|  |
| --- |
| **Gravitation** |
| **Question : C’est quoi  ? Quelle formule a été trouvée en 1er, gravitation ou électrostatique ? Est-ce qu’il y a un équivalent des équations de Maxwell pour la gravitation ?**  *Réponse :* Force de Coulomb. Newton est bien avant Coulomb. D’ailleurs Coulomb a cherché à calquer la forme de sa loi sur celle de Newton, quitte à jouer un peu avec les données... Oui en remplaçant  **Question : Quel nom précis à donner pour m et q ?**  *Réponse : C’est le coefficient d’interaction (ou constante de couplage) entre la particule et le champ charge/champ EB, masse/champ gravitationnel*  **Question : On définit 2 types de masses. Lesquelles ?** *Réponse :* Masse gravitationnelle qui intervient dans la force de gravitation. Masse inertielle qui intervient dans le PFD. En mécanique classique, c’est les mêmes. En relativité générale, c’est un postulat : le principe d’équivalence faible.  **Question : Pourquoi la Terre est à symétrie sphérique. Comment varie g ?**  *Réponse :* En réalité elle est plus aplatie aux pôles mais là c’est pour faire un calcul simple. Modèle thermodynamique montre que la Terre est ellipsoïde. La grandeur g est liée au poids et égale à G(RT) au 1er ordre. Aux ordres supérieurs, il faut ajouter la force d’inertie d’entraînement et prendre en considération le fait qu’il y a des déformations donc la Terre n’est pas tout à fait sphérique. Donc la direction de g n’est pas exactement celle de la droite reliant le point à la surface avec le centre de gravité de la Terre.  **Question : Est-ce qu’on peut définir la notion de poids de précise pour élèves de lycée ?**  *Réponse :* C’est l’opposé de la force qu’on doit appliquer à un objet pour le maintenir en place sur Terre. *On pense par exemple à la tension d’un ressort qui maintient un objet en lévitation.*  **Question : Qu’est-ce qu’un référentiel ?**  *Réponse : la donnée d’un repère d’espace et d’une horloge*  **Question : Pas tous les satellites sont géostationnaires. Ils sont sur quel orbite ?**  *Réponse :* orbite basse, moyenne, elliptique : hbps://geoxc-apps.bd.esri.com/space/satellite-explorer/  **Question : Quel est l’objet qui a été envoyé le plus loin par l’être humain ?** *Réponse :* Les sondes Voyager (1 et 2) *h4ps://fr.wikipedia.org/wiki/Voyager\_1*  **Question : A-t-on essayé de tester des propriétés de la gravitation récemment ?**  *Réponse : -* Ondes gravitationnelles. Elles ont pu valider la prédiction de la relativité générale. *-Mission MICROSCOPE pour tester l’équivalence faible (h4ps://fr.wikipedia.org/wiki/ MICROSCOPE\_(satellite)) - Pleins d’effets liés aux trous noirs (lentille gravitationnelle, etc.) - matière noire / énergie noire, qui peuvent être partiellement incorporée à la relativité générale*  **Question : Moment cinétique est constant donc mouvement de M est plan. Pourquoi ?**    **Question : Comment étaient faites les mesures précédentes ? Comment améliorer ce modèle ? Quelles sont les limites dans ce cas ?**  *Réponse :* Par la même bille. Mais aussi en changeant la bille car le temps de chute libre n’est pas censé varier avec la masse. On peut augmenter la hauteur et dans ce cas on aura une vitesse limite à cause du frottement fluide.  **Question : C’est quoi la force de frottement ?**    **Question : Que décrit vraiment cette quantité g ?**  *Réponse :* il y a des corrections à prendre en compte. La plus importante concerne les effets inertiels liés au fait que le référentiel terrestre n’est pas galiléen. C’est ce terme qui explique que le lancement des satellites se fait le plus proche possible de l’équateur. La Terre n’est pas vraiment sphérique donc g n’est pas la même partout. Les reliefs ont un effet aussi mais minoritaire.  **Question : Couplage entre gravitation et effets inertiels ?**  *Réponse :* Force de marée / Déviation vers l’est (Train)  **Question : James Webb est une trajectoire libre ? Est-ce qu’il tourne pas autour de la Terre ? La force de gravitation est 1/r donc c’est une force à longue portée. A partir de quand on dit qu’on est en état libre ?**  Réponse : Ce satellite est à un point dit de Lagrange où les forces gravitationnelles de la Terre et du Soleil s’équilibrent, il n’est plus en orbite autour de la Terre.  **Question : Satellite géostationnaire ? A quel rayon ? Quelle utilisation ?**  *Réponse :* Satellite géostationnaire a une vitesse de rotation égale à celle de la Terre pour être toujours fixe sur un point de la Terre. Il orbite à environ 36 000 km de la Terre.  *Questions sur l’expérience :*  **Question : Pourquoi l’expérience n’a pas bien marché ? Toutes les erreurs sont liées à l’ordinateur ?**  *Réponse :* Il y a des erreurs à cause du suivi automatique de Tracker. La caméra n’est pas vraiment perpendiculaire au mouvement. Mais il y a des effets de frottement pas du tout négligeable car la balle est très légère.  **Lois de conservation en dynamique** |
| **QuesBon : Qu’entendez vous par “dp/dt = si isolé est la définiBon même de R” ?** *Réponse : DéfiniBon de R galiléen*  **QuesBon : Différence isolé / pseudo-isolé ?**  *Réponse : isolé = pas de force pseudo isolé = force qui se compensent (somme des forces nulle)*  **QuesBon : Peut-on vérifier l’hypothèse de pseudo isolaBon sur l’exemple de la barque**  *Réponse : ici, on s’intéresse à px donc ok si on néglige la viscosité de plus, on a = - mtot*  **QuesBon : Que peut-on dire de plus sur le mouvement de la barque ?**  *Réponse : on a intégré l’équaBon pour trouver le déplacement on peut aussi trouver des relaBons sur la dynamique (par exemple la vitesse de la barque à la fin du déplacement de A et B)*  **QuesBon : DémonstraBon de TEM, lien entre Ep et travail ?**  *Réponse :* dEp = - . = -  **QuesBon : Qu’est-ce qu’une ligne de courant ?**  *Réponse :* lignes parallèles à → équa&on  **QuesBon : Démo Bernouilli : qu’entendez-vous par “tout reste constant entre A’ B’ et C D” ?** *Réponse : Forces de pression :* → régime permanent → et orthogonal à la surface latérale donc les forces de pression ne travaillent pas *Forces de pesanteur :* → régime permanent → g uniforme  **QuesBon : Tube de Pitot = uBlisaBon Bernouilli MAIS hypothèse incompressible, or air = compressible ? Qu’est-ce qui nous y autorise ?** *Réponse : → hypothèse = écoulement incompressible → possible, même dans le cas d’un fluide compressible (nombre de Mach)*  **QuesBon : Pourquoi on peut supposer que vS = v0 ? Vous aviez parlé de la couche limite**  *Réponse : FLUIDE PARFAIT → on néglige la viscosité, donc on a pas de couche limite → qu’est-ce qui autorise à négliger le tube ? le tube a une secBon très très faible donc OK FLUIDE RÉEL → on veut une couche limite la plus peBte possible → on doit avoir la pression qui change peu entre le trou du tube et la ligne de champ : hypothèse de conBnuité de P*  **QuesBon : Comment foncBonnent le manomètre et l’anémomètre à fil chaud ?**  *Réponse :* anémomètre à fil chaud : *-> on fait passer un courant dans un fil => chauffé par effet Joule -> si T augmente, on a R qui diminue -> plus la vitesse de l’écoulement est grand, plus on perd de la chaleur donc plus TRP est faible donc R est faible -> on peut relier vitesse et R manomètre : relie différence de pression à une tension, pas plus d’info*  **QuesBon : Vous avez tracé = f(v), qu’est-ce qu’on aurait pu tracer de plus visuel ?** *Réponse : On aurait pu tracer* = f(v2) *et montrer qu’on avait bien une loi affine*  **QuesBon : Commentaire sur de 0,2 ?** *Réponse : On veut plutôt* autour de 1 *On a sûrement suresBmé nos incerBtudes*  **QuesBon : Vous avez énoncé le TMC, ceae relaBon est-elle toujours vraie ?** *Réponse : Le TMC n’est valide que pour un point O fixe*  **QuesBon : Pourquoi le système est isolé pour le personnage sur le tabouret d’inerBe ?** *Réponse : hypothèse = liaison pivot parfaite donc pas de couple de fromement au niveau du tabouret*  **QuesBon : ConservaBon MC dans problème à deux corps => 1ère loi de Kepler. Pouvait-on en déduire d’autres choses ?** *Réponse : ConservaBon de -> mouvement plan (1ère loi de Kepler) -> conservaBon de la vitesse aréolaire (2ème loi de Kepler)*  **QuesBon : D’où vient la 3ème loi de Kepler, rapidement ?**  *Réponse : On introduit le vecteur de Laplace, conservé lui aussi, pour montrer la 3ème loi* **QuesBon : Pourquoi le vecteur de Laplace est-il conservé ?** *Réponse : Il faut qu’on ait une énergie potenBelle de la forme Ep = 1/r*  **QuesBon : Pourquoi a-t-on conservaBon de certaines quanBtés dans certains problèmes ?** *Réponse : Théorème de Noether Propriétés du systèmes / Symétries / loi de conservaBon associée*    **QuesBon : EquaBon de conservaBon de la charge : symétrie à l’origine de ceae conservaBon d’après Noether**  *Réponse : Invariance de jauge des équaBons de Maxwell*  **QuesBon : Navier-Stokes et Euler dérivent du PFD, pourrait-on imaginer écrire ces équaBons sous la forme des équaBons de conservaBon**  *Réponse : oui, avec un terme de source de quanBté de mouvement (= force ?)*  **Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley** |
| Question : Éther, support des ondes lumineuses. Qui est le premier à avoir proposé cette notion ?  Réponse : Christiaan Huygens au 17ème siècle, dans son « Traité de la Lumière » (écrit en français, pendant son séjour à Paris, en 1678 ; publié 12 ans plus tard aux Pays-Bas). L' « éther » est un concept qui revient sans cesse en physique au fil des siècles ; toutefois, dans le cadre d'une leçon sur la relativité restreinte, on peut se cantonner à parler de l'éther de Christiaan Huygens, support des ondes lumineuses (l'éther luminifère), sans nécessairement remonter aux origines antiques (quintessence, 5e élément d'Aristote) du mot et du concept. « Luminifère », i.e. « porteur de lumière ». A rapprocher de « Lucifer » (désignation latine  de la planète Vénus, le « porteur de Lumière », annonceur de l'aurore) pour l'étymologie...  Question : Propagation, le terme en c²-v² ? Ça serait quoi comme solution ?  Réponse : Lorsqu'on applique la transformation de Galilée aux équations de Maxwell, en particulier à l'équation de propagation des ondes EM dans le vide, on voit apparaître un terme de propagation à la vitesse (c-v) et un autre à la vitesse (c+v) [cohérent avec la composition classique des vitesses ; mais l'équation de propagation n'a plus la même forme].  Question : Sources de lumière de Michelson-Morley ?  Réponse : Lampe au sodium (en fait « flamme au Sodium ») d'abord puis en lumière blanche (lampe « Argand » i.e. lampe à huile, blanche).  Question : Pourquoi la lampe au sodium ? Quel est l'intérêt ?  Réponse : Doublet jaune, quasi-monochromatique. Permet le réglage de l'interféromètre. Notamment pour l'alignement des miroirs et pour obtenir les franges, et rechercher le contact  optique.  Question : Qu'est-ce qui se passe en lumière blanche ? A quoi ressemble la figure d'interférences ?  Réponse : Superposition des interférences pour chaque lambda. En lumière blanche, Michelson obtient une frange sombre centrale, quelques franges blanches, puis des franges colorées qui se brouillent rapidement de part et d'autre de la frange sombre centrale.  Question : Utilité du bain de mercure ?  Réponse : Grande densité donc le marbre flotte dessus. Permet de faire lentement tourner le marbre, en limitant les vibrations qui rendraient difficilement observable l'évolution attendue du motif d'interférences pendant la rotation.  Question : Quelle est l'utilité de la lame compensatrice ?  Réponse : Pour compenser la différence de chemin optique dans le verre (de la lame semitransparente) entre les deux bras.  Question : Pourquoi 6 mois plus tard pour la manip ?  Réponse : Pour vérifier le mouvement de l'éther par rapport à la Terre lorsque celle-ci se déplace (à 30 km/s) dans la direction opposée.  Question : Connais-tu d'autres expériences ayant pour objectif la mise en évidence du vent d'éther ?  Réponse : Expérience de Fizeau (question de l'entraînement (ou non, ou partiel) de l'éther par les milieux transparents en mouvement). Autre expérience conçue afin de mettre en évidence le « vent d'éther » : l'expérience de Trouton et Noble (un condensateur plan chargé, suspendu à un fil de torsion, est sensé pivoter de telle sorte que les plaques s'orientent perpendiculairement au « vent d'éther »).  Question : Est-ce que tu peux préciser ce que Michelson veut mesurer en faisant tourner le marbre ?  Réponse : Inversion du signe de la différence de chemin optique entre les deux bras de l'interféromètre lorsqu'il pivote de 90°, qui doit induire un décalage du motif des franges.  Question : En quoi les postulats d'Einstein résolvent les résultats de l'expérience de Michelson et de Morley ? Et si l'éther au voisinage de la Terre était entraîné par la Terre dans son mouvement ?  Réponse : Si la lumière se propage à la célérité c dans tous les référentiels inertiels, on n'attend aucune différence de marche du fait du mouvement de la Terre entre les bras de l'interféromètre, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux. Si une couche d'éther se déplaçait avec la Terre dans son mouvement autour du soleil, cela rendrait compte du résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley, mais ce serait incohérent avec l'interprétation classique de l'aberration des étoiles, interprétée alors comme la composition (addition classique des vecteurs vitesses) du mouvement de la lumière (dans l'éther)  avec le mouvement de la Terre (dans l'éther).  Question : Est-ce que tu saurais préciser sous quelles hypothèses la transformation de Lorentz (telle que formulée) est valable ? Idem, hypothèses lorsque tu as écrit la transformation de Galilée ?  Réponse : [Le manque de précision lors de l'écriture de la transformation de Lorentz au tableau a suscité ces questions]. Sous la forme utilisée, on suppose que les origines O et O' des deux référentiels R et R' se confondent à t=t'=0 (synchronisation des origines des temps lors de l'événement particulier O=O'), sans quoi il est nécessaire d'ajouter des termes constants dans les équations de Lorentz. Il est important d'être précis et de bien prendre le temps de dessiner les deux référentiels, les axes, de poser les hypothèses, de préciser que O et O' se confondent à t=t'=0, etc.  Question : Est-ce que ce n'est pas restrictif de ne considérer pour le mouvement de référentiel qu'une translation sur l'axe des x ? N'y a-t-il pas là perte de généralité ?  Réponse : L'ensemble des transformations qui laissent invariantes les équations de Maxwell forment le « groupe de Poincaré » ; sa base canonique est constituée des translations dans l'espace et dans le temps, des rotations, du renversement du temps et de la parité, et des « boost » de Lorentz sur les 3 axes. Lorsqu'on écrit la transformation de Lorentz en supposant le mouvement relatif entre les référentiels selon Ox et O'x', il n'y a pas nécessairement perte de généralité : dans les référentiels inertiels R et R' considérés, on peut toujours choisir les axes de telle sorte que l'axe Ox (et l'axe O'x') soient orientés selon le mouvement relatif entre les 2 référentiels.  Question : Qu'est-ce que le « temps propre », définition ? Si on prend un mobile pour lequel deux événements ont lieu successivement pour lui dans son référentiel propre, quelle sera la durée qui sépare ces deux événements dans un autre référentiel ?  Réponse : Temps/durée mesurée entre des événements ayant lieu au même point dans le référentiel où le mobile est au repos. Dans tout autre référentiel, on trouvera entre les mêmes événements une durée plus longue : c'est la « dilatation du temps ».  Question : Dans la célèbre expérience sur les muons atmosphériques : à quoi correspond le temps de vie du muon de 2.2 microsecondes ? Si jamais j'avais une population de muons « dans une boîte », comment cette population évoluerait-elle ?  Réponse : Temps de vie moyenne. Loi exponentielle décroissante. En physique des particules, on donne en général le temps de vie moyen d'une particule, noté tau. Il s'agit bien sûr du temps de vie moyen mesuré « au repos », i.e. dans le référentiel propre de la particule (temps propre). Pour une population de particules semblables, la population de ces particules évoluera selon : N(t) = N(0) exp(-t/tau).  Question : Retour sur les effets de la transformation de Lorentz sur les longueurs, validité de l'équation obtenue pour la longueur de la règle dans l'autre référentiel ?  Réponse : La longueur d'un objet (selon la direction du mouvement relatif entre les 2 référentiels considérés) mesurée dans le référentiel où il est au repos est sa « longueur propre ». Dans tout autre référentiel, on trouvera une longueur plus courte : c'est la « contraction des longueurs ». Lors du calcul, il est essentiel de bien définir les événements considérés, et de se souvenir que du point de vue opérationnel, on définit une mesure de longueur comme la détermination simultanée des abscisses des deux extrémités de l'objet, au même instant dans le référentiel où on effectue la mesure. Sans ces précautions, surtout en raisonnant sur des intervalles de temps et d'espace mal définis, on aboutit parfois au résultat inverse de ce que la relativité prédit [La question est venue car le calcul présenté au tableau était erroné et aboutissait au résultat inverse de ce que prédit la théorie de la relativité. Une telle erreur lors de l'épreuve devant le jury de l'agrégation serait très certainement « fatale » pour la/le candidat(e)].  Question : Tu as évoqué la vitesse c comme une limite infranchissable ; as-tu déjà entendu parler des tachyons ? c.à.d. des particules hypothétiques, qui, par définition, se déplaceraient à une vitesse supérieure à c ? A quoi ressemblerait leurs lignes d'univers dans un diagramme d'espace-temps ? Quelles seraient les conséquences pour un tachyon ? Peux-tu rappeler ce qu'est le cône de lumière d'un événement, le dessiner, et rappeler à quoi correspondent les différentes régions que délimite le cône de lumière ?  Réponse : Le tachyon est, par définition, une particule (hypothétique) qui se déplacerait plus vite que la lumière. On peut montrer qu'un tachyon doit nécessairement se déplacer plus vite que la lumière dans tous les référentiels inertiels. La pente de sa ligne d'univers est telle que pour n'importe quel point-événement de sa ligne d'univers, son futur et son passé sont hors de son cône de lumière, ce qui pose de sévères questions concernant le principe de causalité pour le tachyon. On peut aussi montrer qu'il est toujours possible de trouver un référentiel inertiel tel que émission et réception d'un tachyon voient leur ordre temporel inversé. Pour le cône de lumière d'un événement, la partition de l'espace-temps associée, et la discussion sur le signe de l'intervalle d'espace-temps pour une paire d'événements, se référer à l'abrégé de cours par exemple.  Question : Est-ce que tu saurais retrouver la nouvelle loi de composition des vitesses par les transformations de Lorentz ? Quelle différence avec la loi galiléenne ? Imaginons un rayon lumineux allant à c selon +x dans R, à quelle vitesse se propage-t-il dans R' ?  Réponse : L'objectif de la question était de retrouver la loi relativiste de composition des vitesses (au moins pour la composante selon x/x'), de l'appliquer au cas particulier d'un rayon lumineux se propageant selon +x ou -x, et de vérifier qu'on obtient bien un résultat cohérent avec les postulats d'Einstein, à savoir que la lumière se propage à la célérité c dans tous les référentiels galiléens/inertiels.  **Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux** |
| **Question : Est-ce la viscosité de l’eau qu’on ressent en marchant dans une piscine ?**  *Réponse : On peut calculer le Re associé :* 𝑅e=~ 10^5≫1  *On est en régime inertiel, pour lequel la force de trainée est indépendante de la viscosité, donc* ***non****, c’est la densité (masse volumique) de l’eau qui est ressentie.*  **Question : Quelle est l’origine de loi de Stokes (analytique, empirique, numérique, …) ?**  *Réponse : La démonstration analytique est possible et a été réalisée par Stockes à la fin du 19ème siècle (1880). Il faut déterminer le champ de vitesse partout dans le fluide pour ensuite calculer les contraintes (normales et tangentielles)*  **Question : Idem pour la loi à haut Reynolds ? Comment est estimé Cx = 0.45 pour une sphère ?**  *Réponse : Les valeurs de Cx sont obtenues expérimentalement.*  **Question : Quel est l’allure des lignes de courant pour l’expérience réalisée ?**  *Réponse :*    *Attention, cela correspond aux lignes de courant dans le référentiel de la sphère. Les lignes de courant dans le référentiel du laboratoire ne sont pas du tout celles-là et il faudrait être capable de tracer leur allure…*  **Question : Peut-on négliger les effets des parois latérales ?**  *Réponse : Oui car le rayon de la cuve est de l’ordre de 10 cm, celui de la bille de 2 mm. On a donc 2 ordres de grandeur. Cependant, les effets de bords ne sont plus négligeables vers le fond de la cuve. Le champ de vitesse autour d’une sphère varie en 1/r avec donc des interactions à longue portée. Il faut donc que le récipient de diamètre soit beaucoup plus grand que la sphère pour qu’il n’y ait pas d’effets de parois.*  **Question : Comment estimer la distance nécessaire pour atteindre la vitesse limite ?**  *Réponse : La bille est soumise à une force de trainée, au poids et à la poussée d’Archimède. On peut donc estimer le temps caractéristique à partir duquel la bille cesse d’accélérer.*  **Question : Comment définir le nombre de Reynolds dans le cas général, que faire du terme de pression ?**  *Réponse : Il faut comparer le terme de viscosité avec le gradient de pression. On doit donc définir une pression caractéristique basée sur la viscosité et le gradient typique de vitesse (cf. cours).*  **Question : Comment comprendre la notation** 𝑅e="𝑐onvection"/"𝑑iffusion" ?  *Réponse : C’est un rapport de forces volumiques qui correspond aussi à un rapport de temps caractéristiques de diffusion / convection :*  • *Temps visqueux :* τvisq=L2/ν  • *Temps de convection :* τconv=L/U  *Or, les temps caractéristiques sont inversement proportionnels à la force, donc*  Re=τvisq/τconv*.*  **Question : Quelle est le domaine de validité de la loi de Stokes ? L’objet considéré est-t-il nécessairement solide?**  *Réponse : La sphère est supposée indéformable et les vitesses (normale et tangentielles) à la surface de la sphère sont supposées être égales à la vitesse de la sphère (condition de non-glissement à la paroi). Elle n’est donc pas valide pour une sphère fluide (par exemple une bulle d’air dans un liquide) car les conditions aux limites ne sont pas les mêmes (il y continuité des vitesses à l’interface mais il peut y avoir une vitesse de fluide à l’intérieur…)*  **Question : Que ce passe-t-il si l’écoulement est compressible ?**  *Réponse : L’expressiondes forces de viscosité n’est plus aussi simple.*  **Question : Si le fluide n’est pas newtonien ?**  *Réponse : La viscosité est fonction de la contrainte appliquée. Le terme visqueux alors plus un Laplacien mais il faut revenir au terme de divergence du tenseur des contraintes en prenant en compte l’équation constitutive du fluide (équation liant les contraintes aux gradients de vitesses) qui n’est plus simplement linéaire.*  **Question : Si l’écoulement n’est pas de cisaillement (par exemple si** 𝑣𝑣𝑥𝑥(𝑥𝑥) **)**  *Réponse : Supposer l’écoulement incompressible et le fluide newtonien est suffisant pour pouvoir exprimer les forces de viscosité comme* 𝑓⃗𝑣isco=ηΔ𝑣⃗*. Il faut acoir conscience que si l’écoulement n’est pas de cisaillement mais extensionnelle, il peut se développer des contraintes normales visqueuses.*  **Question : Sur le graphique** 𝐶𝑥(𝑅e)**, on observe un décrochage vers 2.10^5 (c*rise de la trainée / paradoxe d’Eiffel)*. Quelle en est la signification physique ?**  *Réponse : Ce décrochage (chute de la trainée) correspond à l’amincissement de la zone de turbulence située derrièrel’objet. On utilise ce phénomène pour réduire la trainée des balles de golf en les réalisant rugueuses (non lisses).*  **Question : La crise de la trainée a-t-elle lieu avant ou après pour une sphère lisse ?**  *Réponse : Dans le cas d’une sphère rugueuse, ledécrochage a lieu plus tôt (Re critique plus faible) que pour une sphère lisse.Cependant, Cx est ensuite plus importante pour Re > Rec.*      **Question : Dans la construction d’une séquence pédagogique, l’étude d’un fluide parfait doit-elle avoir lieu avant ou après celle de la viscosité ?**  *Réponse : Tout est possible. Etudier le modèle du fluide parfait après la viscosité peut permettre de bien cerner les limites et les avantages de cette modélisation. Cependant, c’estcontraire à l’approche historique(fluide parfait avant l’étude de la viscosité).*  **Question : Quelle est la dépendance du coefficient de viscosité dynamique** η **avec la température ? Est-elle identique pour tous les fluides ?**  *Réponse : Pour un gaz : si T élevée = agitation thermique importante = temps de diffusion faible = viscosité importante. La valeur de* η augmente donc avec la température.  *Pour un liquide, c’est le contraire, la viscosité diminue lorsque la température augmente (cf. huile sur une poêle).*  **Question : Quelle est la dépendance de la viscosité** η **avec la pression ?**  *Réponse : Elle est indépendante de la pression pour un gaz, et il existe dépendance importante (exponentielle) pour les liquides.*  **uestion : Dans la video, tu as dit "le mouvement est transmis des bords au centre".**  **Peux-tu preciser?**  Reponse : Dans le referentiel du laboratoire, un becher avec du fluide est mis en rotation. Au centre  est pose un verre a pied fixe. En fait, ici c’est la partie centrale qui bouge par rapport au fluide, donc  la quantite de mouvement est transmise du centre au bord, c’est l’inverse.Remarque : cette video  (en cylindrique) n’est pas evidente a commenter, il faudrait avoir prepare quelques phrases sur sa  description plutot que l’improviser comme cela a ete fait.  **Question : Sur l’etablissement de la loi de Newton, qui est** Fx **?**  Reponse : C’est la force exercee par l’element du dessus sur l’element du dessous. C’est important  de definir une convention, sinon il y a un signe −.  **Question : Comment a ete decouverte cette loi?**  Reponse : C’est une loi qui correspond a des observations experimentales.  **Question : Qu’est-ce qu’un fluide newtonien? Connais-tu des fluides non newtoniens?**  Reponse : C’est un fluide qui respecte la loi de Newton. Certains fluides n’ont pas une force qui est  lineaire en le gradient de vitesse. Par exemple, la maizena est un fluide rheo-epaississant. Il y a aussi  des fluides rheo-fluidifiants (le sang), ou les fluides de Bingham.  **Question : Le coeffcient** η **evolue totalement differemment avec** T **pour un liquide ou un**  **gaz. Peux-tu re-expliquer l’evolution de** η **pour un liquide?**  Reponse : Pour les liquides, la viscosite dynamique diminue avec la temperature. En effet, lorsque la  temperature augmente, les distances intermoleculaires augmentent (dilatation), il y a donc moins de  frottements, et la viscosite diminue. Pour les gaz, lorsque la temperature augmente, la vitesse des  molecules augmente et leur taux de collision egalement, par consequent la viscosite augmente.  **Question : As-tu un exemple courant ou on voit que la viscosite diminue avec** T **pour un**  **liquide?**  Reponse : Quand on fait de la patisserie, les liquides sont plus "mous" a haute temperature. Autre  exemple : quand on met de l’huile dans une poele, l’huile est moins visqueuse quand on chauffe.  **Question : Et quel est le role de la pression?**  Reponse : Elle a une influence negligeable mais non nulle sur la viscosite d’un liquide. Pour un gaz,  la pression ne joue pas de role.  **Question : Peux-tu expliquer le PFD que tu as fait pour trouver** η **(Eq. 4)?**  Reponse : Je dis que la force exercee par le dessus sur le dessous est egale a la perte de quantite  de mouvement du dessous vers le dessus. Remarque : la demonstration n’etait pas claire, il faut la  presenter plus proprement, en definissant bien les systemes qu’on considere a chaque etape.  **Question : Comment mesure-t-on une viscosite concretement?**  Reponse : On peut faire l’experience que j’ai faite. On peut aussi realiser un viscosimetre de Couette,  en utilisant un dipositif similaire a celui que j’ai montre sur la video. D’autres methodes seraient envisageables,  comme realiser un ecoulement de Poiseuille et mesurer la resistance hydraulique.  **Question : Quelles sont les hypotheses de l’equation de Navier-Stokes?**  Reponse : Le fluide est incompressible et newtonien.  **Question : Que se passe-t-il si le fluide n’est pas incompressible?**  Reponse : Dans ce cas, le terme de contrainte visqueuse est different. Il y a une contribution supplementaire,  faisant apparaitre  −→∇  ・ −→v , qui s’annule bien si l’ecoulement est incompressible.  **Question : Peut-on voir le nombre de Reynolds comme un rapport de temps caracteristiques?**  Reponse : Absolument ! Le Reynolds est le rapport entre le temps typique inertiel et le temps typique  visqueux. En effet, τdiff = L2  ν et τinertie = L  U . On obtient alors le Reynolds en faisant τdiff  τinertie  .  **Question : Qui est** ν **? Quelle est son unite?**  Reponse : C’est le coefficient de viscosite cinematique, mesure en m2/s.  **Question : Dans ton experience, y a-t-il des effets de bords? Comment le montrer?**  Reponse : Il faut regarder les tailles typiques de diffusion visqueuse, et verifier ainsi que la bille ne  "voie" pas les bords.  **Question : D’ou vient la loi de Stokes?**  Reponse : Elle a ete probablement decouverte empiriquement. Elle se demontre toutefois analytiquement  (calcul tres long) avec l’hypothese Re ≪ 1.  **Question : Que devient cette loi a** Re ≫ 1**?**  Reponse : On aura une loi en ∝ v2.  **Question : Qu’est-ce que le coefficient de trainee? Comment evolue-t-il en fonction de**  Re**?**  Reponse : C’est un coefficient qui depend de la geometrie de l’objet. (courbe classique).  **Question : Il se passe un "ptit truc marrant", c’est quoi?**  Reponse : Le decrochement s’appelle crise de trainee, utilisee pour les balles de golf.  **Question : Comment etre sur, dans ton experience, qu’on est en regime stationnaire?**  Reponse : Experimentalement, on peut faire Tracker et verifier que c’est le cas. Sinon, on peut avec  le PFD trouver le temps typique d’etablissement du regime stationnaire. J’ai fait l’application numerique,  c’est 3 ms donc ca va.  **Question : Que vaut le Reynolds dans ton experience?**  Reponse : Je l’ai estime a 10 − 20.  **Question : Quels sont les messages que tu veux faire passer dans cette lecon?**  Reponse : Je veux que les etudiants retiennent la notion de viscosite, que c’est important dans la vie  quotidienne et qu’on peut la mesurer.  **Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide** |
| **Question : Faites la mesure en direct**  *Réponse :*  *On fait la mesure avec un microcontroleur*  **Question : Pouvez-vous intuiter la relation donnant h(t) ?**  *Réponse : On obtient une loi puissance, décroissante (si z vers le haut)*  **Question : La courbe h(t) tend vers 0 asymptotiquement ? Et vB ?**  *Réponse : h tend vers 0, (branche décroissante de parabole)*  *vB décroit linéairement avec t*  *cf schema*  **Question : Que se passe-t-il si on place le réservoir sur un plateau tournant ?**  *Réponse : Si le robinet est au centre, c’est plus lent car il se crée un tourbillon qui creuse la surface libre avec donc une hauteur d’eau plus faible au dessus du trou de vidange. Si le robinet est sur le côté, c’est peut-être plus rapide (effet force centrifuge en r omega² ?)*  **Question : On dit qu’on doit mettre en rotation une bouteille pour la vider plus vite, est-ce la même chose ?**  *Réponse : Pas la même chose car on a un récipient fermé pour la bouteille (vidange ralentie par absence entrée d’air.*  *Pour la bouteille, effet vortex permet de garantir une entrée d’air*  **Question : Que peut-on dire pour Bernouilli, si rot(v) <> 0 ? à part la relation sur une ligne de courant ? Si on intègre sur une ligne tangente en tout point à rot(v) ?**  *Réponse : On intègre Euler sur une ligne tangente à rot v*  *On a toujours (rot(v) ^ v) orthogonal à notre dl car dl parallèle à rot(v)*  *Donc on a aussi conservation de (v²/2 + P/rho + gz) le long d’une ligne de « courant » de rot(v) (ie. Une ligne de vorticité)*  **Question : On a supposé que l’on avait un écoulement quasi stationnaire pour la vidange. Peut-on le vérifier à posteriori ?**  *Réponse : On veut vérifier v0 / tho < < v0² / L*  *On prend L ~ h0 et tho ~ t(vidange), on réinjecte l’expression de vB en fonction de h*  *On retrouve s/S < < 2 (ce qui revient à la même chose, en ordre de grandeur) => cohérent*  **Question : On peut utiliser Bernoulli si rot(v) = 0 ou le long d’une ligne de courant/de vorticité. Et si l’écoulement est instationnaire ?**  *Réponse : On garde l’hypothèse incompressible et irrotationnel*  *Si irrotationnel, alors v = grad(phi) donc on doit pouvoir transformer le terme instationnaire en gradien*  *on a conservation de [d(phi)/dt + v²/2 + P/ rho + gz ]*  **Question : Dans quel cas utilise-t-on cette relation de Bernoulli instationnaire ?**  *Réponse : Dans le cas des ondes à la surface de l’eau. Dans ce cas, comme on considère des petites ondes, on peut négliger le terme en v²/2. La relation de Bernoulli en instationnaire doit aussi utlisé pour calculer la force de traînée d’un fluide sur un objet, dite force de masse ajoutée. Elle peut aussi être utilisée pour rendre compte du phénomène de « coup de bélier » intervenant lors de la fermeture brutale d’une conduite.*  **Question : Tube de Pitot : commentaire sur les lignes de courant, pourquoi les lignes de courant ne sont plus parallèle proche du tube ?**  *Réponse : On a une couche limite qui se développe proche du tube*  **Question : Et cela impacte la prise de pression ?**  *Réponse : On a une couche limite très petite, et le gradient transverse de pression est donc négligeable car la vitesse transverse est très petite devant la vitesse longitudinale, donc on ne fait pas une grande erreur en négligeant cette couche limite.*  **Question : De quand datent les équations d’Euler, de Bernoulli et de Navier-Stokes ? Et le tube de Pitot**  *Réponse : L’équation d’Euler datent d’environ 1750 (1757) puis et cells dite de Navier-Stokes d’environ 1850 (1822-1845). Le tube de Pitot inventé pour mesurer la vitesse des eaux courante (la Seine) et des bateaux date de 1732. La relation de Bernoulli date de 1738.*  **Question : Pourquoi a-t-il inventé son tube ?**  *Réponse : Pour mesurer la vitesse de l’eau dans la Seine*  **Question : Y a-t-il une force de trainée dans les fluides parfaits en régime stationnaire ?**  *Réponse : Non, c’est le paradoxe de d’Alembert : on a aucune dissipation donc aucune trainée si l’écoulement est stationnaire et irrotationnel, avec un écoulement symétrique amont-aval pour des objets symétriques. Dans la réalité, l’écoulement est disymétrique amont-aval par frottement visqueux et éventuellement décollement des couches limites, ce qui entraine une dépression en aval.*  *A noter qu’il peut exister une force de traînée dans les fluides parfait en régime stationnaire, lorsque l’écoulement est à même d’évacuer l’énergie à l’infini, comme dans le cas des vagues induites dans le sillage d’un objet se déplaçant à la surface de l’eau : c’est la traînée de vagues.*  **Question : Peut-on avoir des forces de trainée si l’objet est en train d’accélérer dans l’écoulement parfait ?**  *Réponse : En accélérant, on doit mettre en mouvement plus de fluide, qui s’oppose au mouvement de la sphère, et dont augmenter l’énergie cinétique du fluide. Le travail nécessaire à cela correspond celui de la force dite de masse ajoutée.*  **Question : Un gaz parfait est-il un fluide parfait ?**  *Réponse : Non, car un gaz parfait a une viscosité (cf théorie cinétique).*  **Question : Qu’est-ce qu’un fluide parfait ?**  *Réponse : Un fluide parfait est un fluide avec une viscosité nulle, alors qu’un écoulement parfait est un écoulement où on peut négliger les termes de dissipation visqueuse*  **Question : Que peut-on dire des conditions aux limites en écoulement parfait ?**  *Réponse : continuité de la contrainte normale (pression) et continuité de la vitesse normale (non pénétration) MAIS pas continuité contrainte tangentielle et vitesse tangentielle*  *(même chose pour une paroi solide ou une interface entre 2 fluides)*  **Question : Jet rectiligne : v(x,t) ex ? Est-ce possible avec la conservation de la masse ?**  *Réponse : Si incompressible, non (car div(v) = 0) donc v(t) seulement*  *Si compressible, c’est possible (onde longitudinale acoustique)*  **Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides** |
| **Premier principe de la thermodynamique** |
| **Question : Dans les prérequis, que sont les définitions de base de la thermodynamique ?**  *Réponse : La caractérisation des transformations.*  **Question : Comment expliquer la notion de variables et fonctions d’état à un élève de classe prépa ?**  *Réponse : Variables qui ne dépendent que des états initial et final, et fonctions qui décrivent l’état du système à tout instant.*  **Question : Sur l’introduction historique, quand est-ce que l’étude de la thermique a commencé ?**  *Réponse : Avec Lavoisier au 16ème siècle.*  **Question : Quel est l’apport majeur de Joules sur le sujet ? Quel était le but de l’expérience présentée.**  *Réponse : Montrer qu’un travail mécanique peut créer de la chaleur.*  **Question : Définir le terme calorifugé. Comment on l’obtient ?**  *Réponse : Parois athermanes, on peut utiliser des isolants thermiques.*  **Question : C’est quoi un système fermé ?**  *Réponse : Pas d’échange de matière avec l’extérieur.*  **Question : Pour le nombre de particules doit être grand devant celui d’Avogadro ?**  *Réponse : Pour pouvoir observer des comportement moyens.*  **Question : A-t-on besoin de N dans le premier principe ?**  *Réponse : Non, on pourrait présenter le premier principe sans.*  **Question : De quand date l’atomistique ? Comment faisait-on de la thermodynamique avant ?**  *Réponse : Début XXème. Avant on croyait en l’existence du calorique, un fluide qui posséderait de la chaleur. Pour être exacte, la théorie du calorique est justement invalidée au XIXe par Joule et cie.*  **Question : Définition de l’énergie interne ? Est-ce que c’est la somme ou la moyenne ?**  *Réponse : L’énergie interne est la somme des énergies des particules, dans le référentiel où le système est au repos.*  **Question : L’énergie interne des particules compte-t-elle dans l’énergie interne ou macroscopique ?**  *Réponse : On se place dans le référentiel où le système est macroscopiquement au repos.*  **Question : Comment on fait pour savoir de quelles variables d’état dépend l’énergie interne ?**  *Réponse : On peut utiliser des variables qui ne sont pas conjuguées (souvent 3).*  **Question : Qu’est que des variables conjuguées ?**  *Réponse : Celles qui apparaissent ensembls dans dU par exemple.*  **Question : Comment on expliquerait ça à un élève de prépa ?**  *Réponse : On peut identifier les variables d’état comme celles qu’on pourrait mesurer.*  **Question : Vous avez défini les forces de pression, est-ce que les élèves ont déjà vu ça ?**  *Réponse : Elle aurait pu être abordée en statique des fluides.*  **Question : dU= CdT n’est-elle valable que pour un gaz parfait ?**  *Réponse : Approximativement vraie pour une phase condensée.*  **Question : Pourquoi cette loi est valable pour un gaz parfait ?**  *Réponse : D’après le théorème d’équipartition de l’énergie, l’énergie ne dépend que de la température.*  **Question : Comment la loi de Joule évoluerait pour un gaz réel ?**  *Réponse : Il faudrait ajouter des termes ΔV.*  **Question : Est-ce que les capacités dépendent de la température ?**  *Réponse : Non si l’énergie est linéaire en T.*  **Question : D’où vient le facteur 3/2 dans l’énergie ?**  *Réponse : Degrés de liberté du gaz, peut varier en fonction de la température et donc faire dépendre cv de T. On fera l’hypothèse en général qu’elle varie lentement par rapport à T.*  **Question : Pourquoi U est une variable extensive ?**  *Réponse : Car on considère les énergies des particules.*  **Question : Est-ce que c’est tout le temps vrai ?**  *Réponse : Non, notamment dans les systèmes avec des fortes interactions entre particules.*  *Surtout : les systèmes à interaction de courte portée.*  **Question : C’est quoi un gaz parfait ?**  *Réponse : Un gaz qui vérifie la loi des gaz parfait, définition empirique sous hypothèse de non-interaction entre les particules.*  **Question : Dans l’exercice, est-ce que la transformation était vraiment isobare ?**  *Réponse : Non, plutôt monobare.*  *Quand l’élément imposé est de résoudre un exercice, ayez la correction également pour ne pas dire de bêtises !*  **Question : Est-ce que l’expression de la pression du piston est toujours vraie ?**  *Réponse : Non, seulement car il n’y a pas de frottement. Sinon, le piston céderait une partie de son énergie aux parois. Attention aussi à l’inertie du piston.*  **Question : Que pourrait-il se passer dans le régime transitoire quand on lâche le piston ?**  *Réponse : Il pourrait y avoir des oscillations, mais on suppose qu’un équilibre mécanique s’établit rapidement.*  **Transitions de phase** |
| **Question:Pourquoil’équilibrethermodynamiqueestà**𝑇,𝑃,𝜇 **égaux?**  *Réponse:*𝑑𝐺=𝑉𝑑𝑃−𝑆𝑑𝑇+𝜇𝑑𝑁 etilfautqueGsoitminimum.OnutiliseGcarlatransformationestisobareetisotherme.  **Question:Commentobtenir**𝛥𝐻𝐿→𝑆=𝑄𝐿→𝑆 ?  *Réponse:*𝐺=𝐻−𝑇𝑆 *et*𝛥𝐺=0 *donc*𝛥𝐻=𝑇𝛥𝑆  **Question:DémonstrationClapeyron**  *Réponse:*dg=udP-sdT(petiteslettrescarcesontdesgrandeursmolaires)  dP/dT=(s1-s2)/(v1-v2)=h/(v1-v2)T  **Question:DansClapeyron,pourquoi**𝜕 **?**  *Réponse:*Iln’yapaslieudemettreunedérivéepartiellecarsurlacourbedecoexistencePn’estfonctionquedeTpourunemassedefluidefixée.  **Question:S’ilyaunepentenulledanslediagramme(P,T),qu’est-cequecelaveutdiresurl’entropieSolide-Liquide?**  *Réponse:*Variationd’entropieSolide-Liquidequasi-nulle.C’estlecasdelatransitionentrel’héliumliquidesuperfluideetl’héliumsolideparexemple.  **Question:Supposonsunrécipientfermé,avecmélangeliquideetgaz.Quandonchauffe,qu’est-cequisepasse?Commentarriveraupointcritique?**  *Réponse:*Pourarriveraupointcritiqueenmodifiantlatempératureàvolumefixé,ilfautchoisirlebon“n”demoléculesdèsledépart.Eneffet,lepointcritiqueliquide-vapeurcorrespondàunetempératureetunepressionfixées.Sionamoinsden,onauraunephasecomplètementgazeuseàlafin.  **Question:Commentstockerunfluidedansunebouteillesousformedeliquide+vapeur?**  *Réponse:*IlfautqueTambiantesoitpluspetitequeTcritiquesinononn’aurapasunecoexistencedes2phases.SiTambianteaugmente,ilfautêtresûrquelamatièrenesetransformepasen100%deliquideafinquelabouteillen’explosepasdoncilfautchoisirunequantitédefluidepastropélevée.  *[QuestionsàproposduMontage]*  **Question:Expliquerlasurfusiondanslachaufferette**  *Réponse:*ilyadessitesdenucléation  **Question:Transition2ndordre:Tdécrochement(Tc)nedépendpasdelamassedel’aimant?**  *Réponse:*ouietdelasusceptibilitéduferd’oùladifférenceentreTc,expetTc,theo.  **Question:Commentfairepourenlevercettedépendanceenmasse?**  *Réponse:*ilfaudraittravailleravecl’aimantfixeetlemorceaudeferaccrochéaufiletmesurerTdécrochementpourdifférentesmassesdefer.S’ilyaunemodificationdeTdécrochement,onpourraitextrapoleràmassenulle.  **Phénomènes de transport** |
| **Question : Tu as dit qu’il n’y avait pas de convection quand la goutte de colorant est mise**  **dans le verre. C’est vrai?**  Reponse : J’ai essaye de deposer delicatement pour eviter les turbulences ; la goutte tombe quand  meme par gravite, ce qui concurrence la diffusion. Il y a, en effet, forcement de la convection naturelle  qui joue aussi, meme en l’absence d’une convection forcee.  Si on considere qu’il n’y a pas d’advection liee au mouvement de la piepette, l’ordre de grandeur  diffusif D ∼ 10−6 m2/s et L = 10−1 m τ = L2/D ∼ 104 s, soit 3 heures. On observe que c’est completement  homogene au bout d’une dizaine de minutes. C’est donc la convection naturelle qui domine  les phenomenes de transports ici !  Cet exemple doit etre utilise pour dire que la diffusion n’est pas suffisante.  **Question : Tu as dit que les phenomenes de transport sont hors-equilibre. Pourquoi y**  **a-t-il toujours un courant qui apparait?**  Reponse : Le systeme evolue vers un equilibre global, il evolue donc vers un etat qui supprime les  inhomogeneites.  **Question : Dans les criteres de l’ETL, est-ce que** L **represente vraiment la taille du systeme?**  Reponse : Il faut forcement etre ≪ L pour l’approximation des milieux continus, mais il y a aussi des  effets de gradients.  **Question : Dans un liquide, ok pour dire que** ℓp **est la distance inter-particules. Et dans un**  **gaz?**  Reponse : On s’attend a ℓp plus grand que la distance entre les particules, les choses sont plus  compliquees a cause de la faible densite. Par analyse dimensionnelle, ℓp = 1  nσ ou n est la densite et  σ la section efficace de collision.  **Question : Quelle est la definition d’un flux?**  Reponse : C’est une quantite de particules (par exemple) qui passe par unite de temps a travers une  surface S. Le vecteur −→j est la densite surfacique de flux.  **Question : Y a-t-il d’autres equations de conservation vues en PC?**  Reponse : Oui, conservation de la masse, de la charge et de l’energie interne (1er principe en diffusion).  **Question : Mais du coup, la loi de Fick se demontre ou pas?**  Reponse : C’est une loi phenomenologique, c’est-a-dire la loi la plus simple qu’on puisse imaginer  pour expliquer un phenomene. D est mesure experimentalement.  Une loi phenomenologique explique les resultats experimentaux heuristiquement, et ne provient pas  de principes fondamentaux. Introduites en prepa, les lois de conduction sont phenomenologiques.  On peut donner un cadre plus general, la theorie de la reponse lineaire, pour unifier toutes ces lois  mais finalement, elle est tout aussi phenomenologique, bien qu’on utilise le second principe pour  montrer sa coherence. On peut demontrer toutes ces lois a partir de la physique statistique, mais  c’est tres pedestre.  **Question : Quel cadre permet d’unifier les relations qui font apparaitre des gradients?**  Reponse : C’est la theorie de la reponse lineaire. On peut relier les differents courants qu’on observe  (thermique, electrique, ...) par une matrice.  De maniere generale, pour un ensemble de variables primitives (extensives) Xi (U,N, V, Q, ...) et leurs variables conjuguees (par l’entropie) xi =  \_  ∂Xi  ∂S  \_  xj̸=i  on a les flux −→j i qui s’ecrivent  −→j i = Lij  −→∇  xj , avec Lij = Lij .  **Question : A propos des prerequis, tu as deja fait la diffusion thermique et la on fait la**  **diffusion de particules. Comment tu articules?**  Reponse : La diffusion de particules est au programme de PC. Avoir fait la diffusion thermique est un  plus pour mieux comprendre : les etudiants ont deja vu des equations de conservation et de diffusion,  mais ici on fait des considerations plus generales.  **Question : Tu utilises le nabla, qu’en dire par rapport au programme?**  Reponse : Les programmes recommandent d’utiliser les notations "grad", "rot" et "div" pour ne pas  confondre les operateurs. De plus, la notation peut faire croire qu’il suffit de faire des produits scalaires  ou vectoriels avec le nabla pour avoir les operateurs, ce qui n’est vrai qu’en cartesiennes. Je  trouve toutefois la notation nabla plus coherente a condition de bien montrer quelle operation est faite.  **Question : Explique la loi de Newton.**  Reponse : Lorsqu’il y a un gradient de vitesse dans un fluide visqueux, de la quantite de mouvement  est diffusee depuis les zones de vitesse rapide vers celles de vitesse lente. L’equation de diffusion  qu’on obtient est alors l’equation de Navier-Stokes lorsque le Reynolds est petit devant 1.  **Question : Si cet exemple traite la diffusion de quantite de mouvement, pourquoi l’argument**  **des derivees n’est pas** ρ−→u **?**  Reponse : Le fluide est suppose incompressible. L’equation de Navier-Stokes n’est valable (avec le  tenseur des contraintes qu’on connait) que pour des fluides incompressibles. Sinon, il y a des termes  plus compliques.  **Question : Peux-tu deriver l’equation de diffusion de la quantite de mouvement a partir**  **de Navier-Stokes?**  Reponse : Il faut se placer dans le regime ou le Reynolds est petit pour oter la derivee convective, et  negliger les effets gravitationnels et de pression (par exemple prendre un ecoulement orthogonal a  −→g ).  Je ne recommande pas d’utiliser l’equation de diffusion de la quantite de mouvement, elle decrit une  situation irrealiste ou le fluide n’est pas soumis a des forces de pression. Il y a bien une diffusion de  quantite de mouvement dans les fluides, mais il y a egalement des puits et des sources de quantite  de mouvement qu’on appelle dans le langage courant des forces.  **Question : Le coefficient de diffusion thermique de l’eau est comment par rapport au**  **cuivre?**  Reponse : Je m’attends a avoir une plus petite conductivite.  Et non! Le transport de chaleur par les electrons libres est beaucoup plus efficace que par les collisions  dans l’eau, bien que cette derniere soit moins dense.  **Question : Qu’est-ce qui fait la difference entre diffusion et convection d’un point de vue**  **phenomenologique? Quelle grandeur introduire pour comparer les deux?**  Reponse : Cela depend de la vitesse locale du fluide. Pour la diffusion, on a L2 ∼ Dτd. Pour la  convection, L ∼ τcu. On peut donc introduire un nombre : τd  τc  = Lu  D . C’est un nombre sans dimension  analogue au nombre de Reynolds ! Le nombre de Reynolds est juste le rapport entre diffusion et  convection de la quantite de mouvement.  **Question : On peut resoudre facilement une equation de diffusion?**  Reponse : Non, c’est tres delicat. Le plus souvent on utilise des resolutions numeriques (je comptais  le faire avec mon programme Python). Le profil typique est une gaussienne dont l’ecart-type augmente  avec le temps.  **Question : Que dire de la conductivite electrique d’ailleurs?**  Reponse : Il y a beaucoup plus d’ordres de grandeur differents que pour la conduction thermique.  C’est a cause de la theorie des bandes qui occasionne de gros changements de regime, contrairement  a la diffusion.  **Question : Comment fonctionne un thermocouple?**  Reponse : Il repose sur l’effet Seebeck et repose sur la theorie de la reponse lineaire. La densite de  courant electrique s’ecrit −→j = −σ  −→∇  V + α  −→∇  T. En circuit ouvert, la difference de tension est proportionnelle  a la difference de temperature. Il faut utiliser deux metaux differents pour avoir une tension  non nulle.  **Question : Mais le boitier du thermocouple donne egalement la temperature de chaque**  **couple dans l’absolu, pourquoi?**  Reponse : Les thermocouples donnent la difference de temperature entre la soudure au bout du fil,  et celle dans le boitier de mesure. Il y a dans le boitier une sonde de platine ou une thermistance  pour avoir la temperature dans l’absolu.  **Question : Tu as dit :**  −→∇  T = ΔT  L **. C’est une approximation?**  Reponse : C’est exact en regime stationnaire et en l’absence de pertes laterales sinon on a un profil  semblable a celui de l’ailette de refroidissement.  **Question : Du coup on sur ou sous-evalue** λ**?**  Reponse : Un raisonnement simple consiste a dire qu’on sur-evalue le flux thermique qui creee le  ΔT et donc qu’on sur evalue jq, bien que dans les fait, on aurait egalement tendance a sur-evaluer  ΔT.  **Question : Quelles sont les conditions aux limites de part et d’autre du barreau?**  Reponse : Du cote de la resistance chauffante, la continuite est celle du flux thermique (il s’etablit  une temperature unique en regime permanent, mais on ne la controle pas ; on controle le flux). Du  cote du refrigerant, la temperature est fixee et controlee.  **Question : Quel processus permet, du cote de l’eau, les transferts thermiques? Et qu’en**  **deduire?**  Reponse : C’est la conducto-convection, ce qui fixe plutot un flux. Puisqu’on fixe le flux en entree, on  doit aussi fixer le flux en sortie. Finalement, les temperatures et les flux sont tous continus en regime  permanent. Dans cette etude, les conditions aux limites choisies ne changent pas la resolution du  probleme.  **Question : Explique la methode de Monte-Carlo.**  Reponse : ... cf. Martincertitudes  **Question : Quelle est l’erreur dominante, pourquoi?**  Reponse : Il y a une erreur systematique a cause de l’isolation imparfaite du barreau, et aussi a  cause du thermocouple qui affiche une difference de temperature meme sans chauffer. Sinon, l’erreur  aleatoire dominante reste celle du thermocouple (0.5 K sur 12 K). Pour eliminer cette erreur  systematique, on pourrait tracer une droite en faisant varier la puissance imposee au barreau.  **Conversion de puissance électromécanique** |
| **Conversion electromecanique : se fait-elle dans un seul sens ?**  *Non c’est le principe de l’alternateur. Les barrages et les eoliennes sont des exemples de*  *conversions dans l’autre sens.*  **Peut-on utiliser le moteur asynchrone pour faire la conversion inverse ?**  *Oui.*  *Moteurs reversibles : si on fait tourner le rotor dans le champ du stator avec une vitesse plus*  *grande que ΩS : creation electricite. → mais tres peu utilise en pratique*  **Energie tend vers infini ? Pourquoi utiliser la puissance ? (plutot que l’energie)**  *On peut quantifier energie sur une duree, donc la puissance permet de s’affranchir de la*  *duree*  *Depend aussi de la charge auxquelles on veut fournir de l’energie.*  *Besoins peuvent etre specifiques en termes de puissance, point de fonctionnement en termes*  *de puissance.*  *Il ne suffit pas de laisser tourner longtemps un moteur pour soulever n’importe quelle charge*  *Exemple : Machines thermiques reversibles pas souhaitable alors que rendement en energie*  *maximal, car la puissance tend vers zero.*  **Pourquoi noter W l’energie ? Travail et energie pareil ?**  → lien avec le travail. Je deconseille cette notation. En thermodynamique, on separe clairement  une fonction d’etat, l’energie, et une grandeur liee a une transformation, le travail.  **W energie de quoi ? recue ou fournie ?**  *Il faut definir le systeme, convention energie recue par le systeme >0 et fournie par le*  *systeme <0*  **Pourquoi noter p ou P la puissance ?**  *Majuscule car ne depend pas du temps*  **Pourquoi la formule ≪ ne convient plus ≫ en sinusoidal ?**  *P=U\*I valide en instantanee mais on veut des valeurs moyennees*  **Que veut dire acronyme RMS parfois present au lieu de efficace ?**  *Root Mean Square*  **Sur le calcul de la valeur efficace :**∫*t*0  *t* 0+*T* cos(2*ωt*)  2  *dt* **, pourquoi la moyenne est-elle 0?**  *integre sur 2 periodes de ce cos donc toujours 0*  **D’ou vient la definition Pmeca=C\*Ω ?**  Mecanique du solide. Travail pour la rotation autour d’un axe fixe.  **Moteur asynchrone triphase : vitesse ≪ tres stable ≫ ?**  *En cas de perturbations sa vitesse va rester stable*    *Point de fonctionnement moteur stables dans graphe couple Ω*  *S’annule pour vitesse de synchronisme ΩS*  *Dans cas Ω<Ω (partie moteur), si Ω augmente un peu*  *dans la branche avant le pic (du a une perturbation, le couple*  *resistif est plus faible temporairement), la vitesse augmente,*  *donc le couple augmente, ce qui augmente encore la vitesse*  *de rotation, etc. => instable. Pour la branche apres le pic,*  *c’est le contraire, donc la branche est stable.*  *Donc la branche stable, on voit que la fonction*  *donnant le couple en fonction de la vitesse de rotation est*  *proche de verticale. Le moteur peut donc rester sur une grande plage de fonctionnement, et donc*  *de couple, tout en ayant une vitesse de rotation proche de constante.*  **Pourquoi facile a construire** :  *Pas besoin d’avoir un rotor qui genere sont propre moment magnetique, que cela soit un*  *aimant avec des terres rares, ou bien un circuit qui reste connecte electriquement, ce qui requiere*  *des contacts glissant.*  **Moteur triphase ?**  *dephasage de 2pi/3 entre chaque bobine*  *Ici Va=Vb=Vc : choix de construction → permet une realisation simple d’un*  *champ tournant*  **Schema des trois bobines** :  *courants et tensions, / ! \ aux conventions recepteur ou generateur*  **A quoi servent les ferromagnetiques dans les bobines ?**  *conduisent les lignes de champs*  **Loi de Lenz : courants induits dans le rotor, genere moment magnetique qui veut s’aligner avec**  **le champ, pourquoi ne s’aligne pas avec le champ ?**  *Qu’est-ce qui se rapproche ? en fait c’est le fonctionnement du moteur synchrone ?*  *Ce qui est important c’est la vitesse relative de rotation du rotor par rapport au champ tournant.*  *Au debut, la fem est tres importante et donc la vitesse du rotor augmente, mais plus elle se*  *rapproche de la vitesse de rotation du champ tournant plus l’ecart relatif est faible et la fem aussi*  **Comment sont fait les branchements ?**  *dans le moteur : 3 bobines (stator). Ici, systeme en etoile*  **Frequence du champ tournant la meme que 50Hz fournit ? a quelle Frequence tourne le**  **champ au milieu du moteur ?**  *meme frequence d’apres animation, peut mesurer avec sonde a effet Hall → pour le systeme*  *d’etude du champ tournant.*  *1500tr/min*  *25Hz dans le moteur a cause de la configuration geometrique des bobines,*  *differente de celle du systeme didactique pour l’etude du champ tournant.*  **Rendement donne : ou sont les pertes ?**  - *effet joules : pertes cuivre*  - *pertes fer*  - *frottements mecaniques (roulement a bille)*  **Induction électromagnétique** |
| **Question : Dans l’expérience introductive, la tension varie rapidement, peut-on observer un**  **signal ?**  Fonction single de l’oscilloscope en faisant attention a bien regler le trigger, le calibre de la base  de temps, et le decalage temporel.  **Question : Comment définir le vecteur surface à un élève de CPGE de première année ?**  Orthogonal au plan de la spire et de norme egal a la surface. Pour une spire qui n’est pas dans un  plan, on peut choisir n’importe quelle surface geometrique \Sigma reposant sur la spire, et  calculer la surface \vec{S} totale de la spire en integrant les elements de surfaces \vec{dS} de \  Sigma. On peut montrer que la surface \vec{S} de la spire ne depend pas de la surface  geometrique \Sigma choisie.  **Question : Comment calculer le champ créé par un solénoïde, comment le calculer avec le**  **programme de CPGE ?**  Theoreme d’ampere avec deux rayons differents → + invariances et symetries, etc.  **Question : Que vaut le champ sur l’axe dans la tranche au bout d’un solénoïde semi infini ?**  Le champ sur l’axe a l’extremite d’un solenoide demi-infini ne depend que du sens de  l’enroulement de courant, puisque le champ magnetique circule dans un seul sens dans le  solenoide. On peut alors decomposer un solenoide infini en deux solenoides semi-infinis, qui  generent exactement le meme champ sur l’axe a leur jonction. Par linearite, ce champ doit etre le  meme que celui a l’interieur d’un solenoide infini. On a donc B1=B0/2.  **Question : Quelle est la définition de la fem ? D’où vient-elle ?**  → je ne sais pas changer les equations, mais la definition de la fem se fait par la circulation du  champ electrique sur le circuit. Le fait que la fem soit egale a l’oppose de la variation de flux  magnetique est le resultat du theoreme de Faraday, mais n’a rien a voir avec la definition de la fem.  C’est comme definir le rotationnel de E en disant que c’est l’oppose de la derivee temporelle de B.  C’est une grosse erreur ! Il faut definir les grandeurs de facon intrinseque, avant de les egaler a  d’autres grandeurs.  **Question : On parle de deux types d’induction en CPGE, lesquels ?**  Induction de Neumann et de Lorentz, Neumann variation dans le temps et Lorentz dans un champ  independant du temps → c’est typiquement une reponse fausse car insuffisamment precise.  Neumann, c’est un circuit fixe dans un champ magnetique variable dans le temps, Lorentz c’est un  circuit mobile dans un champ magnetique stationnaire.  **Question : D’où vient la loi de Faraday ?**  Ce n’est pas une loi fondamentale, on peut la demontrer avec Neumann ou alors avec Lorentz  dans un circuit ferme → a partir des equations de Maxwell et de la force de Lorentz.  **Question : Dans la donnée du champ magnétique à l’intérieur du solénoïde, pourquoi on utilise**  **la même équation quand le champ varie et en magnétostatique ?**  Car approximation des regimes quasi stationnaires  **Question : Comment on -on pu prévoir que B2 s’oppose à B1 ?**  Par la loi de Lenz  **Question : Comment calculer la fem si la bobine se déforme sous l’effet du champ magnétique ?**  Il faut ecrire e= - d(Li)/dt, a partir du theoreme de Faraday. En effet, la forme e = - L di/dt suppose  que L est une constante dans le temps.  **Question : Si bobine en aluminium plutôt qu’en cuivre est-ce que L change ?**  Non, L ne depend que des caracteristiques geometriques du circuit, pour des milieux nonmagnetiques.  **Ondes progressives, ondes stationnaires** |
| **Retour sur l’introduction : photo de la houle, que cherche-t-on à montrer avec ?**  Système qui répond à une excitation avec des modes propres  **Définition de la surface d’onde ?**  Surface sur laquelle la phase de l’onde est identique en chaque point.  **Comment montrer à partir de l’expression s(x, t) = cos(wt – kx + phi) que les surfaces d’onde de s sont des plans ?**  Il faut à t fixé que kx -wt = cte => surface d’équation x=cte  **Quelle autre caractéristique de l’onde que décrit la houle (à part progressive et plane)**  C’est une onde qui a l’air harmonique aussi.  **Quelle différence entre un violon et une guitare ? Comment expliquer qu’il y a une différence entre le son d’une guitare et le son d’un violon alors que la fréquence (la note) est la même ?**  La différence de son s’appelle le timbre de l’instrument. Le timbre est l’amplitude relative des harmoniques. Celui-ci dépend de l’instrument, et de la façon d’exciter la corde qui a un impact direct sur les modes excités et donc sur le son produit (même si la fréquence fondamentale ne change pas).  **Comment faire rentrer les ondes stationnaires dans la définition des ondes donnée au début de la leçon ?**  Il vaut mieux ne pas parler de propagation lorsqu’on définit une onde.  **Peut-on généraliser l’équation de d’Alembert ? Trouve-t-on les mêmes solutions ou cela modifie-t-il le résultat ?**  Oui (on introduit le laplacien).  **Toutes les solutions de l’équation de d’Alembert sont-elles des ondes progressives ? Ou peuvent-elles toutes s’écrire comme la somme d’ondes progressives ?**  On peut toutes les écrire comme somme d’ondes progressives (mais les solutions peuvent être stationnaires)  **Réexpliquer le dispositif du trombone de Koenig. Ondes progressives ou stationnaires dans le trombone ? Pourquoi l’onde sonore ferait-elle des virages dans le tube du trombone ?**  Explication du trombone de Koenig : https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Notices/P72.2\_Trombone%2520de%2520K%25C3%25B6ening\_MATLABO.pdf&ved=2ahUKEwjR5rbNoNeIAxXJVaQEHcraJlQQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw0hIcWii\_4zg5y6GnmDBrIl  On peut voir les ondes dans le trombone soit comme des ondes progressives qui interfèrent à la sortie du tube, soit comme des ondes stationnaires qui ont un noeud là où on observe un minimum d’intensité sonore.  **Quelle est la longueur d’onde de l’onde qu’on envoie dans le tube ?**  Lambda ~ 20 cm. Il n’y a qu’un seul mode possible qui se propage dans le trombone.  **Quelle vitesse a-t-on calculé ? Vitesse de phase, de groupe ?**  Ici, vitesse de phase mais qui correspond aussi à la célérité car on s’intéresse à une onde harmonique.  **L’incertitude sur le calcul de la célérité du son dans l’air est-elle satisfaisante ? Est-il pertinent de présenter cette méthode à des élèves pour calculer la célérité du son dans l’air ?**  L’incertitude est satisfaisante pour la méthode utilisée. Au-delà du calcul de la célérité, cette méthode a l’intérêt de présenter un phénomène d’interférences aux élèves.  **Quelle relation entre lambda et la longueur de la corde (corde de Melde) ?**  L = p \* lambda/2  **Ondes acoustiques** |
| **Propagation guidée des ondes** |
| **Question : Quelles sont les conditions pour avoir une réflexion totale entre deux milieux diélectriques ?**  *Réponse : Il faut qu’on passe d’un milieu plus réfringent à moins réfringent.*  **Question : Dans le cas moins réfringent à plus réfringent que se passe-t-il ?**  *Réponse : On a toujours un rayon réfléchi et réfracté. Le rayon réfracté est plus proche de l’axe normal que le rayon incident. On a un angle maximal d’angle réfracté* 𝑖lim⁡ *quand l’angle d’incident est rasant tel que* sin(𝑖𝑙𝑖𝑚)=𝑛1𝑛2*.*  **Question : Dans le cas plus réfringent à moins réfringent que se passe-t-il pour des angles plus petits que icrit, plus grand que icrit et juste en dessous de icrit ?**  *Réponse : Pour des angles plus petits que icrit, on a rayon réfracté plus loin de l’axe normal et un rayon réfléchi. Pour des angles plus grands que icrit, on a uniquement un rayon réfléchi. Pour un angle juste en dessous de icrit, le rayon réfracté est rasant.*  **Question : Si on est au-delà de icrit que se passe-t-il dans le milieu moins réfringent**  *Réponse : On a une onde évanescente c’est-à-dire qu’on a une décroissance exponentielle de l’amplitude avec la distance au dioptre.*  **Question : Déterminer la décroissance de l’onde évanescente ? (avec des questions intermédiaires)**    *Réponse : On a :* 𝐸𝑖⃗⃗⃗ =𝐸0𝑢𝑦⃗⃗⃗⃗ 𝑒𝑗(𝜔𝑡−𝑘𝑖⃗⃗⃗ 𝑟 )*,*  *On connait* 𝑘𝑧⃗⃗⃗⃗ =𝑛1𝜔𝑐sin(𝑖)𝑢𝑧⃗⃗⃗⃗ ⁡ *et* 𝑘𝑥⃗⃗⃗⃗ =𝑛1𝜔𝑐cos(𝑖)𝑢𝑥⃗⃗⃗⃗  *Or dans le milieu 2, on aura encore 𝑘𝑧(2)⃗⃗⃗⃗⃗⃗⃗ =𝑘𝑧(1)⃗⃗⃗⃗⃗⃗⃗*  *Et aussi* (𝑘(2)⃗⃗⃗⃗⃗⃗⃗ )2=(𝑛2𝜔𝑐)2 *avec* 𝑘(2)⃗⃗⃗⃗⃗⃗⃗ =−𝑖𝜅𝑒𝑥⃗⃗⃗ +𝑘𝑧(2)𝑒𝑧⃗⃗⃗ *en écrivant* 𝐸⃗ (2)=𝐸⃗ (𝑧,𝑦,𝑡) 𝑒−𝑘𝑥  *D’où :* 𝜅2=𝑘𝑧(2)−(𝑛2𝜔)2𝑐2=𝜔2𝑐2(𝑛12sin2(𝑖)−𝑛22)=𝜔2𝑐2𝑛12(sin2(𝑖)−sin2(𝑖𝑐))  *On retrouve la décroissance exponentielle pour les 𝑖>𝑖𝑐.*  **Question : J’achète une fibre chez un commerçant, quelles sont les caractéristiques que je récupère ?**  *Réponse : On a la différence d’indice, l’indice intérieur -> On a donc l’ouverture numérique qui est la caractéristique principale d’une fibre otique*  **Question : Qu’est-ce qu’on a de particulier avec l’absorption ?**  *Réponse : On a le théorème de Kramers-Kroenig -> on a un lien fondamental mathématique entre l’absorption et la dispersion.*  **Question : Ecrire une relation entre n et une autre constante importante ?**  *Réponse : On a le tenseur* [𝜀𝑟] *pour les milieux linéaires telles que : avec* 𝐷⃗⃗ =𝜀0𝐸⃗ +𝑃⃗ *, on a* 𝐷⃗⃗ =𝜀0[𝜀𝑟]𝐸⃗ *. Si on suppose que le milieu est homogène* [𝜀𝑟] *ne dépend pas du point. Si on suppose isotrope, on a* [𝜀𝑟]=𝜀𝑟𝐼 *et on a alors :* 𝑛=√𝜀𝑟  **Question : Est-ce que vous pouvez donner un modèle simple pour avoir** 𝜺𝒓 **?**  *Réponse :* Il s’agit du modèle de l’électron élastiquement lié.  Le modèle de Thomson (ci-dessous ) donne la polarisabilité  en fonction de la géométrie de l’atome  *On considère un atome neutre avec un noyau chargé positivement, et un cortège électronique. En présence d’un champ électrique on a le cortège électronique de taille* 𝑅 *qui se déplace et un moment dipolaire* 𝑝 =𝛼𝜀0𝐸⃗ *. On déplace les deux centres d’une distance* 𝑑*.*  *On fait un équilibre des forces sur le noyau on a alors comme il ne subit que la charge de la boule de rayon d :* 𝐸𝑍𝑒=𝑍𝑒𝜌4𝜋3𝑑34𝜋𝜀0𝑑2=(𝑍𝑒)2𝑑3𝜀0143𝜋𝑅3⁡ 𝑍𝑒𝑑=𝐸4𝜋𝑅3𝜀0  *D’où* 𝛼=4𝜋*. C’est le modèle de Thomson.*  *La relation de Clausius Mossoti relie la polarisabilité à la constante dielectrique d’un milieu dont la densité d’éléments polarisables est N.* 𝑁𝛼3=𝜀𝑟−1𝜀𝑟+2  **Question : C’est quoi la forme des parties réelles et imaginaires de** 𝜺𝒓 **?**  *Réponse :*  *avec* 𝜀1 *la partie réelle et* 𝜀2 *la partie imaginaire.*  **Question : C’est quoi la conséquence pour une fibre optique ?**  *Réponse : On aura aussi de la dispersion intramodale due A la dispersion de la constante diélectrique*  De plus pour les modes guidés (voir diagramme (k), on a de la dispersion due aux conditions aux limites (indépendamment de la dispersion due au milieu matériel (cf modele de l’électron élastiquement lié qui donne la dispersion de 𝜺𝒓 **))**  **Question : On croise aussi l’ouverture numérique qu’est-ce ?**  *Réponse :* sin(𝜃𝑐)=√𝑛12−𝑛22  **Question : Dans le guide plan, est-ce qu’on a quelque chose de différent avec une autre polarisation ?**  *Réponse : on peut avoir aussi des ondes TM (la polarisation de B est suivant y)*  *Notons que pour les ondes guidée dans un guide plan plan conducteur, les champs E et B ne sont pas orthogonaux (pour le mode TE, B a une composante suivant x et suivant z alors que pour le mode TM c’est E qui a une composante suivant x et suivant z). Il ne s’agit plus de modes électromgnétiques transverses comme dans le vide.*  **Question : C’est quoi les vitesses de phase et de groupe ?**  *Réponse : Pour la vitesse de phase, on peut considérer une onde de la forme* 𝑠(𝑥,𝑡)=𝐴cos(𝜔𝑡−𝑘𝑥)*, les plans de phase constantes se déplacent à une vitesse* 𝑣𝜑=𝜔𝑘*.*  *Pour la vitesse de groupe, on considère un paquet d’onde de la forme :* 𝑠(𝑥,𝑡)=∫𝑑𝜔𝑠(𝜔)𝑒𝑗(𝜔𝑡−𝑘(𝜔)𝑥)∞0  *Avec une amplitude autour de* 𝜔0 *et d’épaisseur* Δ𝜔 *petit.*  *On a alors avec le dl autour de* 𝜔0 *une forme :* 𝑠(𝑥,𝑡)=𝑒𝑗(𝜔0𝑡−𝑘𝑥)𝐴(𝑡−𝑥𝑣𝑔)  *Avec* 𝑣𝑔=𝑑𝜔𝑑𝑘  **Question : C’est quoi une fibre à gradient d’indice ?**  *Réponse : On a une variation continue de* 𝑛 *qui est telle que l’indice décroit avec la distance au centre : cela permet que les rayons qui font plus de trajet spatial de le faire dans un moins grand indice et donc d’aller plus vite. On a une compensation qui permet une moins forte dispersion.*  **Question : Pour internet, c’est quoi comme fibre ?**  *Réponse : C’est des fibres monomodes.*  **Question : Comment on fait une fibre monomode ? C’est quoi le débit ?**  *Réponse :l e coeur de la fibre est suffisamment petit (de l’ordre de 10**m de diamètre si bien qu’un seul mode peut se propager) Le debit est . 10Gbit/s par couleur et par paeire de fibre. On peut faire circuler environ 100 longueurs d’onde différentes par paire de fibre soit au total 1Tbit/s*  **Microscopies optiques** |
| **Interférences à deux ondes en optique** |
| **Question : Pulsation spatiale, est-ce que ça a un autre nom ? Et c’est égal à quoi ?**  *Réponse : Vecteur d’onde et égal à 2pi/lambda*  **Question : C’est quoi l’approximation faite sur le schéma ? Quand est-ce qu’elle s’est exprimée ? Elle est valable jusqu’à quand ?**  *Réponse : On fait l’approximation qu’on a des ondes planes. Pour le calcul de la différence de marche. Tant que a<<D*  **Question : C’est quoi la longueur d’onde ?**  *Réponse : 592 nm*  **Question : Est-ce qu’il est possible de faire ce montage sans faire l’approximation de l’écran à l’infini ?**  *Réponse : si on place apres la bifente une lentille f et qu on met un ecran dans le plan focal de cette lentille, alors on a « ramené » l’infini dans le plan focal de cette lentille*    **Question : Pourquoi la lumière ne va pas tout droit en S2 ? Même chose en S1 ?**  *Réponse : À cause de la diffraction. Oui*  **Question : Comment est la source en S2 ?**  *Réponse : Source d’ondes sphériques*  **Question : Est-ce que c’est important que l’onde arrivant en S1 et S2 soit plane ?**  *Réponse : non*  **Question : C’est quoi un front d’onde ? Quelles est la phase de deux rayons à une distance infinitésimale de la source ? Dessiner les fronts d’ondes partant de la source ?**  *Réponse : Surface pour laquelle tous les rayons sont en phase.*  *Ils sont en phase s’ils sont à la même distance infinitésimale de la source.*  *Voir photo.*  **Question : Est-ce qu’il y a un déphasage entre S1 et S2 ? Où, sur le dessin, on retrouve la phase de S1 ? Que vaut ce déphasage ?**  *Réponse :* 𝛿𝛿=𝑎𝑎𝑎𝑎𝑆𝑆′𝑓𝑓′    **Question : C’est quoi le temps caractéristique pour la moyenne temporelle ? D’ailleurs la moyenne temporelle se fait sur quoi ?**  *Réponse :. Se fait sur le temps de mesure. Un oeil à un temps de reponse de 10-20 Hz, une photodiode peut alller jusqu’au ns (mais usuellement jusqu’à la ms, ou* μ*s*) On peut trover des détecteurs plus rapides que la ns.  **Question : C’est quoi la fréquence optique dans le vide ? C’est quoi le temps caractéristique pour l’oeil ?**  *Réponse : 10^-17 s* pour la fréquence optique. 0.041 s pour l’oeil, soit 24 Hz. On travaille généralement avec l’oeil ou des détecteurs de l’ordre du kHz.  **Question : Sur l’expérience, pourquoi avoir placé le filtre coloré là où il est ? Est-ce que ça change qqch de la placer après ?**  *Réponse : C’est là où il a le plus de place avant les fentes. Ça n’a aucune importance.*  **Question : C’est quoi l’incertitude sur la largeur de la fente ?**  *Réponse : 1μm*  **Interférométrie à division d'amplitude** |
| **Question : Quelle est la taille des anneaux ?**  *Réponse :*  *δ = 2\*e\*cos i*  *= 2e\*(1 – i2 / 2)*  *or i = tan i = r/f’ pour i petit*  *δ = 2e\*(1 – (r/f’)2 / 2)*  *… pas la suite du calcul*  On pose *δ= p**et on en déduit le rayon*  **Question : Définition du contraste ?**  Réponse :  *Contraste = (Imax – Imin) / (Imax + Imin)*  *→ expression en lame d’air pour une seule raie*  I=2 I0 (1 + cos (2π δ / λ)  *donc Imax = 2I0 et Imin = 0 donc Contraste = 1*  *→ expression pour un doublet ?*  *→ On considère les raies de longueur d’onde λ1 et λ2 qu’on suppose avoir même intensité*  *→ On pose (λ1 + λ2)/2 = λmoy et λ1 - λ2 =* Δλ  .. calcul classique  On trouve Contraste = abs(2 cos (π Δλ *δ / λmoy2))*  *On peut se servir de cette relation pour extraire* Δλ  En effet, à partir du contact optique, on a un contraste de 1. On chariote jusqu’au brouillage et on a alors le premier contraste de 0 pour lequel cos = 0 soit (π Δλ *δ / λmoy2* = /2). *δ* =2e. est la position du 1er brouillage à partir du contact optique. On en déduit donc la valeur de Δλ. On peut aussi considérer le chariotage nécessaire entre deux premiers brouillage ce qui leve l’incertitude sur le contact optique s’il n est pas bien déterminé, (en adaptant la relation précédente)  **Question : Pourquoi met-on une compensatrice ?**  *Réponse : Pour compenser la différence de chemin optique entre les deux rayons*  *→ Vraiment utile ?*  *En fait, on peut charioter pour compenser cette différence de marche, en lumière monochromatique. Mais si on a une source à spectre étendu, on ne peut plus compenser pour toutes les longueurs d’ondes juste en chariotant à cause de la dispersion d’indice dans le verre. La différence demarche sans la compensatrice ne sera pas la même pour toutes les longueurs d’onde .*  **Question : Travaille-t-on toujours en lumière monochromatique avec le Michelson ?**  *Réponse : Non, on peut aussi utiliser une source spectrale ou de la lumière blanche*  *→ En Hg, on a brouillage des franges si on est trop loin du contact optique ( car superposition des différentes longueurs d’ondes). Quand on a brouillage, la différence de marche entre les deux bras est au-delà de la longueur de cohérence lc de la source. On a lc=c tc où tc est le temps de coherence inversement proprtionnel à la largeur spectrale*   **Question : Comment sont les anneaux en lumière blanche ?**  *Réponse : Proche du contact optique, on a pas d’anneau car le rayon des anneaux est trop grand pour les voir (on voit la teinte plate, avec la couleur qui varie quand on chariote). Plus loin, on ne voit rien non plus car le contraste est nul.chaque longueur d’onde crée es anneaux d’interférences de taille différentes. On ne voit donc jamais d’anneau et seulement des couleur au et très près du contact optique*  **Question : En coin d’air, les franges sont-elles vraiment localisées sur les miroirs ?**  *Réponse : C’est subtil.*  *→ source ponctuelle : interférences non localisées (quelque soit le dispositif d’interférences)*  *→ sources étendues : localisées à proximité des miroirs*  *Remarque d’Agnès : Il est faux, même si c’est courant dans les livres, de justifier la localisation des franges en disant que les rayons s’y croisent.*  *Il faut considérer une source étendue (avec une multitudes de i (mais pas trop différents pour faitre un développemet limité en i+**i) pour un point M donné du miroir)*  *Il faut chercher le plan tel que d δ / di =0 (c’est là que les interférences sont situées car c’est dans ce plan que toutes les figures d’interférence des différents points sources coincident) cf DUNOD PC Edition 2016 par exemple*  **Diffraction de Fraunhofer** |
| **Diffraction par des structures périodiques** |
| **Absorption et émission de la lumière** |
| **Question : Tu as dit que Kirchhoff a utilise deux prismes, pourquoi?**  Reponse : Il utilise plutot un goniometre avec un prisme.  **Question : Dans quelles circonstances observe-t-on des raies d’absorption?**  Reponse : Lorsqu’un rayonnement continu traverse un milieu peu dense (un gaz typiquement), le  rayonnement est absorbe a des longueurs d’onde precises correspondant aux transitions atomiques.  Elles sont situees exactement aux memes positions que les raies d’emission. On les observe dans  l’atmosphere, depuis Newton.  **Question : La lampe utilisee s’appelle quartz-iode, que cela veut-il dire?**  Reponse : C’est un filament de tungstene dans un gaz d’iode. L’ampoule est faite en quartz fondu. Le  quartz a la propriete de transmettre les UV et les IR, il conduit bien la chaleur et ne fond pas. Autant  de proprietes que ne possede pas le verre.  **Question : Quand tu as presente** Eν**, dimensionne comme une emittance, quel coefficient**  **sans dimension peut-on faire apparaitre?**  Reponse : Il est interessant de faire apparaitre l’albedo.  **Question : D’ou viennent les lois de Kirchhoff? Comment fait-il pour mesurer** uν **ou** Iν **?**  Reponse : Elles sont principalement experimentales. Kirchhoff a decompose la lumiere pour tenter  d’observer le spectre le mieux resolu. Il a utilise un prisme, mais c’est bizarre car le prisme absorbe  et fausse les mesures !  **Question : Quelle est la contribution d’Einstein dans cette lecon, a part son approche**  **pour les lasers?**  Reponse : C’est lui qui a introduit la notion de photons qui justifie l’hypothese de Planck, dans un de  ses articles de 1905.  **Question : La loi de Rayleigh-Jeans est en fait posterieure a 1905 et donc a la loi de**  **Planck. Que faut-il dire pour corriger ton propos?**  Reponse : La loi de Planck n’est pas une simple interpolation, elle a vraiment predit la realite.  **Question : A quel moment precis la constante** h **apparait-elle dans les calculs?**  Reponse : La serie geometrique s’ecrit    On somme ainsi que des quanta d’energie espaces de hν. On retrouve d’ailleurs la fonction de partition  grand canonique.  **Question : Pourquoi la constante** h **s’appelle-t-elle ainsi?**  Reponse : Elle signifie hilfe, auxiliaire, en allemand. Je n’aurais pas du dire que Planck a suppose  les quanta de lumiere, c’etait une hypothese qu’Einstein a faite contrairement a Planck.  **Question : Planck a en fait reecrit l’histoire. Au debut, il ne croyait pas du tout aux quanta.**  **Il ne savait pas pourquoi il y avait cette serie. Il a ensuite reinterprete sa loi comme une interpolation**  **de celles de Wien et Rayleigh-Jeans, plusieurs annees apres 1905.**  **Question : Il manque un mot dans ton analyse.**  Reponse : On est a l’equilibre thermique. La loi de Kirchhoff n’est valable qu’a cette condition, raison pour laquelle kBT apparait dans les calculs. La loi de Planck resulte de l’equilibre du rayonnement.  Il faut aussi supposer un champ incoherent.  **Question : Tu y crois, a un temps de vie d’un niveau excite de trois secondes? De quoi**  **depend ce temps de vie?**  Reponse : Pour un laser, c’est plausible mais c’est plutot l’exception que la regle. Le temps de vie  depend de la frequence et de la taille de l’atome. Sinon, l’ordre de grandeur est la nanoseconde,  surtout pour les alcalins avec lesquels beaucoup d’experiences ont ete menees.  **Effet tunnel : application à la radioactivité alpha** |
| **Mécanismes de la conduction électrique dans les solides** |
| **Question : Quel est le semi-conducteur dans cette experience?**  Reponse : Du germanium.  **Question : Quel est le gap du germanium?**  Reponse : Autour de 0, 7V.  **Question : Comment peut-on savoir que c’est une decroissance exponentielle?**  Reponse : On peut faire un ajustement.  **Question : On obtient quel gap avec cette experience?**  Reponse : Autour de 0, 65V C’est une valeur plus precise que 0, 7V.  **Question : Comment peut-on visualiser l’exponentiel?**  Reponse : On peut tracer ln(R) en fonction de 1/T .  **Question : Developper le sens du terme intrinseque.**  Reponse : Pour changer les proprietes, on peut introduire des impuretes qui seront soit donneurs :  N ou accepteurs : P (libere de la place et cree des trous). Ces impuretes sont toujours presentes,  on considere qu’un semi-conducteur est intrinseque quand on peut negliger leur presence dans les  proprietes du semi-conducteur.  **Question : Vous avez dit que tous les semi-conducteurs ont des impuretes. Quel est**  **l’ordre de grandeur, pourquoi on peut negliger ici?**  Reponse : Pour les semi-conducteurs intrinseques : c’est de l’ordre de 1015m−3. Pour des produits  dopes, c’est plutot de l’ordre de 1021m−3 Pour savoir quel est le regime du semi-conducteur (intrinseque  ou extrinseque), il faut comparer la densite de porteurs intrinseques ni a la densite d’impuretes  nimp (cf question suivante). ni depend du gap et de la temperature donc pour un certaine de valeur  de nimp on atteindra toujours un regime intrinseque a suffisamment haute temperature. Quelques  ordres de grandeur a T ambiante : ni ≈ 1019m−3 pour le Germanium, ni ≈ 1016m−3 pour le Silicium  et ni ≈ 1012m−3 pour GaAs, Arsenure de Gallium. On voit donc que nimp ≈ 1015m−3 donne bien un  regime intrinseque pour le Germanium et pour le Silicium (limite) mais pas pour GaAs.  .  **Question : Comment comparer ces valeurs a la densite de porteurs de charge?**  Reponse : Pour un semi-conducteur dope, le nombre de porteurs de charges correspond a celui d’impuretes.  Pour un semi-conducteur intrinseque le nombre de porteurs de charges est grand devant le  nombre d’impuretes. Attention, un semi-conducteur dope avec une densite donnee d’impuretes sera  dans un regime extrinseque (le nombre de porteurs de charges correspond a celui des impuretes  nimp) a basse temperature (ni ≪ nimp) mais intrinseque (nombre d’electron et de trous egal a ni) a  haute temperature, ni ≫ nimp.  **Question : En pratique, il faut vraiment tres peu d’impuretes, comment on peut faire pour**  **avoir un comportement intrinseque?**  Reponse : En pratique, on fait de la compensation de dopage : on rajoute des P s’il y a des impuretes  N (et vice versa)  **Question : Si on prend un semi-conducteur dope, est-ce qu’on peut voir le comportement**  **intrinseque?**  Reponse : Oui mais pour des hautes temperatures. Oui, voir commentaire plus haut. En general, on  a pour la resistivite :    **Question : Dans les prerequis, que voulez-vous dire par l’introduction des phonons?**  **Question : Precisez la definition du temps** τ **.**  Reponse : C’est le temps caracteristique d’une probabilite poissonienne (donc exponentielle), c’est  donc le temps moyen entre deux chocs (pas le temps exact/maximal). Si la probabilite d’avoir un  choc pendant le temps dt est dt/τ alors la probabilite de ne pas avoir de choc au bout d’un temps t  est e−t/τ . Le temps moyen entre deux chocs est donc τ .  **Question : Est-ce que ce** τ **est le meme pour tous les electrons?**  Reponse : Il faut se placer dans un modele quantique. Et non, τ depend de l’energie et n’est donc  pas le meme pour tous les electrons .  **Question : Pour quels electrons faut-il connaitre la valeur de** τ **pour avoir une bonne**  **description du phenomene?**  Reponse : Pour un metal, seule la valeur a εF suffit, car ce sont les electrons proches de l’energie de  Fermi qui participent au transport. Pour un semi-conducteur il faut le connaitre a priori partout dans  la bande de conduction.  **Question : Quel est le lien entre la vitesse classique et** kF **?**  Reponse : Par la quantite de mouvement, on a : m−→v = ℏ  −→k .  **Question : Vous donnez deux raisons qui limitent le deplacement des electrons les phonons**  **et les impuretes, explicitez.**  Reponse : Quand on a les etats de Bloch, ils peuvent se deplacer "librement" sous forme d’ondes  planes, ces ondes sont diffusees par les ecarts a la periodicite du reseau. Ces ecarts proviennent  d’impuretes ou des fluctuations des positions des ions du reseau (phonons).  **Question : Comment on comprend la dependance avec la temperature de la resistivite?**  Reponse : Par la loi de Matthiessen, les resistivites s’additionnent entre la part des phonons qui est  une dependance lineaire avec la temperature et la part des impuretes qui est independante de la  temperature.  **Question : Expliquer en terme de chocs que c’est les resistivites qui s’additionnent?**  Reponse : C’est des chocs independants et en ecrivant de maniere infinitesimal, on voit que la probabilite  d’etre arretee est la somme de celle d’etre arretee par chacun des composants. La probabilite  d’un choc avec les phonons est dt/τph, la probabilite d’un choc avec les impuretes est dt/τimp, la  probabilite totale de choc est donc dt × (1/τimp + 1/τph). On ajoute les inverses des temps de choc  et donc les resistivites.  **Question : Pourquoi on utilise une mesure 4 points?**  Reponse : Cela permet de s’affranchir de la resistance des soudures car le voltmetre ne permet pas le passage du courant.    **Question : Vous avez fait une difference metal et conducteur, explicitez?**  Reponse : En physique du solide, on dit plutot metal.  **Question : Comment on peut savoir le type de porteur des charges?**  Reponse : On utilise l’effet Hall et le signe donne le type (electron ou trou).  **Question : Est-ce que pour un semi-conducteur, cela a un autre interet?**  Reponse : Cela permet de retrouver densite des porteurs de charge.  **Question : Vous avez traite** σ **isotrope, c’est vrai en general?**  Reponse : En general, on peut avoir un tenseur de conductivite, ex : graphite, avec un effet Hall, avec  des contraintes.  **Question : Est-ce qu’on peut doper des semi-conducteurs avec autre chose que des impuretes?**  Reponse : On peut le faire de maniere electrostatique : c’est les transistors a effet de champ.  **Approche macroscopique du ferromagnétique** |
| **Question : Quelle est l’intérêt d’un transformateur ?**  *Réponse : Cela sert à abaisser ou relever une tension selon le rapport du nombre de spire entre le primaire et le secondaire du transformateur.*  **Question : Quel type de ferromagnétique va-t-on utiliser pour faire une mémoire ?**  *Réponse : On va utiliser un ferromagnétique dur pour garder en mémoire l’aimantation, mais cela sera plus couteux en énergie pour en changer l’aimantation.*  **Question : Comment faire autrement qu’en utilisant un RLC-mètre ?**  *Réponse : Avec un circuit RLC série et en regardant le déplacement de la résonnance.*  **Question : Revenons sur votre théorème d’Ampère : quelle est l’équation de Maxwell à utiliser dans un milieu magnétique ?**  *Réponse : Il faut prendre celle avec* 𝐻⃗⃗ *:* 𝑟𝑜𝑡⃗⃗⃗⃗⃗⃗ (𝐻⃗⃗ )=𝑗 *, on pourra alors réécrire* 𝐻⃗⃗ =𝐵⃗ /μ  *qui dépend de* μ *qui dépend lui-même du milieu.*  **Question : Pourquoi le champ** 𝑩⃗⃗ **est toujours le même dans le tore ?**  *Réponse :* 𝐵⃗ *est guidé par le tore donc* 𝐵⃗ .𝑑𝑙⃗⃗⃗ =𝐵.𝑑𝑙  **Question : Ok et pourquoi la circulation est égale à** 𝑩𝒍**, en d’autres thermes est-ce que B dépend de la position ?**  *Réponse :* 𝐵⃗ *est constant car div(*𝐵⃗ *)=0 et la section ne varie pas*  *(On peut faire apparaître le flux qui est constant dans* ∮𝐻⃗⃗ .𝑑𝑙⃗⃗⃗ =∮𝐵⃗ 𝑆μ𝑆.𝑑𝑙⃗⃗⃗ *)*  **Question : Quel type de ferromagnétique utilise-t-on pour votre expérience ?**  *Réponse : Un ferromagnétique doux.*  **Question : Est-ce que ça fonctionnerait avec un ferromagnétique dur ?**  *Réponse : Non, car pour un ferromagnétique dur,* μ *ne dépend pas de* 𝐻⃗⃗ *, son cycle d’hystérésis est plat sur une grande zone. Donc il va mal canaliser le champ.*  **Question : Comment avez-vous défini** 𝛍 **?**  *Réponse :* μ *est défini par* 𝐵⃗ =μ𝐻⃗⃗ *mais* μ *dépend de H, ça n’est pas dB/dH qui est une autre quantité importante.*  **Question : Pourquoi l’aire du cycle d’hystérésis est importante ?**  *Réponse : Cette aire est proportionnelle aux pertes par hystérésis. (Elles sont plus fortes pour les ferromagnétiques durs)*  **Question : Est-ce que vous avez une idée de l’aimantation à saturation, est-ce que ça dépend du matériau ?**  *Réponse : ça ne varie pas beaucoup d’un matériau à l’autre (contrairement au champs coercitif ou rémanent)*  *En effet celle-ci dépend de l’orientation des spins dans le matériau et comme la densité est à peu près la même d’un matériau à l’autre (*𝑛~1029𝑚−3*) et on peut relier le moment magnétique de spin au magnéton de Bohr* μ𝐵=𝑒ℏ2𝑚𝑒=10−23𝐴.𝑚2*. Donc après calcul, on trouve bien* 𝑀~𝑛 μ𝐵~106𝐴.𝑚−1 *soit* μ0𝑀~*1T qui est bien le bon ordre de grandeur de l’aimantation à saturation.*  **Question : Pourquoi est-ce qu’un matériau ferromagnétique peut ne pas être aimanté a priori (en l’absence d’excitation magnétique) ?**  *Réponse : A l’intérieur du matériau, il va y avoir des domaines de Weiss d’aimantation aléatoire. Il y a donc une compétition entre l’énergie nécessaire à créer un champ magnétique extérieur (les domaines ont tendance à s’aligner pour fermer les lignes de champ de sorte qu’elles ne sortent pas) et l’énergie nécessaire à désaligner des spins (création d’une paroi de domaine).*  **Question : Que se passe-t-il lorsque l’on soumet le matériau à un champ magnétique ?**  *Réponse : Les domaines d’aimantation qui sont le plus alignés avec le champ vont croître, la paroi se déplace jusqu’à heurter un défaut du matériau, puis elle se détache brusquement à un moment, ce qui génère un flux à l’origine de l’hystérésis. Enfin l’aimantation dans le matériau tourne pour s’aligner avec la direction du champ magnétique (car la direction de l’aimantation dans un domaine n’est pas à priori colinéaire avec le champ).*  **Question : Comment peut-on visualiser ces domaines ?**  *Réponse : Avec des poussières selon la méthode de Bitter. Ou bien avec la déviation de la polarisation de la lumière, ou encore avec de la microscopie à force magnétique (microscopie à force atomique mais avec une pointe magnétique).*  **Question : Comment appelle-t-on les matériaux comme le fer, le cobalt et le nickel ?**  *Réponse : Ce sont des métaux de transition.*  **Question : Connaissez-vous d’autres matériaux plus récents utilisés pour leurs propriétés ferromagnétiques ?**  *Réponse : On peut utiliser des terres rares (période des lanthanides) par exemple le néodyme. Qui sont bien plus utilisés aujourd’hui dans les aimants permanents, pour les moteurs, les éoliennes etc…*  **Question : De quel type de corps sont les ferromagnétiques ?**  *Réponse : Ce sont des cristaux ou des matériaux polycristallins, car le recouvrement entre orbitales dépend de la distance entre les atomes qui n’est précisément définie que dans des cristaux. (Le recouvrement moyen serait nul dans un fluide).*  **Question : Quel phénomène est à l’origine du ferromagnétisme, et l’alignement des spins ?**  *Réponse : Ça n’est pas comme on pourrait le penser une interaction entre deux dipôles magnétiques. En réalité, c’est la force de Coulomb combinée au principe d’exclusion de Pauli (caractère fermionique des électrons) qui fait aligner ces spins.*  **Rétroaction et oscillations** |
| **Quel rapport entre le pont de Wien et les lasers?**  Il y a une cavité qui sélectionne une longueur d'onde et qui amplifie ensuite.  **Comment est concrètement cette cavité?**  Un milieu semi-réfléchissant ne laisse passer que la fréquence désirée. Il y a, comme pour la corde de Melde, des conditions aux limites qui imposent les fréquences. Pour l'amplification, on fait un pompage (on injecte de l'énergie qui maintient le niveau d'énergie constant à l'intérieur).  **Justifie l'amplitude des oscillations du pont de Wien.**  Cela correspond grosso modo à l'amplitude de l'alimentation continue, 24 V (en réalité il y a une petite différence). On ne peut pas respecter Barkhausen exactement donc on se place légèrement au-dessus. L'amplitude du sinus devrait alors être «infinie». On est alors limité par la tension maximale délivrable par l'A.O., qui est celle de l'alimentation continue.  **Alors on est dans le cas où l'A.O. n'est plus en régime linéaire! C'est grave?**  Il sature par moments, mais comme on oscille on a une plage de valeurs où on est en régime linéaire. On oscille entre deux états non-linéaires qui sont instables (ouf).  **Pourquoi des résistances aussi élevées?**  J'ai voulu rendre les autres résistances négligeables devant celles-là, même si en pratique ça ne change pas grand chose.  **Tu as lu lafréquence sur *meas*avec l'oscilloscope. Comment mesurer autrement et faire mieux?**  Il faut jouer sur la base de temps. On peut par exemple faire une transformée de Fourier avec l'oscilloscope. Ça va permettre de s'affranchir des fréquences parasites (on est *quasi-sinusoïdal*) et même d'avoir l'incertitude sur la fréquence avec la largeur du pic.  **Pourquoi on a d'autres fréquences? Lesquelles?**  Le filtre de Wien a une certaine bande passante, d'où une certaine largeur en fréquence. Il y a aussi des harmoniques à cause de la saturation, inévitable.  **Sur quelle source tu trigges, là? Le signal a l'air d'onduler un peu... (on y revient à la fin)**  Sur le signal lui-même, pas sur EDF. (Donc le 50 Hz n'explique pas l'ondulation)  **Le réchauffement climatique est unbon exemple. Tu as parlé de boucles positives et négatives, peux-tu élaborer?**  Les activités humaines modifient la température moyenne de la Terre, qui rétroagit sur le système Terre. On peut avoir deux types de rétroaction. Positive lorsqu'une augmentation induit une autre augmentation, négative lorsqu'une augmentation a tendance à faire diminuer.  En fait, c'est un peu pareil que les entrées de l'A.O.! Si on a un processus qui est «branché sur l'entrée inverseuse», la boucle de rétroaction est négative, on ne diverge pas (c'est le régime  linéaire). Mais s'il est branché sur «l'entrée non inverseuse», elle est positive et on va diverger (en pratique, on sature).  [Cette vision des choses énerverait les climaticiens parce que super simple, mais c'est l'idée]  **Que représentent les flèches sur un schéma-bloc?**  Elles permettent de donner une convention sur le sens d'écriture des fonctions de transfert. Elles ne signifient pas le sens des échanges d'énergie.  **La précision est l'écart entre la consigne et la sortie. Que faire si ce sont des grandeurs physiques différentes?**  On compare à la valeur attendue si la consigne est respectée. Il y a un facteur de conversion.  **La définition de la stabilité est problématique. Tous les signaux physiques sont bornés...**  On ne peut en effet pas avoir une énergie infinie. Quand on est instable, on arrive au bout d'un moment à une valeur qui dépasse les modèles qu'on a. Des non-linéarités apparaissent et il faut changer de modèle.  **Explique le programme Python que tu as fait.**  J'ai pris une fonction qui correspond à un système d'ordre 2, et j'ai modifié ses paramètres: par exemple l'étude de la stabilité correspond à changer *Q*, … C'est un programme purement pédagogique.  **Tu as dit qu'un système bouclé n'est pas linéaire. Serais-tu prêt à l'affirmer de nouveau?**  J'ai dit des bêtises à l'époque, c'est juste que quand on boucle le système ça se complique... Il est bouclé mais toujours linéaire.  **C'est qui *r\**?**  Ce sont les racines de l'entrée. Mais on se moque de leur valeur, on s'intéresse uniquement aux pôles de la fonction de transfert.  **Pour un bon oscillateur quasi-sinusoïdal, comment doit être le gain de la fonction de transfert du filtre?**  Ici *Q*=1/3, c'est un peu nul en vrai: Δω = ω0/*Q*= 3 ω0. On fait donc passer aussi de très basses fréquences, entre 0 et 3/2 ω0. Il faudrait un gros *Q.*  **Et concrètement?**  On peut mettre un quartz.  **Y a-t-il d'autres critères que celui de Barkhausen?**  Le critère du revers.  **Que faire en non-linéaire comme oscillateurs?**  Les oscillateurs à relaxation.  **Sur l'oscilloscope on voit des ondulations à basse fréquence...**  Il faut tracer le diagramme de Bode de βAet pas seulement de β! Les fréquences amplifiées vérifient GdB> 0. On observe alors des battements à cause des fréquences voisines qui passent.  **Traitement d'un signal. Étude spectrale** |
| **QuesBon : Pourquoi on a besoin de numériser ? C’est quoi analyseur de spectre ? Pourquoi on a besoin d’avoir des valeurs discrètes ?** *Réponse :* Pour stocker les signaux analogiques (en 0 et 1) et on peut faire tous les traitements qu’on veut par les calculs. Comme pour analyser les fréquences dans un spectre donné ..  **QuesBon : C’est quoi un bruit ? Un bruit aléatoire ? Comment caractériser un bruit ? Le CMB était un bruit alors que c’est un signal qui nous intéresse ..** *Réponse :* C’est pas le signal qui nous intéresse. Si c’est un bruit aléatoire on peut la caractériser par un spectre de bruit. Il peut être un bruit blanc .. etc. Connaissant son type on peut appliquer le filtre convenable. Le bruit peut être beaucoup plus important que le signal.  **QuesBon : C’est quoi le CMB ? Décris la photo du slide (carte du CMB) et explique les couleurs** *Réponse :* On trouve que l’univers à l’époque est hétérogène  **QuesBon : Pourquoi se restreindre dans le cadre sinusoïdal ? Pourquoi on choisit un cosinus dans la représentaBon du signal ?** *Réponse :* pour respecter le programme de PSI. Car la somme des signaux en cos représentent un signal périodique .. et la TF d’une somme est la somme des TF donc c’est le côté linéaire de la TF  **QuesBon : Qu’est-ce que ça veut discret (pour un signal numérique) ?** *Réponse : nombre fini de points représentant le signal*  **QuesBon : la TF discrète, qu’est-ce qu’elle a de discret ?** *Réponse :* On ob&ent 1 raie pour un 1 signal. Dans la formule, le temps est discret et donc nous pouvons le remplacer par dans la somme.  **QuesBon : C’est quoi la FFT ? Le résultat de la FFT est un résultat conBnu ou discret ?** *Réponse : algorithme de calcul rapide de la TFD, donnant un nombre fini de nombres représentant l’amplitude du spectre du signal*  **QuesBon : Pourquoi le pic de la TF est large ? Comment on peut raffiner la raie ?** *Réponse :* car le signal qu’on récupère est fini et pas infini. Donc c’est le signal d’entrée mul&plié par une porte. C’est le fenêtrage du signal. Le TF s’applique au signal mais aussi à ceke porte qui donne un . Pour rétrécir la raie il faut augmenter la largeur de la porte mais les pieds du vont augmenter.  **QuesBon : Comment respecter Nyquist-Shannon sur un signal périodique (Somme de signaux) ?** *Réponse :* il faut que soit de tous les signaux formant le signal périodique qu’on étudie. c’est des mul&ples du fondamentale donc on choisit pas les n’importe comment.  **QuesBon : Critère de Shannon est empirique ? C’est quoi les hypothèses ?** *Réponse : c’est un vrai théorème mathéma4que, très peu d’hypothèses mathéma4ques*  **QuesBon : Filtrage pour filtre anB-repliement mais là on ne l’a pas vu .. comment là on est sûr qu’il n’y a pas de repliement spectre ?** *Réponse :* Par l’oscilloscope, on peut montrer TF à la sor&e on verra une bonne raie à 5 KHz et d’autres qui sont fantômes. Si l’on applique à on voit notre signal à 5 KHz.  **QuesBon : Comment changer la sur oscilloscope ?** *Réponse :* On modifie l’échelle temporelle. Si on choisit donc on voit bien qu’il n’y a pas de raies fantômes car les 2 signaux respectent le critère de Nyquist-Shannon. Si on baisse , le pic fantôme apparait et on peut l’assimiler au signal 125 KHz en regardant l’amplitude du pic (i think)  **QuesBon : Pourquoi t’as choisi de meHre le câble au milieu de la R à décade et pas au bout ?** *Réponse :* Pour ne pas ajouter une R des câbles intérieurs de la boîte. Cela peut avoir qq ce qui est gênant car là R choisie est .  **QuesBon : Pourquoi le filtre n’est pas parfait ?** *Réponse :* pas le bon terme. Il est juste pas adapté. On pourrait u&liser un filtre d’ordre 2 pour avoir une pente de -40dB/décade. On pourra baisser la fréquence de coupure (i think)  **QuesBon : L’ajustement du diagramme de Bode est ajusté sur des barres d’erreur ?** *Réponse :* Non car interface.exe ne donne pas des incer&tudes  **QuesBon : A quoi sert l’asymptote dans le diagramme de Bode ? Le lien avec** *Réponse :* Permet de calculer le Gain à -3dB sauf que là je ne l’ai pas iden&fié sur la courbe. Car l’asymptote ici n’est pas bonne donc le croisement des 2 courbes n’est pas bon.  **Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique**  — **Quelle etait la premiere definition de resonance que tu as donnee? Et la definition energetique?**  Maximum d’amplitude a une certaine pulsation pour un systeme excite. Quand la puissance fournie par la  source est maximale.  — **En moyenne elles sont pas toujours egales les puissance fournie et dissipee? Quelle est la moyenne de**  **toute cette equation?**    — **Justification de l’equation de l’electron elastiquement lie. En particulier, pourquoi l’emission de rayonnement**  **est** −*m*  *τ* ⃗*v* **?**  On se place toujours autour d’une position d’equilibre et on regarde les oscillations dans le puits, on a toujours  un rappel elastique au premier ordre en −*mω*20  (*r* −*r*0) et on ajoute une dissipation −*λ*⃗*v*  — **Quelle serait l’equation d’une particule qui evoluerait dans le potentiel** E*p* **?**    — **Qu’est-ce qu’on sait de l’emission de rayonnement electromagnetique par une charge?**  Il faut que la charge soit acceleree.  — **Il faudrait donc que la force** *f* **liee au rayonnement depende de l’acceleration** *a***. Est-ce qu’on peut trouver**  **la puissance rayonnee** *P* **a partir de l’acceleration, la vitesse de la lumiere, la charge de la particule** *q*2 =  *e*2/*ϵ*0 **?**  Theoreme Pi.  [*P*] = *E T* −1 [*c*] = *L T* −1 ; [*q*2] = *EL* ; [*a*] = *L*/*T* −2  [*P*] = *cα aβ* (*q*2)*γ*  Patati patata on obtient  *P* ∝  *q*2 ×*a*2  *c*3  La force moyenne associee au rayonnement s’obtient par  *P* = − < *f* ˙ *x* >∝−*a*2 = − < ¨ *x*2 >=< ˙ *x*  ...  *x* >  On en deduit que la force resultant du rayonnement est proportionnelle a  ...  *x* . Comme on a en premiere approximation  ¨ *x* = −*ω*20  *x*, la force liee au rayonnement est proportionnelle a −˙ *x*.  — **Pourquoi les notations ont-elles change quand on a fait le lien avec le regime libre?**  L’oscillation n’est pas vraiment a *ω*0 si l’oscillateur est amorti.    C’est lameme notation en fait : *τ*relax = *τ* |
| **Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités** |

**Question : Pourquoi on peut négliger les frottements sur un temps court ? Est-ce qu’on peut le comprendre avec l’équation ?**

***Réponse : sur un temps court par rapport au temps d’amortissement mais long par rapport à la période du pendule, l’amplitude des oscillations ne change presque pas.***

**Question : Quelles sont les non-linéarités dans le cas du système masse-ressort ? Et dans le circuit RLC ? Pourquoi on va avoir un terme non-linéaire pour l’inductance ? Et pour le condensateur ?**

***Réponse : On va avoir w02 qui va dépendre de x (sortie du ressort du régime linéaire). Pour la bobine, on peut avoir une saturation d’un milieu magnétique (coeur ferromagnétique) et pour la capacité, c’est une saturation du diélectrique entre les armatures.***

**Question : Pourquoi il n’y a pas de correction en theta0 pour la formule de Borda ?**

***Réponse : On peut s’y atteindre à cause de la symétrie par rapport à Oz du pendule.***

**Question : Est-ce que le fait que la fréquence dépendant de l’amplitude est le seul phénomène caractérisant la non-linéarité ?**

***Réponse : On retrouve un spectre contenant plusieurs fréquences pour un oscillateur non-linéaire i.e. le fondamental et ses harmoniques. La création d’harmoniques est un phénomène non-linéaire important qu’il faut discuter. Mentionner aussi des applications possibles en optique non-linéaire par exemple.***

***Phénomènes de bifurcation, de saturation et de transition vers le chaos***

**Question : C’est quoi la définition du plan de phase ?**

***Réponse : Il faut écrire le système sous la forme de n équations du premier ordre. Les fonctions du temps impliquées (x\_1(t), x\_2(t), …, x\_n(t)) définissent l’espace des phases.***

**Question : Est-ce que tu peux écrire le pendule sous la forme d’équations du premier ordre ?**

***Réponse : On pose dtheta/dt = phi et on obtient d phi/dt = -omega\_0^2 sin theta. Dans ce cas, l’espace des phases, c’est theta et phi = dtheta/dt***

**Question : Si on se place dans le cas le plus général (espace des phases : x et y), comment est la tangente en un point initial choisi ?**

***Réponse : Les équations sont dx/dt = f(x, y), dy/dy = g(x, y). On a pour la tangente à la trajectoire dy/dx = g (x, y)/f(x, y). Les équations du mouvement permettent donc de tracer la tangente à la trajectoire dans l’espace des phases en tout point.***

**Question : Faisons cela pour le pendule. On voyait des tangentes orthogonales pour les points sur les axes. Est-ce que tu peux l’expliquer pour l’axe de phi ? Et pour l’axe theta ? Est-ce que c’est toujours vertical ?**

***Réponse : on a dphi/dtheta = -w02 \* sin theta / phi. Or theta = 0 et phi non nul sur l’axe phi, donc pente bien horizontale.***

***Sur l’axe theta (phi = 0), on trouve une pente infinie donc verticale tant que theta est différent de n pi. On trouve une pente finie pour theta = n pi.***

**Question : Pour theta proche de pi, comment sont les trajectoires ? Est-ce que tu peux le montrer ?**

***Réponse : Ce sont des branches d’hyperboles. Faire un DL autour de pi – epsilon et écrire l’équation différentielle en multipliant par depsilon/dt.***

**Question : Est-ce qu’on peut donner d’autres exemples de système non-linéaires ?**

*Réponse : L’horloge (oscillateur forcé non linéaire), le tympan (membrane qui vibre, système non linéaire), la dilatation des matériaux (vibration des atomes dans un puits de potentiel non-linéaire pour de grandes amplitudes).*

**Question : Des choses à dire sur le comportement chaotique d’un oscillateur ? C’est quoi le chaos pour les oscillateurs ?**

*Réponse : On peut l’avoir avec des systèmes à plus qu’un degré de liberté (pendule double). Le portrait de phase sera alors à plusieurs dimensions et extrêmement sensible aux conditions initiales. Ex : la météo*

**Question : Qu’est-ce qui est qualitativement important dans les oscillateurs non-linéaires dans le comportement ?**

*Réponse : Réponse fréquentielle d’un système non-linéaire : on excite un système à une fréquence donnée, d’autres fréquences sont excitées dans le spectre. Qualitativement, la fréquence d’excitation est différente des fréquences de réponse.*

**Question : Qu’est-ce qui n’a pas marché dans l’expérience ?**

*Réponse : Il manquait le programme pour tracer un portrait de phase expérimental sur l’ordinateur. Un peu déçu de la valeur de 14.59 mais cela peut venir de l’ajustement qui va jusqu’à 70°. En refaisant l’ajustement jusqu’à 50°, on trouve 14.9. C’est mieux mais pas parfait encore*

**Question : Vous êtes allé un peu vite sur le changement de variable, d’où ça vient ? Est-ce que vous pouvez développer un peu ?**

*Réponse : Voir compte-rendu P4*

**Question : Pourquoi le changement de variable fait intervenir deux variables alors qu’il n’y en avait qu’une variable avant ?**

*Réponse : Adimensionnement de l’intégrale et theta\_0. X est relié à theta\_0*