

Transformée de Fourier, spectrogrammes optiques et la caractérisation de l'impulsion la plus complexe jamais créée

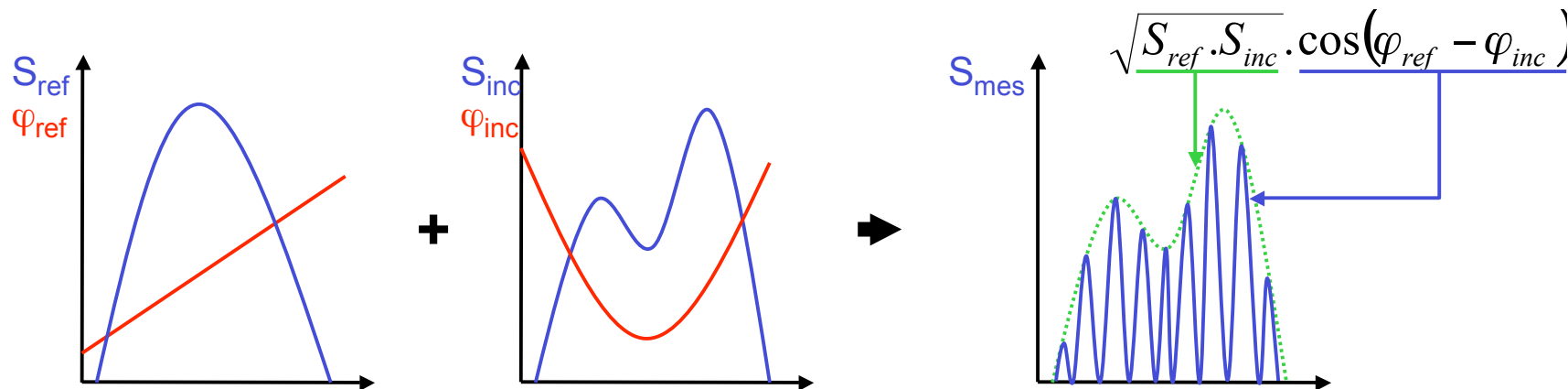
P.-A. Lacourt, J.M. Dudley

Caractérisation et TF

- Objectif: déterminer les caractéristiques temporelles d'une impulsion brève, notamment:
 - Son enveloppe temporelle $A(t)$
 - Sa phase temporelle $\varphi(t)$ (et donc sa fréquence instantanée)
 - Conjointement, on peut s'intéresser à:
 - La répartition spectrale d'énergie $S(\omega)$
 - La phase spectrale $\varphi_s(\omega)$
 - Problème:
 - $A(t)$: inaccessible directement (**réponse impulsionnelle** des détecteurs)
 - $\varphi(t)$: mesure directe impossible (interférométrie) + **réponse impulsionnelle**
 - $S(\omega)$: **mesure courante** (analyse spectrale)
 - $\varphi_s(\omega)$: mesure indirecte (interférométrie spectrale), délicate mais **possible**
- Relation de Fourier: la connaissance complète du spectre donne accès à la connaissance du champ dans le domaine temporel

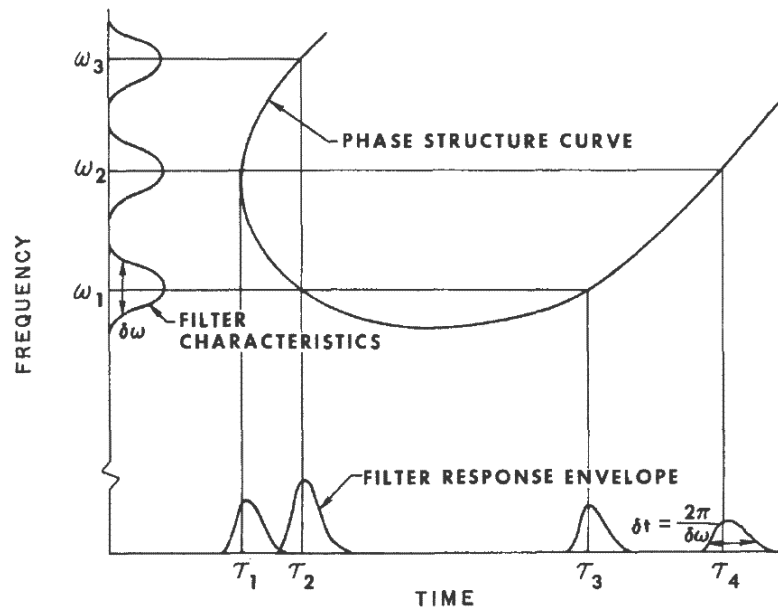
Interférométrie spectrale

- La mesure du spectre de puissance est courante
- La mesure de la phase spectrale $\varphi_s(\omega)$ est réalisée par analyse de franges d'interférences:
 - On obtient ainsi la différence de phase entre un champ de référence $S_{ref}(\omega)$ et le champ inconnu, que l'on cherche à caractériser
 - On remonte alors au champ $A(t)$ par une transformée de Fourier complexe, ainsi qu'à sa phase $\varphi(t)$
- Limitation: nécessite un champ de référence connu



Spectrogrammes

- Lorsque une source de référence n'est pas disponible (cas le plus fréquent!), il est nécessaire d'employer une méthode différente
- Notion de spectrogramme: on réalise un produit de corrélation entre le champ testé E et une fonction porte g , puis on prend la TF de ce produit
 - D'où le nom de corrélation résolue en fréquence souvent associé à cette technique

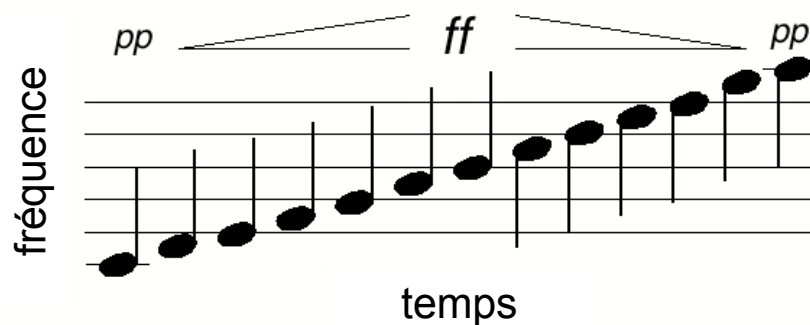
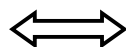
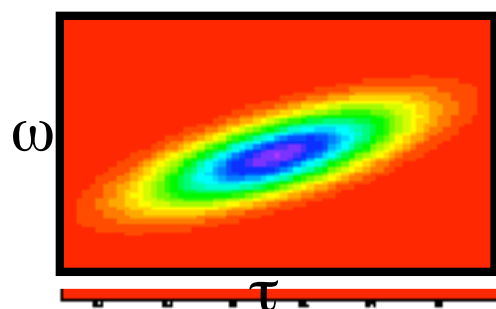


$$\Sigma(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{E(t).g(t-\tau)}_{\text{Corrélation}} \underbrace{e^{i\omega t}}_{\text{TF}} dt \right|^2$$

⇒ *E. B. Treacy:*
J. Appl. Phys. **42**,
 3848 (1971)

Spectrogramme et partition musicale

- Le spectrogramme se présente sous la forme d'une fonction de deux variables: le retard τ entre E et g et la pulsation ω
- Il permet d'analyser le contenu spectral du champ au cours du temps, un peu comme la partition musicale permet de connaître la hauteur (fréquence) des notes jouées à un instant donné
- Il contient des informations intuitives sur la nature de l'impulsion: sa durée, la présence d'une dérive de fréquence instantanée, sa complexité...
- Un traitement algorithmique permet de remonter aux paramètres de E et g

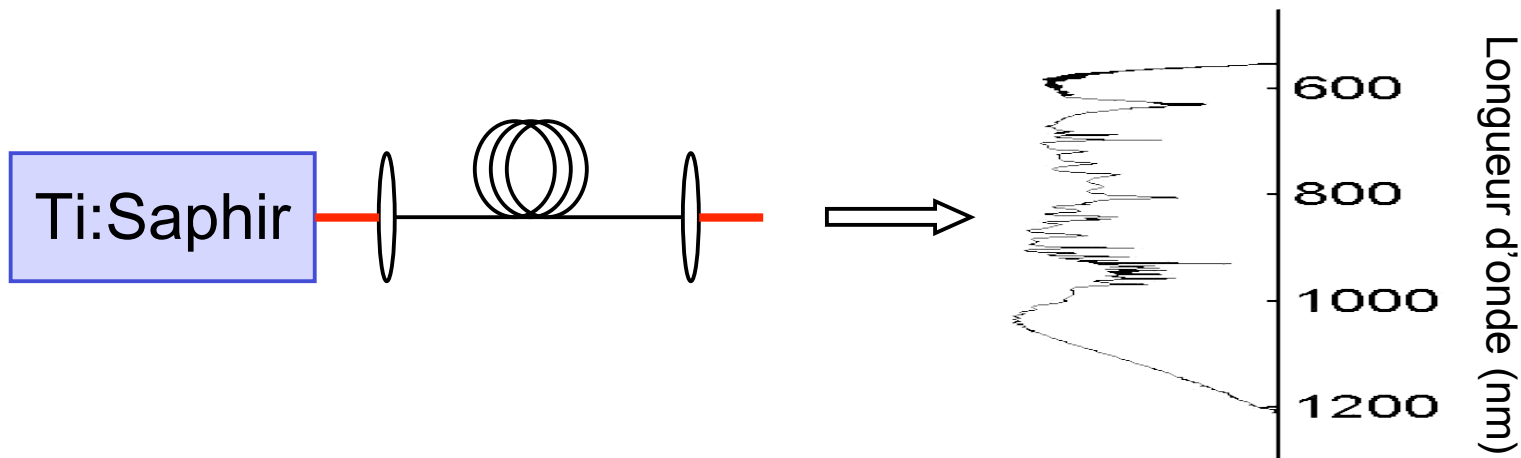


Mesure de spectrogrammes optiques

- La mesure requiert deux étapes: corrélation et résolution spectrale
 - La résolution spectrale est obtenue simplement à l'aide d'un spectromètre, analyseur de spectre, etc.
 - La corrélation nécessite un processus non-linéaire, donc une puissance importante
- On procède en général à une autocorrélation: $g(t) = E(t)$
 - Le plus souvent par génération de second harmonique dans un cristal massif
- Problème de sensibilité: les puissances crêtes requises sont de l'ordre du watt en régime picoseconde, et encore bien supérieures en régime femtoseconde
 - Les sources fs sont généralement très intenses, mais les sources ps restent problématiques à caractériser de cette façon
- Mise au point d'une technique de forte sensibilité, exploitant un effet non-linéaire différent: le mélange quatre ondes
 - Non-linéarité d'ordre trois, permettant l'emploi de fibres optiques
 - Coefficient non-linéaire faible, mais plus que compensé par le fort confinement et la grande longueur d'interaction disponible
 - Caractérisation d'impulsions ps, puissance crête de l'ordre du mW

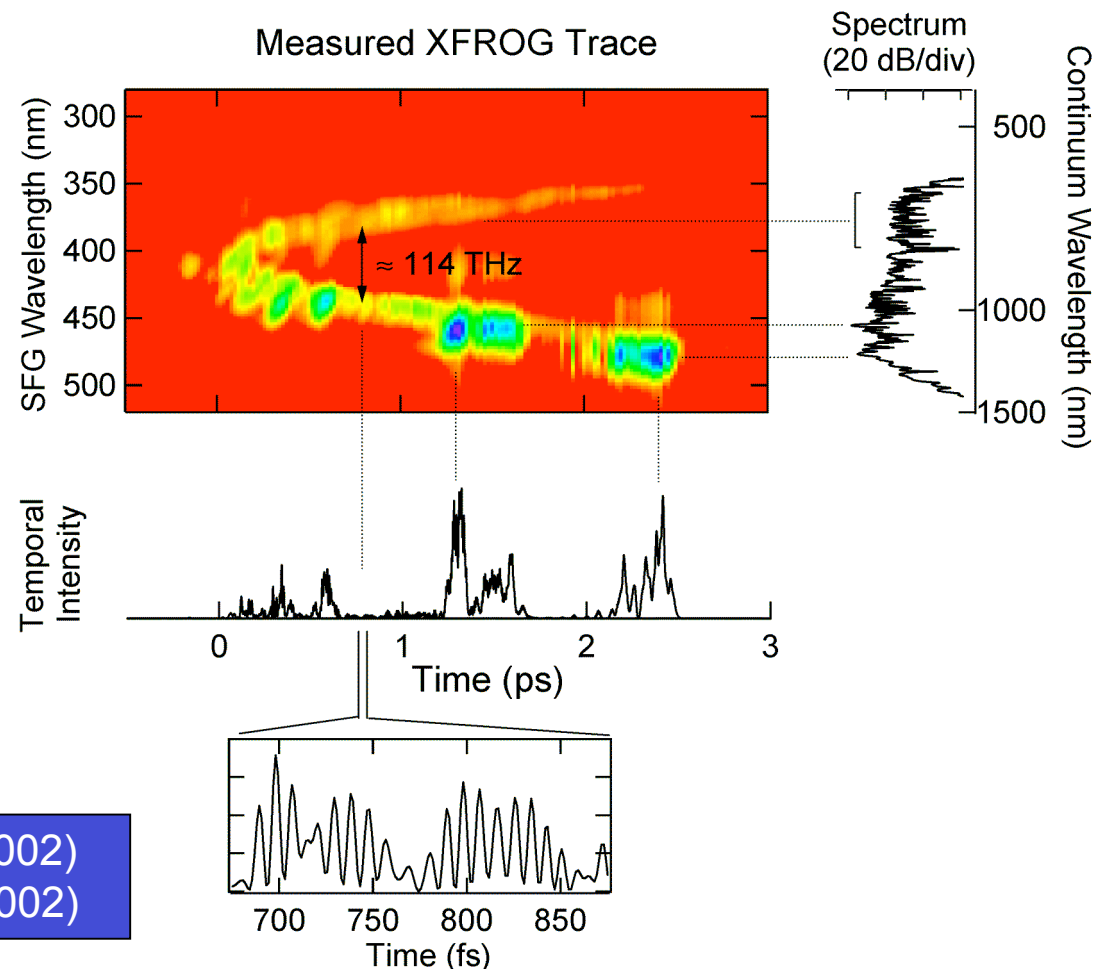
Impulsions complexes

- Génération de supercontinuum spectral:
 - On fait se propager un champ femtoseconde intense dans une fibre fortement non-linéaire et dispersive
 - Plusieurs effets non-linéaires intenses interagissent: effet Kerr, effet Raman, perturbés par la dispersion...
- En résulte un champ extrêmement complexe, dont l'interprétation est a priori délicate



Corrélation croisée

- Dans ce cas, le spectrogramme peut être obtenu en corrélant le champ fs généré par le laser Ti:Saphir (\rightarrow g) avec le champ complexe obtenu dans la fibre non-linéaire (\rightarrow E)
- Permet d'isoler des composantes précises du spectre et de les associer à des phénomènes précis



Gu et al. Opt. Lett. **27** 1174 (2002)
Dudley et al. Opt. Exp. **10** 1251 (2002)

Conclusion

- Importance de la relation de Fourier entre comportement temporel et spectral
- Importance de la phase (temporelle ou spectrale)
- Apport fondamental de la TF: l'autocorrélation reste limitée, l'autocorrélation *résolue en fréquence* permet une analyse poussée
- Généralisation progressive de cette méthode comme référence de la caractérisation d'impulsions brèves
- Technique ultrasensible: caractérisation ps au milliwatt crête
- Technique ultrapolyvalente: caractérisation d'impulsions complexes