoire de la physique peut-elle éclairer les obstacles épistémologiques ? *Aster*, (5) :117-141.
- ROSMORDUC, J. (1995). L'histoire des sciences dans la formation scientifique des maîtres de l'école élémentaire. *Didaskalia*, (7) :91-103.
- ROSMORDUC, J. (1996). *L'histoire des sciences*. coll. « ressources formation ». Paris : CNDP Hachette.
- RUSSO, Fr. (1983). *Nature et méthode de l'histoire des sciences*. Paris : Librairie scientifique et technique.
- SCHMID, A.F. (2003). Concept. In Lecourt, D. *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* (pp. 224-226). Paris : Quadrige/PUF.
- SEGRÉ, E. (1987a). *Les physiciens classiques et leurs découvertes : de la chute des corps aux ondes hertziennes*. Paris : Fayard.
- SEGRÉ, E. (1987b). *Les physiciens modernes et leurs découvertes : des rayons X aux quarks*. Paris : Fayard.
- SHAMOS, M. H. (1990). *Great experiments in physics, First hand Accounts Galileo to Einstein*. New York : Dover.
- TATON, R. (1961). *Histoire générale des sciences*. Tome III, vol I. Paris : PUF.
- ULLMO, J. (1969). *La pensée scientifique moderne*. Paris : Flammarion.
- VAN HEEL, A.C.S. et VELZEL, C.H.F. (1967). *Qu'est ce que la lumière ?* (traduit par Gruijs Faucher, C.J.C). Paris : Hachette.
- VERDET, E. (1869). *Leçons d'optique physique*. vol 1. Paris : Imprimerie Impériale.
- VERDET, E. (1872). *Notes et mémoires*. Paris : Masson.
- WORRALL, J. (1975). *The 19th Century revolution in optics: a case study in the interaction between philosophy of science and history and sociology of science*. Thèse de doctorat. Université de London.
- YOUNG, Th. (1802a). An account of some cases of the production of colours, not hitherto described. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2(42) :387-397.
- YOUNG, Th. (1802b). The Bakerian Lecture. On the theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1(42) :12-49.

4. Méthodologie

- AULIAC, G. (1995). *Probabilités et statistiques. Cours et exercices corrigés*. Paris : Ediscience international.
- BARDIN, L. (1993). *L'analyse de contenu*. 7^{ème} ed. Paris : PUF.
- BLANCHÉ, R. (1969). *La méthode expérimentale et la philosophie de la physique*. Coll. « U₂ ». Paris : Colin.
- BLANCHET, A. et GOTMAN, A. (1992). *L'enquête et ses méthodes : l'entretien*. Paris : Nathan.
- FENELAN, J.P. (1981). *Qu'est ce que l'analyse des données ?* Paris : Lefonen.
- GHIGLIONE, R. et MATALON, B. (1978). *Les enquêtes sociologiques, théorie et pratique*. Paris : A. Colin.
- LAZAR, P. et SCHWARTZ, D. (1994). *Eléments de probabilités et statistiques*. Paris : Flammarion.

- MICHELAT, G. (1975). Sur l'utilisation de l'entretien non directif en sociologie. *Revue Française de Sociologie*, XVI (2) :229-247.
- PERRIEN, J. et CHERON, E.J. et ZINS, M. (1984). *Recherche en marketing : méthodes et décisions*. Québec : Gaëtan morin.
- REUCHLIN, M. (1987). *Précis de statistique*. Paris : PUF.
- WEIL-BARAIS, A. (Coord). (1997). *Méthodes en psychologie*. Paris : Bréal.

5. Physique Niveau secondaire

- DURANDEAU, J.P. et BRAMAND, P. et FAYE, Ph. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Coll. « Durandeaup ». Paris : Hachette.
- FONTAINE, G. et al. (1967). *La physique au baccalauréat CDE*. Paris : Nathan.
- LEARDONNEL, J.-P. et PROUST, B. et VILLAR, J.-G. (dir) (1997). *Physique Chimie seconde*. Coll. « Galiléo ». Paris : Bordas.
- LECARDONNEL, J.P. et BOULABND, A. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Coll. « Galileo ». Paris : Bordas.
- *Le Petit Robert* (1981). Paris : Dictionnaires Le Robert.
- LESTRADE, A.-M. et MAUREL, J. et TINNES, J. et WINTHER, J. (1996). Enquête sur l'enseignement de physique et chimie en classe de seconde. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 90(786) :1-31.
- MANUEL DE PHYSIQUE CHIMIE. (1998). *Physique chimie- 3^{ème} année secondaire*. Tunis : C.N.P.
- MANUEL DE PHYSIQUE CHIMIE. (1998). *Physique chimie- 4^{ème} année secondaire*. Tunis : C.N.P.
- MESPLÈDE, J. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Paris : Bréal.
- PROGRAMMES OFFICIELS TUNISIENS. (1998). *Sciences physiques, 3^{ème}, Terminale*. Tunis : C.N.P.
- SECRÉTON, D. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Paris : Didier.
- SEMAT, H. et BLUMENTHAL, R.H. (1967). *College Physics/A programmed aid, vol. 4 : light, atomics and nucleonics*. New York : Holt, Rinehart et Winston.
- TOMASINO, A. et al. (1995). *Physique, Terminale S*. Paris : Nathan.
- TOMASINO, A. et PENIGAUD, A. (1993). *Physique seconde*. Paris : Nathan.

Niveau supérieur

- ALONSO, M. et FINN, E.-J. (1977). *Physique générale : champs et ondes*. Tome II. Paris : Interédition.
- BARTON-RAYMER, B. (1979). *Physique : science de l'univers*. 2^{ème} ed. Montréal : HR Wltée.
- BENSON, H. (1999). *Physique*. vol 3. Bruxelles : De Boeck University.
- BERGMANN, L. et SCHAEFER, C. (1999). *Optics of waves and particles*. Berlin : Walter de Gruyter.
- BERON, M.J. et PARRENT, G.B.Jr. (1964). *Theory of partial coherence*. New Jersey : Prentice-Hall.
- BERTIN, M. et FAROUX, J-P. et RENAULT, J. (1986). *Optique et physique ondulatoire : optique géométrique et optique physique, phénomènes de propagation*. Paris : Dunod.
- BERTY, J. et ESCAUT, A. et MARCHAND, P. et MARTIN, L. et OUSTRY, A. (1991). *Physique pratique, optique*. tome 3. Paris : Vuibert Université.
- BLAY, M. (2001). *Lumières sur les couleurs, le regard du physicien*. Paris : Ellipses.
- BORN, M. et WOLF, E. (1999). *Principles of optics*. 7^{ème} ed. Cambridge : Cambridge University Press.
- BOUASSE, H. et CARRIÈRE, Z. (1923). *Interférences*. Paris : Librairie De la Grave.

- BOUHIFD, M. (1998). *Conception d'un capteur interférométrique et sa caractérisation par imagerie numérique*. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur, Strasbourg 1.
- CABANNES, J. (1954). *Optique ondulatoire*. Paris : Société d'Édition d'Enseignement Supérieur.
- CHARMONT, P. (2000). *Leçons de physique*. Paris : Dunod.
- COLIN, A. (2002). *Physique*. Coll « Phase ». Paris : Ellipses.
- CRAWFORD, F.S.Jr. (1968). *Waves*. vol 3. Massachusetts : Mc Graw-Hill.
- DAMMAN, D. (2002). *Réussir en beauté son oral de physique*. Paris : Ellipses.
- DESMEULES, E. et ROYNARD, D. (1997). *Optique ondulatoire*. Paris : Masson.
- DITCHBURN, R.W. (1953). *Light*. London et Glasgow : Blackie et Son Limited.
- DUFFAIT, R. (1997). *Expériences d'optique, agrégation de science physique*. Paris : Bréal.
- DUPIN, J.J. et JOHSUA, S. et al. (1993). *Nouvel autodidactique*. Turin : Quillet.
- DUQUESNE, M. (2001). *La physique*. 2^{ème} ed. Bruxelles : De Boeck Université.
- FEYNMAN, R.P. (1987). *Lumière et matière ; une étrange histoire*. Paris : InterEdition.
- FEYNMAN, R.P. et LEIGHTON, R.B. et SANDAS, M. (1972). *The Feynman lectures on physics quantum mechanics*. Massachusetts : Addison-Wesley.
- FRANÇON, M. (1972). *Optique : formation et traitement des images*. Paris : Masson et Cie.
- FRANÇON, M. (1986). *L'optique moderne et ses développements depuis l'apparition du laser*. Coll. « Liaisons Scientifiques ». Paris : Hachette.
- FRANÇON, M. et KRAUZMAN, N. et al. (1969). *Expériences d'optique physique*. Paris : Gordon et Breach.
- FRANÇON, M. et SLANSKY, S. (1965). *Cohérence en optique*. Paris : Centre National de la Recherche Scientifique.
- FRANK, S. et CRAWFORD, Jr. (1968). *Waves*. vol 3. Massachusetts : Mc Graw-Hill.
- GABRIEL, M. et GRANGE, J. (1983). *Comprendre et appliquer l'optique*. vol 2. Paris : Masson.
- GABRIEL, M. et LARCHER, D. (1996). *Optique*. Paris : Masson.
- GIANCOLI, D.C. (1993). *Physique générale 3 : ondes, optique et physique moderne*. Bruxelles : De Boeck Université.
- GOUZERH, J. et PERREAU, M. (1996). *Optique ondulatoire*. Toulouse : Diderot Edition.
- HABER-SCHAIM, U. et al. (1974). *Physique*. 3^{ème} ed. Canada : Centre Educatif et Culturel Inc.
- HEAVENS, O.S. et DITCHBURN, R. W. (1991). *Insight into optics*. Chichester : John Wiley et Sons.
- HECHT, E. (1975). *Theory and problems of optics*. United States of America : McGraw-Hill.
- HECHT, E. (1999). *Physique*. (traduit par T. Bacherrawy). Bruxelles : De Boeck Université.
- HECHT, E. (2002). *Optics*. 4^{ème} ed. United States of America : Addison Wesley.
- HECHT, E. (2005). *Optique*. 4^{ème} ed. (Traduction française dirigée par Sébastien Matte la Faveur et Jean-Louis Meyzonnette). Paris : Pearson Education.
- HUTTEN, E.H. (1969). *Les concepts de la physique*. (traduit par F. Eldin). Coll. « sciences-poche ». Paris : Dunod.
- KALITÉVSKI, N. (1980).). *Optique ondulatoire*. (traduit du russe par S. Medvédev). Moscou : Mir.
- KANE, J. et STERNHEIM, M. (1986). *Physique*. Paris : InterEditions.
- KIPNIS, N. (1993). *Rediscovering optics*. BENA Press : Minneapolis.
- KLEIN, M.V. et FURTAK, T.E. (1986). *Optics*. 2^{ème} ed. New York : John Wiley et Sons.
- KOCK, W.E. (1971). *Ondes sonores et ondes lumineuses. Notions fondamentales sur les ondes*. (traduit par P. Csillag). Coll. « Science Poche ». Paris : Dunod.
- LAUTERBORN, W. et KURZ, T. et WIESENFELDT, M. (1997). (traduit de l'allemand par G. Bloch). *Optique cohérente, fondements et applications*. Paris : Masson.
- LAVERRIERE, R. (1997). *Capes de science physique 1990-1997*. Rosny : Bréal.
- LÉNA, P. et BLANCHARD, A. (1990). *Lumières : une introduction aux phénomènes optiques*. Paris : InterEditions.
- LIPSON, S.G. et LIPSON, H. et TANNHAUSER, D.S. (1995). *Optical physics*. 3^{ème} ed. Cambridge : Cambridge University.

- MANDEL, L. et WOLF, E. (1995). *Optical coherence and quantum optics*. Cambridge : Cambridge University Press.
- MARTIN, G. (1998). *Panorama sur l'optique ; de l'optique géométrique à l'optique quantique*. Paris : Nathan.
- MAUREL, A. et BOUCHET, G. (2003). *Optique ondulatoire : rappels de cours et exercices*. Paris : Belin.
- MAY, M. (1993). *Introduction à l'optique*. Paris : Dunod.
- MÉNÉTRIER, M. et al. (2002). *Optique ondulatoire*. Paris : Hachette Supérieur.
- MEYER-ARENDET, J.R. (1995). *Introduction to classical and modern optics*, 4^{ème} ed. New York : Prentice-hall.
- MOUSSA, A. et PONSONNET, P. (1977). *Cours de physique : optique*. Lyon : André Desvigne.
- MOUCHET, A. (2000). *Apprendre les ondes. Cours et exercices corrigés*. Paris : Dunod.
- PÉREZ, J.Ph. (1991). *Optique géométrique, ondulatoire et polarisation*. Paris : Masson.
- PROVOST, J.P. et PROVOST, P. (1980). *Optique : optique ondulatoire et cohérence*. vol 2. Paris : Cedic/Fernand Nathan.
- QUARANTA, L. (1998). *Introduction à l'optique*. Paris : Masson.
- ROIG, J. (1967). *Optique physique, tome 1 : propagation, cohérence, interférences*. Paris : Masson et Cie.
- ROSSING, T.D. et CHIAVERINA, C.J. (1999). *Light science, physics and the visual arts*. New York : Springer-Verlag.
- ROUX, P. (1994). *Ondes électromagnétiques, optique*. Paris : Ellipses.
- SARMANT, J.P. (1981). *Dictionnaire de physique*. Rennes : Hachette.
- SERRES, M. et FAROUKI, N. (dir.) (1997). *Le Trésor, dictionnaire des sciences*. Paris : Flammarion.
- SEXTANT. (1997). *Optique expérimentale*. Paris : Hermann.
- SOUM, G. et DENIZART, M. et JAGUT, R. (1995). *Optique 2 : optique ondulatoire*. Paris : Hachette Supérieur.
- STEEL, W.H. (1967). *Interferometry*. London : Cambridge University Press.
- STÖCKER, H. et JUNDT, Fr. et GUILLAUME, G. (1999). *Toute la physique, 1^{er} et 2^{ème} cycle, Ecoles d'ingénieurs*. Paris : Dunod.
- SUARDET, R. (1985). *Physique ondulatoire*. Paris : Baillièrre. Technique et Documentation, Lavoisier.
- SWARTZ, C.E. (1981). *Phenomenal Physics*. Canada : John Wiley et Sons.
- WILLIAMSON, S.J. et CUMMINS, H.Z. (1983). *Light and color in nature and art*. New York : John Wiley et Sons.
- YOUNG, M. (2000). *Optics and lasers. Including fibres and optical wave guides*. 5^{ème} ed. Paris : Springer.

ANNEXES

Annexe 1

RESUME DU MEMOIRE DE DEA (2001)

Conceptions des étudiants tunisiens sur la notion de déphasage : Etudes historique et didactique

Sous la direction de :

- M. Mattéo NOTA : Maître de conférences à l'Université Claude Bernard, Lyon1 (L.I.R.D.H.I.S.T) ;
- M. Mustapha FNAIECH : Professeur à la Faculté des Sciences de Monastir (Tunisie).

Soutenu le : 13 / 12 / 2001 à Tunis avec la mention très bien

Devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------|-------------------------------|--------------|
| M. Jean GRÉA | Professeur émérite (Lyon1) | : Président |
| M. Mattéo NOTA | Maître de conférences (Lyon1) | : Membre |
| M. Mustapha FNAIECH | Professeur (Monastir) | : Membre |
| M. Mohamed MILEDI | Professeur (Tunis) | : Rapporteur |
| M. Moncef EL HAJJI | Maître assistant (Tunis) | : Rapporteur |

Résumé :

Le mémoire porte sur les conceptions d'étudiants tunisiens en maîtrise concernant l'optique ondulatoire. On a choisi ce domaine de la physique car il y a peu de travaux didactiques. La plupart des recherches à propos des ondes lumineuses concernent l'optique géométrique et les difficultés de compréhension d'enfants, élèves et étudiants (Fawaz, 1985 ; Beaty, 1987 ; Perales Palacios ; Osborn et Black, 1993 ; Singh et Butler, 1990). Seules deux études portant sur la diffraction et la formation des images (Maurines, 1997, 2000 ; Colin et Viennot, 2000) sont à signaler. Face à ce constat, on a décidé de s'intéresser aux difficultés liées au concept de déphasage.

Les travaux de Singh et Butler sur la réfraction (1990) et de Viennot sur le raisonnement à plusieurs variables (1992) ainsi que ceux portant sur l'utilisation de l'histoire des sciences dans l'enseignement (Toussaint, 1996) ont orienté notre recherche :

- Singh et Butler ont constaté que beaucoup d'étudiants en Nouvelle-Zélande (premier cycle universitaire) ne réalisent pas qu'un faisceau de lumière incidente sur une interface entre deux milieux est partiellement réfléchi et transmis. De plus, peu parmi eux connaissent le terme d'indice de réfraction ou utilisent la formule $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ pour définir le phénomène en

question. On a alors émis l'hypothèse que la présence de conceptions erronées à propos de la réfraction pouvait laisser supposer la présence de conceptions erronées spécifiques au déphasage, pour peu que l'on s'intéresse à des dispositifs impliquant des milieux transparents.

- Viennot a dégagé la tendance des étudiants à réduire le nombre de variables, à favoriser des grandeurs non pertinentes et à utiliser un raisonnement linéaire causal. On a donc voulu savoir comment les étudiants utilisent les grandeurs fondamentales dans des situations mettant en jeu des différences de marche et des déphasages : les grandeurs telles que la longueur d'onde, la vitesse de propagation, la période sont-elles correctement reliées ? Parmi elles, les étudiants ont-ils repéré les invariants fondamentaux ?

- Toussaint a remarqué une analogie certaine entre les idées persistantes chez les élèves et les adultes et des modes de description ayant eu leur "heure de gloire" parmi la communauté scientifique à un moment ou à un autre. On s'est donc intéressé à l'histoire des ondes car elle peut être une source d'informations sur les difficultés des étudiants et sur les

remédiations susceptibles d'être proposées. On fait en effet l'hypothèse que des éléments décisifs pour les scientifiques autrefois sont devenus implicites dans l'enseignement actuel.

Sur le plan théorique, notre travail a consisté en une analyse de contenu. Nous nous sommes intéressées en particulier aux relations fondamentales de l'optique ondulatoire " $\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$ " et " $\lambda = V.T$ ", ainsi qu'aux grandeurs invariantes les rendant opérationnelles. Nous sommes aussi intéressés à l'enseignement dispensé en Tunisie car nous avons fait l'hypothèse que les conceptions erronées des étudiants pouvaient être favorisées par des éléments, restés implicites, du savoir enseigné sur les ondes. Pour l'analyse historique, on a pris comme référence les travaux de Fresnel (publiés en 1965) à travers lesquels on a repéré des discussions explicites du sens à assigner à quelques grandeurs physiques (chemin optique, retard de vibration ...), ainsi que des argumentations reposant sur un modèle mécanique (recours à l'analogie en optique et mécanique).

Sur le plan méthodologique, on a élaboré un questionnaire pour mener à bien nos investigations. Une partie des questions portent sur les facteurs dont dépend la vitesse de propagation d'une onde ainsi que sur le déphasage résultant de la propagation de l'onde dans différents milieux matériels. L'autre partie porte sur le déphasage entre deux ondes dans différentes situations d'interférences lumineuses. Le questionnaire a été passé à 92 personnes :

- 58 étudiants de quatrième année à la Faculté des Sciences de Monastir (Tunisie). Ces étudiants avaient des spécialités différentes : Physique de Solide, Sciences Physiques, Physique Electronique, Physique Fondamentale, mais avaient suivi le même cours d'optique ;
- 12 étudiants inscrits en deuxième année de l'Institut Préparatoire des Etudes Scientifiques et Technologiques de La Marsa (IPEST) ;
- 8 maîtrisards (étudiants ayant leurs maîtrises depuis 1 ou 2 ans) ;
- 14 enseignants de physique de l'enseignement secondaire (par manque de temps, les réponses n'ont pas été complètement analysées).

Les résultats obtenus à la première partie des questions (la deuxième partie des questions n'a pas pu être exploitée car les étudiants n'ont pas eu le temps de répondre) montrent la "mauvaise" appropriation des relations fondamentales de l'optique, dans le sens où elles ne se révèlent pas opératoires. Nous entendons par là que, si les invariants fondamentaux ne sont pas identifiés et que si, dans la relation tout varie, alors celle-ci ne peut être correctement utilisée. Perdant de ce fait ses propriétés opératoires, elle ne permet pas de construire correctement les concepts physiques comme concepts opérationnels (Viard et Langlois, 2000). Ainsi, dans son raisonnement, l'étudiant ne tient pas compte de la variation de la longueur d'onde avec les différents milieux (12 % des étudiants). En contrepartie, il ne construit pas la période –ou la fréquence– comme invariant caractéristique des phénomènes ondulatoires (33 % des étudiants). Si l'on croise les réponses portant sur les variables des relations fondamentales, (comme $\lambda = V.T$), on se rend compte que les propriétés d'invariance ne sont pas correctement attribuées aux variables. Parallèlement à cette mauvaise appropriation des relations fondamentales de l'optique ondulatoire, on rencontre fréquemment une réponse en termes de conception « dissipative ». Les étudiants, en effet, utilisent préférentiellement l'intensité –ou l'amplitude– pour décrire ce qui se passe dans un milieu translucide autre que l'air. Ainsi, leur raisonnement révèle parfois une confusion entre la vitesse de propagation et de vibration : pour certains étudiants, « se propager moins vite » est équivalent à diminuer le nombre d'oscillations. Ce raisonnement confère des propriétés viscomécaniques au milieu de propagation et est à rapprocher des remarques de Maurines (1992, 2000) sur les conceptions 'substantialistes' des apprenants quant au phénomène de propagation des signaux mécaniques. Il a aussi pour conséquence de justifier des schémas où

la vibration se trouve ‘allongée’ plutôt que ‘tassée’ lors du passage de l’onde dans le verre ou l’eau.

Notre étude demande à être poursuivie. Tout d'abord, la deuxième partie des questions reste à exploiter. Par ailleurs, l'interprétation que nous avons proposée doit être encore plus solidement étayée, aussi bien par un approfondissement de l'analyse que par des entretiens d'explicitation. Cette première étape nous paraît indispensable avant d'envisager une remédiation. A ce sujet, nous entrevoyons déjà des pistes de réflexion : comment gérer les conceptions en termes d'atténuation ? Quel type de dispositif de validation peut-on envisager d'introduire et à quel moment ?

Bibliographie :

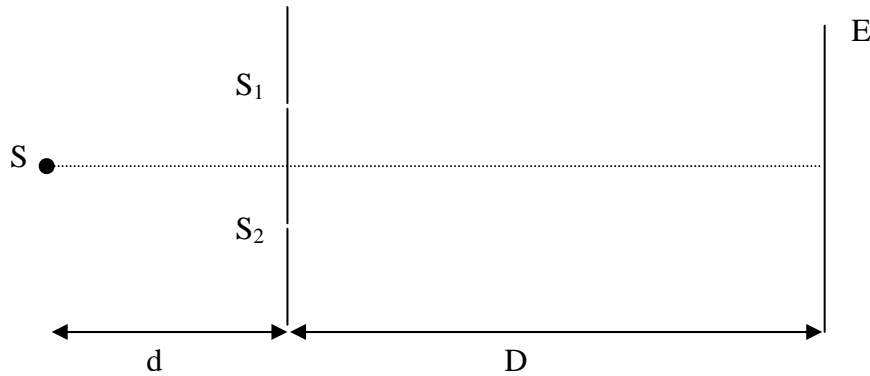
- BEATY, W-J., “The origin of misconception in optics?”, *American Journal of Physics*, Vol. 55, Issue 10, 1987, pp. 872-873.
- COLIN, Ph., VIENNOT, L., “Les difficultés d’étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et de l’image optique”, *Didaskalia*, N°17, 2000, pp. 29-54.
- DE SENARMONT, H., VERDET, E., FRESNEL, L., *Œuvres complètes d’Augustin Fresnel*, Vol 1, 2, Johnson Reprint Corporation, New York, 1965.
- FAWAZ, A-A., Viennot, L., “Image optique et vision”, *BUP*, N°686, 1985, pp. 1125-1146.
- MAURINES, L., “Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent”, *Didaskalia*, N°17, 2000, pp. 55-100.
- MAURINES, L., “Raisonnement spontané sur la diffraction”, *Sixième Séminaire National de Recherche en Didactique de la Physique, de la Chimie et de la Technologie*, L.I.R.D.H.I.S.T., Lyon, 1997, pp. 77-95.
- MAURINES, L., “Spontaneous reasoning on the propagation of visible mechanical signals”, *International Journal of Science Education*, Vol. 14, N°3, 1992, pp. 279-293.
- OSBORNE, J-F., BLACK, P., “Young children’s (7-11) ideas about light and their development”, *International Journal of Science Education*, Vol. 15, N°1, 1993, pp. 83-93.
- PERALES PALACIOS, F-J. et al., “Misconception on geometric optics and their association with relevant educational variables”, *International Journal of Science Education*, Vol. 11, N°3, 1989, pp. 273-281.
- SINGH, A., BULTER, Ph-H., “Refraction : conception and knowledge structure”, *International Journal of Science Education*, Vol. 12, N°4, 1990, pp. 429-442.
- TOUSSAINT, J., *Didactique appliquée de la physique-chimie*, Nathan, Paris, 1996.
- VIARD, J., KHATINE-LANGLOIS, F., “The concept of electric resistance : How Cassirer’s philosophy, and the early developments of electrical circuit theory, allow a better understanding of student’s learning difficulties”, *Science and Education*, Vol. 10, N°3, 2000, pp. 267-286.
- VIENNOT, L., “Raisonnements à plusieurs variables : tendances expérimentales au collège”, *Aster*, N°14, 1992, pp. 127-142.

Annexe 2

QUESTIONNAIRES

QUESTIONNAIRE 1

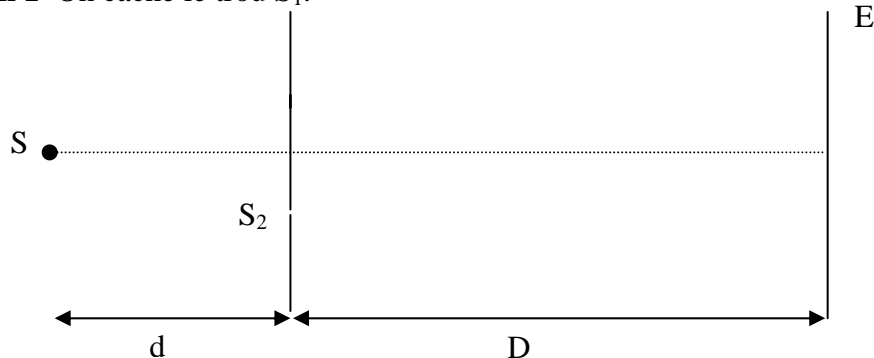
Situation de référence On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E est " D ".



1) *Qu'observe-t-on sur l'écran ? Représentez la figure observée. Expliquez pourquoi on observe cette figure en vous aidant d'un schéma.*

2) Pour chacune des situations suivantes, indiquez si la figure observée sur l'écran est identique ou non à celle de la situation de référence. Si elle est différente, précisez ce qui a changé (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) et justifiez votre réponse en vous aidant d'un schéma.

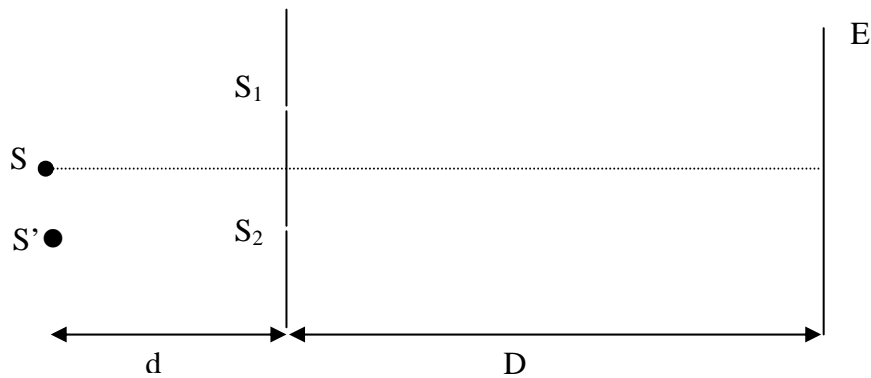
Situation 1 On cache le trou S_1 .



La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- *Oui Pourquoi ?*
- *Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.*

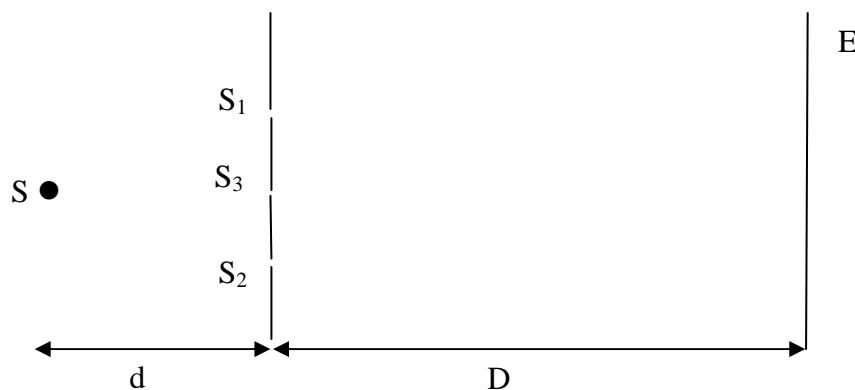
Situation 2 On utilise deux sources ponctuelles monochromatiques S et S' identiques à celle de la situation de référence.



La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- Oui Pourquoi ?
- Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.

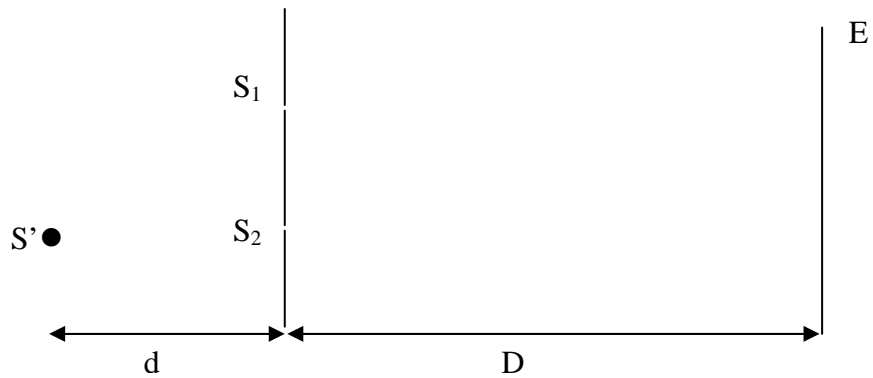
Situation 3 On utilise la source monochromatique ponctuelle de la situation de référence et un écran percé de trois trous équidistants assimilés à des points, S_1, S_2, S_3 .



La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- Oui Pourquoi ?
- Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.

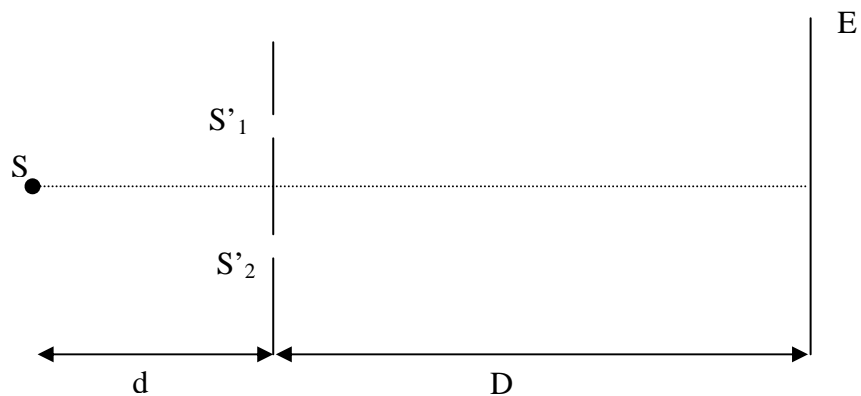
Situation 4 On utilise une source ponctuelle S' identique à celle de la situation de référence mais celle-ci est placée à un autre endroit.



La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- Oui Pourquoi ?
- Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.

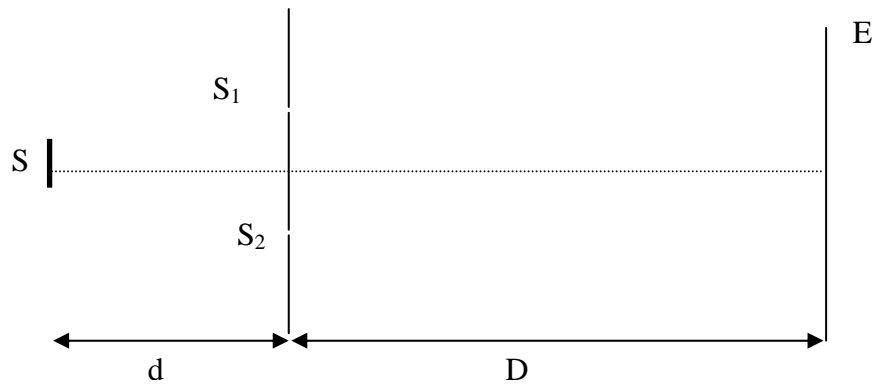
Situation 5 On utilise la source ponctuelle monochromatique S et un écran percé de deux trous S'_1 et S'_2 . Ces trous sont petits mais on ne peut plus les considérer comme des points.



La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- Oui Pourquoi ?
- Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.

Situation 6 La source S n'est plus ponctuelle mais elle a une largeur s

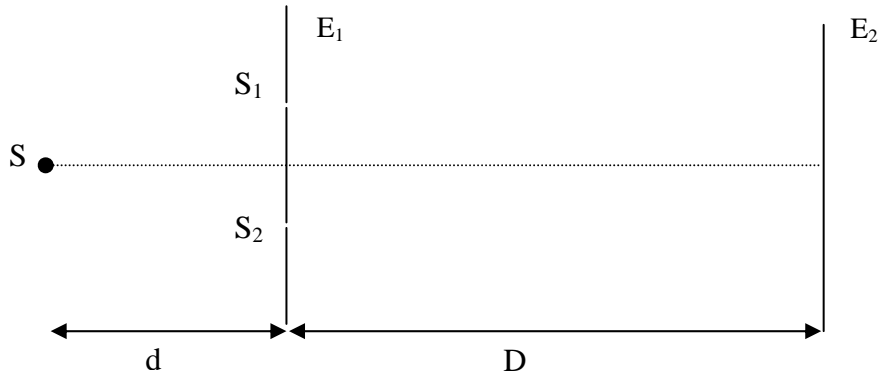


La figure observée sur l'écran est-elle identique à celle de la situation de référence ?

- *Oui Pourquoi ?*
- *Non Qu'est-ce qui a changé ? (écartement des franges, position, luminosité, contraste, autre chose...) Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma pour répondre et expliquez le.*

QUESTIONNAIRE 2

Situation de référence On place une source lumineuse S , monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de " a ". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est " d " et la distance trous-écran d'observation E_2 est " D ". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E_2 .

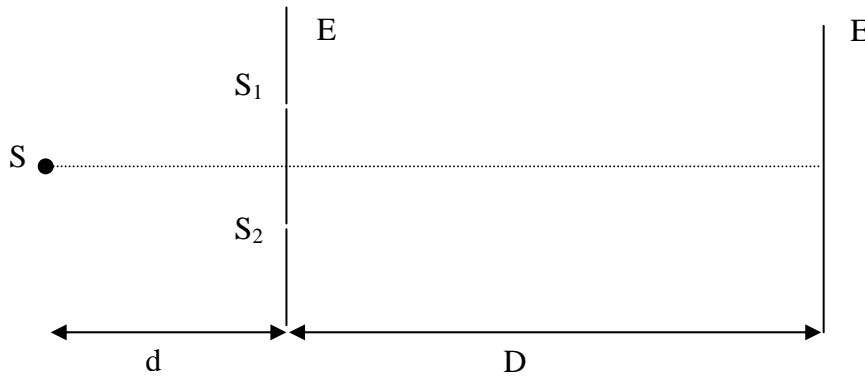


Répondre aux questions suivantes en cochant la case correcte et en justifiant la réponse à chaque fois. Détaillez également les modifications observées éventuellement sur l'écran

| | vrai | faux | Pourquoi ? |
|---|------|------|------------|
| Dans l'expérience | | | |
| a. la distance entre les franges diminue quand on éloigne l'écran | | | |
| b. les franges disparaissent quand on élargit un peu les trous | | | |
| c. les franges disparaissent quand on augmente la distance entre les deux trous S_1 et S_2 | | | |
| d. les franges sombres se resserrent quand on perce un troisième trou entre les deux autres sur E_1 | | | |
| e. les franges se déplacent vers le haut quand on ajoute une autre source S' au-dessus de S | | | |
| f. les franges sont plus lumineuses quand on utilise une source monochromatique étendue et non ponctuelle | | | |

QUESTIONNAIRE 3

Situation de référence On place une source lumineuse S, monochromatique et ponctuelle, devant un écran percé de deux trous, S_1 et S_2 , distants de "a". Les trous sont suffisamment petits pour pouvoir être assimilés à des points. La distance trous-source est "d" et la distance trous-écran d'observation E_2 est "D". On observe des franges d'interférence rectilignes équidistantes sur l'écran E_2 .



1) On recouvre l'un des trous d'Young par une lame de verre d'épaisseur faible e . Cochez les cases correspondant aux modifications observées sur l'écran et indiquez éventuellement si d'autres modifications se produisent. Précisez si cette (ces) modification (s) a (ont) lieu sur tout l'écran ou seulement sur une partie. Justifiez vos réponses.

- *la figure d'interférence est translatée
- *la distance entre les franges sombres est modifiée
- *les franges sont moins contrastées (elles se brouillent)
- *l'intensité des franges augmente
- *les franges disparaissent
- *Autres.....

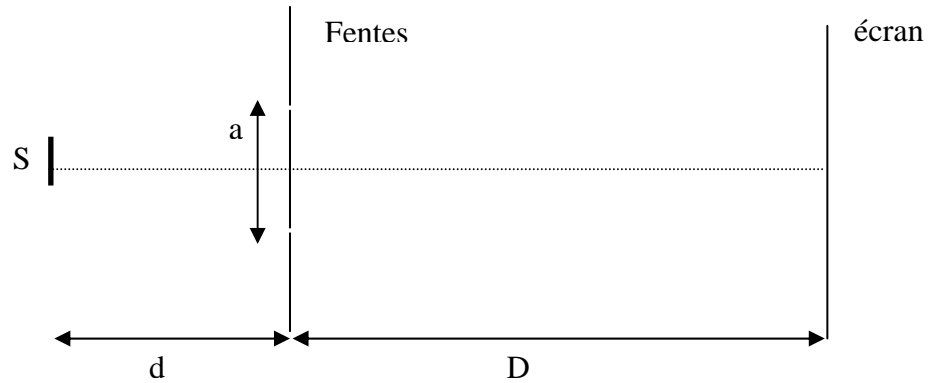
2) La source primaire S est ponctuelle mais émet de la lumière blanche. On place un filtre rouge devant l'un des trous, un vert devant l'autre. Indiquez par une (des) croix si on observe sur l'écran :

- *des franges brillantes jaunes
- *des franges brillantes rouges
- *des franges brillantes vertes
- *il n'y a pas de franges
- *Autres.....

Justifiez votre réponse et précisez si les franges sont identiques sur tout l'écran.

QUESTIONNAIRE 4

On s'intéresse au dispositif des fentes d'Young. On éclaire la fente source grâce à une lampe à vapeur de sodium et à un condenseur (non représentés). La fente source a une largeur s et les fentes d'Young sont distantes de a . La distance fente source-fentes d'Young est d et la distance fentes d'Young-écran d'observation est D .



On observe sur l'écran des franges d'interférence.

1) On diminue la distance ' d ', les franges disparaissent. Pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma si nécessaire.

2) Peut-on en diminuant l'écartement ' a ' des fentes faire réapparaître les franges ? oui non pourquoi ? Aidez vous d'un schéma si nécessaire.

QUESTIONNAIRE 5

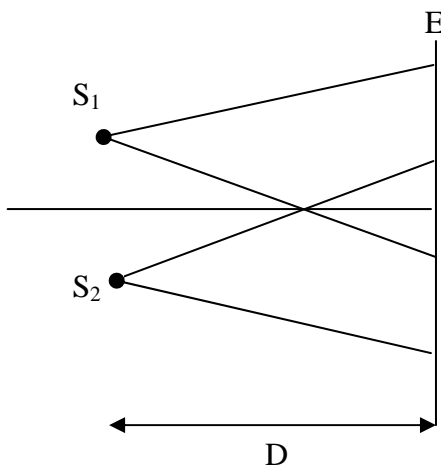
Pour chacune des situations suivantes, peut-on observer un phénomène d'interférences sur l'écran E ?

Si oui, représentez la figure observée. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma si besoin est.

Si non, qu'observe-t-on sur l'écran et pourquoi ?

Situation 1

S_1 et S_2 sont deux lampes à vapeur de sodium considérées comme des sources ponctuelles.



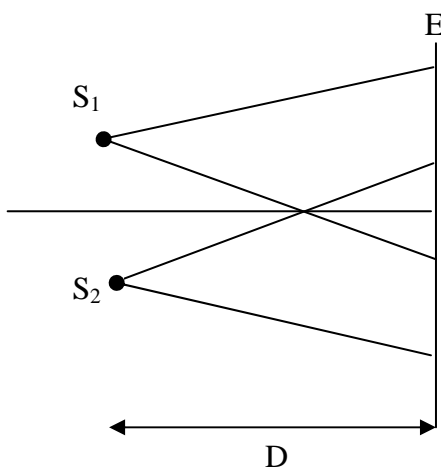
Peut-on observer un phénomène d'interférences sur l'écran E ?

Oui. Représentez la figure observée et expliquez pourquoi on observe ce phénomène.

Non. Qu'observe-t-on et pourquoi ?

Situation 2

S_1 et S_2 sont deux lampes considérées comme des sources ponctuelles monochromatiques émettant des lumières de longueur d'onde différentes.



Peut-on observer un phénomène d'interférences sur l'écran E ?

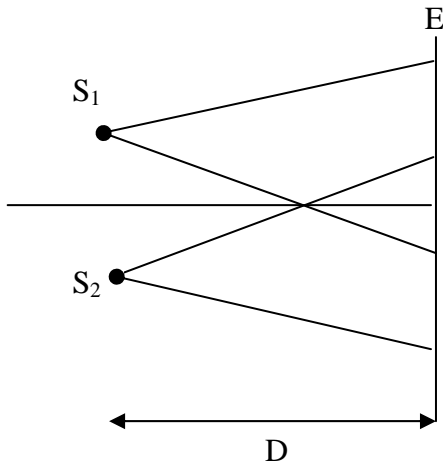
Oui. Représentez la figure observée et expliquez pourquoi on observe ce phénomène.

Non. Qu'observe-t-on et pourquoi ?

Situation 3

S_1 et S_2 sont deux lasers He-Ne dont on a élargi le faisceau lumineux grâce à un dispositif optique non représenté. Dans la situation 3a, les faisceaux sont divergents et dans la situation 3b, les faisceaux sont parallèles.

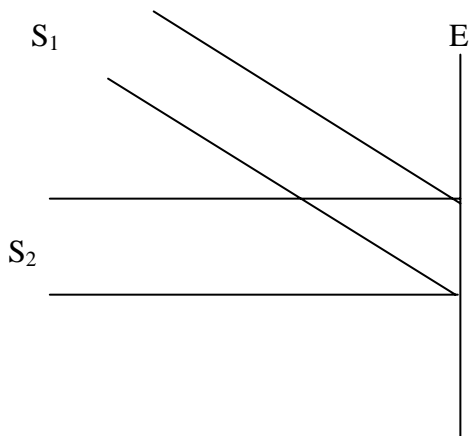
Situation 3a



Peut-on observer un phénomène d'interférences sur l'écran E ?

Oui. Représentez la figure observée et expliquez pourquoi on observe ce phénomène
Non. Qu'observe-t-on et pourquoi ?

Situation 3b



Peut-on observer un phénomène d'interférences sur l'écran E ?

Oui. Représentez la figure observée et expliquez pourquoi on observe ce phénomène.
Non. Qu'observe-t-on et pourquoi ?

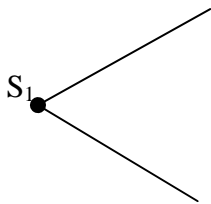
QUESTIONNAIRE 6

On considère deux sources ponctuelles identiques S_1 et S_2 . Elles émettent un faisceau de lumière divergent et sont placées de façon à ce que les faisceaux soient perpendiculaires l'un à l'autre. Dans la situation 1, les deux sources S_1 et S_2 sont des lampes à vapeur de sodium. Dans la situation 2, les deux sources S_1 et S_2 sont des lasers. On rappelle que le phénomène d'interférences lumineuses se produit avec deux sources indépendantes uniquement dans le cas de la lumière laser.

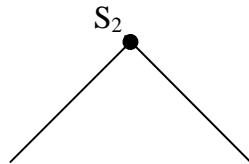
1) Pour chacune des deux situations, complétez les schémas correspondant à ce qui se passe lorsque les deux sources émettent ensemble. Indiquez comment est le trajet de la lumière avant que les faisceaux se croisent et une fois qu'ils se sont croisés. Indiquez également ce qui se passe dans la zone de croisement. Expliquez.

Situation 1 : deux lampes à vapeur de sodium

S_1 émet seule



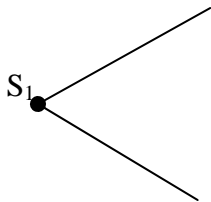
S_2 émet seule



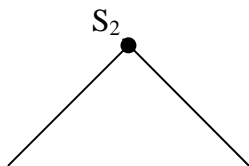
S_1 et S_2 émettent ensemble

Situation 2 : deux lasers

S_1 émet seule



S_2 émet seule



S_1 et S_2 émettent ensemble

1) Comparez les valeurs de la vitesse de la lumière, de la fréquence, de la longueur d'onde dans la zone de croisement des faisceaux à leur valeur avant que les faisceaux se sont croisés. Comparez les valeurs de la vitesse de la lumière, de la fréquence, de la longueur d'onde après que les faisceaux se sont croisés à leur valeur avant que les faisceaux se sont croisés. Expliquez.

Situation 1

Zone de croisement des faisceaux lumineux

Vitesse de la lumière

Fréquence

Longueur d'onde

Intensité

Après le croisement des faisceaux lumineux

Vitesse de la lumière

Fréquence

Longueur d'onde

Intensité

Situation 2

Zone de croisement des faisceaux lumineux

Vitesse de la lumière

Fréquence

Longueur d'onde

Intensité

Après le croisement des faisceaux lumineux

Vitesse de la lumière

Fréquence

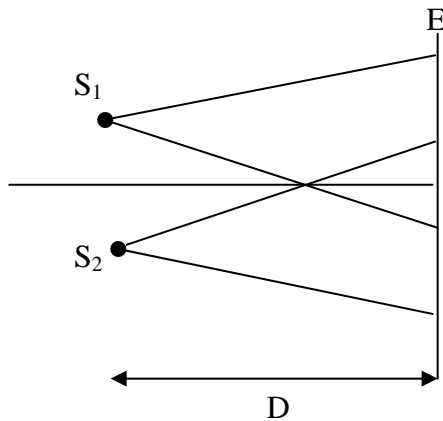
Longueur d'onde

Intensité

QUESTIONNAIRE 7

Situation de référence

S_1 et S_2 sont deux sources secondaires obtenues à partir d'une source primaire ponctuelle monochromatique S , à l'aide d'un dispositif optique non représenté. On suppose que S_1 et S_2 ont la même intensité lumineuse et sont en phase et que la source primaire S émet une lumière "rouge".



E est un écran placé parallèlement à la ligne des sources. On observe sur l'écran E des franges d'interférences, c-a-d des lignes alternativement brillantes et sombres, de couleur rouge, distantes de i_0 , perpendiculaire au plan du schéma ci-contre.

1) Pour chacune des situations suivantes, indiquez si la figure observée sur l'écran est identique ou non à celle de la situation de référence. Si elle est différente, précisez par une croix dans le tableau donné ci-dessous ce qui a changé (direction des franges, écartement, position, luminosité, contraste...). Expliquez pourquoi en dessous du tableau.

Situation 1 La lumière émise par la source primaire S , à l'origine des sources secondaires S_1 et S_2 , est composée de deux radiations monochromatiques au lieu d'une seule. Les fréquences correspondent à des lumières "rouge" et "verte".

Situation 2 L'intensité de la source S_1 est deux fois plus grande que l'intensité de la source S_2 au lieu de lui être égale.

Situation 3 La source S_1 n'est plus en phase avec la source S_2 mais en opposition de phase.

Situation 4 La lumière émise par la source primaire S , à l'origine des sources secondaires S_1 et S_2 , est une lumière monochromatique « verte » et non « rouge ».

Situation 5 La lumière émise par la source primaire S est plus intense.

| | La source primaire S émet deux radiations et non une seule | Intensité de S_1 est deux fois plus grande | S_1 et S_2 sont en opposition de phase | La source primaire S émet une lumière verte | La source primaire S émet une lumière plus intense |
|-------------------|--|--|--|---|--|
| Forme des franges | | | | | |
| Direction | | | | | |
| Position | | | | | |
| Ecartement | | | | | |
| Luminosité | | | | | |
| Contraste | | | | | |
| Couleur | | | | | |
| Autre chose | | | | | |

Situation 1 La source primaire S, à l'origine des sources secondaires S_1 et S_2 , émet deux radiations monochromatiques au lieu d'une seule. Les fréquences correspondent à des lumières "rouge" et "verte".

Situation 2 L'intensité de la source S_1 est deux fois plus grande que l'intensité de la source S_2 .

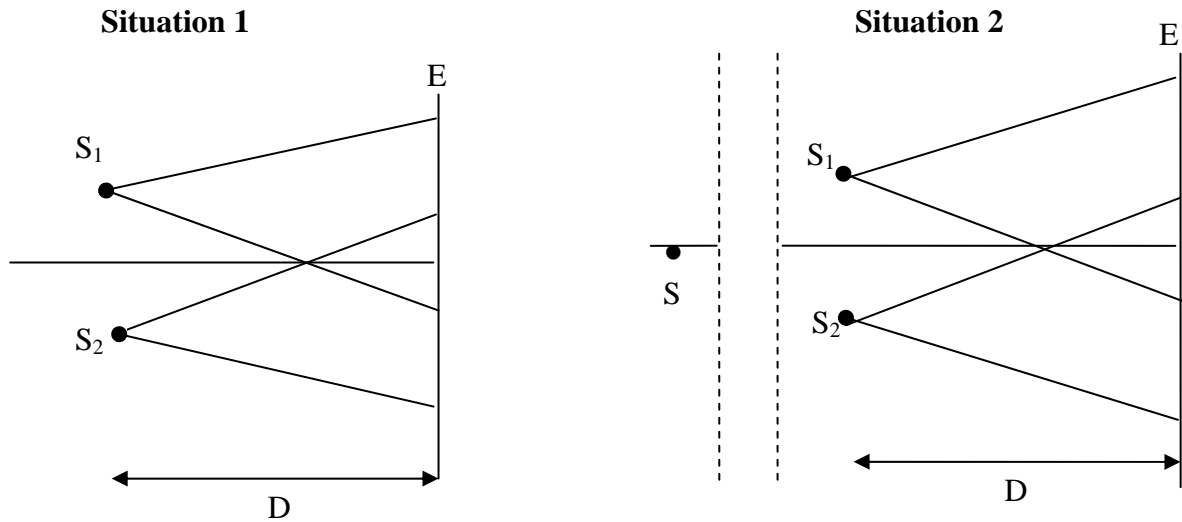
Situation 3 La source S_1 n'est plus en phase avec la source S_2 mais en opposition de phase.

Situation 4 La source primaire S, à l'origine des sources secondaires S_1 et S_2 , émet une radiation monochromatique correspondant à de la lumière "verte".

Situation 5 La source primaire S émet une lumière plus intense que dans la situation de référence.

QUESTIONNAIRE 8

1) On s'intéresse à ce qui se passe dans le plan Π dans les deux situations suivantes :



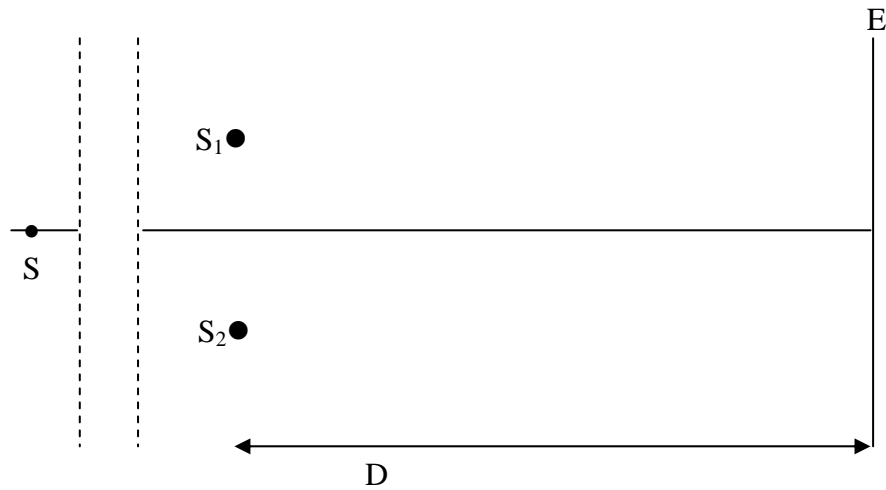
S_1 et S_2 sont deux lampes à vapeur de sodium considérées comme des sources ponctuelles.

S_1 et S_2 sont deux sources secondaires obtenues à partir de S à l'aide d'un dispositif optique non représenté. S est une lampe à vapeur de sodium considérée comme ponctuelle.

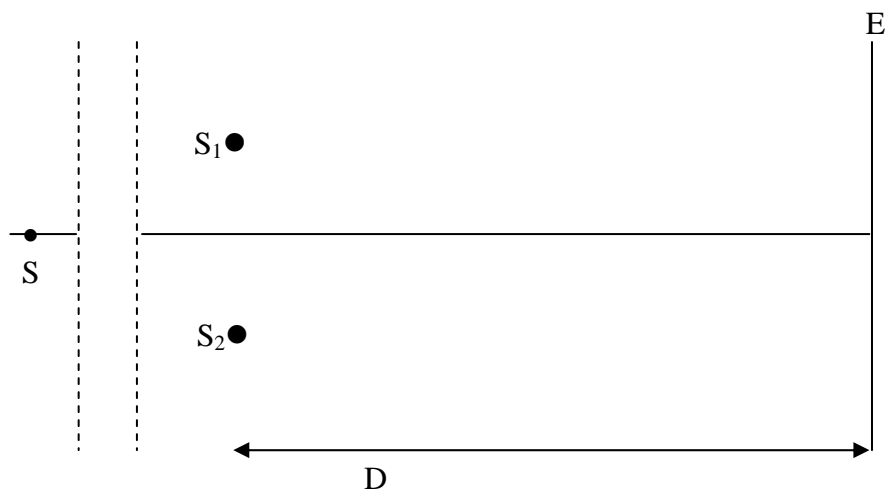
Expliquez pourquoi il existe des franges d'interférences dans le plan Π , c-à-d. des lignes rectilignes parallèles alternativement brillantes et sombres, uniquement dans la situation 2. Vous prendrez soin de détailler votre réponse en vous aidant si nécessaire d'un schéma.

2) On éclaire le dispositif optique de la situation 2 par une lampe à vapeur de sodium puis par un laser He-Ne. On supposera l'intensité lumineuse identique dans les deux cas.

S : lampe à vapeur de sodium



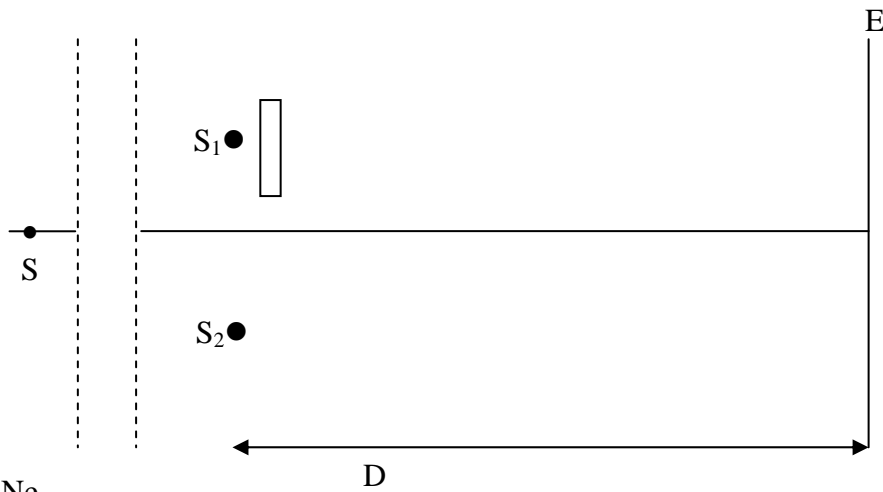
S : laser He-Ne



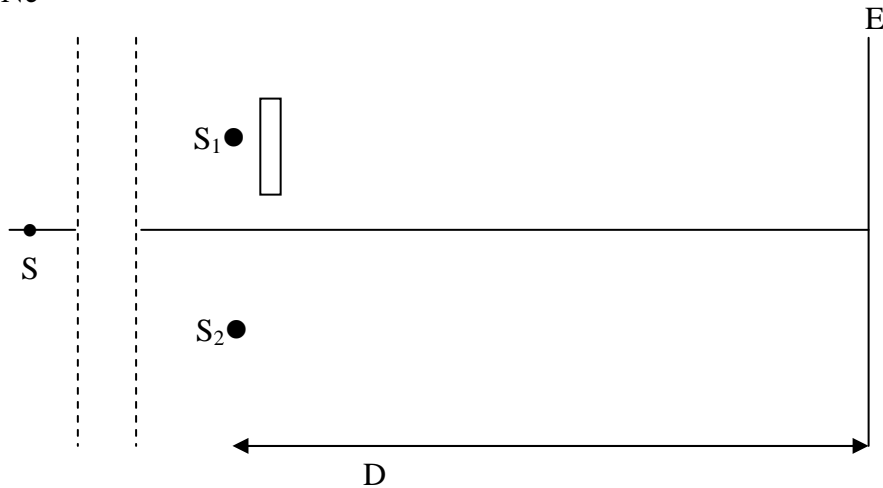
Expliquez pourquoi avec le laser, la largeur du champ d'interférences dans le plan Π est plus grande qu'avec la lampe à vapeur de sodium. Aidez-vous d'un schéma pour répondre si nécessaire.

3) Dans les deux situations de la question 2, on place devant la source secondaire S_1 une lame à faces parallèles transparente d'indice n et d'épaisseur e .

S : lampe à vapeur de sodium



S : laser He-Ne



Expliquez pourquoi les franges d'interférences se déplacent vers le haut dans les deux cas. Aidez-vous d'un schéma si nécessaire.

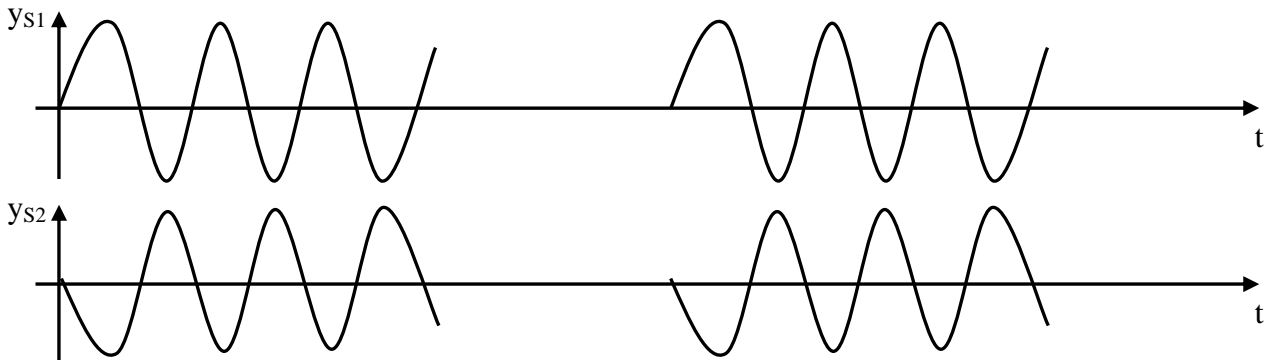
4) On reprend les deux situations de la question 3. On place successivement des lames d'épaisseurs différentes devant S_1 . On constate que les franges se déplacent mais peuvent aussi disparaître.

Expliquez pourquoi la disparition des franges se produit dans le cas de la lampe à vapeur de sodium pour une lame d'épaisseur plus petite que dans le cas du laser He-Ne. Aidez-vous d'un schéma si nécessaire.

QUESTIONNAIRE 9

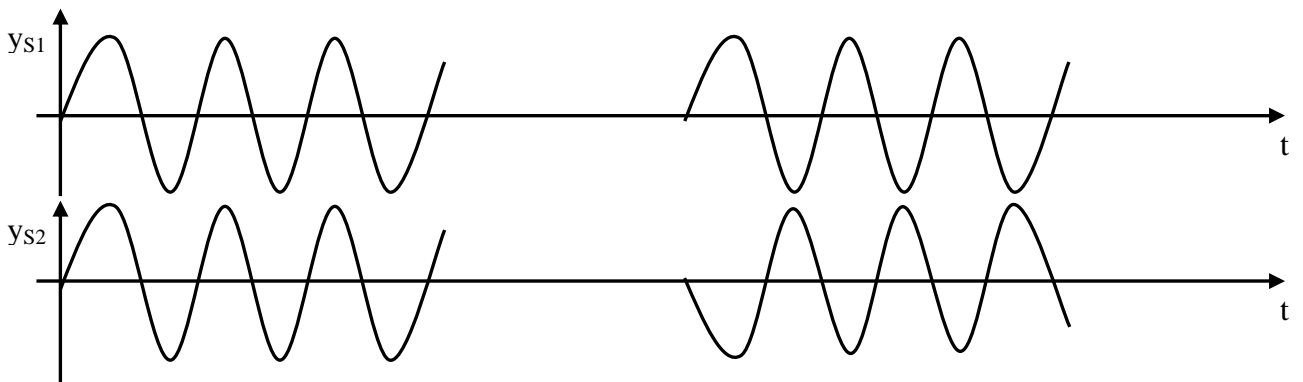
Les schémas représentent des trains d'ondes émis par deux sources ponctuelles S_1 et S_2 . Précisez pour chaque cas si les sources sont cohérentes et pourquoi.

Situation 1



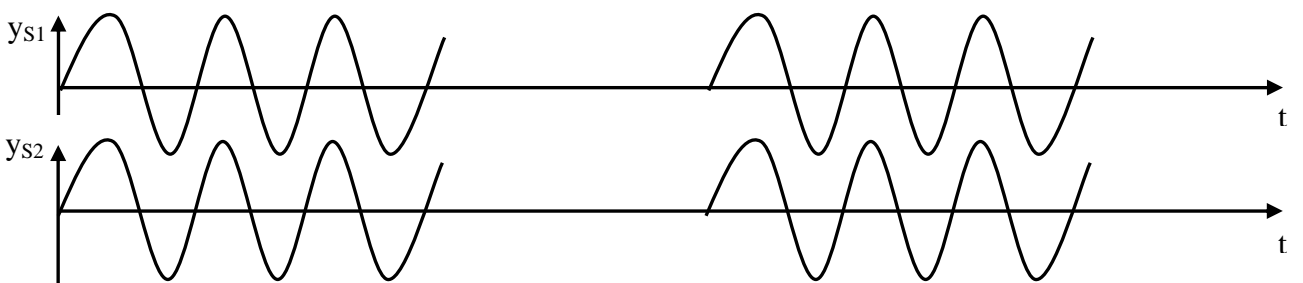
Sources cohérentes : oui, non, pourquoi ?

Situation 2



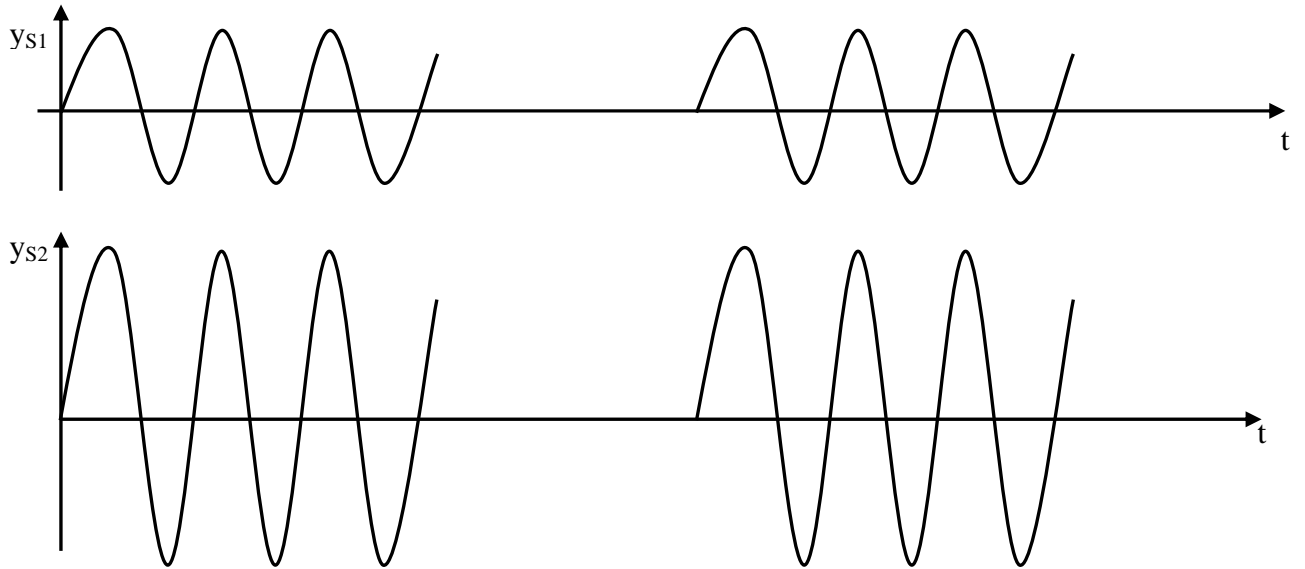
Sources cohérentes : oui, non, pourquoi ?

Situation 3



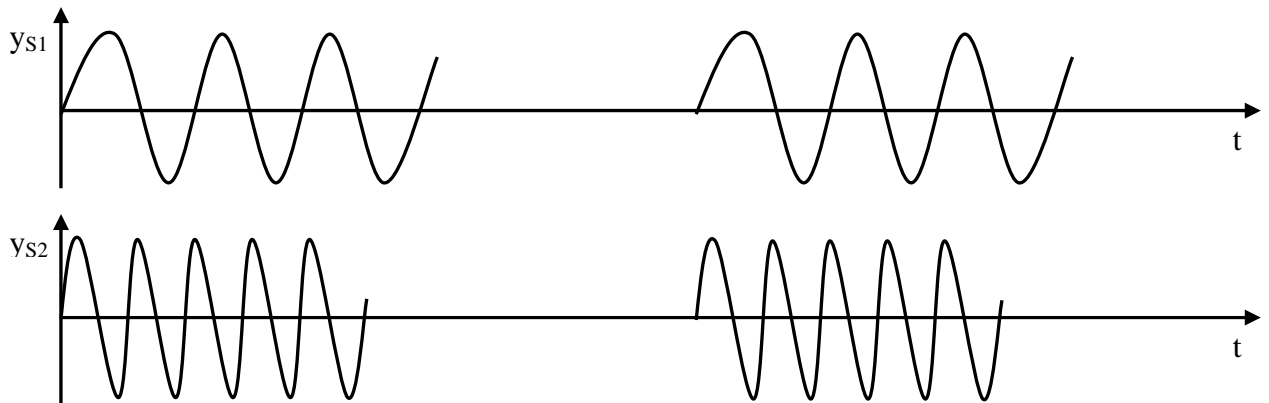
Sources cohérentes : oui, non, pourquoi ?

Situation 4



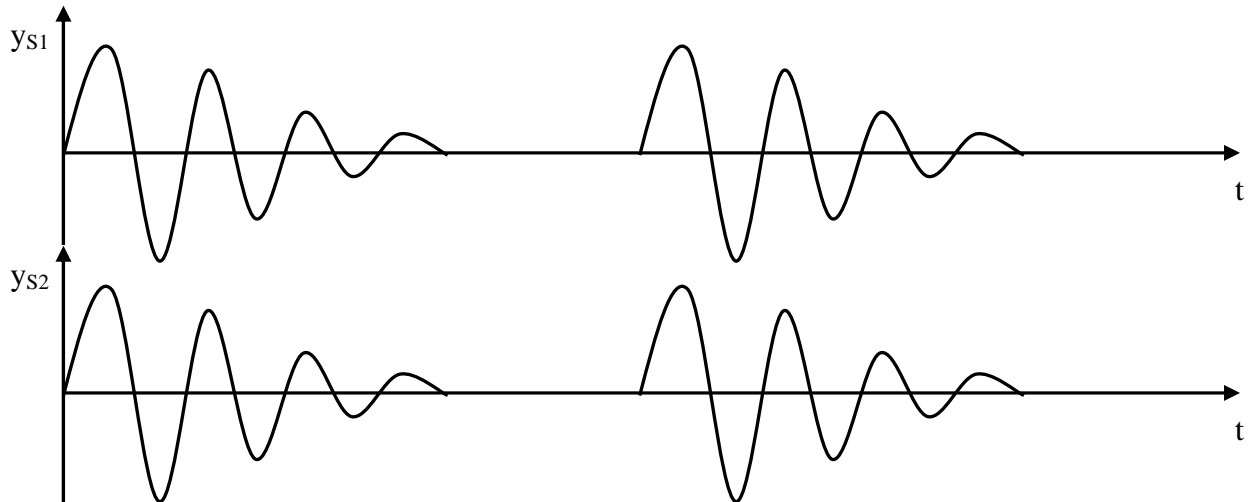
Sources cohérentes : oui, non, pourquoi ?

Situation 5



Sources cohérentes : oui, non, pourquoi ?

Situation 6



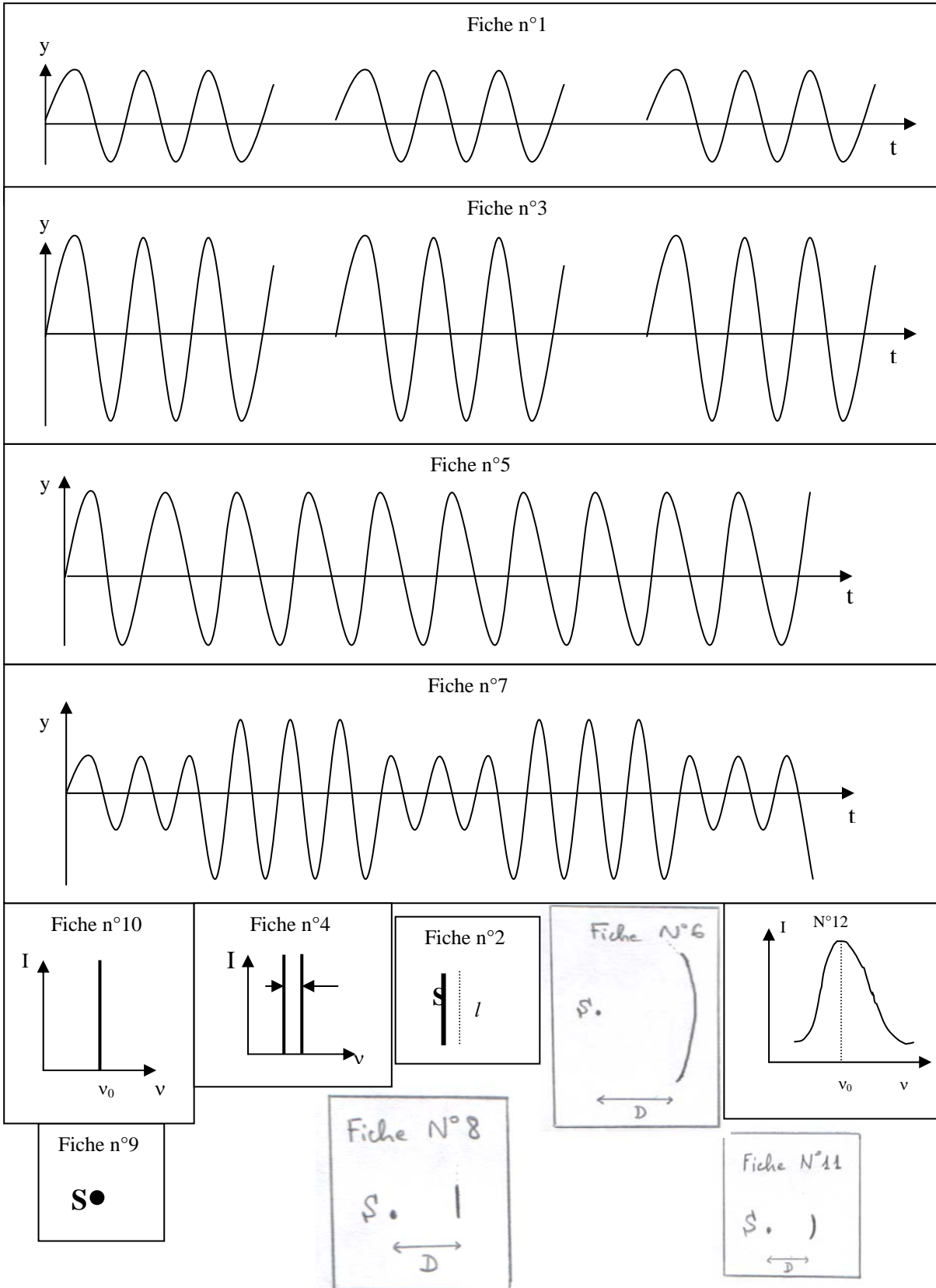
Sources cohérentes : oui, non, pourquoi ?

Indiquez dans le tableau donné ci-dessous s'il s'agit d'une bonne ou mauvaise cohérence, temporelle ou/et spatiale pour un seul train d'onde Y_{S2} . Justifiez vos réponses.

| | Bonne cohérence temporelle | Bonne cohérence spatiale |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | oui, non, pourquoi ? | oui, non, pourquoi ? |
| 2 | oui, non, pourquoi ? | oui, non, pourquoi ? |
| 3 | oui, non, pourquoi ? | oui, non, pourquoi ? |
| 4 | oui, non, pourquoi ? | oui, non, pourquoi ? |
| 5 | oui, non, pourquoi ? | oui, non, pourquoi ? |
| 6 | oui, non, pourquoi ? | oui, non, pourquoi ? |

Questionnaire 10

On dispose de plusieurs sources lumineuses et de plusieurs fiches (représentées ci-dessous) sur lesquelles sont donnés des renseignements concernant ces sources. Ce sont : l'élongation de l'onde émise par la source au cours du temps $y(t)$ (fiches n°1,3,5,7), le spectre de l'onde $I(\nu)$ (fiches n°4,10,12), la dimension de la source (fiches n°2,9), la portion de la surface d'onde à une distance donnée D de la source où l'amplitude de l'onde n'est pas nulle (fiches n°6,8,11).



Questions :

1) Indiquez par une croix la (les) fiche(s) qui donne(nt) un renseignement sur la cohérence temporelle des sources. Expliquez.

S'il y en a plusieurs, classez les par ordre de cohérence temporelle croissant. Expliquez.

| Fiche n° | | Classement par ordre de cohérence temporelle croissant | |
|----------|--------------------------|--|--------------------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> | 7 | <input type="checkbox"/> |
| 2 | <input type="checkbox"/> | 8 | <input type="checkbox"/> |
| 3 | <input type="checkbox"/> | 9 | <input type="checkbox"/> |
| 4 | <input type="checkbox"/> | 10 | <input type="checkbox"/> |
| 5 | <input type="checkbox"/> | 11 | <input type="checkbox"/> |
| 6 | <input type="checkbox"/> | 12 | <input type="checkbox"/> |

2) Indiquez par une croix la (les) fiche(s) qui donne(nt) un renseignement sur la cohérence spatiale des sources. Expliquez.

S'il y en a plusieurs, classez les par ordre de cohérence spatiale croissant. Expliquez.

| Fiche n° | | Classement par ordre de cohérence spatiale croissant | |
|----------|--------------------------|--|--------------------------|
| 1 | <input type="checkbox"/> | 7 | <input type="checkbox"/> |
| 2 | <input type="checkbox"/> | 8 | <input type="checkbox"/> |
| 3 | <input type="checkbox"/> | 9 | <input type="checkbox"/> |
| 4 | <input type="checkbox"/> | 10 | <input type="checkbox"/> |
| 5 | <input type="checkbox"/> | 11 | <input type="checkbox"/> |
| 6 | <input type="checkbox"/> | 12 | <input type="checkbox"/> |

3) Plusieurs fiches peuvent-elles caractériser une même source ?
Non, pourquoi ?

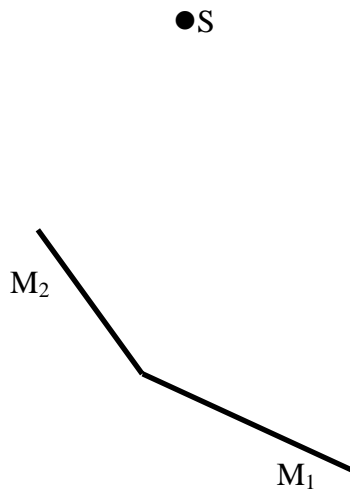
Oui, pourquoi ? Lesquelles ? Pour indiquer que deux fiches peuvent caractériser une même source, mettez une croix dans le tableau ci-dessous. Expliquez comment vous l'avez rempli.

| Fiche n° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | |

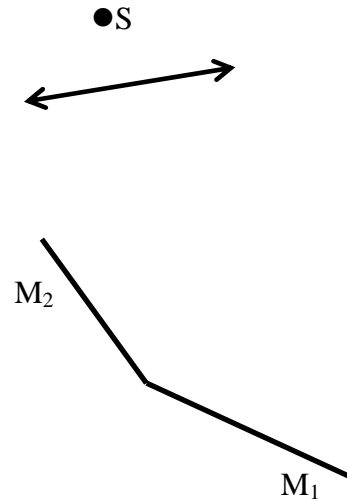
QUESTIONNAIRE 11

On éclaire deux miroirs plans M_1 et M_2 qui font entre eux un angle α (de quelques minutes) grâce à une lampe monochromatique ponctuelle S . Dans la situation 1, la source est placée devant les miroirs, dans la situation 2, la source est placée au foyer objet d'une lentille.

Situation 1



Situation 2



- 1) *Peut-on observer un phénomène d'interférences dans la situation 1 ?*
- *Oui. Représentez la figure observée sur un écran E dont vous préciserez la position. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma.*
 - *Non. Qu'observe-t-on et pourquoi ?*

- 2) *Observe-t-on la même chose dans les situations 1 et 2 ?*
- *Oui, pourquoi ?*
 - *Non, qu'est-ce qui a changé ? pourquoi ?*

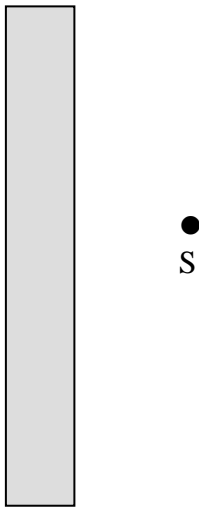
QUESTIONNAIRE 12

On éclaire une lame de mica à faces parallèles grâce à une source lumineuse S monochromatique.

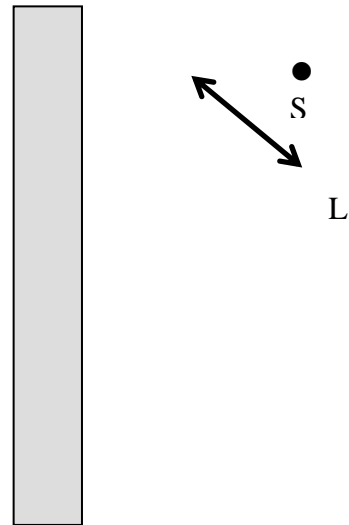
Dans les situations 1 et 2, la source est ponctuelle. Dans 1, elle est placée devant la lame et dans 2, au foyer objet d'une lentille L.

Dans les situations 3 et 4, la source est étendue. Dans 3, elle est placée devant la lame et dans 4, au foyer objet d'une lentille L.

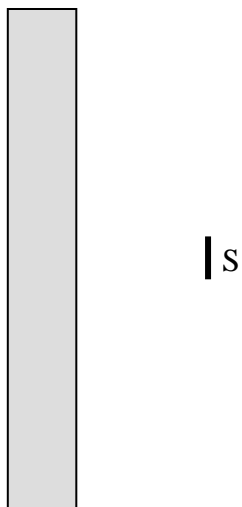
Situation 1



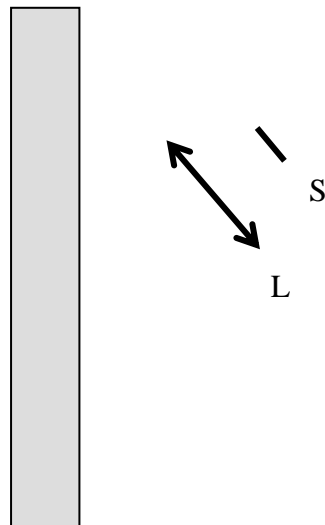
Situation 2



Situation 3



Situation 4



Questions

2) *Peut-on observer un phénomène d'interférences dans la situation 1 ?*

- *Oui. Représentez la figure observée sur un écran E dont vous préciserez la position. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma.*
- *Non. Qu'observe-t-on et pourquoi ?*

2) *Observe-t-on la même chose dans les situations 1 et 2 ?*

Oui, pourquoi ? Non, qu'est-ce qui a changé et pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma si besoin est.

3) *Observe-t-on la même chose dans les situations 1 et 3 ?*

Oui, pourquoi ? Non, qu'est-ce qui a changé et pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma si besoin est.

4) *Observe-t-on la même chose dans les situations 2 et 4 ?*

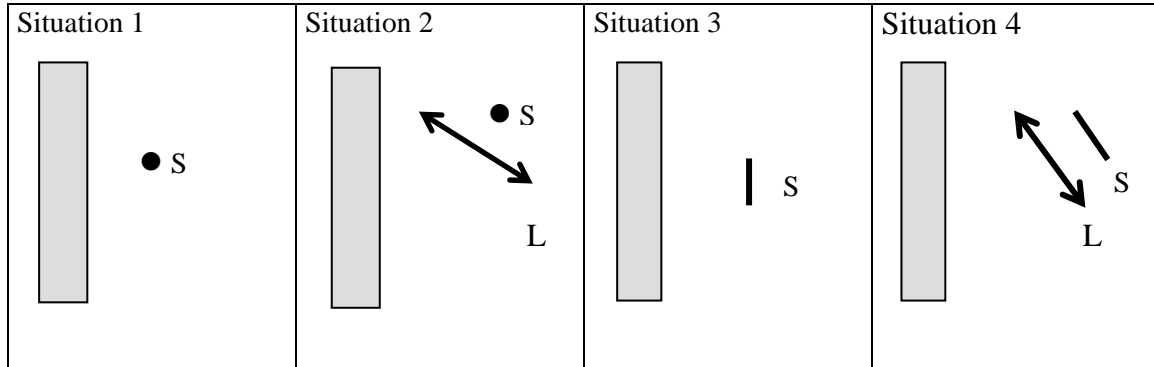
Oui, pourquoi ? Non, qu'est-ce qui a changé et pourquoi ? Aidez-vous d'un schéma si besoin est.

QUESTIONNAIRE 13

On éclaire une lame de mica à faces parallèles grâce à une source lumineuse S monochromatique.

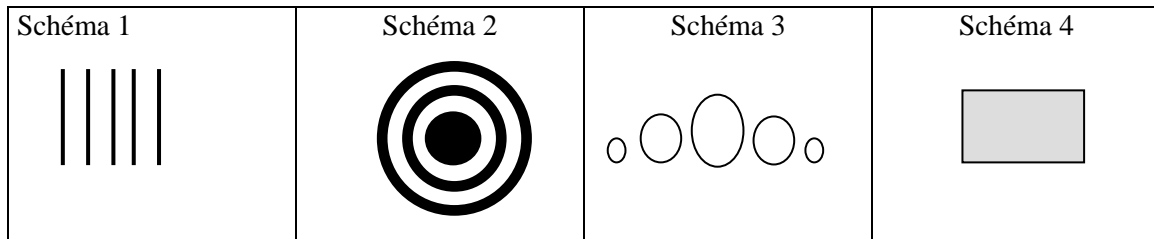
Dans les situations 1 et 2, la source est ponctuelle. Dans 1, elle est placée devant la lame et dans 2, au foyer objet d'une lentille L.

Dans les situations 3 et 4, la source est étendue. Dans 3, elle est placée devant la lame et dans 4, au foyer objet d'une lentille L.



Pour chaque situation, indiquez quel est celui des schémas donnés ci-dessous qui correspond à la figure que l'on peut observer sur un écran convenablement placé.

Justifiez votre réponse et précisez où doit se trouver l'écran.

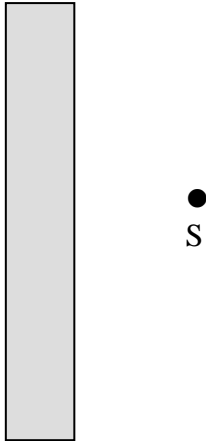


QUESTIONNAIRE 14

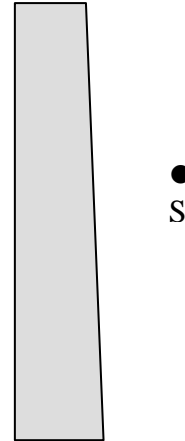
On éclaire une fine lame de mica grâce à une source de lumière monochromatique S considérée comme ponctuelle.

Dans la situation 1, les deux faces de la lame de mica sont parallèles et dans la situation 2, elles ne le sont pas.

Situation 1



Situation 2



Questions

1) *Peut-on observer un phénomène d'interférences dans la situation 1 ?*

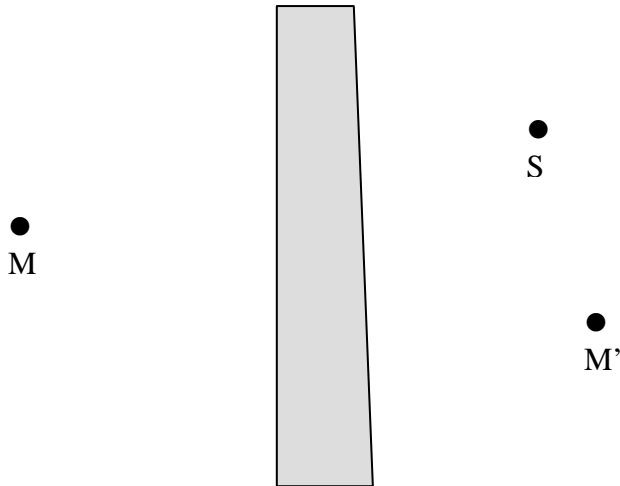
- *Oui. Représentez la figure observée sur un écran E dont vous préciserez la position. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma.*
- *Non, qu'observe-t-on et pourquoi ?*

2) *Observe-t-on la même chose dans les situations 1 et 2 ?*

- *Oui, pourquoi ?*
- *Non, qu'est ce qui a changé et pourquoi ?*

QUESTIONNAIRE 15

On éclaire une fine lame de mica grâce à une source lumineuse S de lumière blanche considérée comme ponctuelle. Les faces de la lame de mica ne sont pas parallèles. On observe la lame en se plaçant en M ou en M'.



Peut-on observer un phénomène d'interférences ?

- *Oui. Représentez la figure observée sur un écran E dont vous préciserez la position. Expliquez pourquoi on observe ce phénomène en vous aidant d'un schéma.*
- *Non, qu'observe-t-on et pourquoi ?*

Annexe 3

PROGRAMMES D'ENSEIGNEMENT

1. AU SECONDAIRE

1.1. Programme de Terminale, section Mathématiques, Sciences expérimentales et Techniques en Tunisie (1998)

| Objectifs spécifiques | Contenu | Recommandations | Horaire |
|--|--|---|----------------------------------|
| <p>L'élève sera capable de reconnaître un ébranlement transversal</p> <p>*énoncer le principe de propagation et l'exprimer par la relation mathématique : $y(t,x) = y(t-x/v)$.</p> <p>L'élève sera capable de :</p> <p>*écrire l'équation horaire du mouvement d'un point quelconque du milieu de propagation connaissant celle de la source ;</p> <p>*représenter graphiquement les sinusoides des temps et des espaces.</p> <p>L'élève sera capable de :</p> <p>*dégager, à partir d'une étude expérimentale, le phénomène d'interférences et interpréter théoriquement les résultats expérimentaux.</p> | <p>I. Les ondes mécaniques</p> <p>I.1 Propagation d'un ébranlement transversal, Célérité, Principe de propagation.</p> <p>I.2 Propagation d'une onde sinusoidale entretenue. Double périodicité. Longueur d'onde.</p> <p>I.3 Interférences</p> | <p>On insistera sur la constance de la célérité dans un milieu homogène et sur le transport d'énergie sans transport de matière ; on indiquera que la célérité ne dépend pas de l'amplitude de l'ébranlement mais dépend des caractéristiques du milieu. On donnera l'expression de la célérité le long d'une corde tendue.</p> <ul style="list-style-type: none"> • On commencera par l'étude de la propagation d'une onde sinusoidale dans un milieu unidimensionnel. • Par l'expérience d'abord et l'interprétation théorique ensuite, on montrera la double périodicité du phénomène ce qui amènera à introduire la longueur d'onde. • On étendra l'étude aux ondes circulaires à la surface d'un liquide. • On commence cette étude par une expérience permettant d'illustrer le principe de superposition de deux ébranlements allant l'un à la rencontre de l'autre. La cuve à ondes servira à faire observer le phénomène d'interférences d'ondes mécaniques. Ce phénomène sera interprété. | <p>1 h</p> <p>4 h</p> <p>3 h</p> |
| <p>L'élève sera capable d'</p> <p>*interpréter une expérience d'interférences lumineuses et confirmer, par analogie avec les interférences mécaniques, la nature ondulatoire de la lumière</p> <p>*expliquer la forme des franges observées et calculer l'interfrange.</p> | <p>II. Les ondes lumineuses</p> <p>Diffraction, nature ondulatoire de la lumière. Réalisation et interprétation d'une expérience d'interférences en lumière monochromatique.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • On réalisera deux expériences de diffraction d'ondes mécaniques et d'ondes lumineuses et on déduira par analogie la nature vibratoire de la lumière. • On rappellera le phénomène de dispersion de la lumière blanche par un prisme et on conclura que cette lumière est composée de plusieurs radiations monochromatiques, chaque radiation est caractérisée par sa fréquence. • On montrera une expérience d'interférences en lumière monochromatique, ce qui confirmera la nature vibratoire de la lumière. • On établira l'expression de la différence de marche et de l'interfrange en fonction des caractéristiques du dispositif expérimental (fentes d'Young et miroirs de Fresnel) et de longueur d'onde. L'interférence en lumière blanche et les déplacements des | <p>4 h</p> |

| | | | |
|--|--|---|--|
| | | franges sont hors programme. On donnera en lecture une vue d'ensemble sur les ondes électromagnétiques : caractéristiques, domaines d'utilisation. | |
|--|--|---|--|

Plan de l'étude des ondes lumineuses

| | |
|--|--|
| Phénomène de diffraction | <p>Diffraction d'ondes mécaniques [: pas de support mathématique, qualitatif, bref...]</p> <ul style="list-style-type: none"> *le phénomène de diffraction [expérience : cuve à ondes] *facteurs d'influence *interprétations <p>Diffraction de la lumière</p> <ul style="list-style-type: none"> *expérience *observation *analogie avec la diffraction des ondes mécaniques *c/c : nature ondulatoire de la lumière |
| Dispersion de la lumière blanche par un prisme | <p>Spectre de la lumière blanche</p> <p>Synthèse de la lumière blanche</p> <ul style="list-style-type: none"> *première expérience *deuxième expérience : disque de Newton *nature de la lumière blanche *différence entre deux lumières monochromatiques |
| Interférences en lumière monochromatique | <p>Expérience des fentes d'Young</p> <ul style="list-style-type: none"> *étude qualitative *étude quantitative (TP) [influence de la longueur d'onde, influence de la distance des sources à l'écran, influence de la distance entre les sources] <p>Interprétation du phénomène</p> <p>Lieu des franges brillantes et lieu des franges sombres</p> <p>Différence de marche et interfrange</p> <ul style="list-style-type: none"> *expression de la différence de marche *expression de l'interfrange [utilisation des miroirs de Fresnel dans un exercice résolu] |

Dualité onde-corpuscule

| Objectifs spécifiques | Contenu | Recommandations | Horaire |
|---|--|---|------------|
| <p>L'élève sera capable de :</p> <ul style="list-style-type: none"> *faire le bilan énergétique correspondant à l'effet photoélectrique *déduire à partir des résultats expérimentaux : <ul style="list-style-type: none"> • l'existence du photon • l'expression de l'énergie d'un photon. | <p>I. L'effet photoélectrique ; le photon.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • On mettra en évidence l'effet photoélectrique par l'expérience de Hertz et on introduira la notion de seuil photoélectrique. • On étudiera l'influence de la fréquence et de la puissance lumineuse sur l'émission photoélectrique dans le vide et on introduira la notion de potentiel d'arrêt. | 4 h |
| <p>L'élève sera capable de :</p> <p>déduire à partir de résultats expérimentaux l'aspect corpusculaire de la lumière.</p> | <p>II. Dualité onde-corpuscule</p> <p>Effet Compton : aspect corpusculaire de la lumière.</p> <p>Dualité onde-corpuscule.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • On exploitera l'effet Compton pour prouver que le photon est doté d'une quantité de mouvement \vec{p} ce qui lui confère le caractère corpusculaire. On se contentera de décrire l'expérience et d'en donner les résultats importants sans développement théorique. • Pour confirmer la dualité onde-corpuscule, on signalera la possibilité de réaliser des expériences d'interférences, avec un faisceau d'électrons. Cela montre qu'à toute particule matérielle de quantité de mouvement \vec{p} est associée une onde de longueur d'onde $\lambda = h/p$ | 2 h |

1.2. Programme de 3^{ème} année Lettres et Economie -Gestion en Tunisie (1998)

| Objectifs spécifiques | Contenu | Recommandations | Horaire |
|--|---|--|--|
| <p>L'élève sera capable de *déterminer expérimentalement, les grandeurs caractéristiques d'un phénomène périodique: période, amplitude ; *déterminer expérimentalement la fréquence ; *analyser stroboscopiquement un mouvement vibratoire ; *mettre en évidence le mouvement sinusoïdal à l'aide de la représentation graphique *dégager le déphasage entre deux mouvements sinusoïdaux.</p> | <p>I. Mouvements vibratoires : Caractéristiques des mouvements périodiques : période, amplitude. Étude expérimentale des mouvements vibratoires ; fréquence. Cas particulier du mouvement sinusoïdal. Notion de déphasage.</p> | <p>L'observation de phénomènes périodiques naturels permettra de dégager leurs caractéristiques : période et amplitude. On représentera graphiquement les variations en fonction du temps de l'élongation d'un point du mobile en mouvement périodique. L'enregistrement graphique, l'analyse optique au miroir tournant de quelques mouvements vibratoires permettront de mettre en évidence le mouvement sinusoïdal. On fera remarquer le lien entre l'amplitude et l'énergie mise en jeu au cours du mouvement. L'éclairage stroboscopique permettra de mesurer la fréquence d'un mouvement vibratoire et d'observer le ralenti apparent.</p> | 4 h 30 |
| <p>L'élève sera capable de : *mettre en évidence expérimentalement la propagation d'un ébranlement et identifier deux types d'ébranlements : transversal et longitudinal *mettre en évidence expérimentalement la propagation d'une onde sinusoïdale ; *caractériser une onde qui se propage par les facteurs physiques suivants : période, fréquence, amplitude, célérité et longueur d'onde *reconnaître à l'observation, une onde qui se réfléchit ; *reconnaître que la production d'un son nécessite :</p> <ul style="list-style-type: none"> • une source capable de vibrer, • un milieu matériel pour transmettre des vibrations ; <p>*reconnaître que le son est onde longitudinale qui peut se propager dans les liquides, les solides et les gaz *distinguer entre sons audibles,</p> | <p>II. Propagation II.1 Propagation d'un ébranlement : célérité. Propagation d'une onde sinusoïdale le long d'une corde. Longueur d'onde ; phase. II.2 Propagation d'une onde sinusoïdale à la surface d'un liquide : réflexion, réfraction, diffraction. II.3 Nature vibratoire du son : célérité, propagation.</p> | <p>L'observation expérimentale de la propagation d'un ébranlement transversal et d'une onde sinusoïdale le long d'une corde élastique permettra de dégager les notions de célérité, de longueur d'onde et de phase sans formule mathématique. On soulignera le caractère énergétique de la propagation : influence de l'amplitude et de la fréquence. On fera l'étude qualitative des phénomènes de réflexion, réfraction et diffraction.</p> <p>On signalera l'existence des domaines de fréquences audibles, de ceux des ultrasons et des infrasons.</p> | <p>3 h 1 h 30 1 h 30</p> |

| | | | |
|---|--|---|--------------------------|
| infrasons et ultrasons. | | | |
| <p>L'élève sera capable de dégager expérimentalement, le phénomène d'interférences ; dégager , à partir des interférences lumineuses, la nature ondulatoire de la lumière *reconnaître une interférence constructive d'une interférence destructive ; *donner la relation $i = \lambda D/a$ pour les interférences lumineuses et l'appliquer.</p> | <p>III. Interférences de deux ondes : III.1 Interférences à la surface d'un liquide. III.2 Interférences lumineuses : nature ondulatoire de la lumière.</p> | <p>On admettra le principe de superposition des vibrations transversales et longitudinales de petites amplitudes. On réalisera l'expérience des "fentes d'Young" avec des fentes rectilignes. On conclura que la somme de deux énergies vibratoires en un point peut être nulle ou maximale selon la valeur de la différence de marche. L'expérience de la diffraction d'un faisceau de lumière monochromatique permettra de mettre en évidence la nature ondulatoire de la lumière qui est, par la suite, confirmé par l'expérience d'interférences (fentes d'Young ou miroirs de Fresnel). On donnera sans démonstration la formule de l'interfrange.</p> | <p>1 h 30 1 h 30</p> |

Lumière

| Objectifs spécifiques | Contenu | Recommandations | Horaire |
|--|--|---|---------|
| <p>L'élève sera capable de : *classer les lentilles : convergentes et divergentes *définir les caractéristiques des lentilles *déterminer à l'aide de la construction géométrique, l'image d'un objet (réel ou virtuel) donnée par une lentille convergente et une lentille divergente *exprimer le grandissement d'une lentille.</p> | <p>I. Les lentilles : Propriétés et caractéristiques des lentilles minces. Construction de l'image d'un objet donné par une lentille convergente et une lentille divergente nature et position.</p> | <p>On définira les caractéristiques des lentilles minces. On fera la construction géométrique de l'image d'un objet à travers une lentille mince convergente et divergente.</p> | 1 h 30 |
| <p>L'élève sera capable de *expliquer les défauts de la vision dus à la myopie, à l'hypermétropie et à la presbytie ; *donner le principe optique de fonctionnement d'un appareil photo et d'un microscope.</p> | <p>II. Applications : L'œil et la correction des défauts de la vision. Instruments optique : appareil photo, microscope.</p> | <p>On donnera le modèle réduit de l'œil. On citera les principaux défauts de la vision et on précisera le type de lentille de correction correspondant à chaque défaut (myopie, l'hypermétropie, presbytie). On tracera la marche d'un faisceau lumineux à travers chacun de ces instruments et on dégagera l'intérêt de son utilisation.</p> | 3 h |

2. AU SUPERIEUR

2.1. Aux écoles préparatoires (en Tunisie et en France)

2.1.1. Programme de 2^{ème} année – Physique dans la voie mathématiques physique (MP et MP*)

2.1.1.1. Cours

Les calculs ne doivent en aucun cas passer au premier plan. S'il s'agit bien de savoir mettre en équations la situation modélisée, la résolution mathématique ne doit en aucun cas obérer la compréhension physique du phénomène étudié. Les exercices ne faisant appel qu'aux seules techniques de calcul étant bannis, l'attention de l'étudiant, libérée d'une charge lourde et inappropriée doit être reportée sur la conceptualisation et/ou l'approche expérimentale du phénomène lui-même, stimulant ainsi une attitude active et créatrice. Questions et exercices seront orientés dans ce sens.

Les techniques de calcul ne doivent pas constituer un obstacle infranchissable empêchant par exemple les étudiants de suivre un cours avec profit. Il importe de ne pas sous-estimer leurs besoins de formation dans ce domaine.

Optique ondulatoire

On se limite aux situations telles qu'une description en termes d'ondes scalaires est suffisante. Le programme d'optique géométrique reste limité à celui qui est défini en première année MPSI. ; en particulier, le principe de Fermat et la condition de stigmatisme sont hors programme. Le théorème de Malus, outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire, est admis.

| Programme | Commentaire |
|---|--|
| Chemin optique le long d'un rayon lumineux et retard de phase associé. Surfaces d'onde (ou équiphasse). Théorème de Malus. | |
| Interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes entre elles. | <i>On se limite aux miroirs de Fresnel et aux trous (ou fentes) de Young. L'étude de tout dispositif utilisant des lentilles et/ou des prismes (bientilles de Billet, de Meslin, biprisme de Fresnel...) est hors programme On explique qualitativement à l'aide d'un modèle de trains d'onde pourquoi la durée de cohérence temporelle de la source impose des limitations à la cohérence mutuelle des deux ondes, mais toute étude générale de la cohérence (cohérence partielle, cohérence spatiale...) est exclue.</i> |
| Interféromètre de Michelson : utilisation en lame d'air, anneaux d'égal inclinaison ; utilisation en coin d'air, franges rectilignes. | <i>On montre l'équivalence de l'interféromètre de Michelson à une lame d'air à faces parallèles ou à un coin d'air. Dans le cas où l'interféromètre est éclairé par une source ponctuelle, on raisonne à l'aide des sources images secondaires. Dans chacun des deux cas, on fait observer expérimentalement la localisation des franges lorsque la source utilisée est étendue. Le théorème de la localisation est exclu de même que toute étude quantitative de la localisation</i> |
| Principe de Huygens-Fresnel. Diffraction à l'infini d'une onde plane par une ouverture plane. Limite de l'optique géométrique. Cas d'une ouverture rectangulaire, d'une fente allongée. | <i>Le principe de Huygens - Fresnel est énoncé de façon qualitative. Lors de sa mise en œuvre mathématique pour la diffraction à l'infini, on s'attache uniquement aux différences de phase entre les ondes secondaires, sans se préoccuper des facteurs d'amplitude.</i> |
| Réseaux plans. | <i>L'étude consiste à déterminer le plus simplement possible, comme résultant d'une condition d'interférences exactement constructives, les directions correspondant aux maxima</i> |

| | |
|--|--|
| | <p>principaux, sans prendre en compte la forme du motif diffractant. On souligne qualitativement l'effet de l'interférence d'un grand nombre d'ondes cohérentes entre elles sur la directivité de l'onde résultante, mais le calcul et les expressions de l'amplitude et de l'intensité diffractées sont hors programme.</p> <p><i>L'étude du pouvoir séparateur est hors programme.</i></p> |
|--|--|

2.1.1.2. Travaux Pratiques

Les connaissances et savoir-faire expérimentaux définis dans la section D) de la 1^{ère} partie du programme MPSI, la section E.1) de la 2^e partie du programme MPSI et dans la section F.1) qui suit constituent un ensemble de compétences exigibles aux épreuves expérimentales des concours ; elles peuvent en outre faire l'objet de questions aux épreuves écrites et orales. En revanche, les thèmes de travaux pratiques de la section F.2) ne sont que des propositions ; leur utilisation relève de l'initiative pédagogique du professeur.

Le matériel nécessaire à l'acquisition des connaissances et savoir-faire exigibles en optique comprend : Sources de lumière (blanche, lampes spectrales, laser), Banc d'optique, Lentilles minces convergentes et divergentes, miroirs sphériques et plan, Collimateur, Lunette autocollimatrice, Viseur à frontal fixe, Goniomètre, Réseaux plans par transmission, Interféromètre de Michelson, Polaroids.

a. Connaissances expérimentales exigibles

| Programme | Commentaires |
|--|---|
| <p>1. Filtres linéaires en électrocinétique : Relevé du diagramme de Bode de filtres du premier et du second ordre (gain en amplitude et phase) : filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande. Caractère intégrateur ou dérivateur dans un domaine limité de fréquences.</p> <p>2. Interférométrie à deux ondes : l'interféromètre de Michelson. Obtention des franges du coin d'air, d'égale épaisseur avec une lampe spectrale. Obtention des franges de la lame d'air, d'égale inclinaison avec une lampe spectrale.</p> <p>3. Réseaux plans par transmission. Mesure du pas d'un réseau à partir d'une longueur d'onde connue ; mesure d'une longueur d'onde, connaissant le pas du réseau.</p> <p>4. Polarisation de la lumière. Lumière naturelle. Production et analyse d'une lumière polarisée rectilignement.</p> | <p><i>On s'attache à montrer dans quelle mesure ces différents qualificatifs sont appropriés.</i></p> <p><i>L'objectif est de faire comprendre aux étudiants les différences physiques entre les deux types de franges et leurs conséquences sur le choix des conditions d'éclairage et d'observation.</i></p> <p><i>Il existe plusieurs protocoles de réglage, mettant en oeuvre un matériel différent. Les étudiants doivent avoir pratiqué l'un de ces protocoles. Lors des épreuves d'évaluation, le protocole adapté au matériel disponible doit être fourni au candidat.</i> <i>Les interférences en lumière blanche sont hors programme. Les interférences en lumière polarisée sont hors programme. Le choix des exemples d'application relève de l'initiative du professeur.</i></p> <p><i>L'étude des réseaux est l'occasion de revoir l'utilisation du goniomètre étudié en première année.</i> La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de l'axe optique de la lunette et de son axe de rotation n'est pas exigible. La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de la normale</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>au réseau à l'axe de rotation de la plate-forme n'est pas exigible</p> <p><i>La méthode du minimum de déviation n'est pas au programme.</i></p> <p>De façon seulement qualitative, on met en évidence la polarisation par réflexion vitreuse et par diffusion.</p> <p><i>On se limite au fonctionnement des polariseurs dichroïques (anisotropie d'absorption). On considère que la lumière obtenue par un polaroïd est totalement polarisée.</i></p> <p><i>Les lames à retard sont hors programme.</i></p> |
|--|--|

b. Thèmes de travaux pratiques proposés

Le choix des thèmes de travaux pratiques relève de l'initiative du professeur, ceux qui figurent ci-dessous ne sont que des propositions. Toutefois les manipulations choisies doivent être en relation avec les connaissances du programme et favoriser l'acquisition progressive d'une démarche autonome.

Mesures optiques à l'aide de l'interféromètre de Michelson.

Expériences de diffraction à l'infini.

2.1.2. Programme de 2^{ème} année – Voie Physique Chimie (PC) et Voie Physique et Sciences de l'Ingénieur (PSI)

2.1.2.1. Cours

On signale le caractère très général des phénomènes d'interférences et de diffraction étudiés en optique en insistant notamment sur le rôle des ordres de grandeur des longueurs d'onde rencontrées dans les différents domaines de la physique ondulatoire. On se limite aux situations telles qu'une description en termes d'ondes scalaires est suffisante.

| Programme | Commentaires |
|---|--|
| <p>1. Modèle scalaire de la lumière</p> <p>propagation d'une vibration scalaire le long d'un rayon lumineux : chemin optique.</p> <p>Surfaces d'ondes ; onde plane, onde sphérique. Théorème de Malus.</p> <p>Eclairement.</p> | <p><i>On définit les surfaces d'ondes relatives à une source ponctuelle S par l'ensemble des points M tels que (SM)= constante.</i></p> <p><i>On admet le théorème de Malus, outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire.</i></p> <p><i>Il ne s'agit en aucun cas de réintroduire par le biais du théorème de Malus un exposé théorique d'optique géométrique. Le programme d'optique géométrique reste celui défini dans la partie expérimentale du cours de première année : le principe de Fermat et la condition de stigmatisme sont hors-programme.</i></p> |
| <p>2. Interférences</p> <p><i>Interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes.</i></p> <p><i>Exemple de diviseur d'ondes : l'interféromètre de Michelson éclairé par une source ponctuelle.</i></p> <p><i>Figure d'interférences, champ d'interférences, franges, ordre d'interférences et défilement éventuel de franges, contraste de la figure d'interférences.</i></p> <p><i>Notion élémentaire de cohérence temporelle limitée à l'étude de l'interféromètre de Michelson éclairé</i></p> | <p><i>La comparaison des prévisions théoriques et des réalités expérimentales conduit à affirmer un critère opérationnel de cohérence mettant en œuvre les notions de trains d'ondes, de sources synchrones, de diviseur d'ondes et de longueur de cohérence.</i></p> <p><i>On montre l'équivalence de l'interféromètre de Michelson à un coin d'air ou à une lame d'air à faces parallèles et on raisonne à l'aide des sources images secondaires.</i></p> <p><i>L'essentiel est de maîtriser la physique du phénomène d'interférences ; l'étude de tout dispositif utilisant des lentilles et/ou des prismes (bientilles de Billet, de Meslin, biprisme de Fresnel, etc...) est hors programme.</i></p> <p><i>Il s'agit simplement de mettre en évidence de la façon la plus élémentaire possible, l'influence de la largeur</i></p> |

| | |
|--|---|
| <p><i>par une source ponctuelle : modèles du doublet spectral et du profil spectral rectangulaire en nombre d'onde.</i></p> <p>3. Diffraction à l'infini Principe de Huygens-Fresnel</p> <p>Diffraction à l'infini d'une onde plane par une pupille rectangulaire ; cas de la pupille fente. Limite de l'optique géométrique.</p> <p>Diffraction à l'infini par les fentes d'Young éclairées par une source ponctuelle à l'infini, par une fente-source parallèle : influence de la largeur de la fente-source sur la visibilité des franges.</p> | <p><i>spectrale d'une source sur le contraste du système de franges d'interférences. La théorie générale de la cohérence temporelle (définition du degré de cohérence partielle etc...) est hors-programme. Les interférences en lumière blanche sont étudiées uniquement en TP-Cours.</i></p> <p>Le principe de Huygens - Fresnel est énoncé de façon qualitative. Lors de sa mise en œuvre mathématique pour la diffraction à l'infini, on s'attache uniquement aux différences de phase entre les ondes secondaires, sans se préoccuper des facteurs d'amplitude.</p> <p><i>On présente l'allure de la figure de diffraction à l'infini par une pupille circulaire (la démonstration de la formule correspondante est hors-programme). On souligne sans démonstration aucune, le rôle de la diffraction à l'infini dans la formation des images.</i></p> <p><i>Les réseaux sont abordés exclusivement en TP-Cours.</i></p> |
|--|---|

2.1.2.2. Approche expérimentale

| Programme | Commentaires |
|---|---|
| <p>1. TP-Cours Interférométrie à deux ondes : l'interféromètre de Michelson.</p> <p>• Présentation de l'appareil. Reconnaissance de l'optique : miroirs, séparatrice, compensatrice. Reconnaissance de la mécanique : axes de rotation et vis de réglages, translation du chariot.</p> <p>• Réglage et utilisation du Michelson. Utilisation d'une source étendue spatialement : localisation des franges d'interférences. Réglage géométrique de l'interféromètre.</p> <p>Obtention des franges du coin d'air, d'égale épaisseur avec une lampe spectrale : conditions d'éclairage et de projection. Obtention des franges de la lame d'air, d'égale inclinaison avec une lampe spectrale : conditions d'éclairage et de projection.</p> <p>Passage à la teinte plate et contrôle de sa qualité en lumière blanche. Franges du coin d'air en lumière blanche.</p> <p>Influence de la translation d'un miroir sur la figure d'interférences.</p> <p>2. TP-Cours Spectroscopie à réseau.</p> <p>• Eléments théoriques. Formule des réseaux par transmission. Minimum de</p> | <p><i>En élargissant progressivement la source à l'aide d'un diaphragme, on met en évidence la diminution du contraste et la localisation des franges d'interférences. L'objectif est de comprendre pourquoi, selon l'expérience, on utilise soit un éclairage convergent soit un éclairage quasi-parallèle, pourquoi, on observe soit l'image des miroirs soit une projection dans le plan focal d'une lentille convergente de sortie.</i></p> <p><i>A cette occasion, on montre que l'ordre d'utilisation des différentes sources (laser éventuellement, puis lampe spectrale, enfin lumière blanche) est lié à la cohérence temporelle des sources lumineuses.</i></p> <p><i>Dans cette partie du TP-Cours, les notions introduites sont le plus naturellement possible issues de l'expérimentation.</i></p> <p><i>Les positions des raies observées sont interprétées comme</i></p> |

| | |
|--|---|
| <p>déviations dans un ordre donné : intérêt expérimental. Dispersion par le réseau dans un ordre donné : spectre d'ordre p, mélange des ordres.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Présentation du goniomètre. Reconnaissance de l'optique : viseur à l'infini, lunette de lecture éventuelle, collimateur, fente source réglable. Reconnaissance de la mécanique : axes de rotation et vis de réglages. • Réglage du goniomètre et utilisation du spectroscopie : lampe étalon, courbe d'étalonnage, mesure de longueurs d'onde. <p>3. TP-Cours Polarisation de la lumière.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eléments du modèle vectoriel de la lumière. <p>Vibration vectorielle propagée. Caractère transversal de la vibration vectorielle. Définition des polarisations rectiligne, circulaire, elliptique. Lumière naturelle.</p> <p>Interprétation élémentaire des propriétés des lames quart d'ondes et demi-onde : existence des axes rapide et lent, indices n_x et n_y.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Production et analyse de lumière polarisée. <p>Utilisation de polaroïds, lames demi-onde et quart d'onde pour la fabrication de lumière polarisée. Analyse de lumière polarisée : reconnaissance de la polarisation, des axes et de l'excentricité éventuels.</p> <p>4. TP-Cours Multivibrateur astable</p> <p>Fonctionnement d'un amplificateur opérationnel en régime linéaire ou en régime saturé (en tension).</p> <p>Comparateur à hystérésis, caractéristique de transfert, bistabilité.</p> <p>Multivibrateur astable : génération de signaux triangulaires, de signaux carrés. Contrôle de la fréquence et du rapport cyclique. Génération de signaux sinusoïdaux par filtrage.</p> <p>5. TP</p> <p>Aucune liste de thèmes n'est proposée. Le choix des thèmes de TP relève de l'initiative du professeur. Toutefois ceux-ci doivent être en relation avec les connaissances du programme et doivent favoriser l'acquisition progressive d'une démarche autonome.</p> | <p><i>résultant d'une condition d'interférences exactement constructives. On souligne qualitativement l'effet de l'interférence d'un grand nombre d'ondes cohérentes sur la directivité de l'onde résultante, mais le calcul et les expressions de l'intensité diffractée et du pouvoir de résolution théorique sont hors programme.</i></p> <p><i>Pour le réglage, on s'appuie sur les techniques vues dans la partie expérimentale du programme de première année. La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de l'axe optique de la lunette et de l'axe de rotation de la plate-forme n'est pas exigible. La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de la normale au réseau à l'axe de rotation de la plate-forme n'est pas exigible.</i></p> <p><i>Le choix des exemples sur lesquels la spectroscopie à réseau est mise en œuvre relève de l'initiative du professeur.</i></p> <p><i>On met en évidence la polarisation par réflexion vitreuse (incidence de Brewster) et par diffusion. L'étude théorique des coefficients de réflexion et transmission sur un dioptre sous incidence oblique est hors-programme.</i></p> <p><i>On néglige, à ce stade de la modélisation, les réflexions sur les faces de la lame et l'absorption interne à la lame. On insiste sur la dénomination demi-onde ou quart d'onde pour telle ou telle longueur d'onde. On insiste sur l'intérêt de la décomposition d'une vibration quelconque en deux vibrations rectilignes, orthogonales, adaptées.</i></p> <p><i>On considère que la lumière obtenue par un polaroïd est totalement polarisée.</i></p> <p><i>Ce TP-Cours est l'occasion de réviser le cours et les TP-Cours d'électronique de première année.</i></p> <p><i>On signale la limitation en fréquence due à la "vitesse de balayage" de l'amplificateur opérationnel.</i></p> |
|--|---|

2.1.3. Programme de 2^{ème} année – Voie Physique et Technologie (PT)

2.1.3.1. Cours

On se limite aux situations telles qu'une description en termes d'ondes scalaires est suffisante. Le programme d'optique géométrique reste limité à celui qui est défini en première année PTSI ; en particulier, le principe de Fermat et la condition de stigmatisme sont hors programme. Le théorème de Malus, outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire, est admis.

| Programme | Commentaires |
|--|---|
| <p>Modèle scalaire de la lumière Propagation d'une vibration scalaire le long d'un rayon lumineux : chemin optique.</p> <p>Surfaces d'ondes (ou équiphasse) ; onde plane, onde sphérique. Théorème de Malus.</p> <p>Éclairement.</p> <p>2. Interférences 2.1 Interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes.</p> <p><i>Figure et champ d'interférences, franges, ordre d'interférences et défilement éventuel de franges.</i></p> <p>2.2 Interférences localisées dans le cas d'une source étendue. <i>On se limite à l'interféromètre de Michelson : anneaux d'égale inclinaison localisés à l'infini et franges d'égales épaisseur au niveau des miroirs.</i></p> <p>2.3 Contraste d'une figure d'interférences</p> <p>3. Diffraction à l'infini Principe de Huygens-Fresnel</p> <p>Diffraction à l'infini d'une onde plane par une ouverture rectangulaire plane; cas d'une fente allongée. Limite de l'optique géométrique.</p> | <p><i>On définit les surfaces d'ondes relatives à une source ponctuelle S par l'ensemble des points M tels que $(SM) = \text{constante}$.</i></p> <p><i>La comparaison des prévisions théoriques et des réalités expérimentales conduit à affirmer un critère opérationnel de cohérence mettant en œuvre les notions de trains d'ondes, de sources synchrones, de diviseur d'ondes et de longueur de cohérence.</i></p> <p><i>L'essentiel est de maîtriser la physique du phénomène d'interférences. On se limite aux miroirs de Fresnel et aux trous (ou fentes) de Young. Tout autre dispositif est hors programme.</i></p> <p><i>On explique que, contrairement aux diviseurs de front d'onde, l'interféromètre de Michelson est un dispositif diviseur d'amplitude.</i> <i>On montre l'équivalence de l'interféromètre de Michelson à une lame d'air à faces parallèles ou à un coin d'air. Toute autre configuration des miroirs du Michelson (déformation...) est hors programme. On fait observer expérimentalement, en TP-Cours, la localisation des franges lorsque la source utilisée est étendue. Toute étude quantitative de la localisation est hors programme.</i> <i>L'utilisation de l'interféromètre de Michelson avec une source ponctuelle est hors programme.</i></p> <p><i>L'étude quantitative du contraste en liaison avec la notion de cohérence, se limite au cas d'un doublet ou à l'éclairage de l'interféromètre par deux sources ponctuelles non cohérentes de même longueur d'onde.</i></p> <p><i>Le principe de Huygens - Fresnel est énoncé de façon qualitative. Lors de sa mise en œuvre mathématique pour la diffraction à l'infini, on s'attache uniquement aux différences de phase entre les sources secondaires, sans se préoccuper des facteurs d'amplitude.</i> <i>L'optique de Fourier est hors programme.</i> <i>On présente l'allure de la figure de diffraction à l'infini par une pupille circulaire (la démonstration de la formule correspondante est hors programme). On souligne sans démonstration aucune, le rôle de la diffraction à l'infini dans la formation des images.</i> <i>Les réseaux sont abordés exclusivement en TP-Cours.</i></p> |

2.1.3.2. Approche expérimentale

Les connaissances et savoir-faire expérimentaux définis dans les TP-Cours de PTSI et PT constituent un ensemble de compétences exigibles aux épreuves expérimentales des concours ; elles peuvent en outre faire l'objet de questions aux épreuves écrites et orales. En revanche, les thèmes de travaux pratiques ne sont que des propositions ; le contenu et l'organisation des TP relèvent de l'initiative pédagogique du professeur et ne doivent faire appel qu'aux connaissances du programme de la classe.

| Programme | Commentaires |
|--|---|
| <p>1.TP-Cours : Interférométrie à deux ondes : l'interféromètre de Michelson.</p> <p>• Présentation de l'appareil. Reconnaissance de l'optique : miroirs, séparatrice, compensatrice. Reconnaissance de la mécanique : axes de rotation et vis de réglages, translation du chariot.</p> <p>• Réglage et utilisation du Michelson. Utilisation d'une source étendue spatialement : localisation des franges d'interférences. Réglage géométrique de l'interféromètre.</p> <p>Obtention des franges du coin d'air, d'égale épaisseur avec une lampe spectrale : conditions d'éclairage et de projection. Obtention des franges de la lame d'air, d'égale inclinaison avec une lampe spectrale : conditions d'éclairage et d'observation.</p> <p>Passage à la teinte plate et contrôle de sa qualité en lumière blanche. Fringes du coin d'air en lumière blanche.</p> <p>Influence de la translation d'un miroir sur la figure d'interférences.</p> | <p><i>Le protocole de réglage est laissé à l'initiative du professeur. Lors des épreuves d'évaluation, le protocole adapté au matériel disponible doit être fourni au candidat.</i></p> <p>En élargissant progressivement la source à l'aide d'un diaphragme, on met en évidence la diminution du contraste et la localisation des franges d'interférences. L'objectif est de comprendre pourquoi, selon l'expérience, on utilise soit un éclairage convergent soit un éclairage quasi-parallèle, pourquoi, on observe soit l'image des miroirs soit une projection dans le plan focal d'une lentille convergente de sortie.</p> <p><i>A cette occasion, on montre que l'ordre d'utilisation des différentes sources (laser éventuellement, puis lampe spectrale, enfin lumière blanche) est lié à la cohérence temporelle des sources lumineuses.</i></p> |
| <p>2. TP-Cours Spectroscopie à réseau.</p> <p>• Eléments théoriques. Formule des réseaux par transmission. Dispersion par le réseau dans un ordre donné : spectre d'ordre p, mélange des ordres.</p> <p>• Présentation du goniomètre. Reconnaissance de l'optique : viseur à l'infini, lunette de lecture éventuelle, collimateur, fente source réglable. Reconnaissance de la mécanique : axes de rotation et vis de réglages.</p> | <p><i>Dans cette partie du TP-Cours, les notions introduites sont le plus naturellement possible issues de l'expérimentation.</i></p> <p><i>L'étude consiste à déterminer le plus simplement possible les directions correspondant aux maxima principaux, comme résultant d'une condition d'interférences exactement constructives. On souligne qualitativement l'effet de l'interférence d'un grand nombre d'ondes cohérentes sur la directivité de l'onde résultante, mais le calcul et les expressions de l'amplitude et de l'intensité diffractée sont hors programme.</i></p> <p><i>L'étude du pouvoir séparateur est hors programme. Pour le réglage, on s'appuie sur les techniques vues dans la partie expérimentale du programme de première année. La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de l'axe optique de la lunette et de son axe de rotation n'est pas exigible. La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de la normale au réseau à l'axe de rotation n'est pas exigible.</i></p> |

| | |
|---|--|
| <p>•Réglage du goniomètre et utilisation du spectroscope : mesure du pas du réseau à partir d'une longueur d'onde connue ; mesure d'une longueur d'onde, connaissant le pas du réseau.</p> | <p><i>La méthode du minimum de déviation n'est pas exigible.</i></p> |
| <p>3.TP-Cours Multivibrateur astable. fonctionnement d'un amplificateur opérationnel en régime linéaire ou en régime saturé (en tension). Comparateur à hystérésis, caractéristique de transfert, bistabilité. Multivibrateur astable : génération de signaux triangulaires, de signaux carrés. Contrôle de la fréquence et du rapport cyclique.</p> | <p><i>Ce TP-Cours est l'occasion de réviser le cours et les TP-Cours d'électronique de première année.</i></p> <p><i>On signale la limitation en fréquence due à la "vitesse de balayage" de l'amplificateur opérationnel.</i></p> |
| <p>4.TP-Cours Oscillateur quasi-sinusoïdal. Etude théorique de la mise en oscillation en régime temporel variable. Recherche directe de la fréquence d'oscillation en notation complexe. Vérification expérimentale. Analyse spectrale des signaux obtenus.</p> | <p><i>Cette étude est menée en utilisant les notions d'électrocinétique de première année.</i></p> |
| <p>5.TP-Cours Filtrage d'une tension créneau par un circuit RLC. Etude expérimentale de la résonance en courant. Comparaison succincte avec la résonance en tension. Relevé du diagramme de Bode (gain en amplitude et phase). Mesure de la bande passante et du facteur de qualité du circuit. Visualisation et étude des harmoniques d'une tension créneau. Filtrage d'une harmonique par le circuit RLC : réglage de la capacité pour une harmonique fixée.</p> | <p><i>Ce TP-Cours est l'occasion de réviser le phénomène de résonance étudié en première année.</i></p> <p><i>Dans cette partie du TP-Cours, les rappels théoriques sont limités. L'étude est essentiellement basée sur l'expérimentation.</i></p> <p><i>On utilise les outils informatiques: carte d'acquisition et logiciel d'analyse spectrale.</i></p> |

2.1.3.3. Thèmes de Travaux Pratiques proposés

A la différence des TP-Cours nécessairement très cadrés, les séances de travaux pratiques sont orientées vers l'acquisition d'une autonomie progressive dans la démarche expérimentale.

Les thèmes de travaux pratiques ne sont que des propositions ; le contenu et l'organisation des travaux pratiques relèvent de l'initiative pédagogique du professeur mais ne font appel qu'aux connaissances du programme.

La connaissance des dispositifs mentionnés ci-dessous n'est donc pas exigible.

Aux thèmes de première année, on peut ajouter :

Interférences lumineuses : dispositif des fentes d'Young.

Courbe d'étalonnage d'un spectroscope à prisme ou à réseau.

Expériences de diffraction à l'infini.

Le matériel nécessaire à l'acquisition des connaissances et savoir-faire exigibles en optique comprend : Sources de lumière (blanche, lampes spectrales, laser), Banc d'optique, Lentilles minces convergentes et divergentes, miroirs sphériques et plan ; Collimateur ; Lunette autocollimatrice ; Viseur à frontale fixe ; Goniomètre ; Réseaux plans par transmission ; Interféromètre de Michelson.

2.2. A l'université

2.2.1. En Tunisie

Programme d'optique physique à la Faculté des Sciences de Monastir (1993-2004) :
Interférences

Chapitre I : Généralités sur les vibrations

A-Grandeurs scalaires sinusoïdales

1. Grandeurs périodiques - Grandeurs sinusoïdales scalaires
2. Représentation d'une grandeur scalaire sinusoïdale
3. Dérivation et intégration d'une grandeur scalaire sinusoïdale
4. Propagation d'un mouvement vibratoire
5. Composition des vibrations scalaires sinusoïdales de même période
6. Addition de deux vibrations parallèles de fréquences voisines : phénomène de battement.

B-Vecteurs vibrants sinusoïdaux

1. Définition
2. Composition de deux vecteurs vibrant sinusoïdaux de direction fixe et rectangulaire
3. Discussion de la forme de l'ellipse selon les valeurs de φ

C-Analyse d'un mouvement périodique en séries de Fourier, intégrales de Fourier

1. Introduction
2. Détermination des coefficients de la série dans le cas d'une fonction périodique de période 2π
3. Cas des fonctions périodiques de période 2π
4. Intégrales de Fourier
5. Cas des fonctions complexes
6. T.F d'une fonction paire et d'une fonction impaire
7. La fonction δ (distribution δ)
8. Produit de convolution par $\delta(x)$
9. T.f du produit de convolution
10. Corrélation-autocorrélation
11. T.F du produit d'autocorrélation
12. Application

Chapitre II : Chemin optique-Principe de Fermat - Théorème de Malus

1. L'approximation de l'optique géométrique
 - 1.1 Onde plane dans un milieu linéaire, transparent, homogène et isotrope
 - 1.2 Equation différentielle de l'optique géométrique
 - 1.3 Vecteur d'onde
2. Le principe de Fermat
3. Théorème de Malus
4. Construction d'Huygens

Chapitre III : Généralités sur les phénomènes d'interférences en optique

1. Le caractère aléatoire de l'émission de la lumière par les sources lumineuses
2. Conditions nécessaires pour observer les interférences
 - a) Les fréquences des deux sources doivent être identiques (sources synchrones)
 - b) Les vibrations d'un très grand nombre de vibrations de même fréquence

Chapitre IV : Interférences données par deux sources ponctuelles cohérentes et monochromatiques

Discussion d'une expérience idéale

1. Position du problème
2. Étude des surfaces d'égale intensité

Etude de quelques systèmes interférentiels

1. Trous d'Young
2. Les miroirs de Fresnel
3. Bilentille de Billet
4. Biprisme de Fresnel
5. Miroir de Lloyd : changement de phase par réflexion
6. Interféromètre de Michelson

7. Déplacement des franges

Chapitre V : Interférences de deux sources en lumière polychromatique

1. Cas de deux radiations monochromatiques
2. Cas d'un petit domaine continu de longueur d'onde
3. Interférences lumineuses données par une raie spectrale à profil Gaussien
4. Phénomène en lumière blanche
 - 1) Couleurs d'interférences
 - 2) Frange achromatique

Chapitre VI : Cohérence spatiale et cohérence temporelle

Cohérence spatiale : Etude qualitative

1. Influence de la géométrie du dispositif interférentiel
2. Emploi d'une fente source étendue

Cohérence spatiale : Etude générale

3. Théorème de Van Cittert Zernike
4. Application

Cohérence temporelle

5. Mise en évidence à l'aide de l'interféromètre de Michelson
6. Profil d'une raie
7. Relation entre la longueur des trains d'ondes et la finesse de la radiation émise
Relation entre l'intensité spectrale I_2 de la source S et le contraste des franges d'interférences produites par les sources S1 et S2
8. Application au cas d'une répartition spectrale rectangulaire

Chapitre VII : Phénomènes d'interférences produits par les lames isotropes (interférences à ondes multiples)

1. Introduction
2. Définitions
3. Amplitudes des rayons successifs
4. Calcul de la différence de marche entre les différents rayons
5. Composition des différents rayons transmis
6. Anneaux à l'infini donnés par les lames à faces parallèles
 - a) Anneaux par transmission
 - b) Anneaux par réflexion
7. Calcul des rayons des anneaux brillants
 - a) Cas d'une lame d'air comprise entre deux lames de verre
 - b) Cas d'une lame de verre
8. Etude de la répartition de l'intensité en fonction de δ
9. Appareil de Fabry-Pérot
10. Le Fabry-Pérot analyseur de radiations
11. Limite de résolution spectrale du F.P
12. Filtrés interférentiels
13. Interférences produites par des lames d'épaisseur légèrement variables : franges d'égale épaisseur
 - 1) Source monochromatique ponctuelle à l'infini
 - 2) Source monochromatique ponctuelle à distance finie
 - 3) Sources étendues monochromatiques
14. Surface de localisation
15. Les anneaux de Newton

2.2.2. En France

2.2.2.1. En Licence - Paris7 (2005-2006)

Chapitre I - Propagation de la lumière dans les milieux linéaires homogènes et isotropes

Chapitre II - Interférences I

1. Introduction

- 1.1. Occurrence
- 1.2. Les champs électriques s'ajoutent
- 1.3. Détection de la lumière

2. Composition de deux ondes - Conditions d'interférences

- 2.1. Somme des champs
- 2.2. Conditions d'interférences
- 2.3. Exemples de géométrie simple d'interférences à deux ondes
- 2.4. Réalisations pratiques- dispositifs à division du front d'onde
- 2.5. Cohérence spatiale
- 2.6. Dispositifs d'observation

3. Réseaux

- 3.1. Réseau par transmission
- 3.2. Réseau par réflexion

Chapitre III - Interférences II

1. Interférences par division d'amplitude

- 1.1. Différence de marche
- 1.2. Lame à faces parallèles - franges d'égale inclinaison
- 1.3. Lame d'épaisseur lentement variable – franges d'égale épaisseur
- 1.4. Interféromètre autre application
- 1.5. Interférences en lumière blanche

2. Sources polychromatiques et cohérence temporelle

- 2.1. Représentation spectrale d'une source – largeur de raies
- 2.2. Spectroscopie par transformation de Fourier

Chapitre IV - Résonateurs Optiques : Fabry-Pérot, lasers

Chapitre V - Introduction à l'holographie

Chapitre VI - Diffraction

Chapitre VII - Optique de Fourier - Filtrage

Chapitre VIII - Polarisation, milieux biréfringents, éléments d'ONL

2.2.2.2. En Licence – Marne La Vallée

SPÉCIALITÉ : PHYSIQUE seconde année, second semestre

OBJECTIFS : Après un premier enseignement d'optique géométrique (L1-1), cette UE a pour objectif d'introduire les bases de la théorie ondulatoire de la lumière.

CONTENU DE L'ENSEIGNEMENT : - Introduction historique sur la nature de la lumière. Propagation de la lumière : vibration lumineuse et chemin optique. Interférences lumineuses à deux ondes, franges d'Young, notion de cohérence.

- Diffraction : Définition, Principe de Huygens, Diffraction à l'infini, dite de Fraunhofer, Diffraction par une fente, Diffraction par une pupille circulaire, Pouvoir séparateur des instruments (Résolution spatiale)

- Réseaux de diffraction optique : Définition et principe d'un réseau, Théorie élémentaire du réseau, Formation des spectres, Pouvoir de résolution spectrale d'un réseau

MOTS-CLÉS : Interférences, diffraction, spectres

Annexe 4

***ETUDE COMPLEMENTAIRE SUR LA
ZONE DE COHERENCE SPATIALE***

Zone de cohérence spatiale

1. Définition

Nous pouvons généraliser la notion de largeur de cohérence spatiale en un point situé à une distance D de la source en introduisant celle de zone de cohérence, c'est à dire de volume de l'espace où l'onde est cohérente partiellement et où le contraste des franges n'est pas négligeable. La forme des zones de cohérence dépend de la longueur d'onde, du dispositif interférentiel et de la position du point d'observation. Leur connaissance permet de déterminer le lieu où les franges sont localisées (Provost et Provost 1980, p. 62).

Soit le voisinage d'un point M suffisamment éloigné de la source (S) : $D = OM \gg l$. Pour cela, on introduit donc un point N tel que $NM \ll D$ (Figure 1).

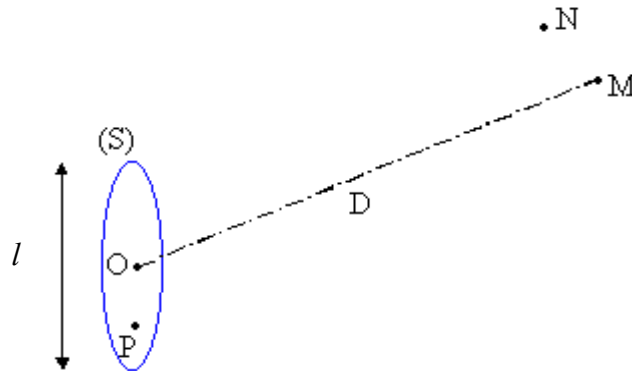


Figure 1. Position des points M et N

Le volume de cohérence autour du point M pour la source (S) est le lieu des points N tels que :

$$\boxed{\sup_{P \in (S)} |(PN - PM) - (ON - OM)| \leq \frac{\lambda}{2}}$$

où λ est la longueur d'onde dans le milieu homogène considéré ($\sup_{P \in (S)}$ est la fonction donnant le maximum des valeurs de son argument lorsque le point courant P décrit le domaine (S)).

Dans le cas d'une source plane circulaire et pour un point sur l'axe de symétrie, la zone de cohérence présente aussi une symétrie de révolution autour de l'axe Oz . Sa forme dépend de la longueur d'onde et de l'éloignement relatif du point M considéré.

Sa largeur transversale est identique à la largeur de cohérence telle que nous l'avons définie dans la partie sur le phénomène des interférences lumineuses $\alpha \cong \frac{l}{2D} \Rightarrow L_s \cong \frac{2\lambda D}{l}$.

Sa longueur est donnée par $L_t = \frac{\lambda}{1 - \cos \alpha} \cong \frac{2\lambda}{\alpha^2}$.

Remarquons que, pour α petit, la longueur est très supérieure à la largeur (Figure 2) et que pour des sources de lumière naturelle, la longueur des trains d'onde est, le plus souvent, plus faible que la longueur de la zone de cohérence spatiale. Mais ce n'est pas *a priori* le cas pour un laser.

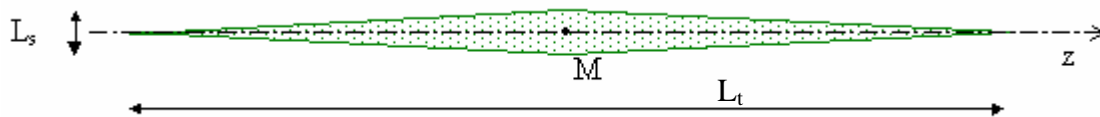


Figure 2. Longueur du volume de cohérence est supérieure à la largeur de cohérence

Pour des points N voisins du plan de front de M, on pourra se contenter d'une **représentation simplifiée** ne mettant en évidence que la **largeur de cohérence** dans une direction donnée (peu inclinée par rapport à la normale) quelle que soit la distance D du point M à la source.

On introduit (Figure 3) ainsi un cône de sommet O, d'axe dirigé vers M, et de demi-angle d'ouverture : $\theta \cong \frac{L_s}{2D} \cong \frac{\lambda}{l}$

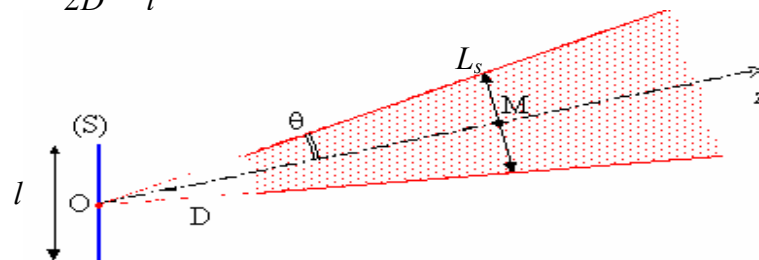


Figure 3. Introduction du cône de sommet O

2. Application

Regardons à présent comment cette notion permet d'interpréter la localisation ou non-localisation des franges. Nous noterons \mathbf{u}_1 et \mathbf{u}_2 les vecteurs unitaires selon les rayons issus de la source S au point O et dirigés vers les sources secondaires S_1 et S_2 .

Dans le cadre de la division du front d'onde, \mathbf{u}_1 et \mathbf{u}_2 sont distincts et deux cas se présentent selon la source. Lorsque la source est étroite, les zones de cohérence sont suffisamment larges pour contenir les deux sources secondaires et donc les deux vecteurs

directionnels \mathbf{u}_1 et \mathbf{u}_2 : les interférences sont visibles en tout point respectant cette propriété. Le schéma ci-dessous (Figure 4) montre que S_2 appartient à la zone de cohérence de S_1

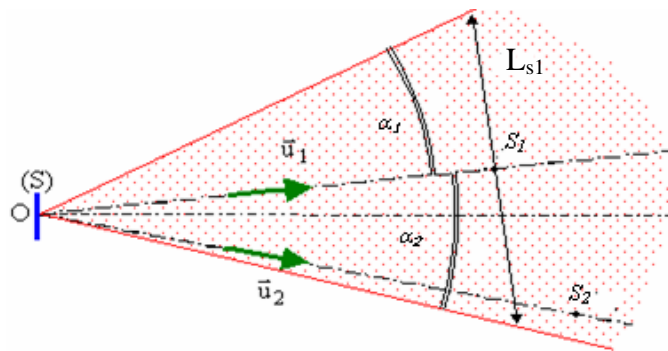


Figure 4. Absence de localisation avec une source "étroite"

Lorsque la source s'élargit, les zones de cohérence sont plus étroites. Si les deux vecteurs directionnels \mathbf{u}_1 et \mathbf{u}_2 sont trop écartés, les zones de cohérence ne peuvent contenir les deux sources secondaires simultanément (Figure 5) : il n'y a pas d'interférences

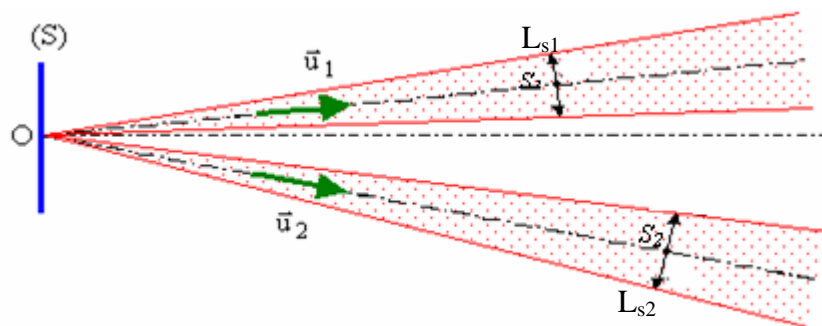


Figure 5. Disparition des franges avec une source "large"

Dans le cas d'un dispositif à division d'amplitude éclairé par une source ponctuelle, nous pouvons nous ramener à ce qui précède. Cependant, plus la source est large, plus il est nécessaire que les vecteurs unitaires \mathbf{u}_1 et \mathbf{u}_2 soient proches et tendent à être parallèles pour que les sources secondaires appartiennent aux deux zones de cohérence (Figure 6). Cela n'est possible que dans le cas où un rayon incident donne deux rayons émergents. : les interférences sont alors localisées à l'infini ou près de la lame

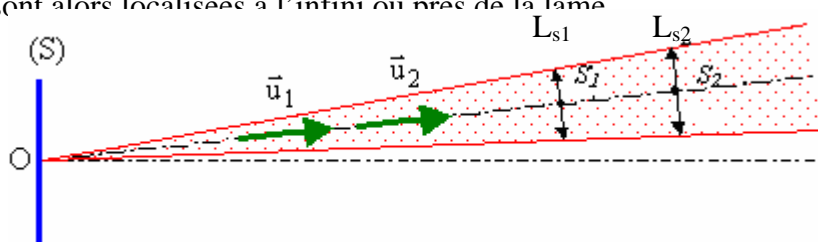


Figure 6. Zone de cohérence avec le dispositif à division d'amplitude

Annexe 5

TEST DE CHI² (χ^2)

Test de Chi² sur les conditions d'obtention des interférences (Partie 4, § 2.7.)

Concernant les conditions d'obtention des interférences lumineuses, nous rappelons les résultats que nous avons trouvés.

Tableau 1. Résultats récapitulatifs des réponses des étudiants sur les conditions d'obtention des interférences lumineuses pour les lampes et les lasers

| Situation | Pas d'interférences | Interférences | Non-réponse |
|--|---------------------|---------------|-------------|
| Deux lampes à vapeur de sodium identiques (N = 47) | 36 % | 57 % | 7 % |
| Deux lampes de longueurs d'onde différentes (N = 47) | 68 % | 23 % | 9 % |
| Deux lasers à faisceaux divergents (N = 47) | 6 % | 68 % | 26 % |
| Deux lasers à faisceaux parallèles (N = 47) | 37 % | 23 % | 40 % |

Nous considérons le tableau ci-dessous des *Effectifs observés* (Tableau 1bis) avec L qui désigne la ligne et C qui désigne la colonne pour les lampes.

Tableau 1bis. Fréquences observées

| Situation | Correct | Faux / Non réponse | Total L _i |
|--|---------|--------------------|----------------------|
| Deux lampes à vapeur de sodium identiques (N = 47) | 17 | 30 | 47 |
| Deux lampes de longueurs d'onde (N = 47) | 32 | 15 | 47 |
| Total Ci | 49 | 45 | 94 |

Compte tenu de l'hypothèse nulle que les différences sont dues au hasard, nous donnons dans le tableau 1ter les *effectifs calculés* déterminés par :

$$E_{ij\text{calculée}} = \text{Total de } L_i * \text{Total de } C_j / T \quad (1),$$

avec $T = \text{Total } L_i + \text{Total } C_j$.

Tableau 1ter. Effectifs calculés

| Situation | Correct | Faux / Non réponse |
|--|---------|--------------------|
| Deux lampes à vapeur de sodium identiques (N = 47) | 24.5 | 22.5 |
| Deux lampes de longueurs d'onde (N = 47) | 24.5 | 22.5 |

Le calcul du test de χ^2 se fait à partir des différentes valeurs du tableau 1bis et 1ter à partir de la relation :

$$\chi^2_{\text{calculée}} = \sum \frac{(o-c)^2}{c} \quad (2),$$

avec o : effectif observé et c : effectif calculé.

Le degré de liberté v est donné par : $v = (k-1)*(r-1)$ avec k le nombre de colonnes et r le nombre de lignes. Dans ce cas, $v = 1$ et $\chi^2_{\text{calculée}} = 2.392$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est inférieure à $\chi^2 = 2.706$ avec une probabilité d'erreur de 10%. La différence dans ce cas n'est pas significative.

Pour ce qui est des lasers, les effectifs sont donnés dans le tableau 2.

Tableau 2. Effectifs observés

| Situation | Correct | Faux / Rien | Total de L_i |
|---|----------------|--------------------|----------------------------------|
| Deux lasers à faisceaux divergents (N = 47) | 32 | 15 | 47 |
| Deux lasers à faisceaux parallèles (N = 47) | 11 | 36 | 47 |
| Total de C_i | 43 | 51 | 94 |

Compte tenu de l'hypothèse nulle que les différences sont dues au hasard, nous donnons dans le tableau 2bis les *effectifs calculés* déterminés par la relation (1).

Tableau 2bis. Effectifs calculés

| Situation | Correct | Faux / Rien |
|---|----------------|--------------------|
| Deux lasers à faisceaux divergents (N = 47) | 21.5 | 25.5 |
| Deux lasers à faisceaux parallèles (N = 47) | 21.5 | 25.5 |

A partir de la relation (2), nous obtenons $\chi^2_{\text{calculée}} = 4.688$ avec $v = 1$. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à $\chi^2 = 3.841$ avec une probabilité d'erreur de 5%. La différence dans ce cas est significative.

Test de χ^2 sur les trous d'Young avec source ponctuelle et source étendue (Partie 4, § 3.4.)

Concernant les trous d'Young en présence d'une source ponctuelle et d'une source étendue, nous rappelons les résultats que nous avons trouvés (Tableau 3).

Tableau 3. Résultats récapitulatifs des réponses des étudiants sur les trous d'Young avec une source ponctuelle puis une source étendue

| Situation | Correct | Faux | Non-réponse |
|--|---------|------|-------------|
| Trous d'Young avec source primaire ponctuelle (N = 57) | 91 % | 0 % | 9 % |
| Trous d'Young avec source primaire étendue (N = 57) | 80 % | 4 % | 16 % |

Pour vérifier si la question sur les trous d'Young avec une source étendue est plus difficile que la question avec une source ponctuelle, nous considérons le tableau ci-dessous des *effectifs observés* (Tableau 3bis).

Tableau 3bis. Effectifs observés

| Situation | Correct | Faux / Non-réponse | Total L_i |
|--|---------|--------------------|-------------|
| Trous d'Young avec source primaire ponctuelle (N = 57) | 52 | 5 | 57 |
| Trous d'Young avec source primaire étendue (N = 57) | 46 | 11 | 57 |
| Total C_j | 98 | 16 | 114 |

Compte tenu de l'hypothèse nulle que les différences sont dues au hasard, nous donnons dans le tableau 3ter les *effectifs calculés* déterminés par la relation (1).

Tableau 3ter. Effectifs calculés

| Situation | Correct | Faux / Non-réponse |
|--|---------|--------------------|
| Trous d'Young avec Source primaire ponctuelle (N = 57) | 49 | 8 |
| Trous d'Young avec Source primaire étendue (N = 57) | 49 | 8 |

Le calcul du test de χ^2 se fait à partir des différentes valeurs du tableau 2bis et 2ter à partir de la relation (2). Dans ce cas, $\nu = 1$ et $\chi^2_{\text{calculée}} = 2.61$. La valeur est inférieure à celle théorique $\chi^2 = 2.71$ avec une probabilité d'erreur de 10 %. La différence dans ce cas n'est pas significative.

Test de χ^2 sur les miroirs de Fresnel (Partie 4, § 3.4.)

Concernant les miroirs de Fresnel avec une source ponctuelle et une autre munie d'une lentille, nous rappelons les résultats que nous avons trouvés (Tableau 4).

Tableau 4. Résultats récapitulatifs des réponses des étudiants sur les miroirs de Fresnel

| Situation | Interférences | Pas d'interférences | Non-réponse |
|--|---------------|---------------------|-------------|
| Miroirs de Fresnel avec Source ponctuelle (N = 48) | 73 % | 12 % | 15 % |
| Miroirs de Fresnel avec Source ponctuelle et Lentille (N = 48) | 58 % | 20 % | 22 % |

Pour vérifier si la question sur les miroirs de Fresnel avec une source ponctuelle et une lentille est plus difficile que la question avec une source ponctuelle, nous considérons le tableau ci-dessous des *effectifs observés* (Tableau 4bis).

Tableau 4bis. Effectifs observés

| Situation | Correct | Faux | Non-réponse | Total Li |
|--|---------|------|-------------|----------|
| Miroirs de Fresnel avec Source ponctuelle (N = 48) | 35 | 6 | 7 | 48 |
| Miroirs de Fresnel avec Source ponctuelle et Lentille (N = 48) | 28 | 9 | 11 | 48 |
| Total Cj | 63 | 15 | 18 | 96 |

Compte tenu de l'hypothèse nulle que les différences sont dues au hasard, nous donnons dans le tableau 4ter les *effectifs calculés* déterminés par la relation (1).

Tableau 4ter. Effectifs calculés

| Situation | Correct | Faux | Non-réponse |
|--|---------|------|-------------|
| Miroirs de Fresnel avec Source ponctuelle (N = 48) | 31.5 | 7.5 | 9 |
| Miroirs de Fresnel avec Source ponctuelle et Lentille (N = 48) | 31.5 | 7.5 | 9 |

Le calcul du test de χ^2 se fait à partir des différentes valeurs du tableau 3bis et 3ter à partir de la relation (2). Dans ce cas, $\nu = 2$ et $\chi^2_{\text{calculée}} = 2.27$ est inférieure à celle théorique : $\chi^2 = 4.6$ avec une probabilité d'erreur de 10%. La différence des résultats n'est pas significative.

Test de χ^2 sur une lame à faces parallèles et une lame à faces non parallèles (Partie 4, § 3.4.)

Concernant une lame à faces parallèles avec une source ponctuelle ou étendue, et une lame à faces non parallèles, nous rappelons les résultats que nous avons trouvés (Tableau 5).

Tableau 5. Résultats récapitulatifs des réponses des étudiants sur les lames

| Situation | Interférences | Pas d'interférences | Non-réponse |
|---|---------------|---------------------|-------------|
| Lame à faces parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 45 % | 33 % | 22 % |
| Lame à faces parallèles avec Source étendue (N = 99) | 55 % | 26 % | 19 % |
| Lame à faces non parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 45 % | 8 % | 47 % |

Pour vérifier si la question avec une lame à faces non parallèles est plus difficile que celle avec faces parallèles, nous considérons le tableau ci-dessous des *effectifs observés* (Tableau 5bis).

Tableau 5bis. Effectifs observés

| Situation | Correct | Faux | Non-réponse | Total Li |
|---|---------|------|-------------|----------|
| Lame à faces parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 44 | 33 | 22 | 99 |
| Lame à faces non parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 44 | 8 | 47 | 99 |
| Total Cj | 88 | 41 | 69 | 198 |

Compte tenu de l'hypothèse nulle que les différences sont dues au hasard, nous donnons dans le tableau 5ter les *effectifs calculés* déterminés par la relation (1).

Tableau 5ter. Effectifs calculés

| Situation | Correct | Faux | Non-réponse |
|---|---------|------|-------------|
| Lame à faces parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 44 | 20.5 | 34.5 |
| Lame à faces non parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 44 | 20.5 | 34.5 |

Le calcul du test de χ^2 se fait à partir des différentes valeurs du tableau 4bis et 4ter à partir de la relation (2). Dans ce cas, $\nu = 2$ et $\chi^2_{\text{calculée}} = 3.219$ inférieure à $\chi^2 = 3.84$ pour une probabilité de 20 %. La différence des résultats n'est pas significative.

Pour vérifier si la question avec une lame à faces parallèles éclairées par une source étendue est plus difficile que la question avec une lame à faces parallèles, éclairée par une source ponctuelle, nous considérons le tableau ci-dessous des *effectifs observés* (Tableau 6).

Tableau 6. Effectifs observés

| Situation | Correct | Faux | Non-réponse | Total L_i |
|---|----------------|-------------|--------------------|-------------------------------|
| Lame à faces parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 44 | 33 | 22 | 99 |
| Lame à faces parallèles avec Source étendue (N = 99) | 54 | 26 | 19 | 99 |
| Total C_j | 98 | 59 | 41 | 198 |

Compte tenu de l'hypothèse nulle que les différences sont dues au hasard, nous donnons dans le tableau 6bis les *effectifs calculés* déterminés par la relation (1).

Tableau 6bis. Effectifs calculés

| Situation | Correct | Faux | Non-réponse |
|---|----------------|-------------|--------------------|
| Lame à faces parallèles avec Source ponctuelle (N = 99) | 49 | 29.5 | 20.5 |
| Lame à faces parallèles avec Source étendue (N = 99) | 49 | 29.5 | 20.5 |

Le calcul du test de χ^2 se fait à partir des différentes valeurs du tableau 3bis et 3ter à partir de la relation (2). Dans ce cas, $\nu = 2$ et la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}} = 0.392$ qui est inférieure à la valeur théorique $\chi^2 = 0.455$ avec une probabilité de 5 %. La différence des résultats n'est pas significative

Test de Chi² sur les trains d'ondes (Partie 7, § 2.1.2)

Pour savoir si les étudiants ont plus de difficultés avec la période et l'opposition de phase qu'avec l'amplitude comme le suggère l'analyse qualitative des résultats, nous avons réalisé des tests de χ^2 pour le questionnaire Q₉D.

Rappelons que nous avons trouvé les résultats suivants (Tableau 7) :

Tableau 7. Pourcentages calculés

| N = 116 | Correct | Faux | Rien |
|----------------------------|----------------|-------------|-------------|
| Opposition de phase | 72 % | 24 % | 4 % |
| Amplitude | 83 % | 13 % | 4 % |

Nous présentons dans le tableau 6bis les *effectifs observés* (on désigne par L la ligne et par C la colonne) :

Tableau 7bis. Effectifs observés

| N = 116 | Correct | Faux | Rien | Total L_i |
|----------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------------------|
| Opposition de phase | 83 | 28 | 5 | 116 |
| Amplitude | 96 | 15 | 5 | 116 |
| Total C_j | 179 | 43 | 10 | 232 = T |

Compte tenu de l'hypothèse nulle que les différences sont dues au hasard, nous donnons dans le tableau 7ter les *effectifs calculés*.

Tableau 7ter. Effectifs calculés

| N = 116 | Correct | Faux | Rien |
|----------------------------|----------------|-------------|-------------|
| Opposition de phase | 89.5 | 21.5 | 5 |
| Amplitude | 89.5 | 21.5 | 5 |

Le calcul conduit à $\chi^2_{\text{calculée}} = 4.874$. Le degré de liberté est ici égal à 2. D'après la table, la valeur de $\chi^2_{\text{calculée}}$ est supérieure à celle théorique : $\chi^2 = 4.60$ avec une probabilité d'erreur de 10%. On constate donc que la différence des résultats est significative. Nous pouvons dire que les étudiants ont bien plus de difficultés avec les trains d'ondes en opposition de phase qu'avec une grande amplitude.

De la même manière, on prend la situation 4 et la situation 5 (Tableau 8).

Tableau 8. Pourcentages calculés

| | | | |
|------------------|----------------|-------------|-------------|
| N = 116 | Correct | Faux | Rien |
| Amplitude | 83% | 13% | 4% |
| Fréquence | 67% | 28% | 5% |

Les *effectifs observés* sont donnés dans le tableau 8bis.

Tableau 8bis. Effectifs observés

| | | | | |
|----------------------------|----------------|-------------|-------------|----------------------------|
| N = 116 | Correct | Faux | Rien | Total L_i |
| Amplitude | 96 | 15 | 5 | 116 |
| Fréquence | 78 | 32 | 6 | 116 |
| Total C_j | 174 | 47 | 11 | 232 = T |

En utilisant la relation (1), nous obtenons :

Tableau 8ter. Effectifs calculés

| | | | |
|-----------|----------------|-------------|-------------|
| N = 116 | Correct | Faux | Rien |
| Amplitude | 87 | 23.5 | 5.5 |
| Fréquence | 87 | 23.5 | 5.5 |

En appliquant la relation (2), on obtient $\chi^2_{calculée} = 8.1$. La valeur de $\chi^2_{calculée}$ est supérieure à celle théorique : $\chi^2 = 4.6$ avec une probabilité d'erreur de 10%. On constate une différence significative donc nous pouvons dire que les étudiants ont plus de difficultés avec des trains d'ondes de fréquence différente qu'avec l'amplitude.

Test de χ^2 sur les fiches à critère temporel et spatial (Partie 7, § 2.2)

Pour savoir si les étudiants *ont plus de difficultés avec les spectres qu'avec les trains d'ondes*, comme le suggère l'analyse qualitative des résultats, nous avons réalisé des tests de χ^2 pour le questionnaire Q₁₀D. Nous rappelons dans le tableau 9 les *effectifs observés*.

Tableau 9. Effectifs observés (cohérence temporelle)

| <i>Fiches</i> | <i>Correct</i> | <i>Faux / Rien</i> | <i>Total Li</i> |
|--|----------------|--------------------|-----------------|
| <i>Trains d'onde</i> <i>N°1,3,5,7</i> | 58 | 2 | 60 |
| <i>Spectre</i> <i>N°4,10,12</i> | 50 | 2 | 52 |
| <i>Total Cj</i> | 108 | 4 | 112 = T |

Nous donnons dans le tableau 9bis les *effectifs calculés* à partir de la relation (2).

Tableau 9bis. Fréquences calculées (cohérence temporelle)

| N = 83 | <i>Correct</i> | <i>Faux / Rien</i> |
|---------------------|----------------|--------------------|
| <i>Train d'onde</i> | 57.86 | 2.140 |
| <i>Spectre</i> | 50.14 | 1.860 |

En utilisant la relation (1), nous trouvons $\chi^2_{\text{calculée}} = 4.6$. D'après la table, la valeur calculée est supérieure la valeur théorique : $\chi^2 = 3.84$ avec $\nu = 1$ et une probabilité d'erreur de 5 %. La différence est significative dans ce cas.

Pour la cohérence spatiale, pour savoir si les étudiants ont plus de difficultés à la largeur de cohérence qu'à la largeur de la source, nous réalisons le test de χ^2 . Nous rappelons dans le tableau 10 les *effectifs observés*.

Tableau 10. Effectifs observés (cohérence spatiale)

| <i>Fiches</i> | <i>Correct</i> | <i>Faux / Rien</i> | <i>Total Li</i> |
|---|----------------|--------------------|-----------------|
| <i>Largeur source</i> <i>N°2,9</i> | 45 | 11 | 56 |
| <i>Largeur cohérence</i> <i>N°6,8,11</i> | 38 | 11 | 49 |
| <i>Total Cj</i> | 83 | 22 | 105 |

Nous donnons dans le tableau 10bis, les effectifs calculés à partir de la relation (1).

Tableau 10bis. Effectifs calculés

| N = 83 | Correct | Faux / Rien |
|--------------------------|----------------|--------------------|
| Largeur source | 44.26 | 11.73 |
| Largeur cohérence | 38.73 | 10.27 |

En utilisant la relation (2), nous trouvons $\chi^2_{calculée} = 0.54$ avec $\nu = 1$. La différence n'est pas significative.

Pour savoir si les fiches sur la cohérence spatiale soulèvent plus de difficultés que les fiches sur la cohérence temporelle, on réalise le tableau 11 pour le calcul du Test de χ^2 .

Tableau11. Effectifs observés (cohérence spatiale)

| N = 83 | Correct | Faux / Rien | Total L_i |
|-------------------------------|----------------|--------------------|-------------------------------|
| Cohérence temporelle | 58 | 15 | 73 |
| Cohérence spatiale | 45 | 33 | 78 |
| Total C_j | 103 | 48 | 151 |

Nous donnons dans le tableau 11bis, les effectifs calculés à partir de la relation (1).

Tableau 11bis. Effectifs calculés

| N = 83 | Correct | Faux / Rien |
|-----------------------------|----------------|--------------------|
| Cohérence temporelle | 49.79 | 23.21 |
| Cohérence spatiale | 53.21 | 24.79 |

En utilisant la relation (2), nous trouvons $\chi^2_{calculée} = 8.24$ supérieure à la valeur théorique : $\chi^2 = 6.63$ avec $\nu = 1$ et une probabilité de 1 %. Donc la différence est significative.

Pour voir si un étudiant répond correctement à la première et à la deuxième question (cohérence temporelle et cohérence spatiale, nous réalisons le tableau croisé (Tableau 12) des résultats de ces deux questions.

Tableau 12. Effectifs observés

| Question 1 \ Question 2 | Correct | Faux | Rien | Total L_i |
|--------------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| Correct | 43 | 0 | 1 | 44 |
| Faux | 27 | 1 | 0 | 28 |
| Rien | 10 | 0 | 1 | 11 |
| Total C_j | 80 | 1 | 2 | 83 |

Nous donnons dans le tableau 12bis, les effectifs calculés à partir de la relation (1).

Tableau 12bis. Effectifs calculés

| Question 1 \ Question 2 | Correct | Faux | Rien |
|-------------------------|---------|------|------|
| Correct | 42.41 | 0.53 | 1.06 |
| Faux | 28.05 | 0.34 | 0.67 |
| Rien | 10.6 | 0.13 | 0.26 |

En utilisant la relation (2), nous trouvons $\chi^2_{\text{calculée}} = 1.634$ supérieure à la valeur théorique : $\chi^2 = 1.064$ avec $\nu = 4$. Donc la différence est significative.

**LA COHERENCE DE LA LUMIERE ET LES
INTERFERENCES LUMINEUSES :**
Raisonnements des étudiants et difficultés d'ordre historique

par Intissar ROMDHANE

Résumé :

Ce travail analyse les difficultés soulevées par l'étude des interférences lumineuses. Centré sur les interférences à deux ondes et sur les conditions de leur obtention, il concerne trois dispositifs interférentiels (trous d'Young, miroirs de Fresnel, lames minces) et deux types d'éclairage (totalement ou partiellement cohérent). Une analyse de la physique des interférences, de son histoire, de sa présentation dans les manuels scolaires, et des recherches sur les conceptions dans le domaine des ondes, a été réalisée. Une quinzaine de questionnaires écrits a été élaborée et 758 étudiants français et tunisiens ont été interrogés après enseignement.

Plusieurs tendances de raisonnement liées les unes aux autres sont dégagées. Deux se rencontrent de manière transversale à différents domaines de la physique : les étudiants privilégient des aspects perceptifs et diminuent le nombre de grandeurs physiques à prendre en compte. Une autre concerne les difficultés d'interprétation des schémas à rayons parallèles en optique. Une autre rejoint celle dégagée pour la diffraction : les étudiants n'utilisent pas le principe de superposition des amplitudes, une onde modulée en amplitude semble être créée au niveau du dispositif interférentiel et se propager en s'élargissant. Les dernières sont spécifiques aux interférences : pour les obtenir, deux sources ponctuelles suffisent ou deux ondes en phase sont nécessaires.

Ce travail débouche sur quelques suggestions pédagogiques : se ramener à la situation à deux sources, préciser les conditions d'obtention des interférences lors de leur introduction, utiliser des schémas avec des rayons et des surfaces d'onde pour la formation des images.

Spécialité : Didactique des disciplines

Option : Didactique des sciences physiques

Mots-clés : interférences lumineuses, cohérence de la lumière, histoire des sciences, raisonnements de sens commun, enseignement supérieur.