

Amplificateurs à fibres Er et Yb en milieu radiatif. Réversibilité et contrôle des états de dégradation d'équilibre locaux sous irradiation continue

Franck **MADY**, Jean-Bernard **DUCHEZ**, Yasmine **MEBROUK**, Mourad **BENABDESSELAM**

Université Nice Sophia Antipolis

Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (LPMC), CNRS UMR 7336

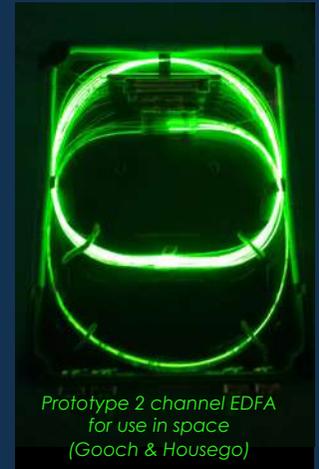


Contexte

- Amplificateurs à fibres dopées terre rare (EDFA, YDFA)

- **Compacité** (faible masse, faible volume)
- **Efficacité** (bon rendement, faible conso.)
- **Applications spatiales** notamment

Amplificateurs fibrés pour gyroscopes, sources lasers fibrées...

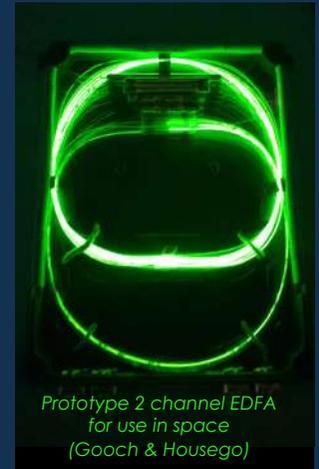


Contexte

- Amplificateurs à fibres dopées terre rare (EDFA, YDFA)

- **Compacité** (faible masse, faible volume)
- **Efficacité** (bon rendement, faible conso.)
- **Applications spatiales** notamment

Amplificateurs fibrés pour gyroscopes, sources lasers fibrées...



- Fibres dopées terre rare (Er, Yb,...)

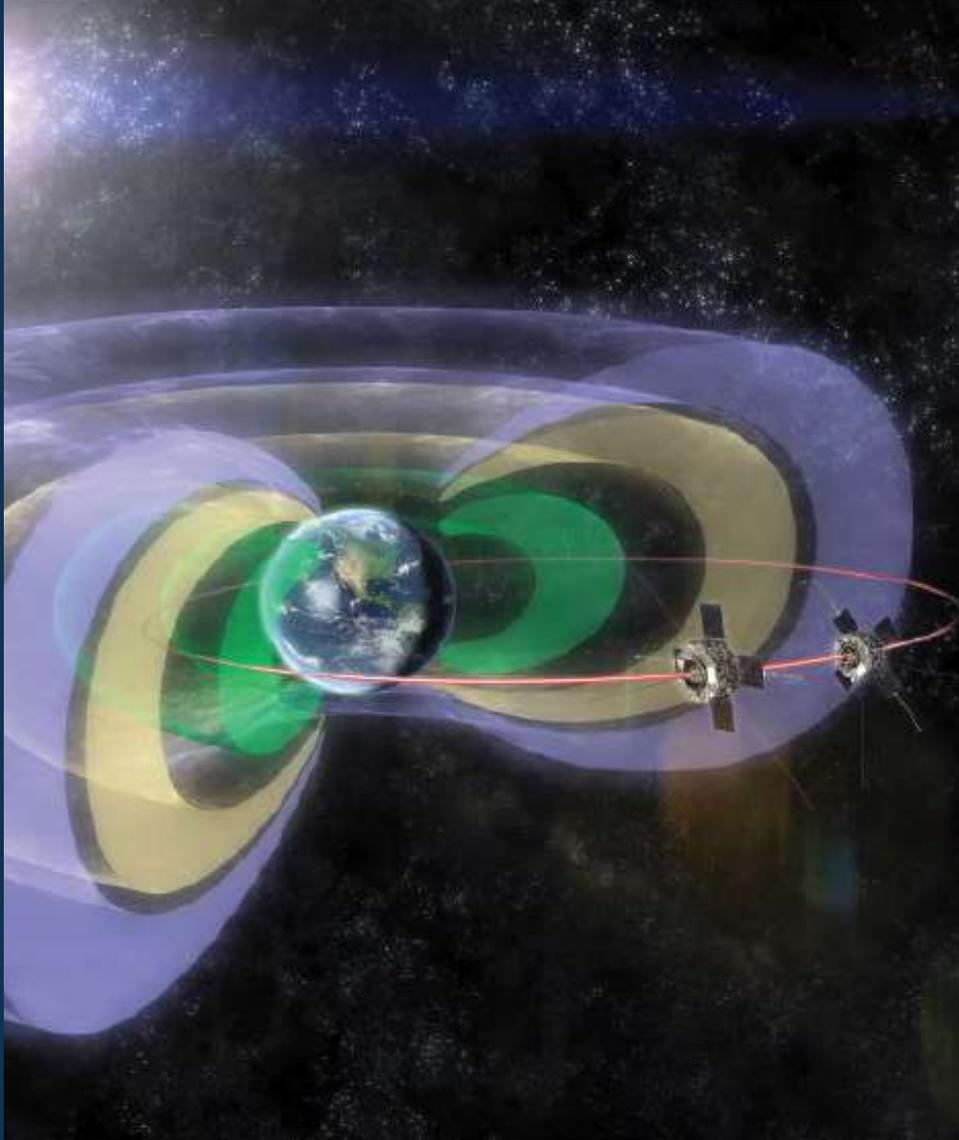
- Souffrent de **dégradation radio-induite** (*noircissement*) (comme les autres fibres en silice)
- **Centres colorés** radio-induits (surtout dans le cœur), Pertes optiques affectant pompe et signal → **Perte de gain**
- Estimation usuelle de la dégradation :

*Atténuation Radio-Induite ou **ARI** (cm^{-1} ou dB m^{-1})*



Contexte

Environnement radiatif spatial



Ceintures de Van Allen

Altitudes des orbites classiques pour les satellites terrestres :

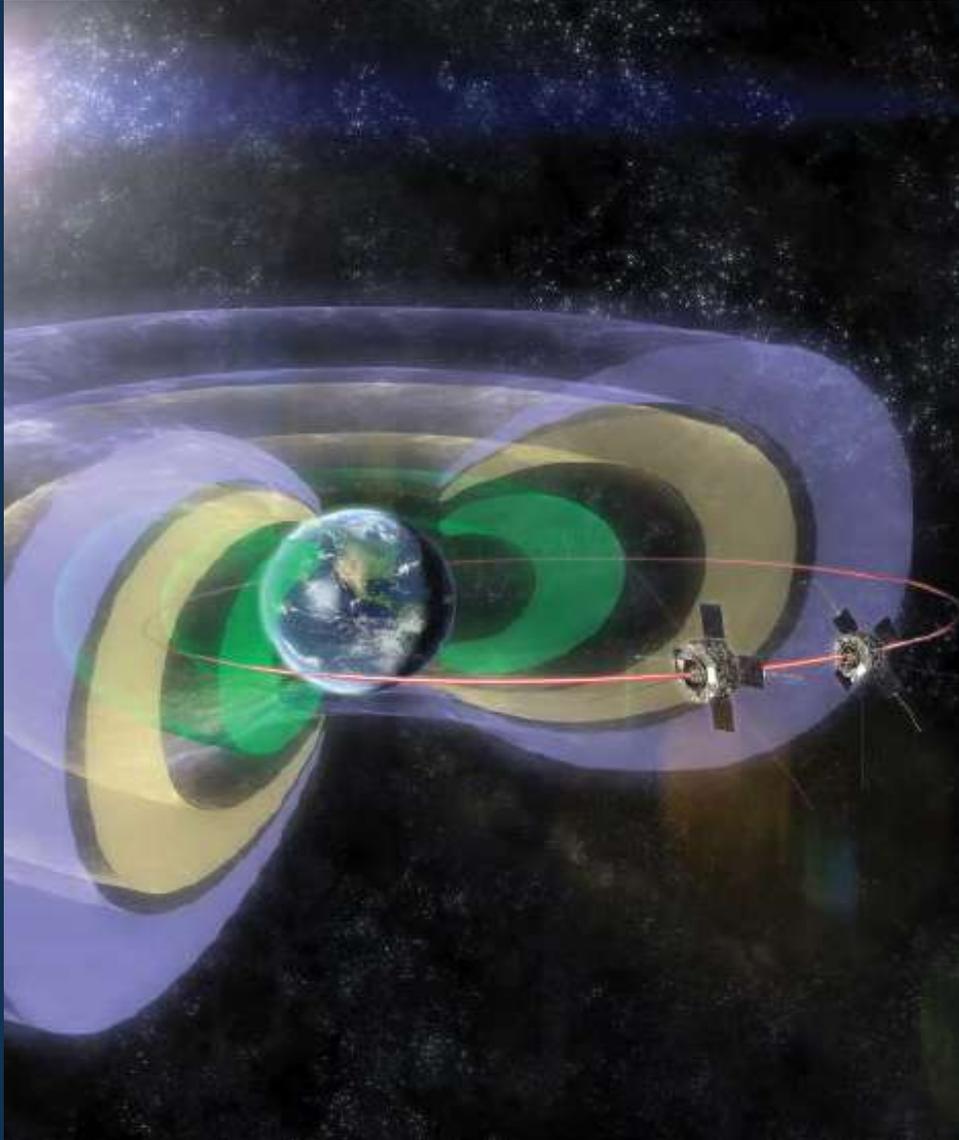
- Orbite basse : 160 – 2000 km
ISS, satellites observation/espions, encore bcp sat. com....
- Orbite moyenne : 2000 – 36000 km (*GPS, Galileo...*)
- Orbite géosynchrone 36000 km

Ceintures de radiation terrestres ; mission Van Allen Probe (NASA 2013) :

- $< 6 \times 10^3$ km : protons (> 100 MeV)
- $13 \times 10^3 - 42 \times 10^3$ km : électrons (> 5 MeV)
- $19 \times 10^3 - 22 \times 10^3$ km : électrons (> 2 MeV)

Contexte

Environnement radiatif spatial



Ceintures de Van Allen

Altitudes des orbites classiques pour les satellites terrestres :

- Orbite basse : 160 – 2000 km
ISS, satellites observation/espions, encore bcp sat. com....
- Orbite moyenne : 2000 – 36000 km (*GPS, Galileo...*)
- Orbite géosynchrone 36000 km

Ceintures de radiation terrestres ; mission Van Allen Probe (NASA 2013) :

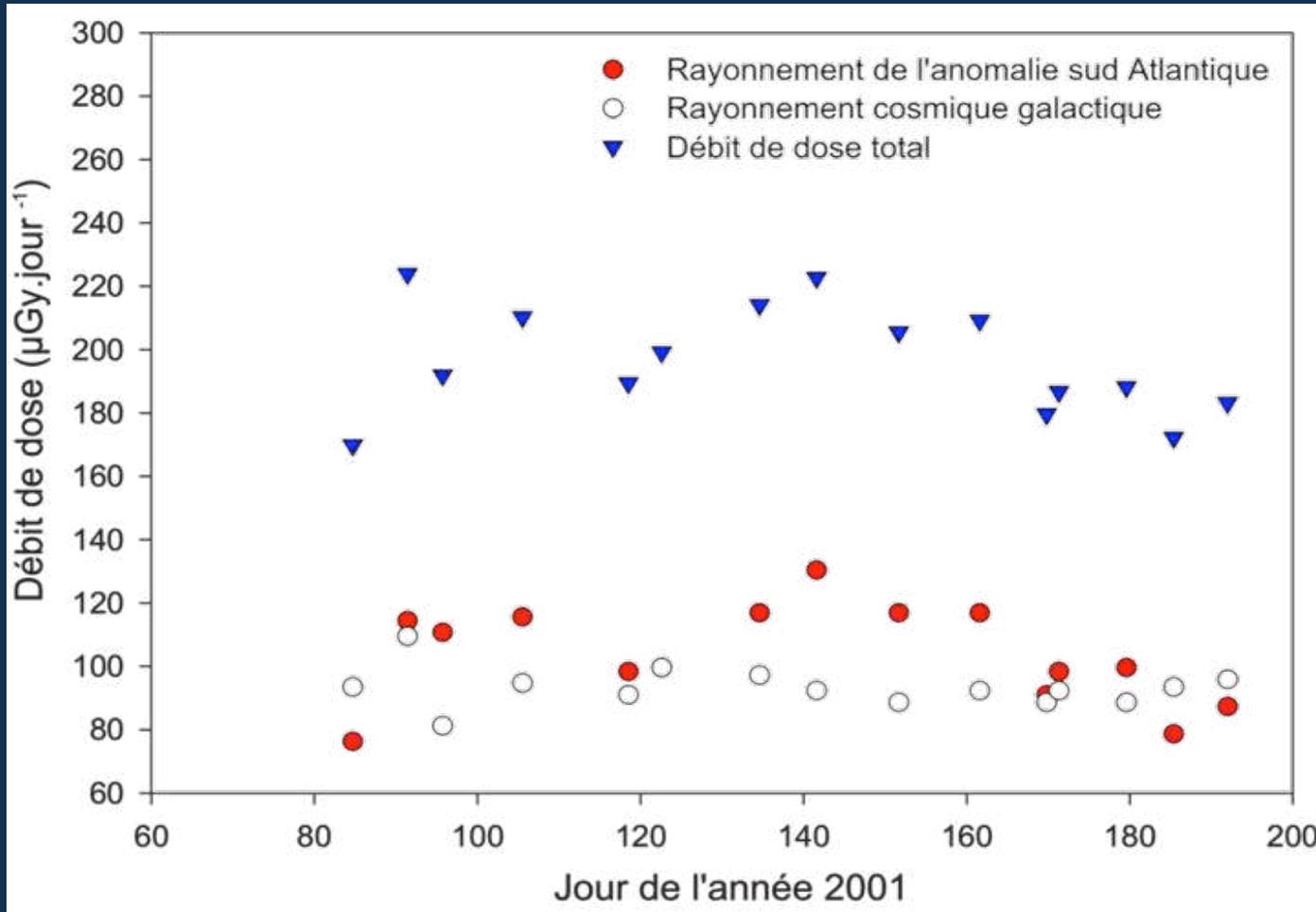
- $< 6 \times 10^3$ km : protons (> 100 MeV)
- $13 \times 10^3 - 42 \times 10^3$ km : électrons (> 5 MeV)
- $19 \times 10^3 - 22 \times 10^3$ km : électrons (> 2 MeV)

Tests de routine au laboratoire : **rayons X**

- Tube RX, anticathode Cu, 45 kV
- 60 % du rayonnement à 8-9 keV
- Disponibilité, radioprotection simple
- Flexibilité (commutation de débit in-situ,...)
- **Effets ionisants équivalents (ARI, RPE...)**

Contexte

Environnement radiatif spatial



Données mesurées à bord de la station spatiale internationale en 2001 (orbite basse)

Débit de dose faible
~ 200 µGy / jour

En krad :
~ 2×10^{-5} krad / jour

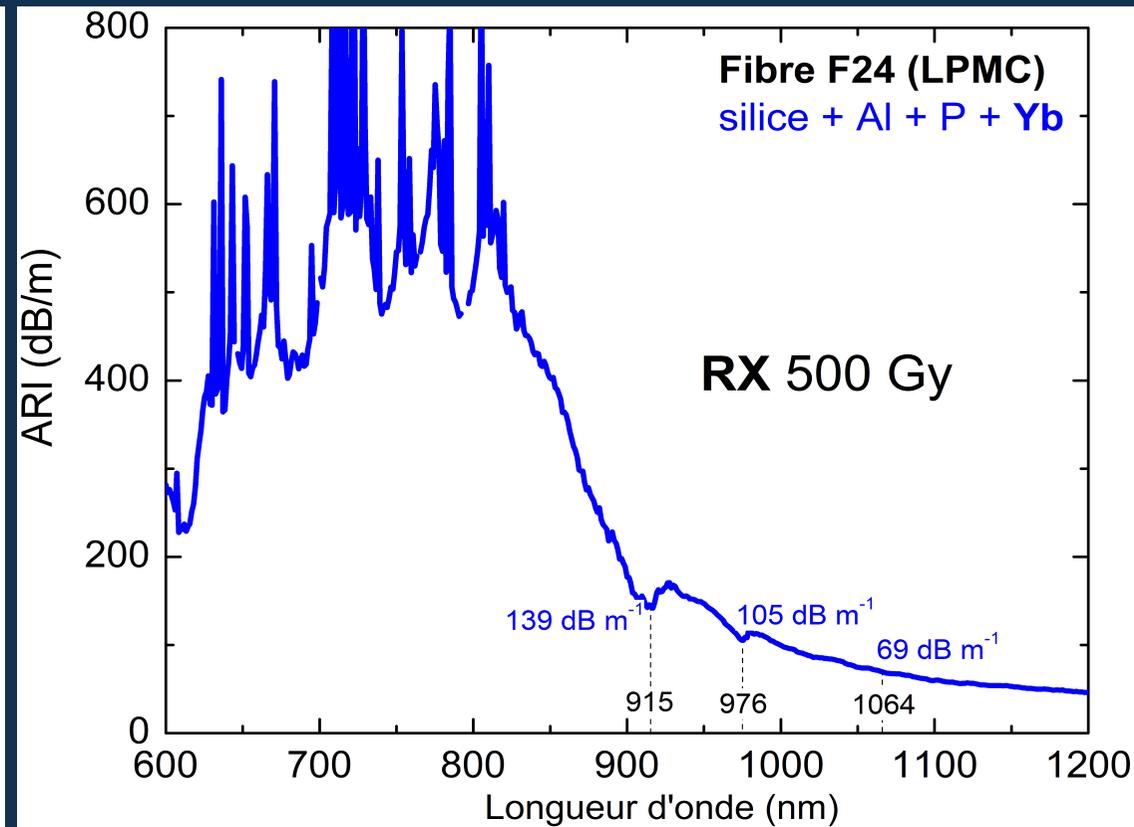
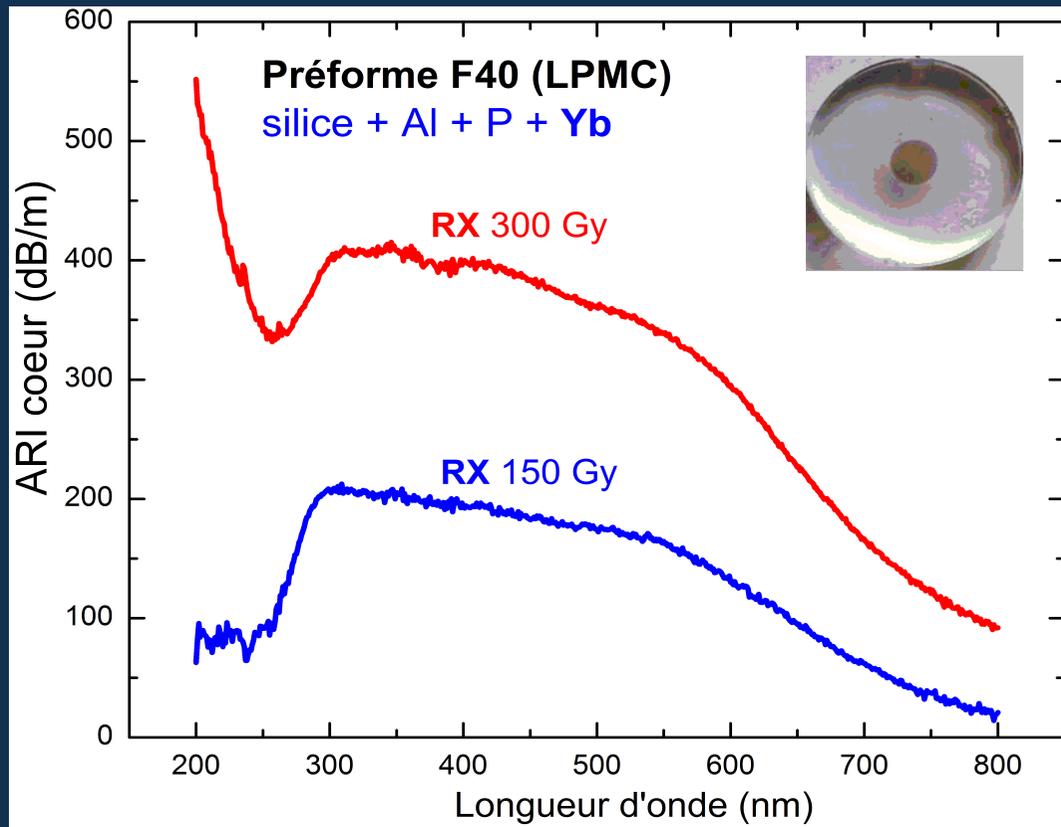
(1 Gy = 0,1 krad)

Reitz et al., "Space radiation measurements on-board ISS—the dosmap experiment," *Radiat. Prot. Dosim.*, **116**, no. 1-4, 374 - 379, 2005

Contexte

Exemples d'ARI sur préforme et fibre **Yb** (éch. LPMC)

Dose typique mission spatiale : 300 – 500 Gy (soit 30 – 50 krad)



Contexte

- Voies de « durcissement » des fibres contre l'ARI

Recettes empiriques basées sur :

- Co-dopage **cérium** (identifiée depuis > 40 ans)
- Réduction de la concentration en aluminium (dopage via NP)
- Chargement **hydrogène** + gainage « étanche » (pour éviter la désorption)

Mais mécanismes de dégradation toujours mal connus...

→ Pas de modèle physique consensuel, pas d'outil de simulation prédictif.

(Positionnement de notre activité au LPMC)

Contexte

• Voies de « durcissement » des fibres contre l'ARI

Recettes empiriques basées sur :

- Co-dopage **cérium** (identifiée depuis > 40 ans)
- Réduction de la concentration en aluminium (dopage via NP)
- Chargement **hydrogène** + gainage « étanche » (pour éviter la désorption)

Mais mécanismes de dégradation toujours mal connus...

→ Pas de modèle physique consensuel, pas d'outil de simulation prédictif.

(Positionnement de notre activité au LPMC)

• Quid de la pompe ? (980 nm typiquement pour fibres Er et Yb)

Pompe → **Photo-Blanchiment ou PB** (Er, Yb) et/ou **Photo-Noircissement ou PN** (Yb)

Agent de durcissement « naturel » en conditions actives → **caractérisation adaptée requise...**

Interaction entre effets photo- et radio-induits : essentielle pour une modélisation pertinente des amplificateurs fibrés opérés en milieux sévères.

Contexte

• Voies de « durcissement » des fibres contre l'ARI

Recettes empiriques basées sur :

- Co-dopage **cérium** (identifiée depuis > 40 ans)
- Réduction de la concentration en aluminium (dopage via NP)
- Chargement **hydrogène** + gainage « étanche » (pour éviter la désorption)

Mais mécanismes de dégradation toujours mal connus...

→ Pas de modèle physique consensuel, pas d'outil de simulation prédictif.

(Positionnement de notre activité au LPMC)

• Quid de la pompe ? (980 nm typiquement pour fibres Er et Yb)

Pompe → **Photo-Blanchiment ou PB** (Er, Yb) et/ou **Photo-Noircissement ou PN** (Yb)

Agent de durcissement « naturel » en conditions actives → **caractérisation adaptée requise...**

Interaction entre effets photo- et radio-induits : essentielle pour une modélisation pertinente des amplificateurs fibrés opérés en milieux sévères.

Dans cette présentation :

Caractérisation PN et PB, comparaison Fibres Er / Fibres Yb, modélisation

Dans cette présentation

1 – Caractérisation expérimentale

Interaction pompe (980 nm) / rad. ionisantes

- Choix d'échantillons courts (caract. locale)
- Banc expérimental
- Etats locaux de dégradation d'équilibre, réversibilité
- Comparaison fibres Yb / fibres Er



Dans cette présentation

1 – Caractérisation expérimentale

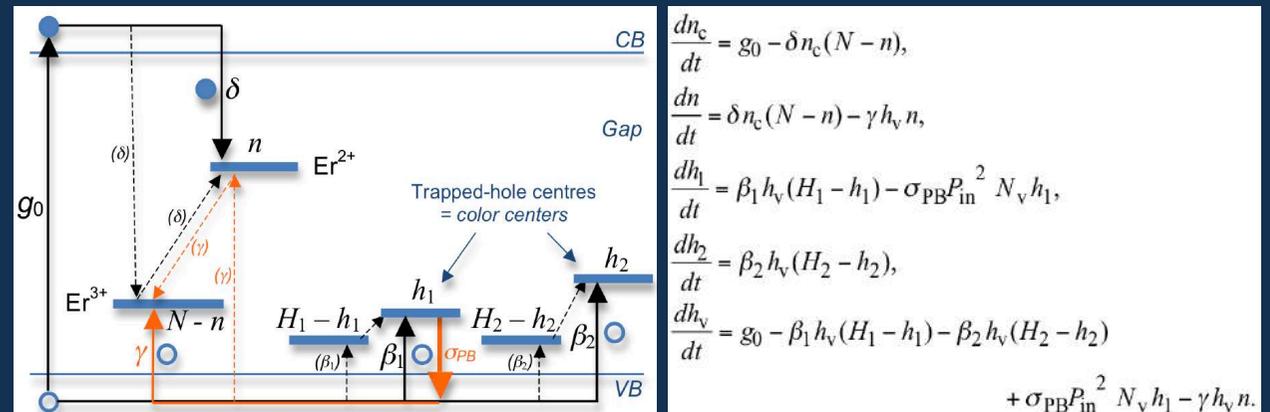
Interaction pompe (980 nm) / rad. ionisantes

- Choix d'échantillons courts (caract. locale)
- Banc expérimental
- Etats locaux de dégradation d'équilibre, réversibilité
- Comparaison fibres Yb / fibres Er



2 – Modélisation locale

- Pas semi-empirique
- Modèles fibres Yb / fibres Er
- Simulations et prédictions
- Confrontation et validation



1 – Caractérisation expérimentale

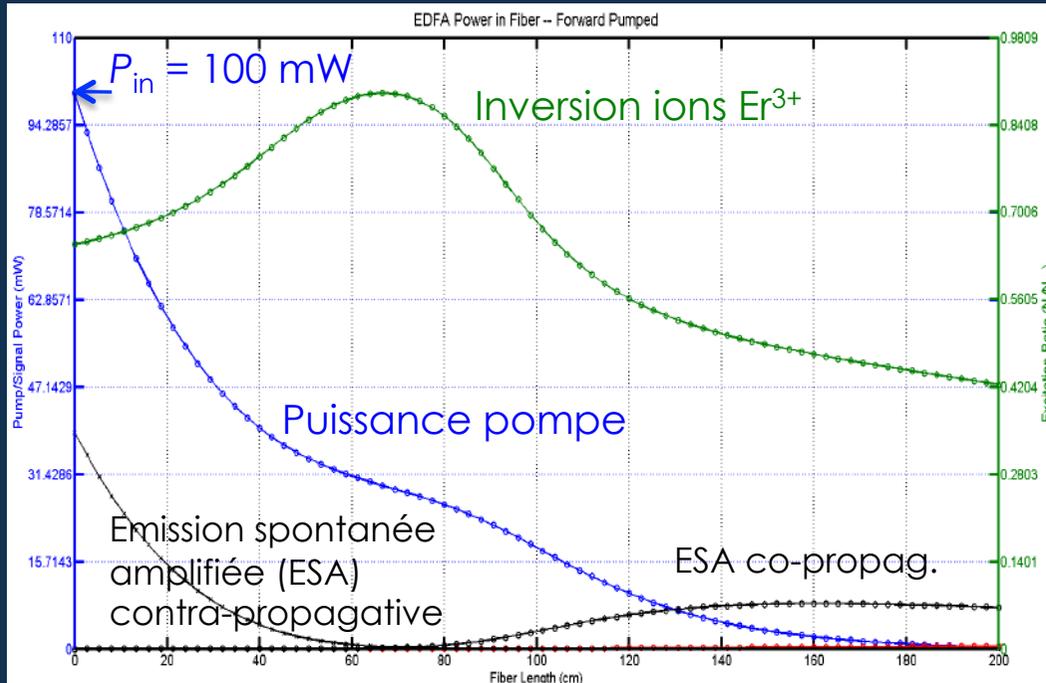
Méthodes et échantillons

1 – Caractérisation expérimentale

Méthodes et échantillons

- Étude sur échantillons courts (fibres Yb et Er) → Pas amplificateurs fibrés réels, mais caractérisation « intrinsèque » (visée fondamentale)

Fibre Er, $P_{pin} = 100 \text{ mW}$, $L = 2 \text{ m}$



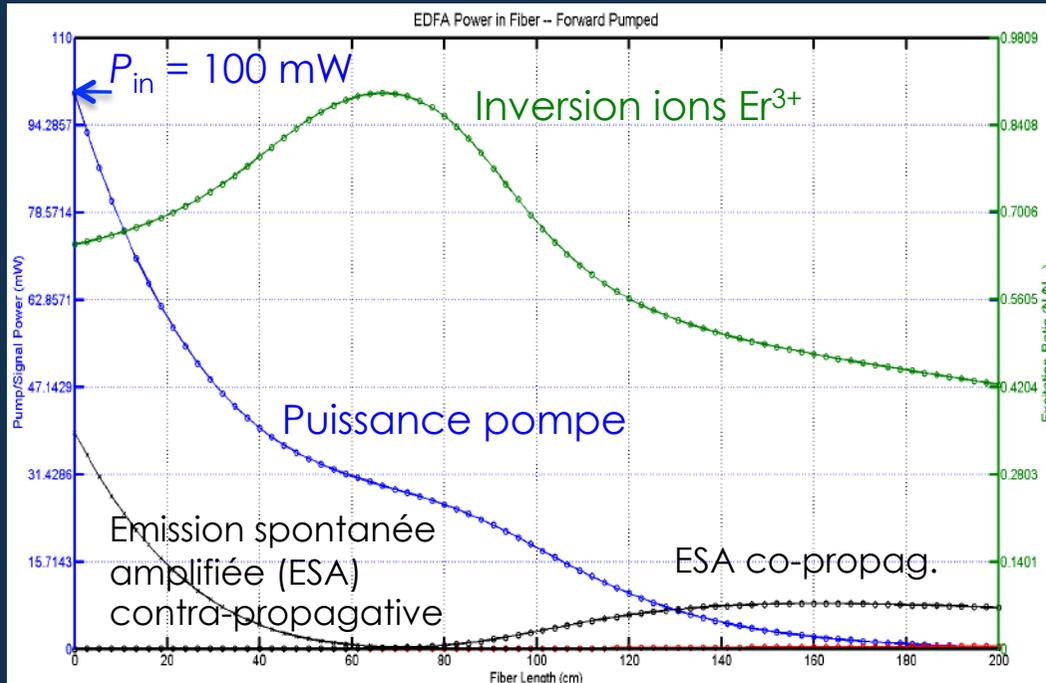
Pompe distribuée, impact sur ARI dépend de L !
Pas adapté pour caractérisation intrinsèque

1 – Caractérisation expérimentale

Méthodes et échantillons

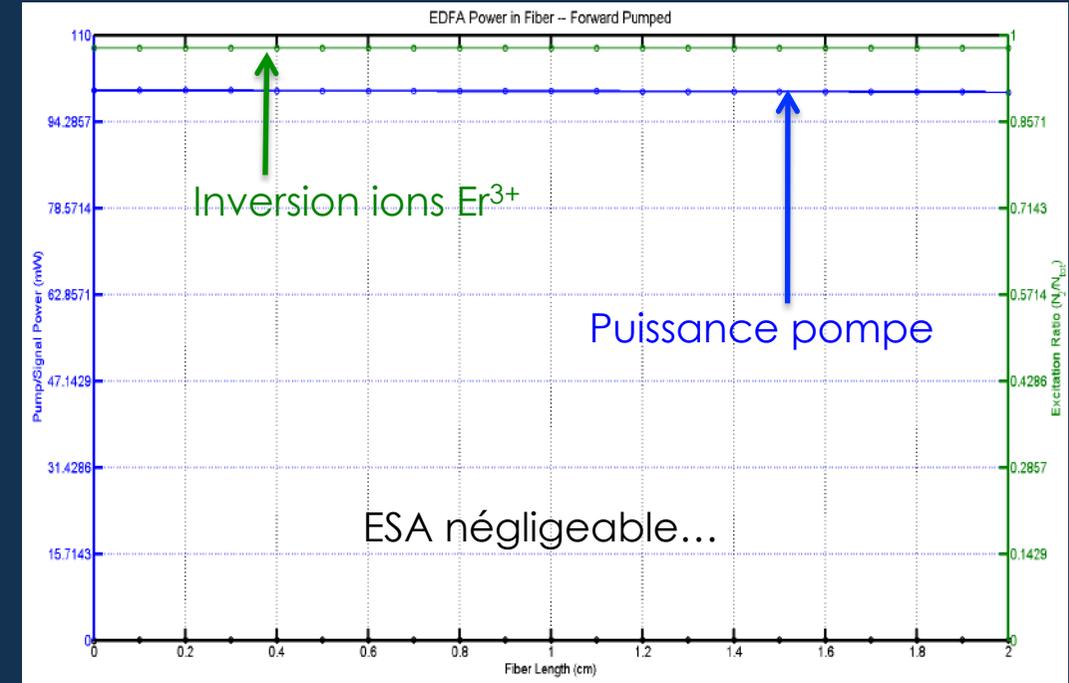
- Étude sur échantillons courts (fibres Yb et Er) → Pas amplificateurs fibrés réels, mais caractérisation « **intrinsèque** » (visée fondamentale)

Fibre Er, $P_{pin} = 100$ mW, $L = 2$ m



Pompe distribuée, impact sur ARI dépend de L !
Pas adapté pour caractérisation intrinsèque

Idem, sauf $L = 2$ cm



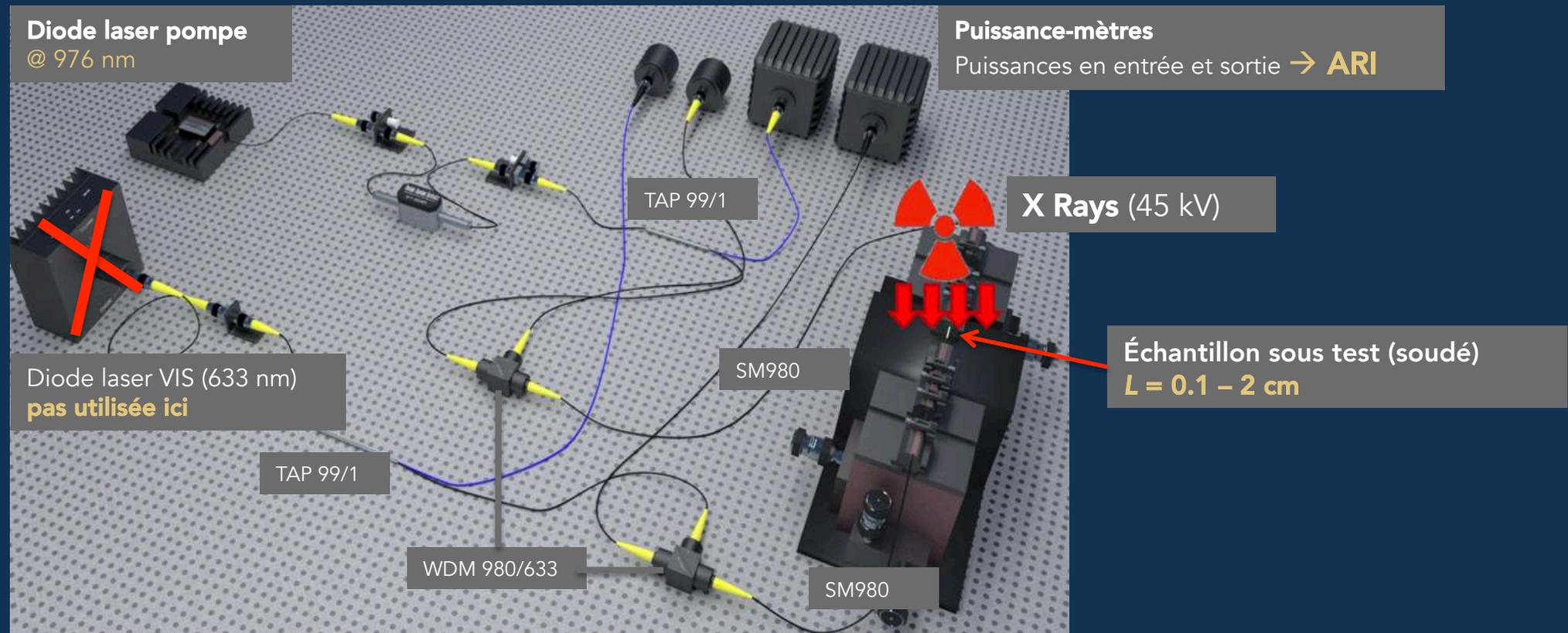
Pompe et inversion homogènes
Effets photo-induits uniquement caractérisés par P_{in}
Caractérisation intrinsèque, mais locale...

1 – Caractérisation expérimentale

Méthodes et échantillons

- Banc de mesure de l'ARI à 980 nm (pompe) sous rayonnement ionisant

Schéma pompe-sonde contra-propagatif

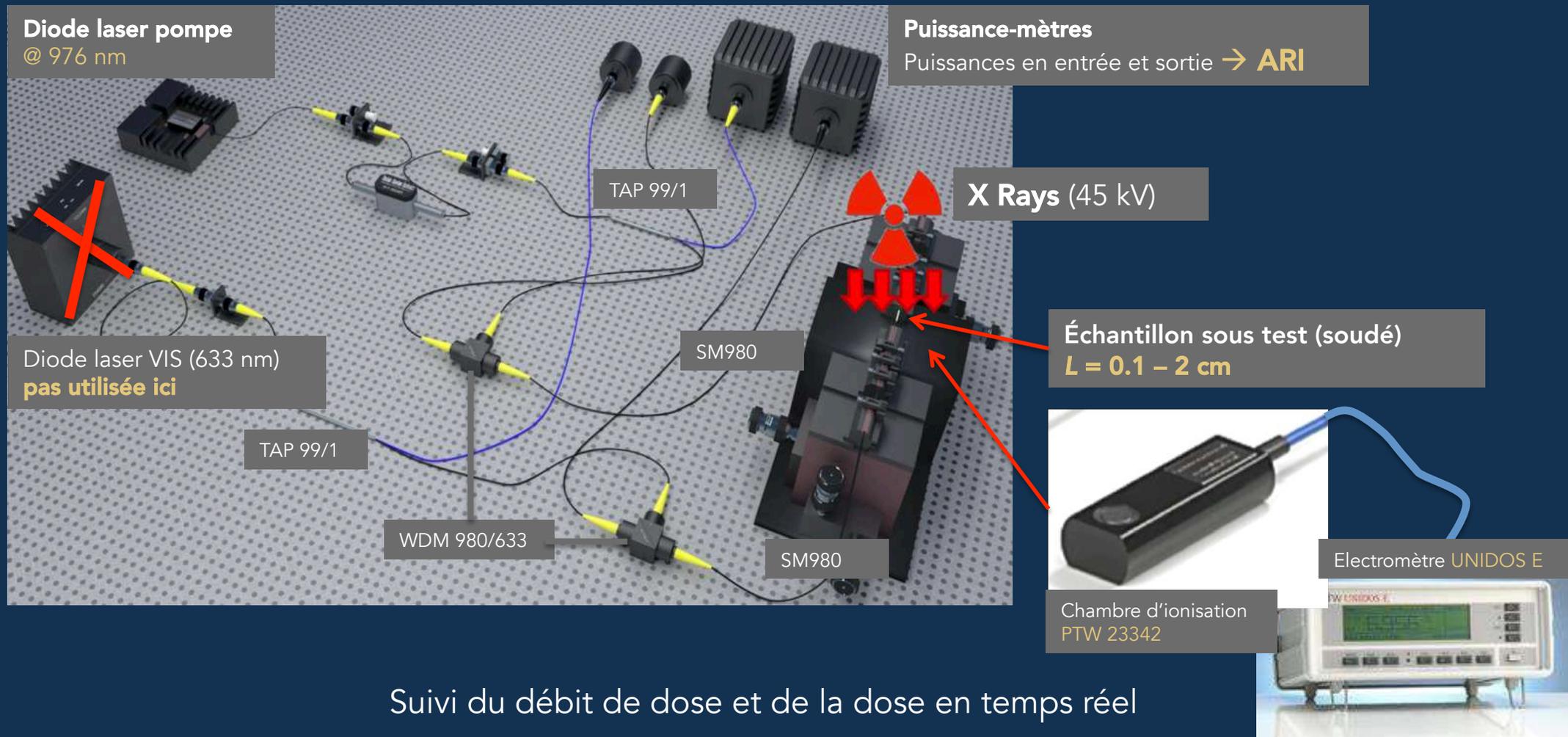


1 – Caractérisation expérimentale

Méthodes et échantillons

- Banc de mesure de l'ARI à 980 nm (pompe) sous rayonnement ionisant

Schéma pompe-sonde contra-propagatif

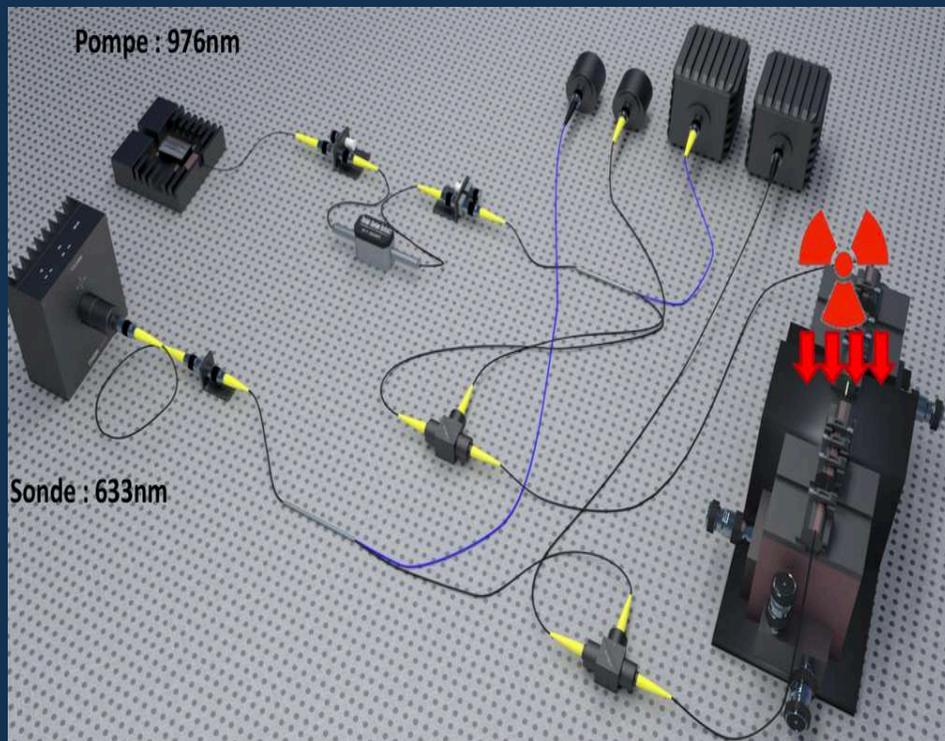


1 – Caractérisation expérimentale

Méthodes et échantillons

- Banc de mesure de l'ARI à 980 nm (pompe) sous rayonnement ionisant

Schéma pompe-sonde contra-propagatif



Puissance de pompe et débit de dose peuvent être variés pendant l'expérience

1 – Caractérisation expérimentale

Méthodes et échantillons

- Échantillons (dans cette présentation)

	Dopage Er	Dopage Yb
Echantillons LPMC (MCVD + dopage solution)	M04 [Er ³⁺] = 2,8 x 10 ¹⁹ cm ⁻³ 72 dB m ⁻¹ @ 1530 nm	K10 [Yb ³⁺] = 4,5 x 10 ¹⁹ cm ⁻³ 575 dB m ⁻¹ @ 976 nm
Echantillons commerciaux « COTS »	Er80 (Liekki) [Er ³⁺] = 3 x 10 ¹⁹ cm ⁻³ 80 dB m ⁻¹ @ 1530 nm	Yb1200 (Liekki) [Yb ³⁺] = 9,4 x 10 ¹⁹ cm ⁻³ 1200 dB m ⁻¹ @ 976 nm

Matrices alumino-silicates pour échantillons LPMC
([Al] ≈ 1 % massique typiquement)

Co-dopants attestés ou probables dans fibres commerciales
(dont cérium dans Yb1200)

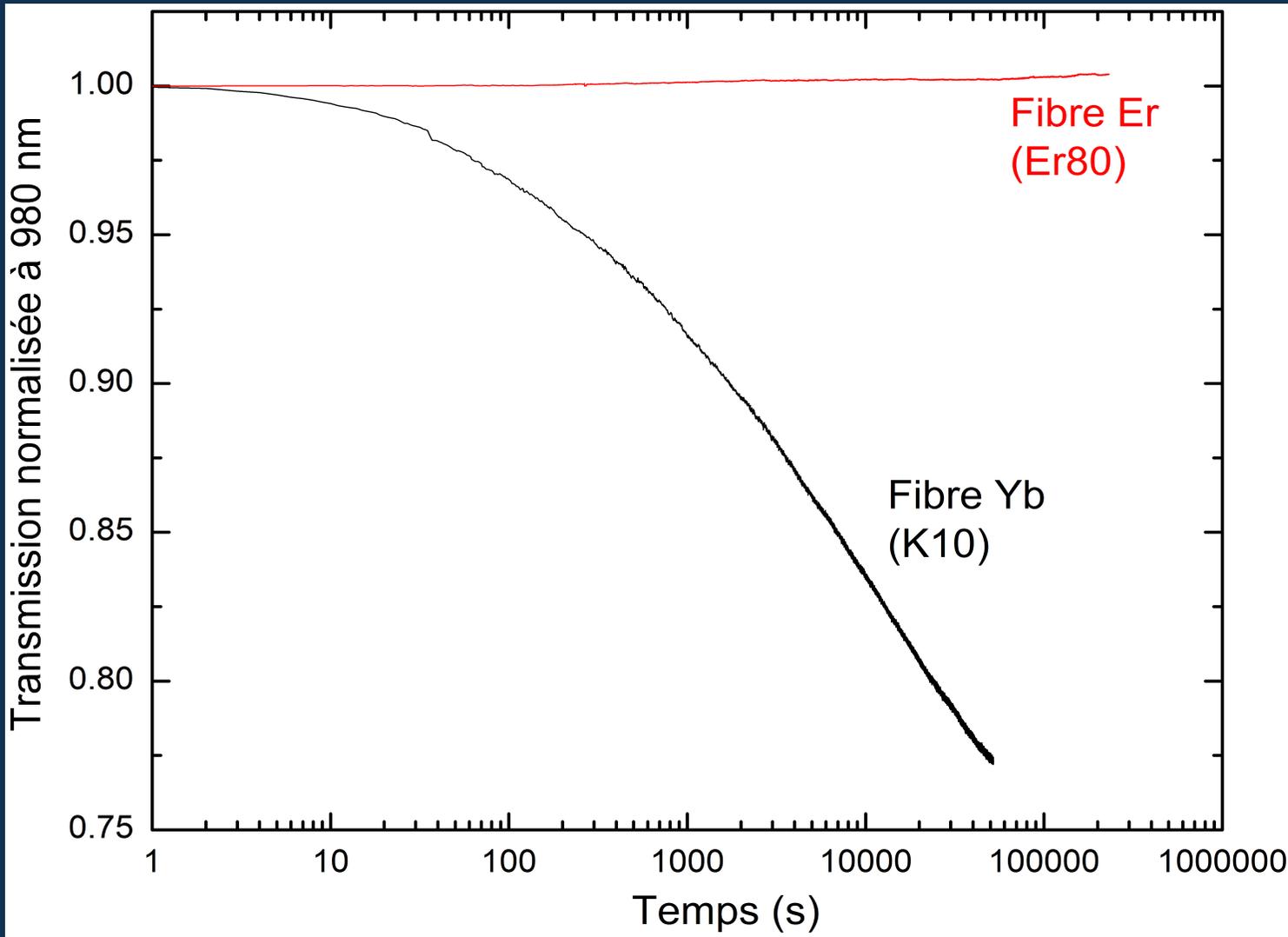
1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 1 : photo-noircissement

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 1 : photo-noircissement

- Photo-noircissement ou PN (pompe seule, pas de RX)



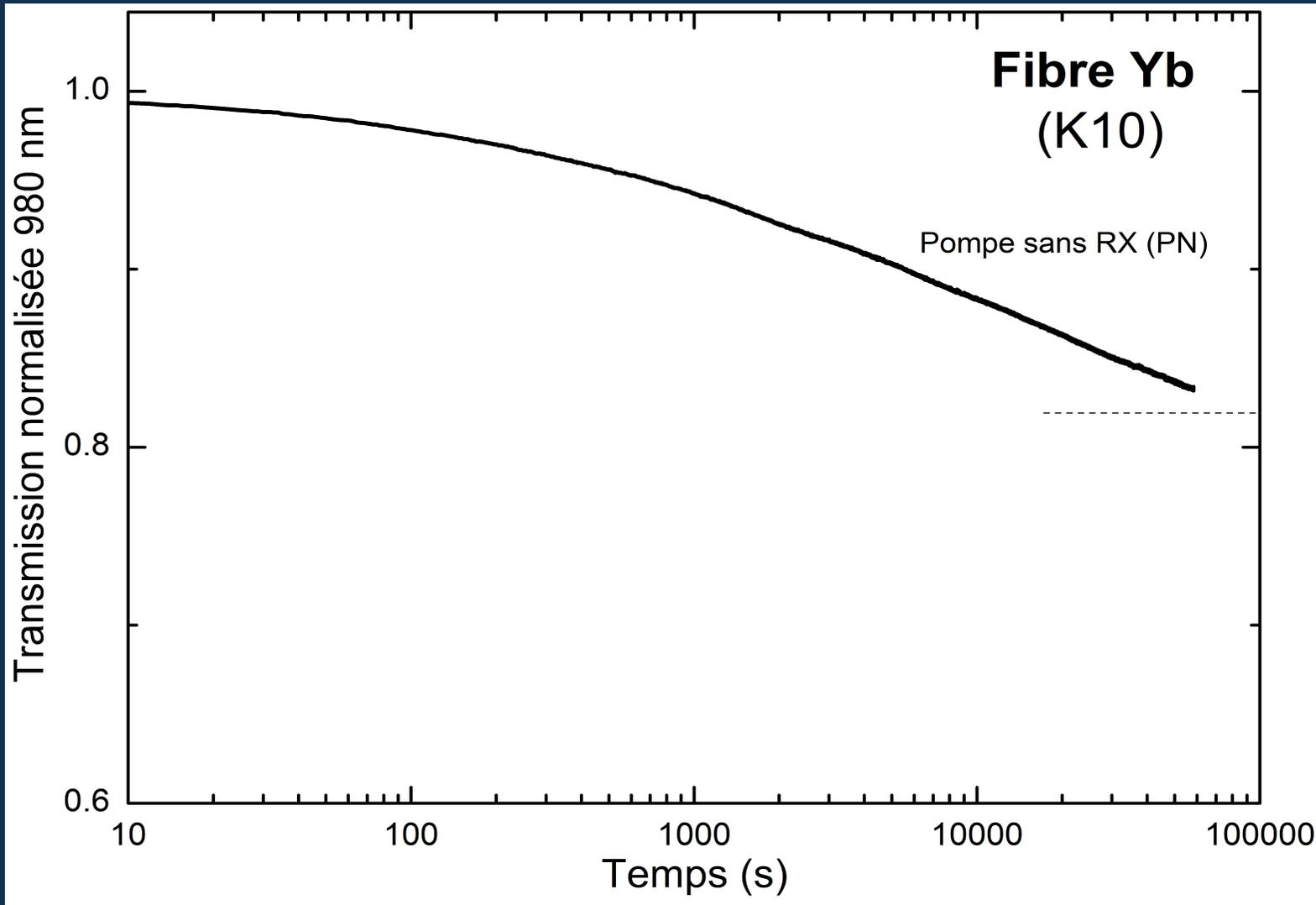
Comme attendu :

- Fort PN pour fibre Yb
- Pas de PN pour fibre Er

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 1 : photo-noircissement

• Niveau d'équilibre du PN (NEPN) des fibres Yb



Un NEPN existe

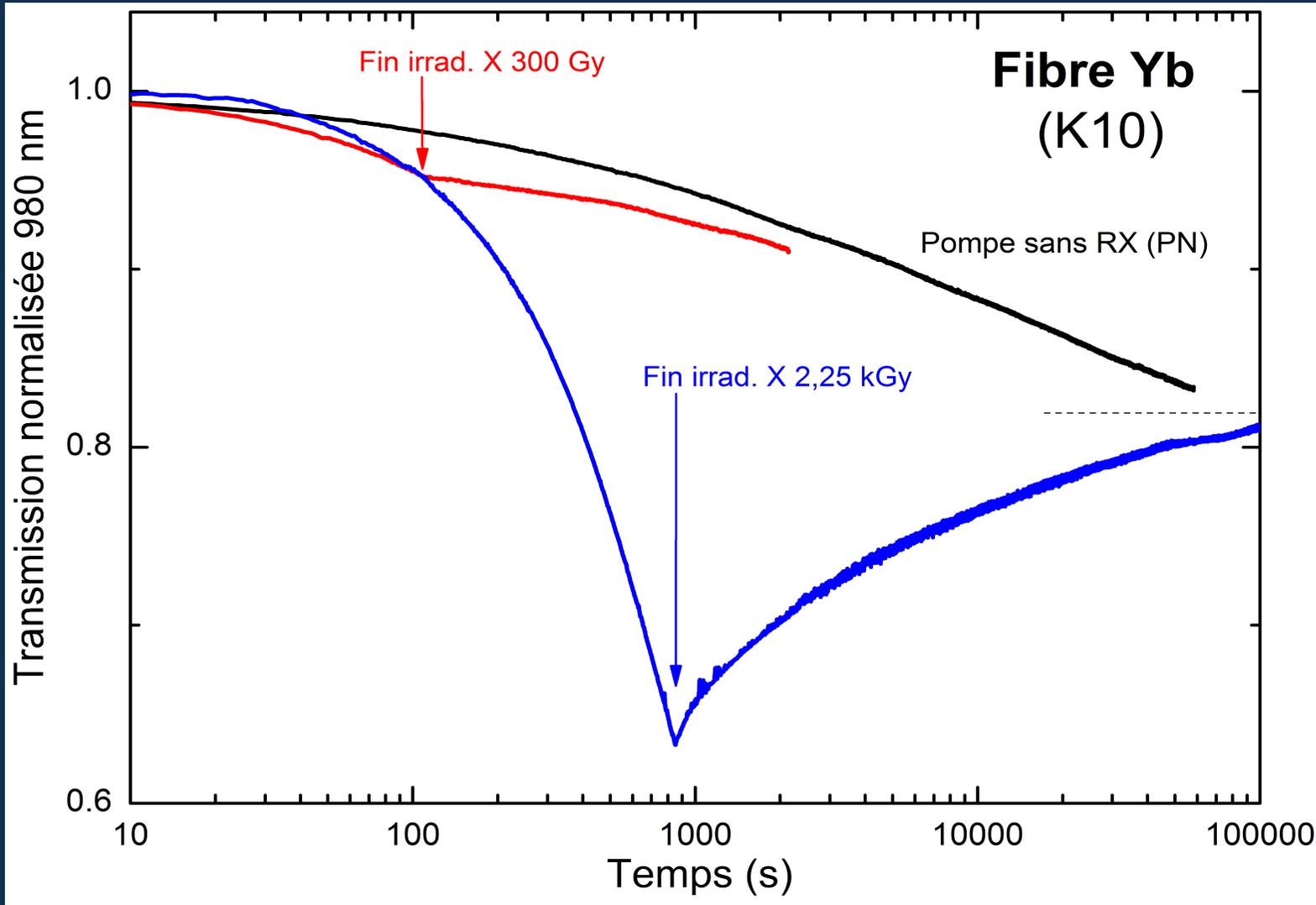
- Ici vers 0,82
- On peut y arriver depuis un état de dégradation inférieur ou nul (noircissement)

...

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 1 : photo-noircissement

• Niveau d'équilibre du PN (NEPN) des fibres Yb



Un NEPN existe

- Ici vers 0,82
- On peut y arriver depuis un état de dégradation inférieur ou nul (noircissement)

...

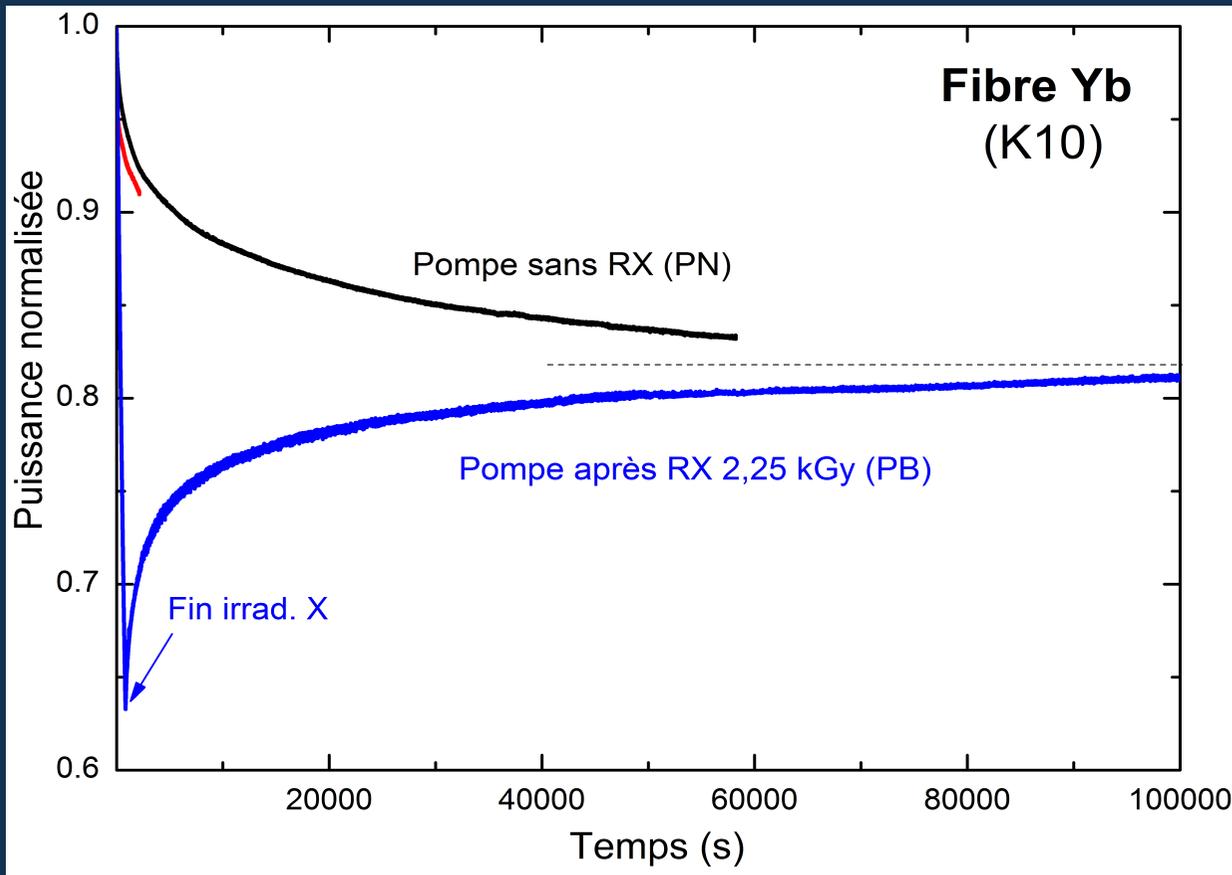
Ou bien depuis un état plus dégradé...

Après Radio-Noirissement (RN)

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 1 : photo-noircissement

• Niveau d'équilibre du PN (NEPN) des fibres Yb



Rôle de la pompe

- Noircit le cœur de fibre
- Blanchit le PN (car NEPN)
- Blanchit aussi le noircissement radio-induit (RN)

Contribution principale

- PN si dégradation < NEPN
- PB si dégradation > NEPN

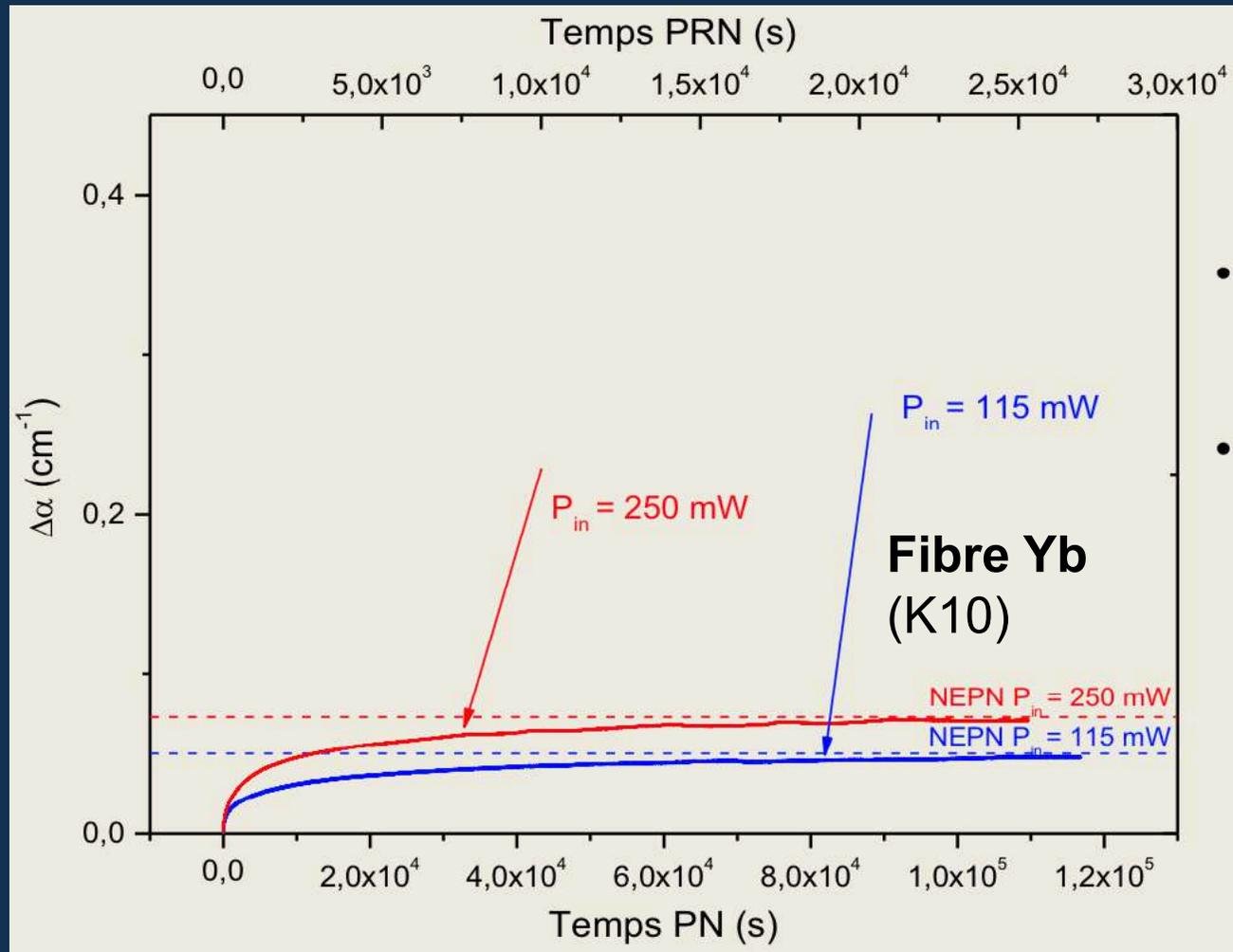
« force de rappel » vers le NEPN

Fort potentiel « durcisseur » de la pompe si NEPN petit ou nul (fibres Yb... et Er !)

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 1 : photo-noircissement

• Effet de la puissance de pompe sur le NEPN (fibres Yb)



Dégradation exprimée ici en terme d'ARI à 980 nm $\Delta\alpha$ (cm^{-1})

- NEPN croît avec P_{in} (car PN croît)

• \rightarrow C'est bien un équilibre, et pas une saturation...

• - On trouve en fait une croissance linéaire avec l'inversion, conformément à la littérature...

S. Jetschke et al.,

Opt. Exp., 15, no. 22, p 14838, 2007

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

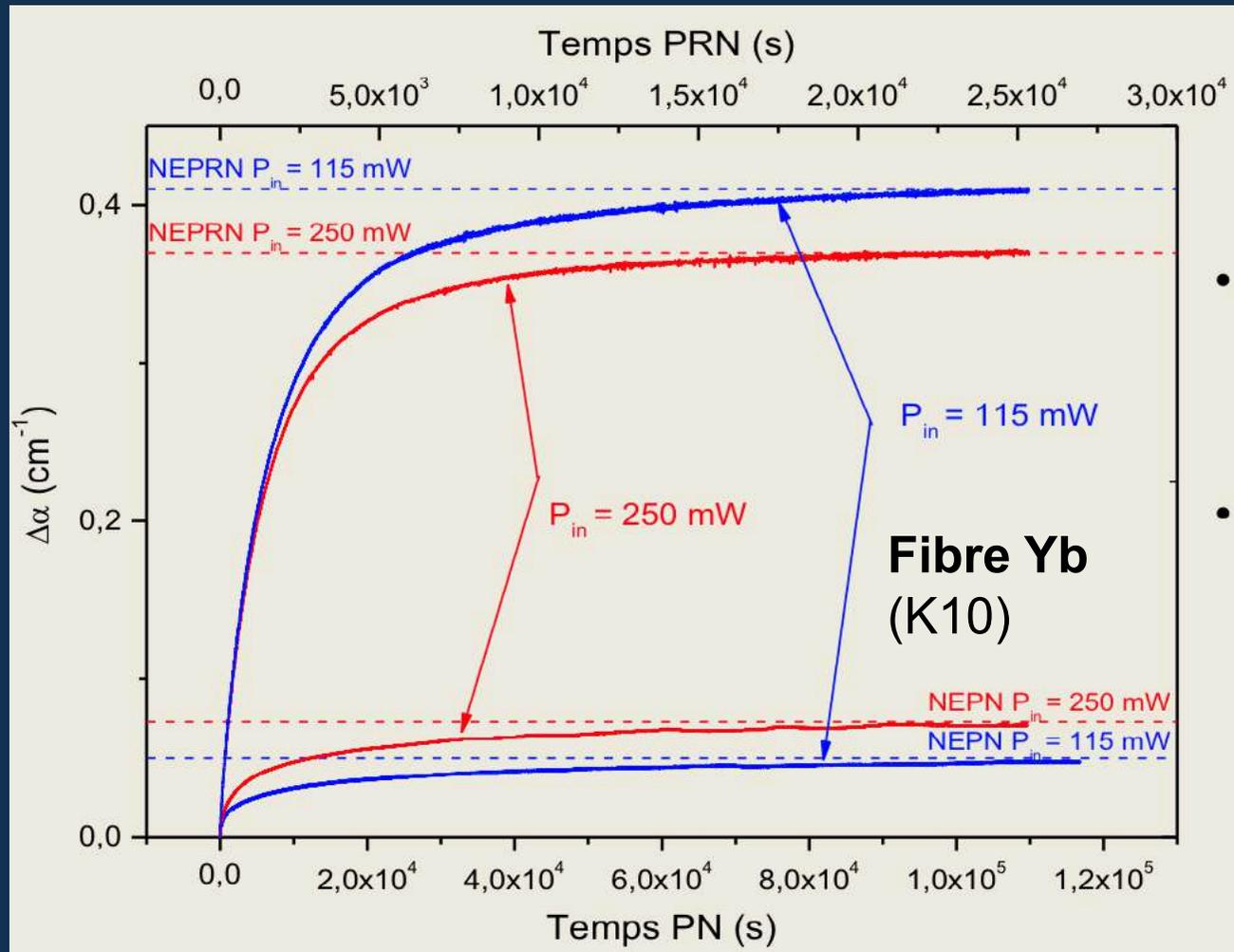
ou

Le « Photo-Radio-noircissement » des fibres Yb

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• Le « Photo-Radio-Noircissement » (PRN)



Un niveau d'équilibre existe (NEPRN)

Car la pompe blanchit le RN...

- NEPRN diminue si P_{in} augmente
- Logique car :
 - Le PB prédomine pour $ARI > NEPN$
 - $P_{in} + \rightarrow PB + \rightarrow ARI -$

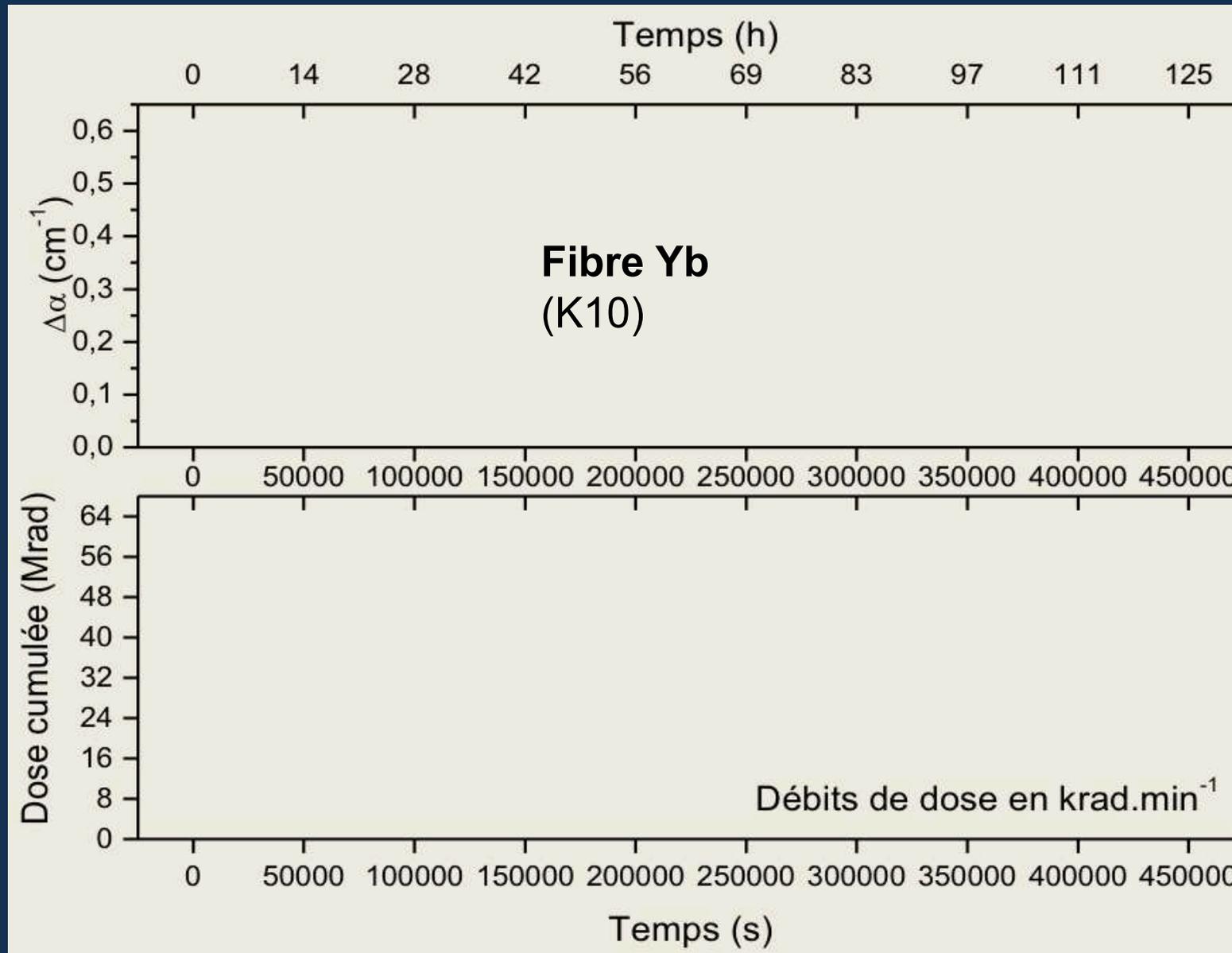
Conséquence

NEPRN \rightarrow NEPN à forte P_{in}

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



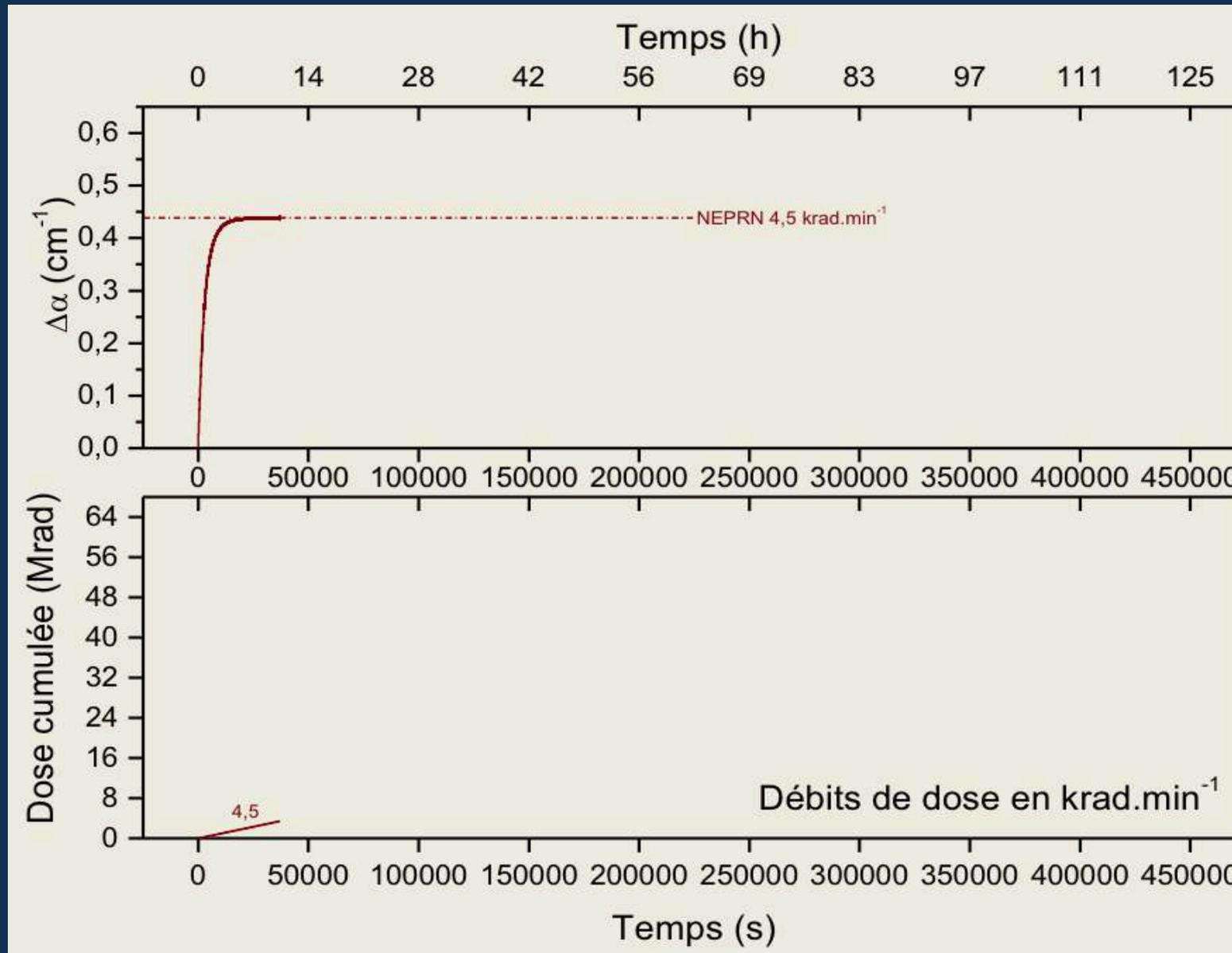
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



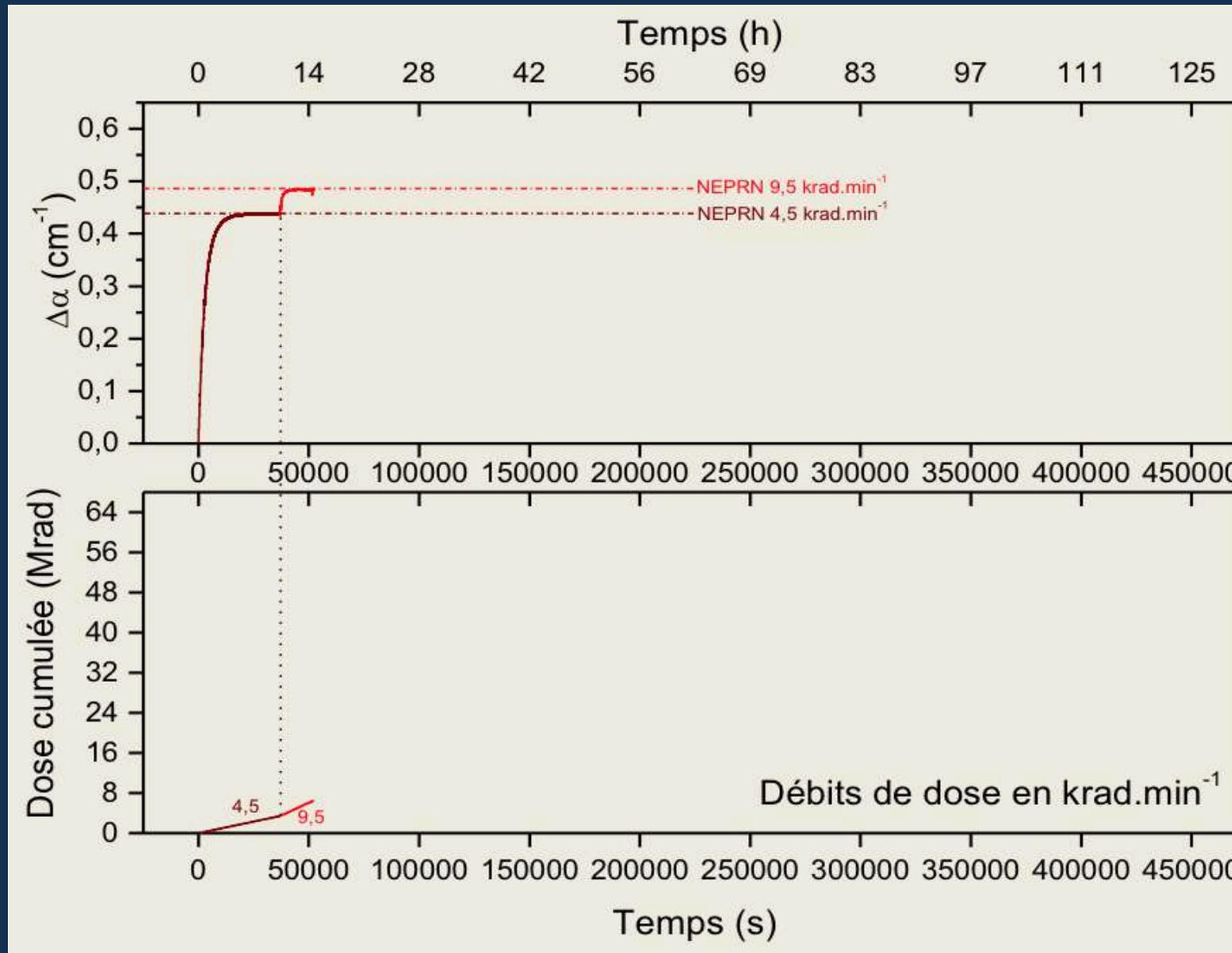
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



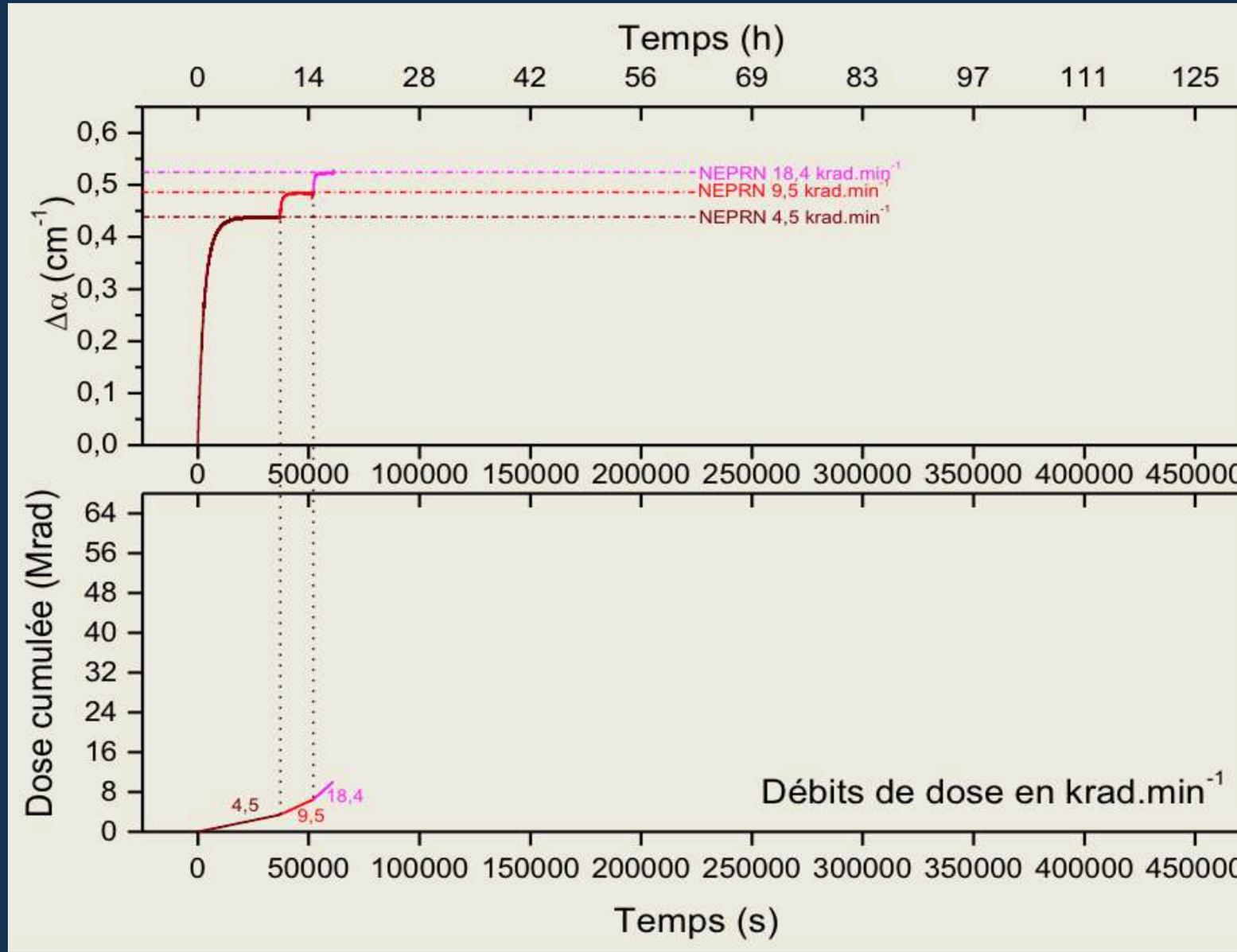
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



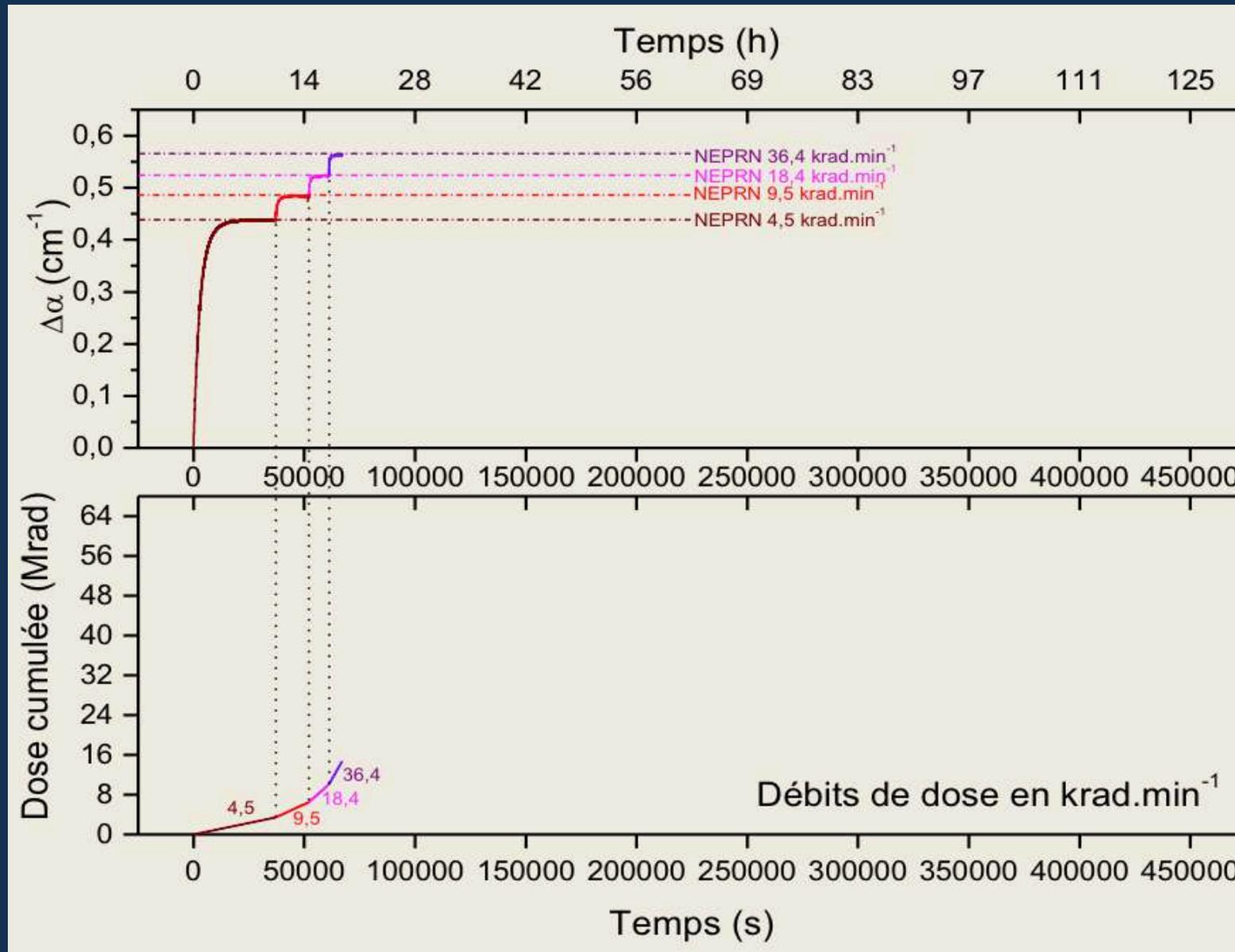
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



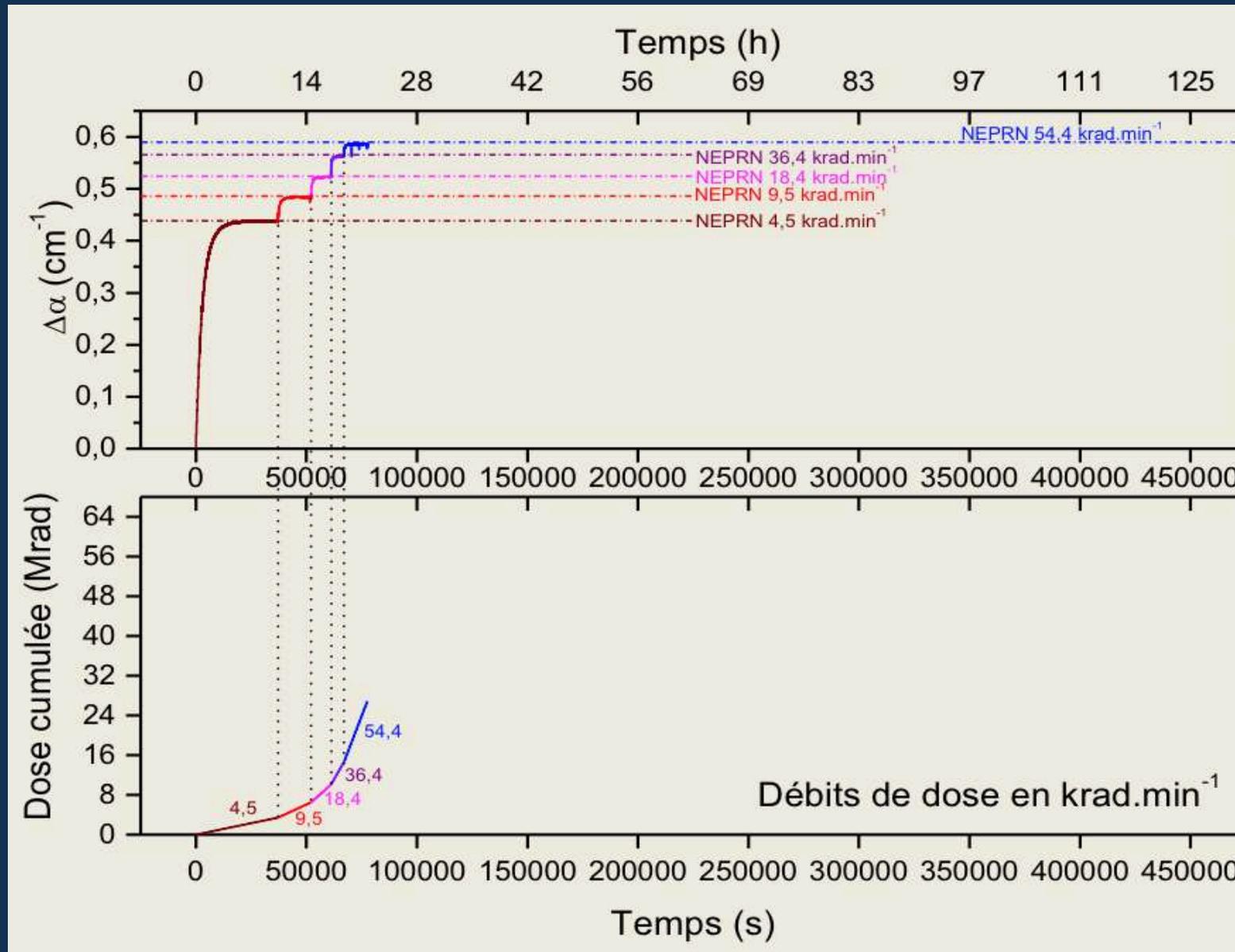
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



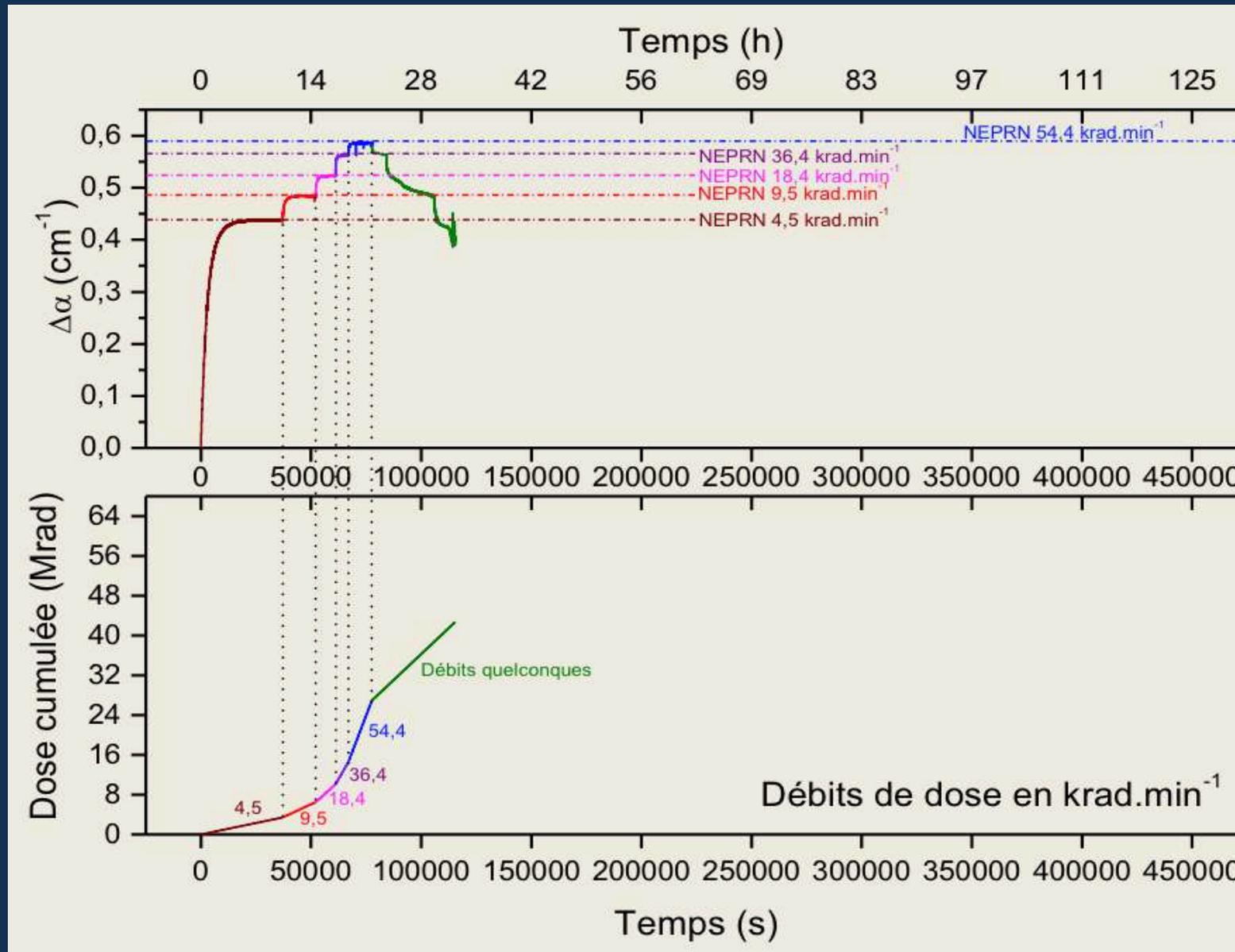
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



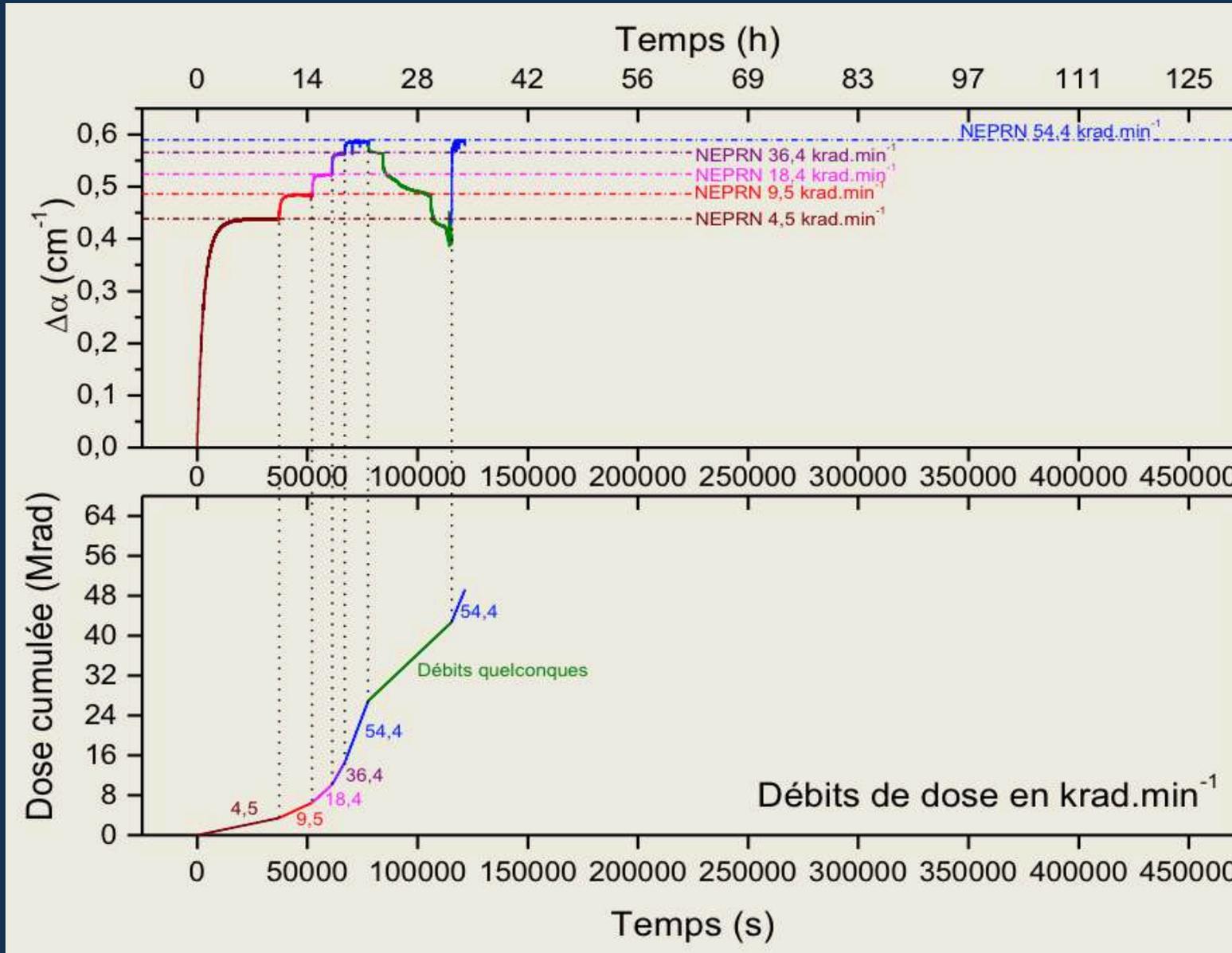
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



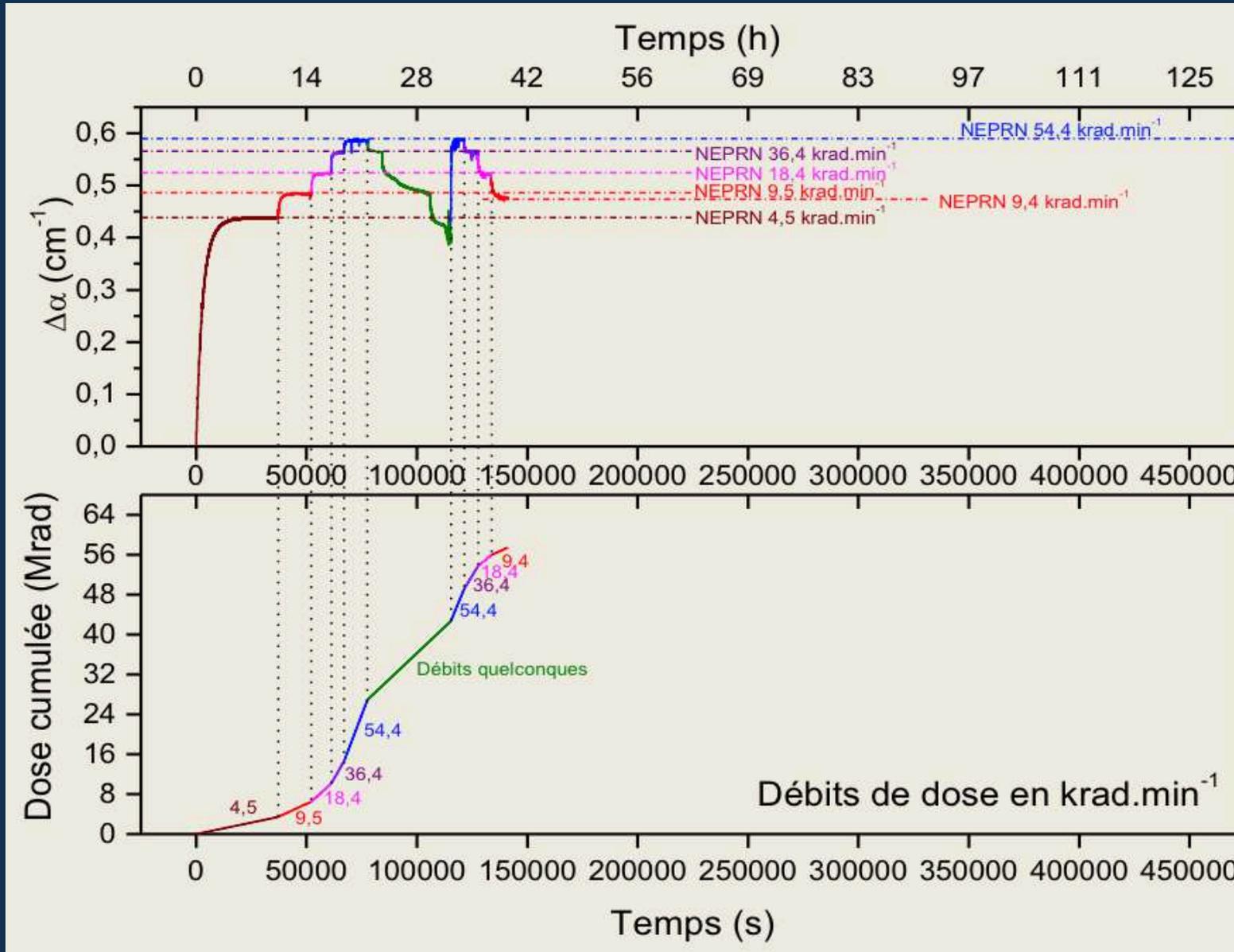
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



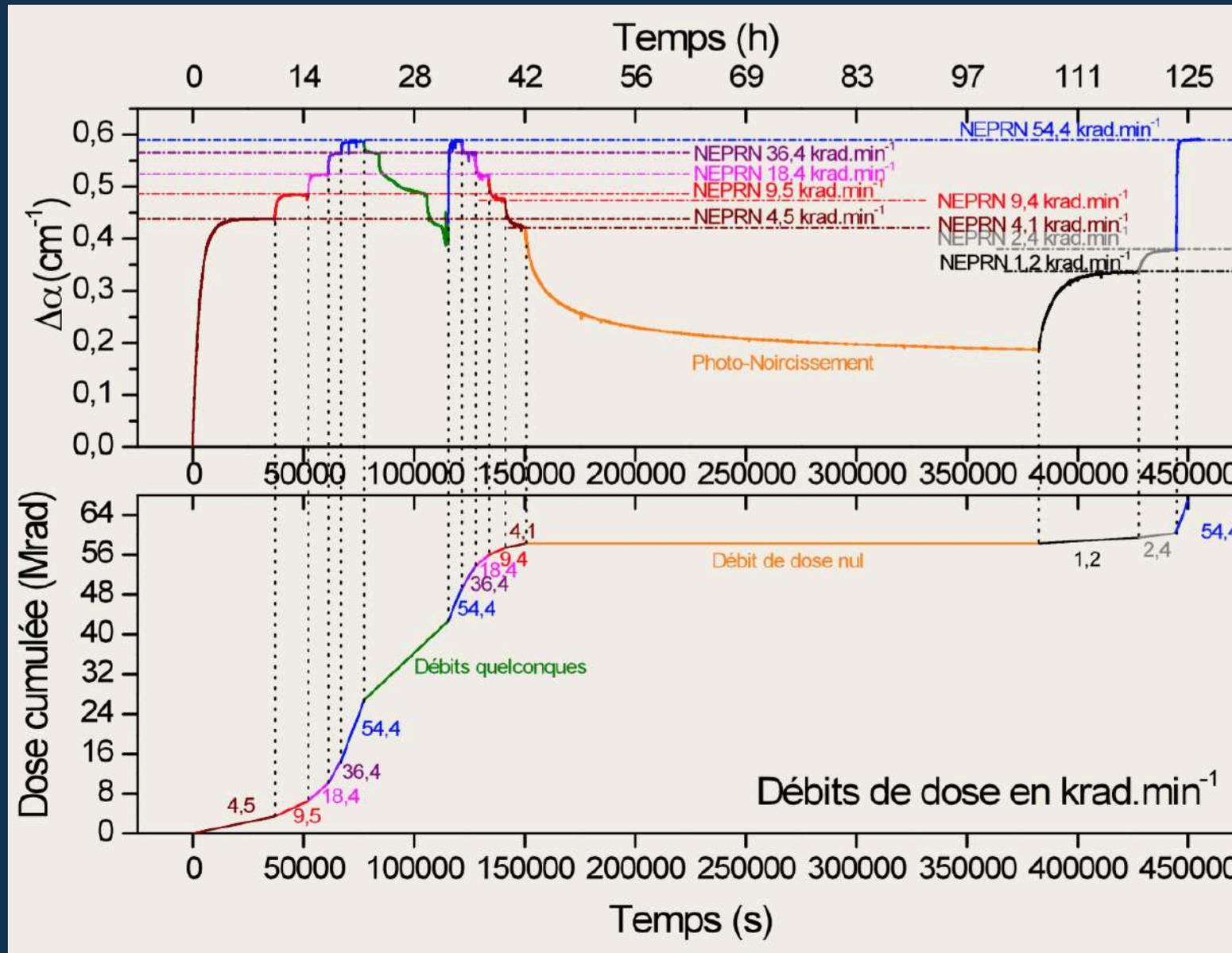
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



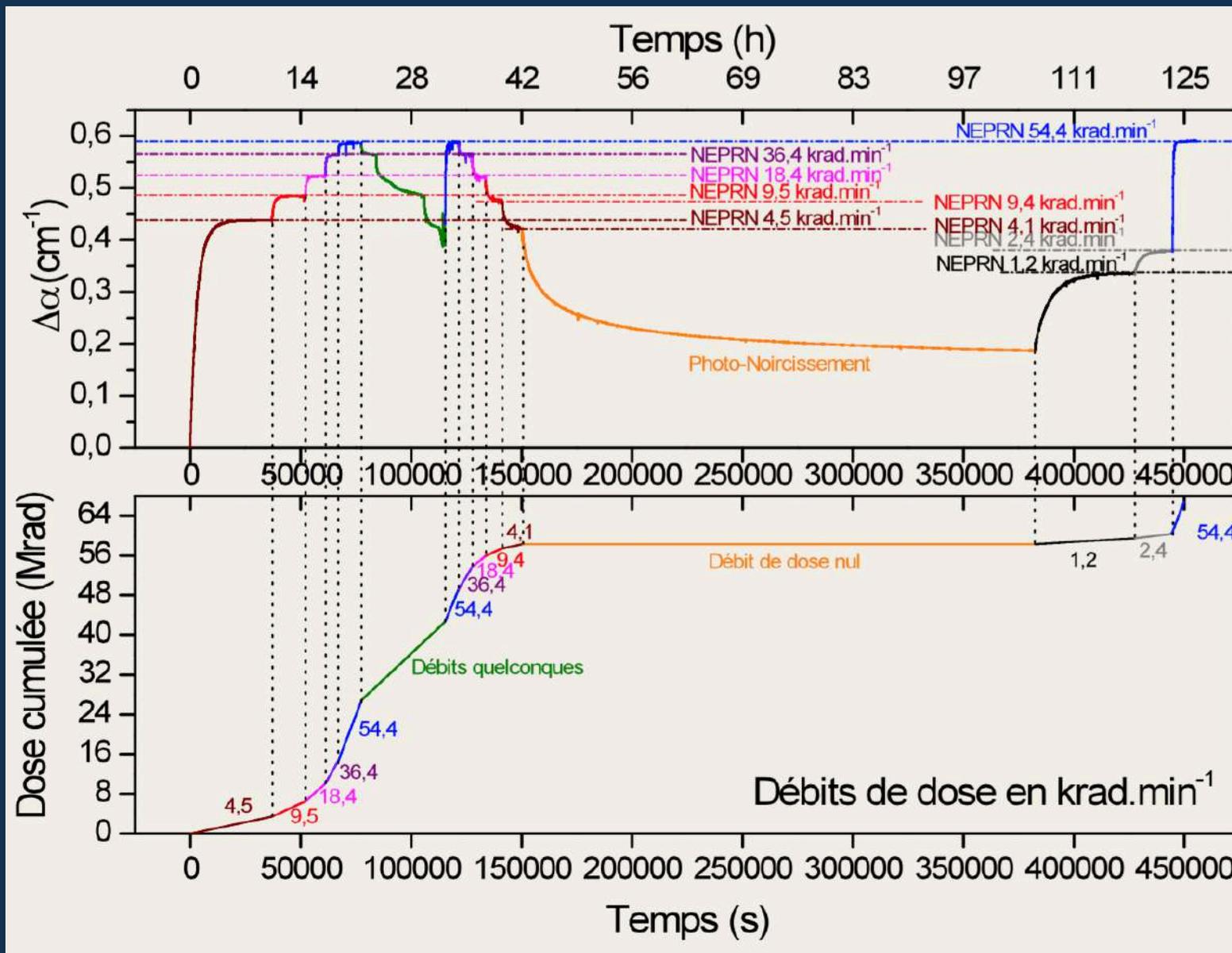
Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de débit de dose



Conditions

- Manip continue > 130 h
- Echantillon unique (K10) cumulant une dose totale importante (> 640 kGy)
- Pin constante (368 mW)
- Débit « commuté » une fois NEPRN atteint

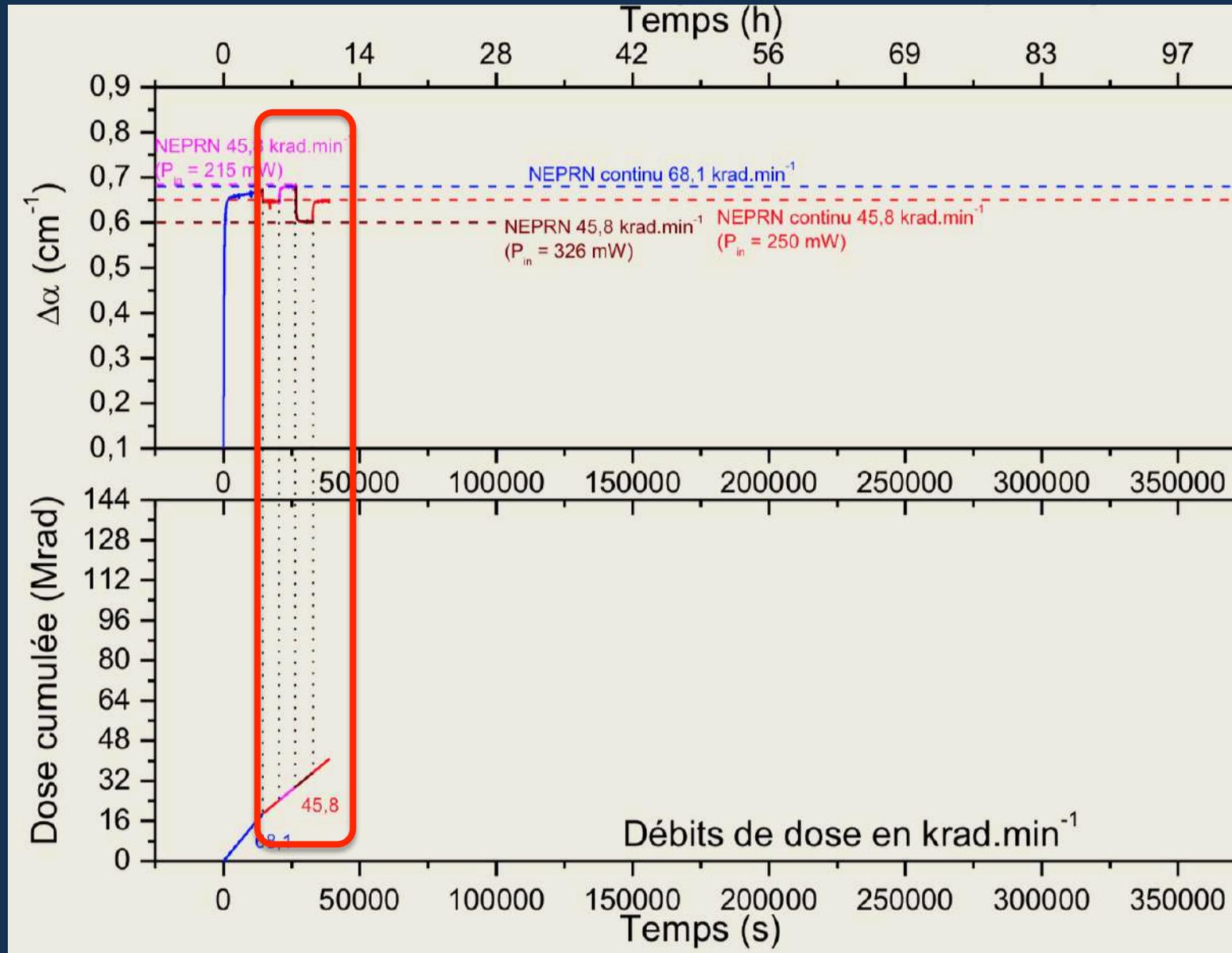
Conclusions

- L'ARI peut diminuer sous dose croissante !!
- NEPRN réversibles, indépendants de la dose et du niveau d'ARI initial
- NEPRN déterminés par le débit de dose à Pin fixe

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• PRN : Commutation de puissance de pompe



Conditions

- Manip continue
- Echantillon unique (K10)
- Débit constant ($45,8 \text{ krad min}^{-1}$)
- P_{in} « commutée » une fois NEPRN atteint

Conclusions

- NEPRN uniquement déterminés par P_{in} à débit fixe

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• En résumé...

Etats d'équilibre (NEPRN) locaux réversibles

- Déterminés par le seul couple (D' , P_{in})
- NEPRN augmente si D' augmente (radio-noircissement plus rapide / PB)
- NEPRN diminue si P_{in} augmente (PB plus efficace)

Comportement identique pour fibre COTS Yb1200

- Pourtant, Yb1200 de composition plus complexe (au moins Ce...)
- Propriétés générales répondant de mécanismes « fondamentaux »

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• En résumé...

Etats d'équilibre (NEPRN) locaux réversibles

- Déterminés par le seul couple (D' , P_{in})
- NEPRN augmente si D' augmente (radio-noircissement plus rapide / PB)
- NEPRN diminue si P_{in} augmente (PB plus efficace)

Comportement identique pour fibre COTS Yb1200

- Pourtant, Yb1200 de composition plus complexe (au moins Ce...)
- Propriétés générales répondant de mécanismes « fondamentaux »

Quel enseignement pour les applications « bas débits » ?

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• Applications bas débits (spatiales)

À débit « suffisamment bas », sous un certain **débit critique**

- Noircissement radio-induit très lent / PN ou PB
- Pompe « domine », tout se passe comme s'il n'y avait que le PN/PB
- NEPRN → NEPN

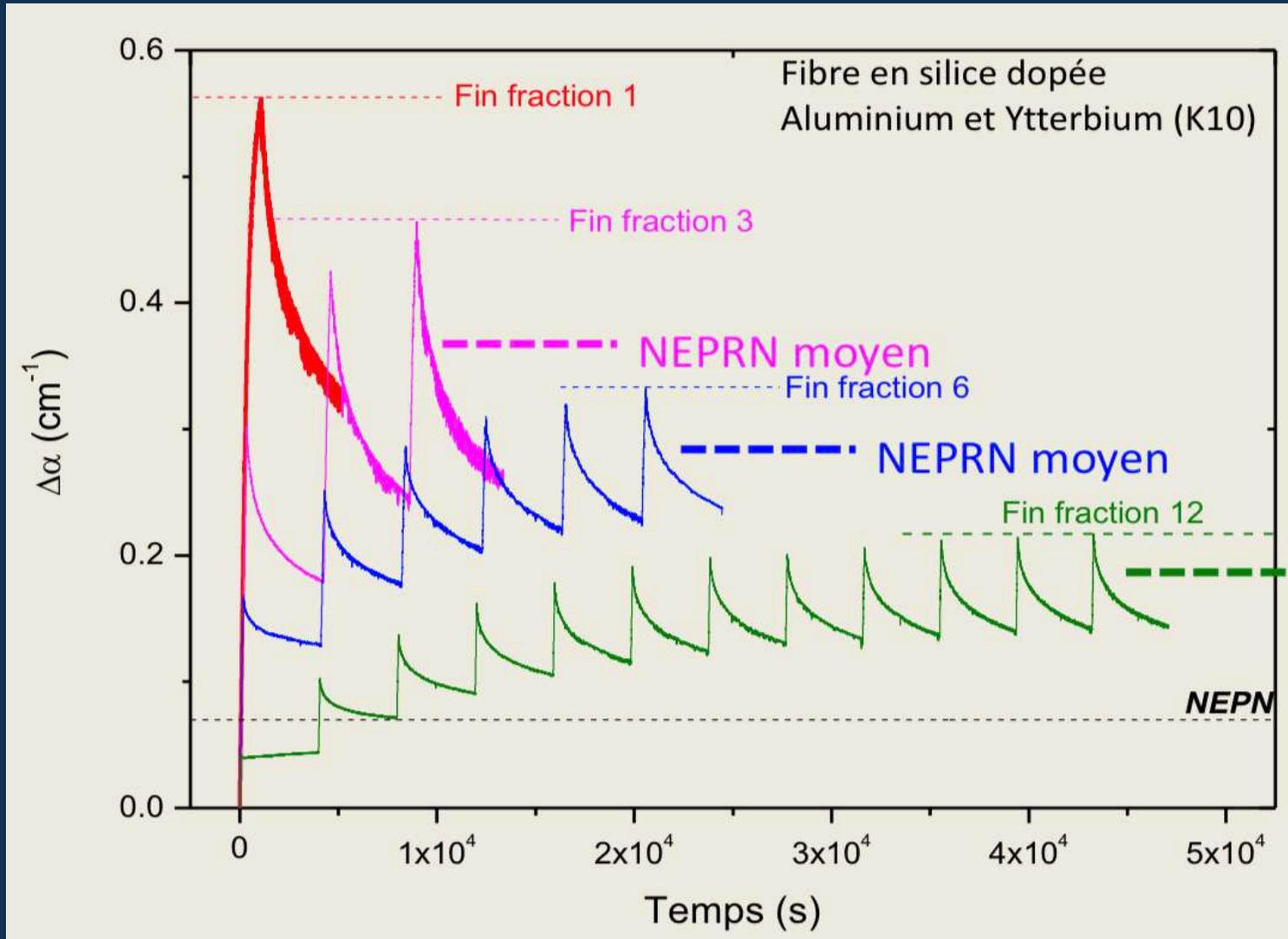
Point difficile à montrer directement

- Très bas débits = temps expérimental prohibitif (≈ 15 ans !)
- Illustration avec des « irradiations fractionnées »

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• Irradiations fractionnées



Conditions

- Fibre Yb LPMC (K10)
- Dose 9 kGy
- Délivrée en 1, 3, 6 et 12 fractions à 43 krad min^{-1}
- PB (pas de RX) de 75 min entre chaque fraction
- $P_{\text{in}} = 250$ mW

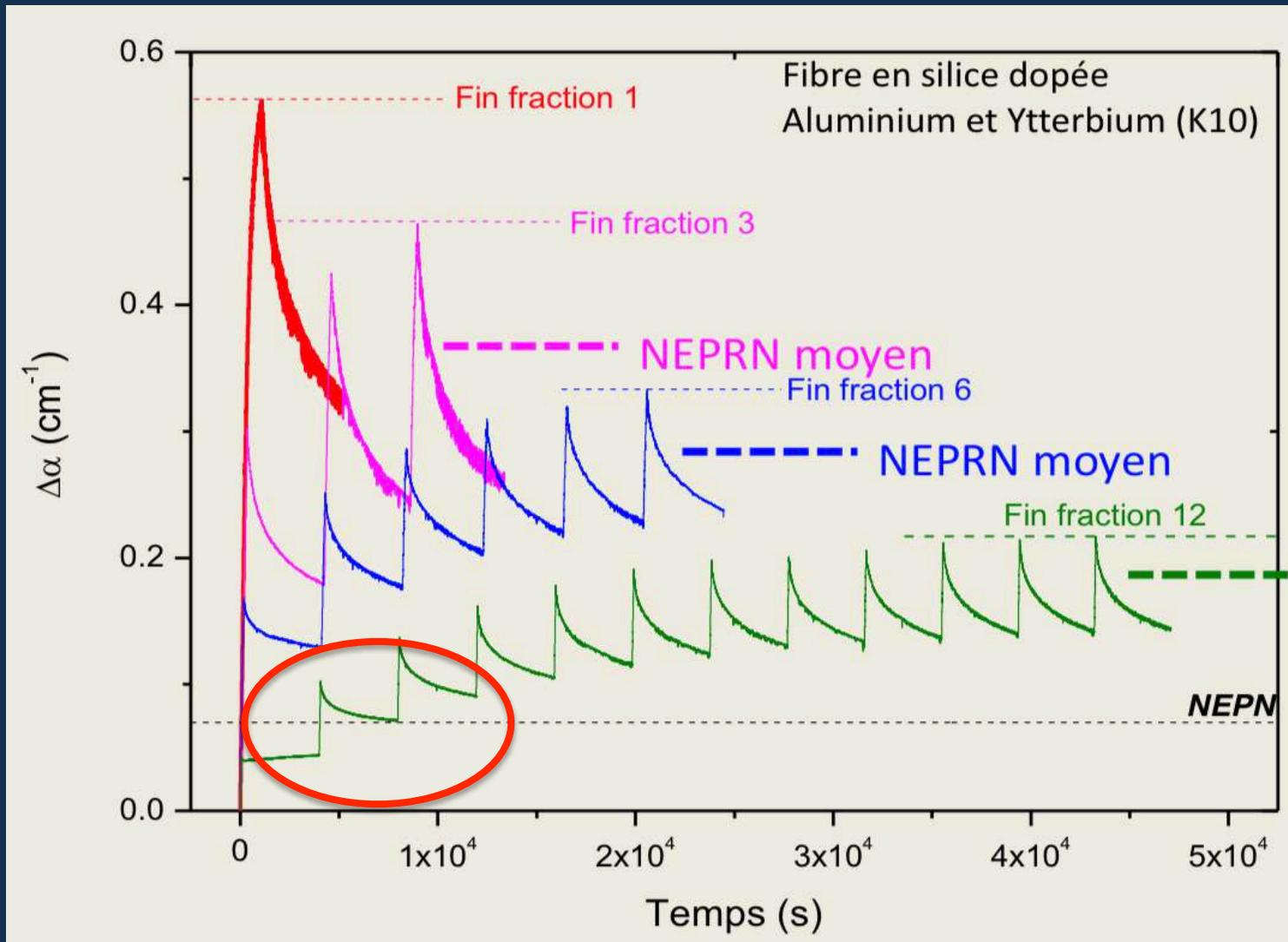
→ Diminution débit moyen :

- 1 fraction → 43 krad min^{-1}
- 3 fractions → 5,3 krad min^{-1}
- 6 fractions → 2,3 krad min^{-1}
- 12 fractions → 1,1 krad min^{-1}

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• Irradiations fractionnées



Résultats

- NEPRN moyen diminue avec le débit moyen

- 12 fractions : la première fraction n'est pas assez « dosée » pour amener l'ARI au-dessus du NEPN → la pompe noircit la fibre...

Irradiation bas débit :

- ARI se développe lentement/PB

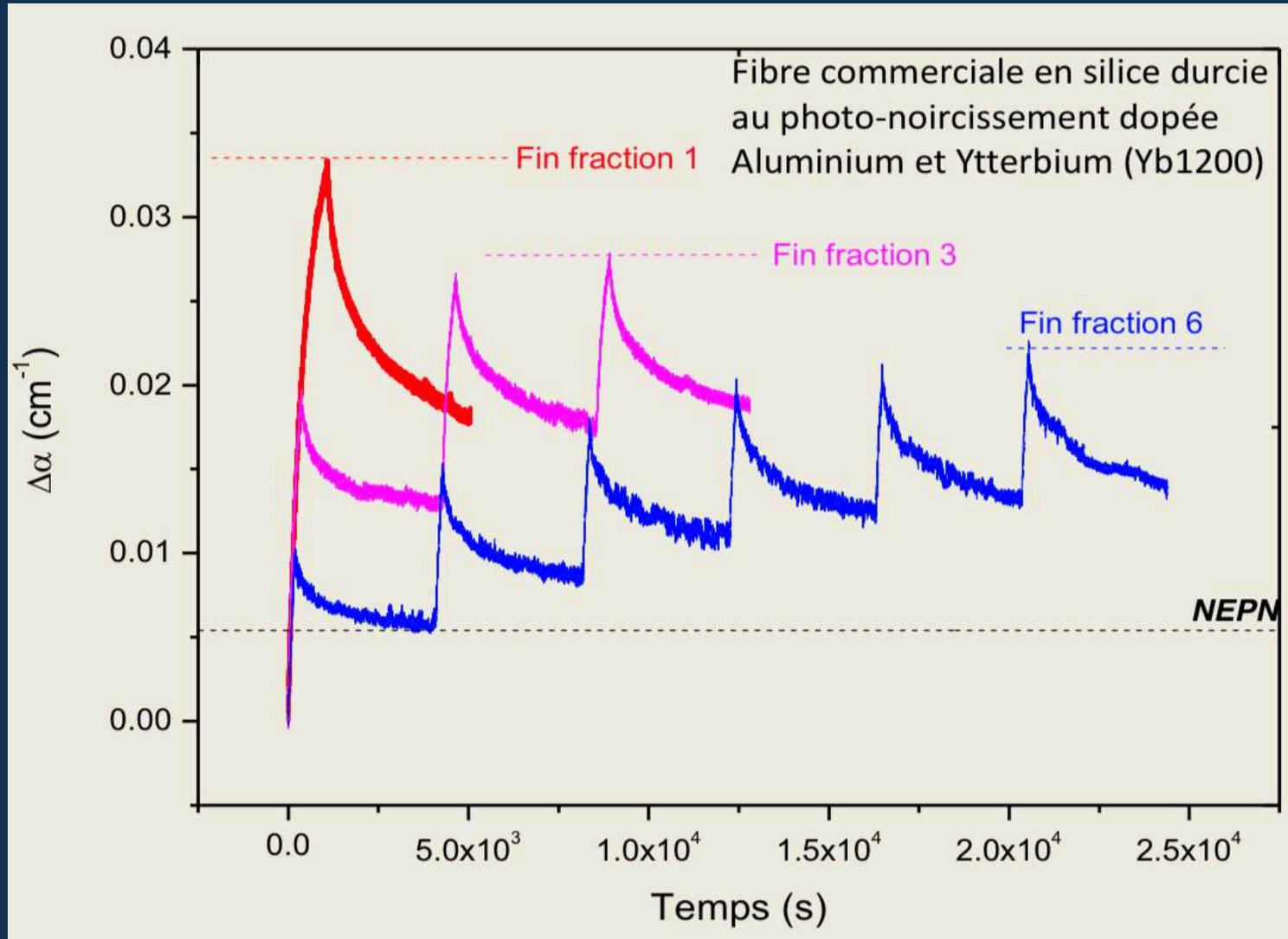
- La pompe dégrade vers NEPN si $\text{ARI} < \text{NEPN}$, mais elle a le temps de ramener au NEPN dès que ARI dépasse le NEPN

- A la limite, $\text{NEPRN} = \text{NEPN}$

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

- Irradiations fractionnées



Même conditions expérimentales pour fibre commerciale **Liekki Yb1200**

Comportement identique

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• Conclusions pour applications bas débits (spatiales)

À débit « suffisamment bas »

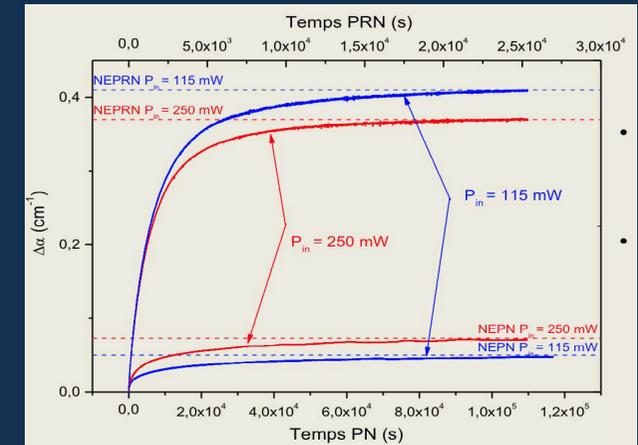
NEPRN \rightarrow NEPN sous un certain débit critique

P_{in} augmente \rightarrow NEPN \nearrow et NEPRN \searrow

NEPRN plus proche de NEPN à forte P_{in}

\rightarrow NEPRN = NEPN pour un débit plus élevé

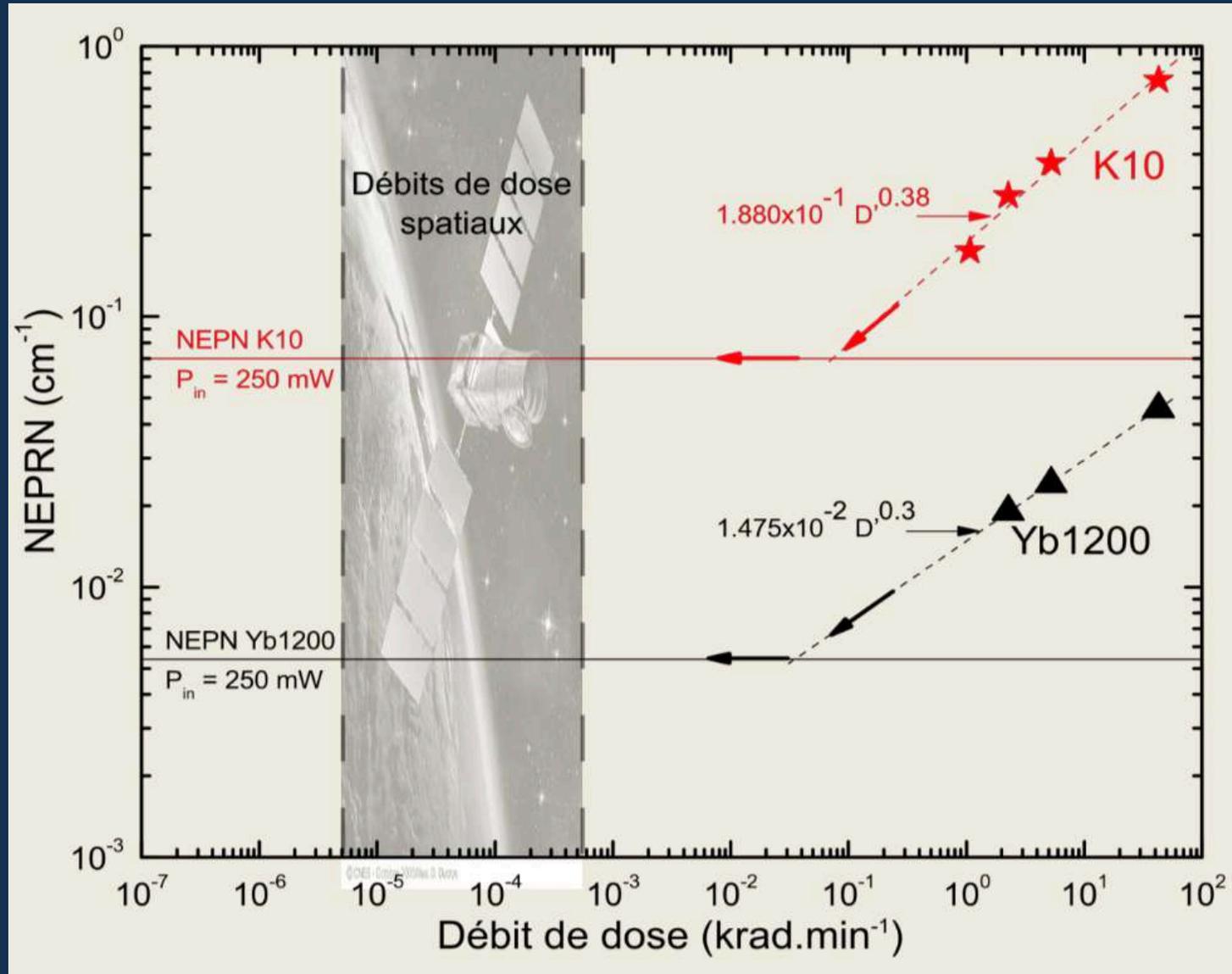
\rightarrow Débit de dose critique augmente avec P_{in}



1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• Illustration, extrapolation bas débit



Données

- D'après irradi. Fractionnées
- $P_{in} = 250$ mW

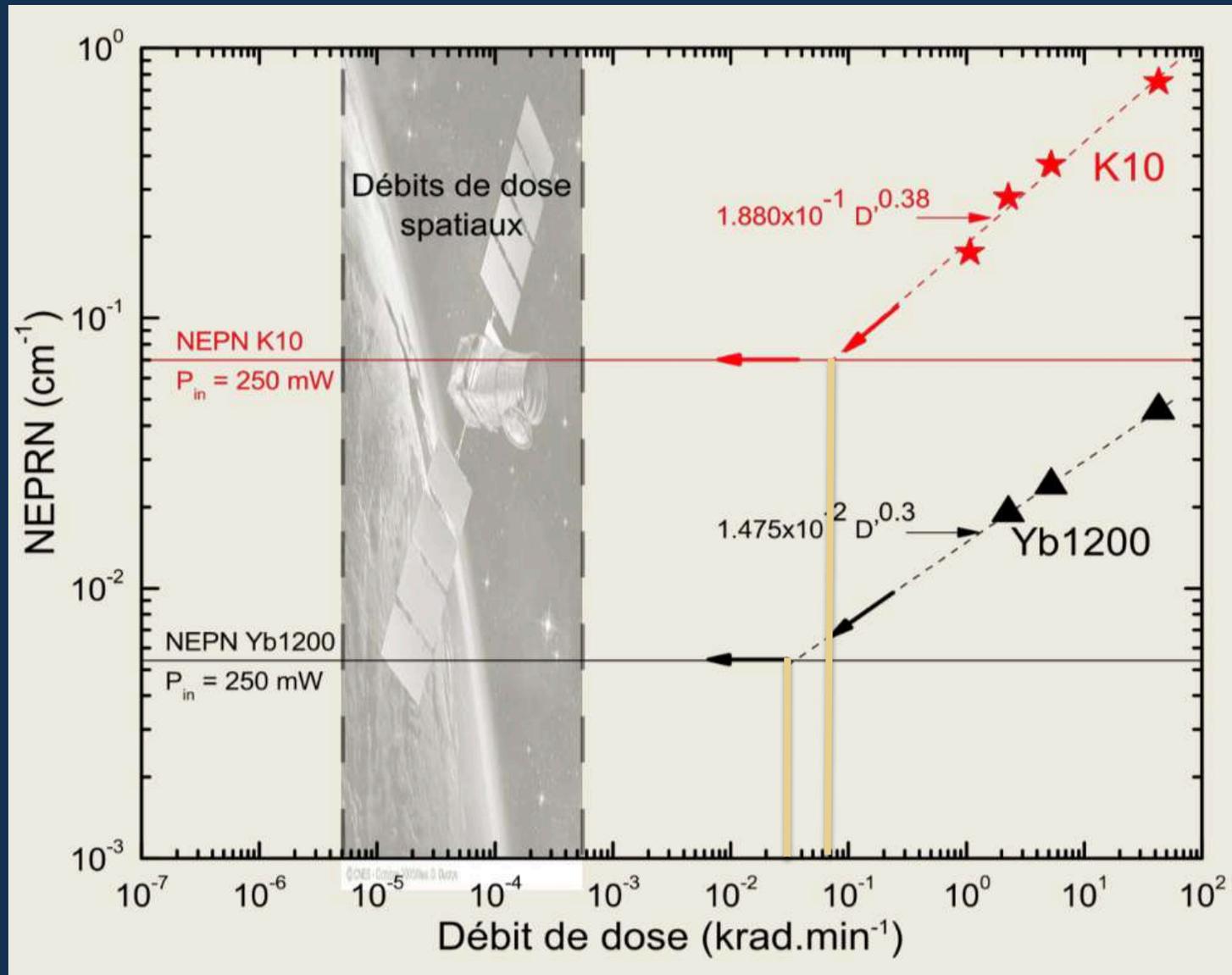
Résultats :

- Yb1200 plus résistante que la fibre « maison » K10 (Yb1200 fortement dopée Ce)

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 2 : pompe + RX sur fibres Yb

• Illustration, extrapolation bas débit



Données

- D'après irradi. Fractionnées
- $P_{in} = 250 \text{ mW}$

Résultats :

- Yb1200 plus résistante que la fibre « maison » K10 (Yb1200 fortement dopée Ce)
- Débits critiques extrapolés : $3-7 \times 10^{-2} \text{ krad}\cdot\text{min}^{-1}$
- En pratique, les fibres ne se dégraderont pas plus que leur PN dans l'espace... (2,3 dB m^{-1} pour Yb1200 @250 mW)

Une fibre photo-résistante pourrait faire l'affaire dans l'espace...

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

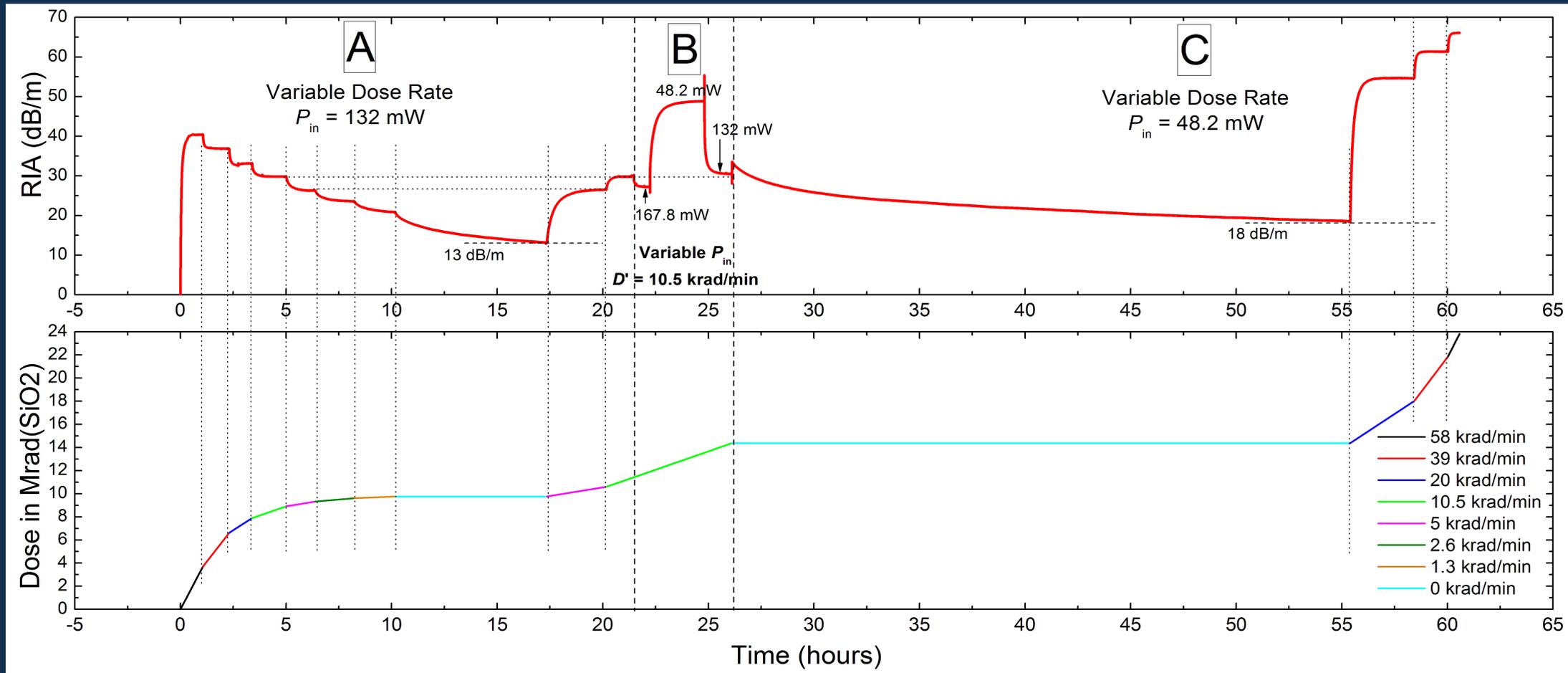
Expériences de commutation de débit ou de puissance pompe

On ne parle plus de PRN... car pas de PN sur fibres Er

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

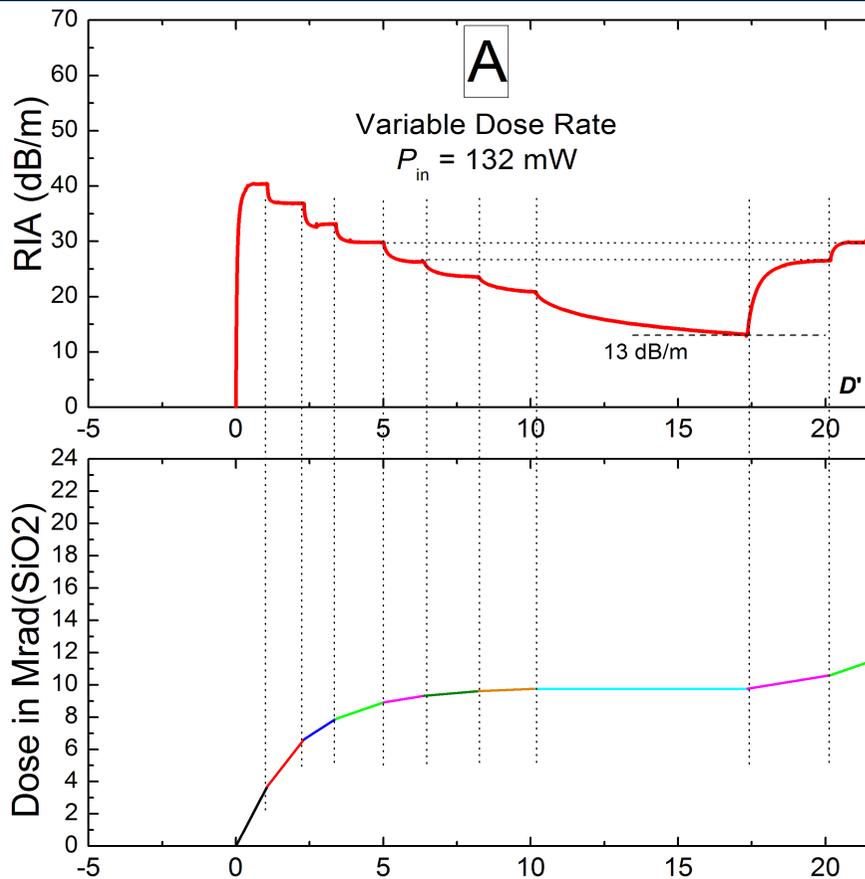
- Fibre Er Commerciale, Er80, $L = 2$ cm



1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

• Fibre Er Commerciale, Er80, $L = 2$ cm



Zone A

Puissance pompe constante $P_{in} = 132$ mW,

Débit de dose variable :

$D' = 58, 39, 20, 10.5, 5, 2.6, 1.3$ and 0 krad min^{-1}

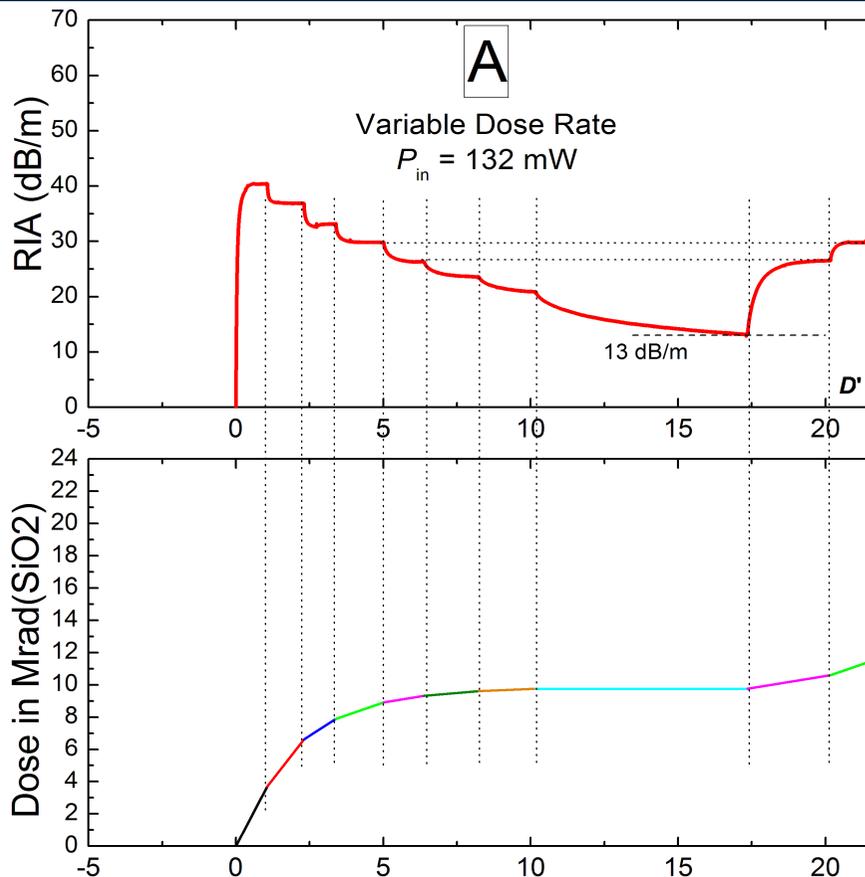
Chaque débit de dose maintenu jusqu'à équilibre

- Existence d'états d'équilibre de la dégradation (EED)
- EED = NEPRN des fibres Yb
- Photo-blanchiment compense radio-noircissement

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

• Fibre Er Commerciale, Er80, $L = 2$ cm



Zone A

Puissance pompe constante $P_{in} = 132$ mW,

Débit de dose variable :

$D' = 58, 39, 20, 10.5, 5, 2.6, 1.3$ and 0 krad min^{-1}

Chaque débit de dose maintenu jusqu'à équilibre

→ Existence d'états d'équilibre de la dégradation (EED)

→ EED = NEPRN des fibres Yb

→ Photo-blanchiment compense radio-noircissement

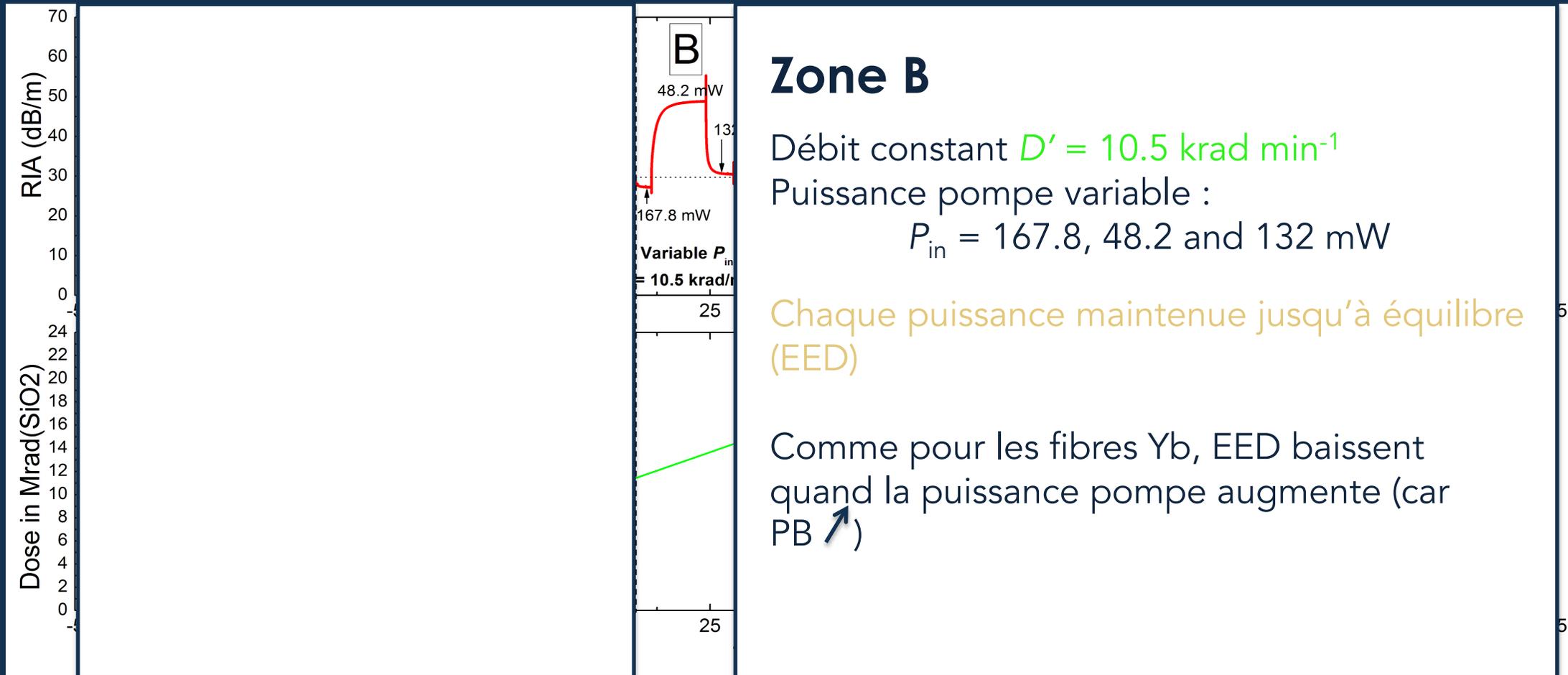
EED baissent avec débit de dose

Là encore, la dégradation (ARI) diminue alors que la dose cumulée augmente

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

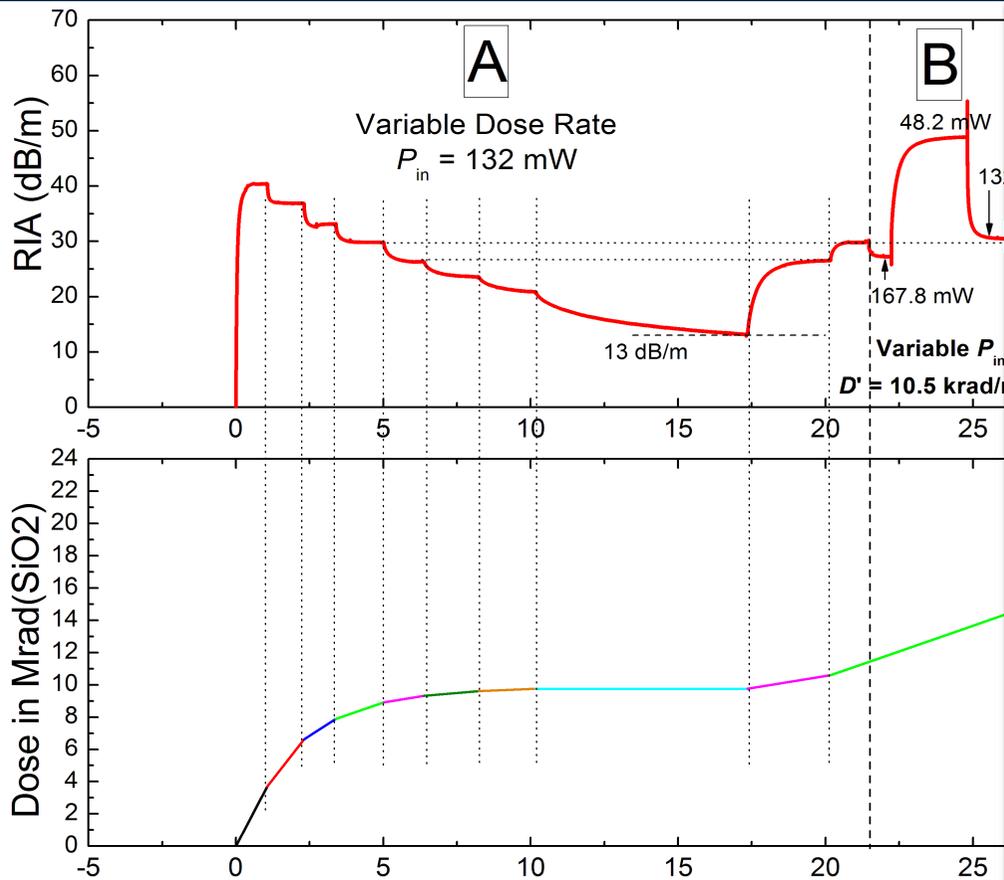
- Fibre Er Commerciale, Er80, $L = 2$ cm



1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

- Fibre Er Commerciale, Er80, $L = 2$ cm



Zone A + Zone B

Chaque fois qu'un même couple (P_{in}, D') est appliqué, l'ARI retourne au même état d'équilibre

→ EED entièrement déterminés par le couple (P_{in}, D') , quelle que soit la dose totale et la niveau d'ARI initial

Jusque là, tout se passe comme si fibres Er étaient des fibres Yb avec PN nul...

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

• Fibre Er Commerciale, Er80, $L = 2$ cm

Zone C

Puissance pompe constante

$$P_{in} = 48.2 \text{ mW},$$

Débits croissants

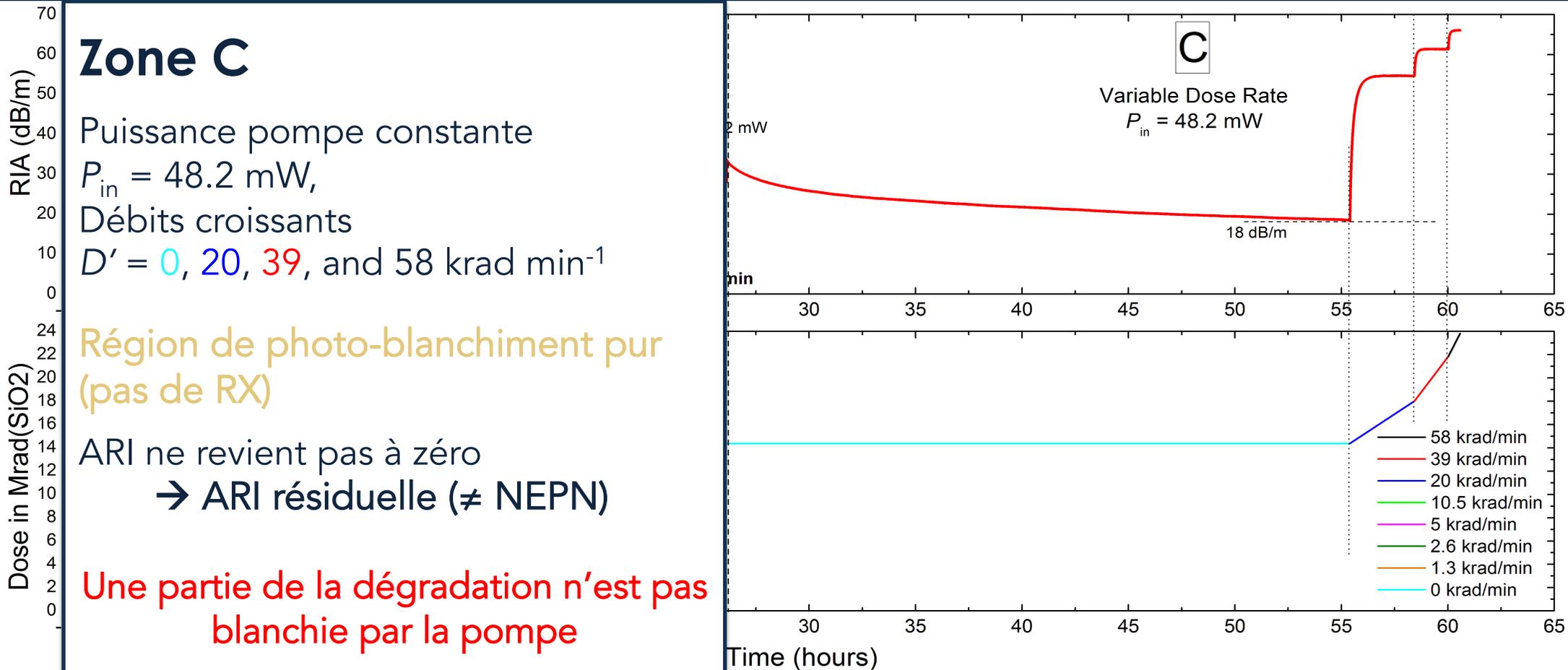
$$D' = 0, 20, 39, \text{ and } 58 \text{ krad min}^{-1}$$

Région de photo-blanchiment pur
(pas de RX)

ARI ne revient pas à zéro

→ ARI résiduelle (\neq NEPN)

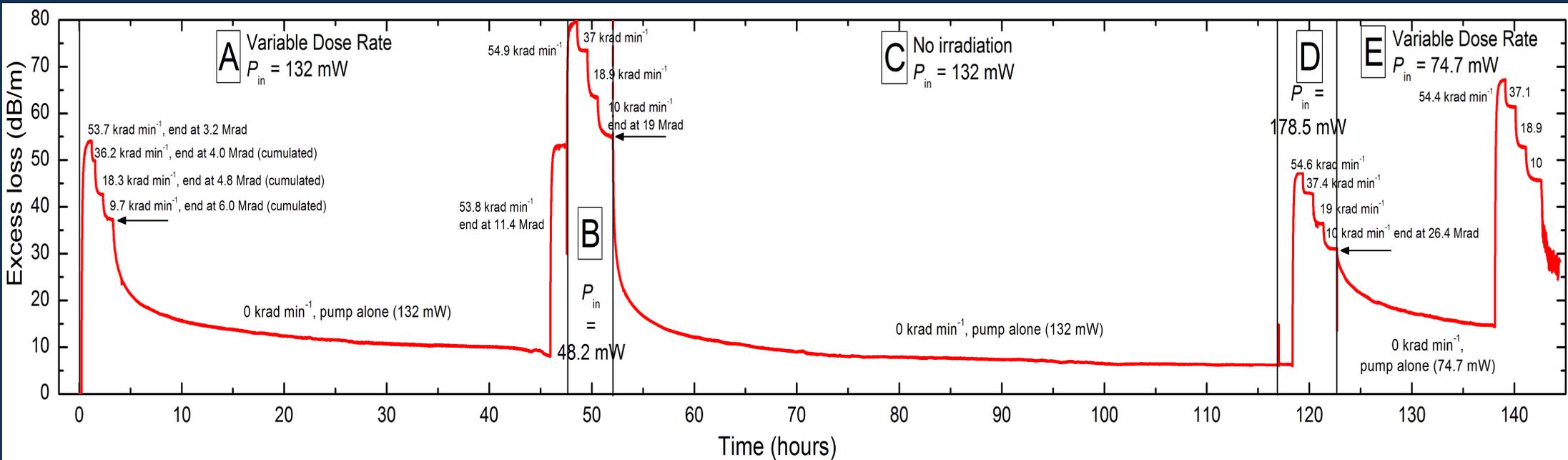
Une partie de la dégradation n'est pas
blanchie par la pompe



1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

- Fibre Er Commerciale, Er80, $L = 0,5$ cm

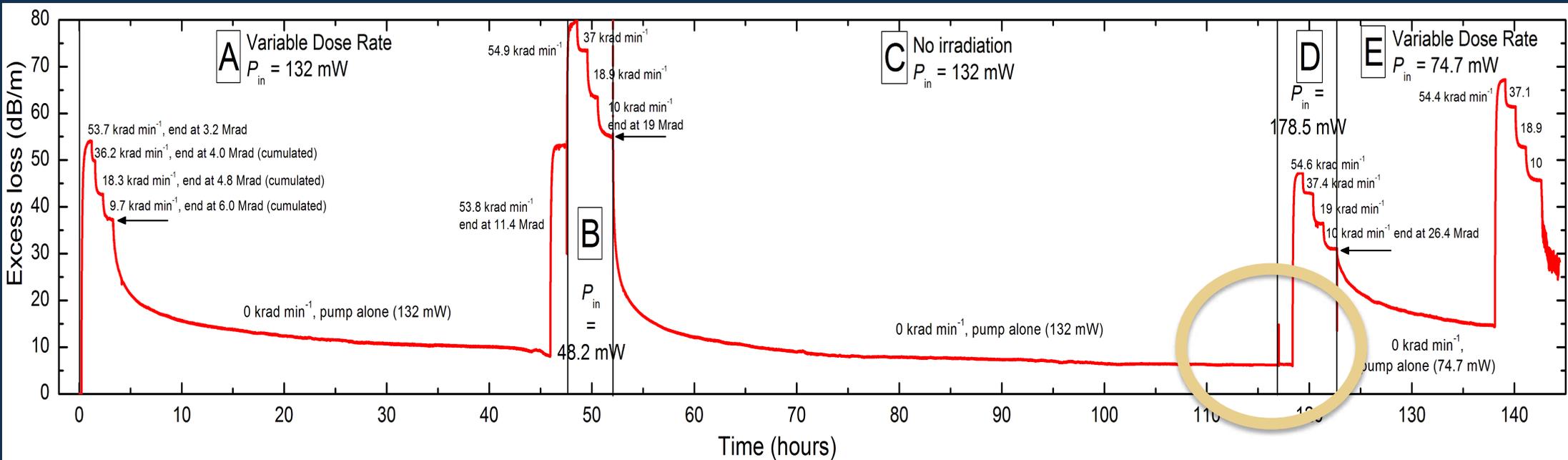


- Même comportement que pour $L = 2$ cm (pas d'effet de longueur)
 - Existence d'états d'équilibre de l'ARI déterminés par (P_{in}, D) + ARI résiduelle

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

- Fibre Er Commerciale, Er80, $L = 0,5$ cm



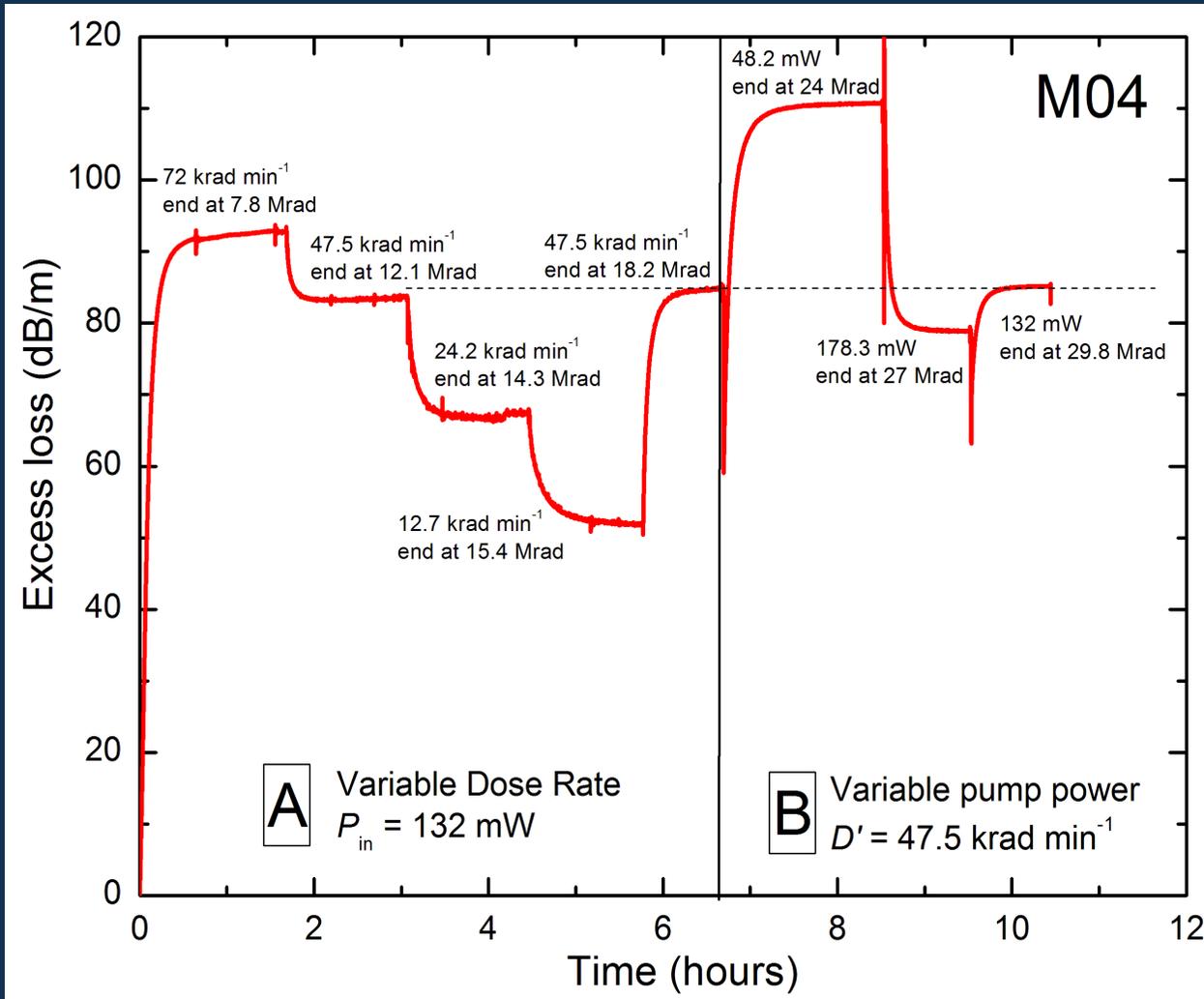
- Même comportement que pour $L = 2$ cm (pas d'effet de longueur)
 - Existence d'états d'équilibre de l'ARI déterminés par (P_{in}, D) + ARI résiduelle
- ARI résiduelle après photo-blanchiment pur :
 - Une fois atteinte, ne diminue plus lorsque la puissance de pompe est augmentée

**Le puissance n'impacte pas l'ARI résiduelle (mais éventuellement le PB transitoire).
Une partie des centres colorés n'est pas « guérie » par la pompe...**

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

• Fibre Er LPMC, M04, L = 2 cm



• Mêmes comportements que Er80

- Existence d'états d'équilibre déterminés par le couple (P_{in} , D')

- Etats équilibre ↗ quand P_{in} ↘ et/ou D' ↗

- ...

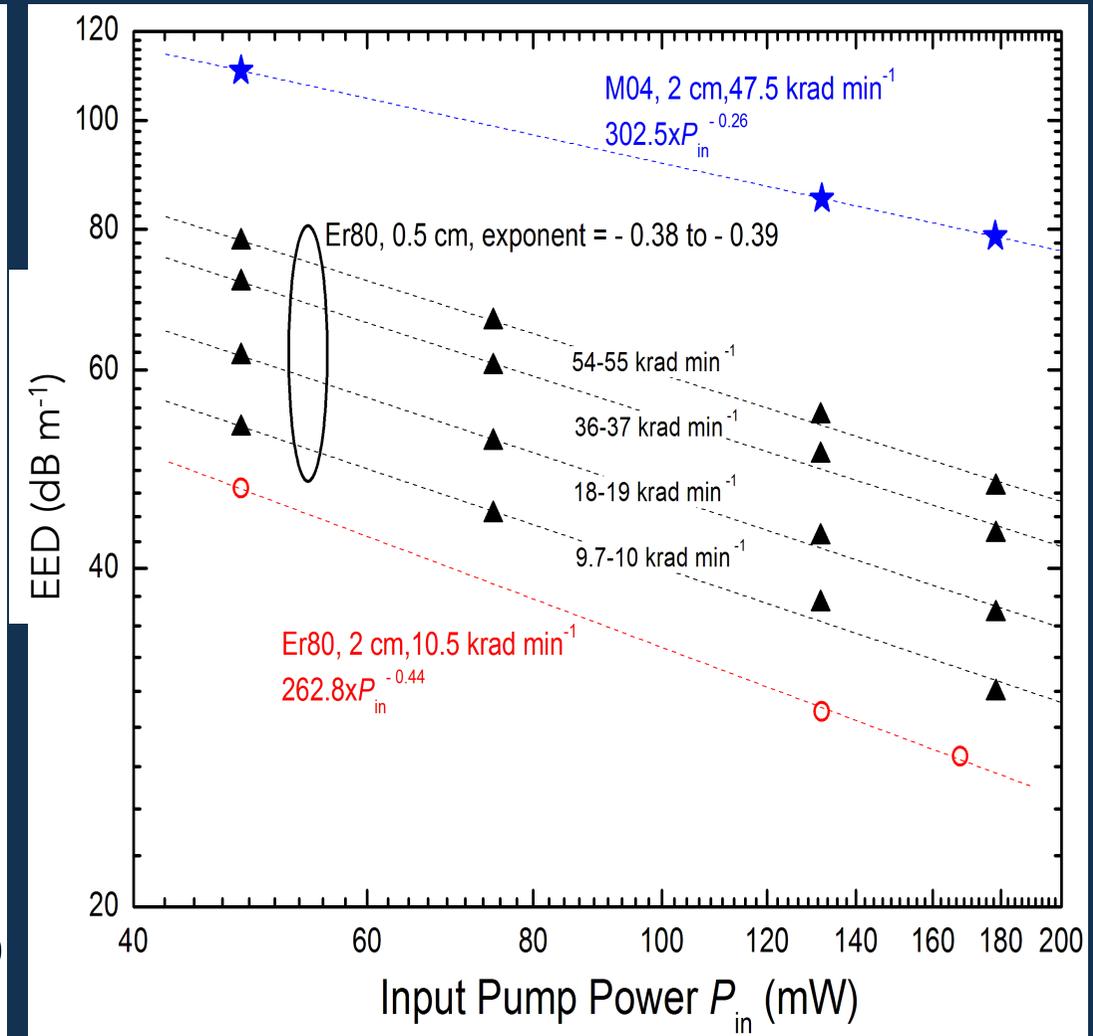
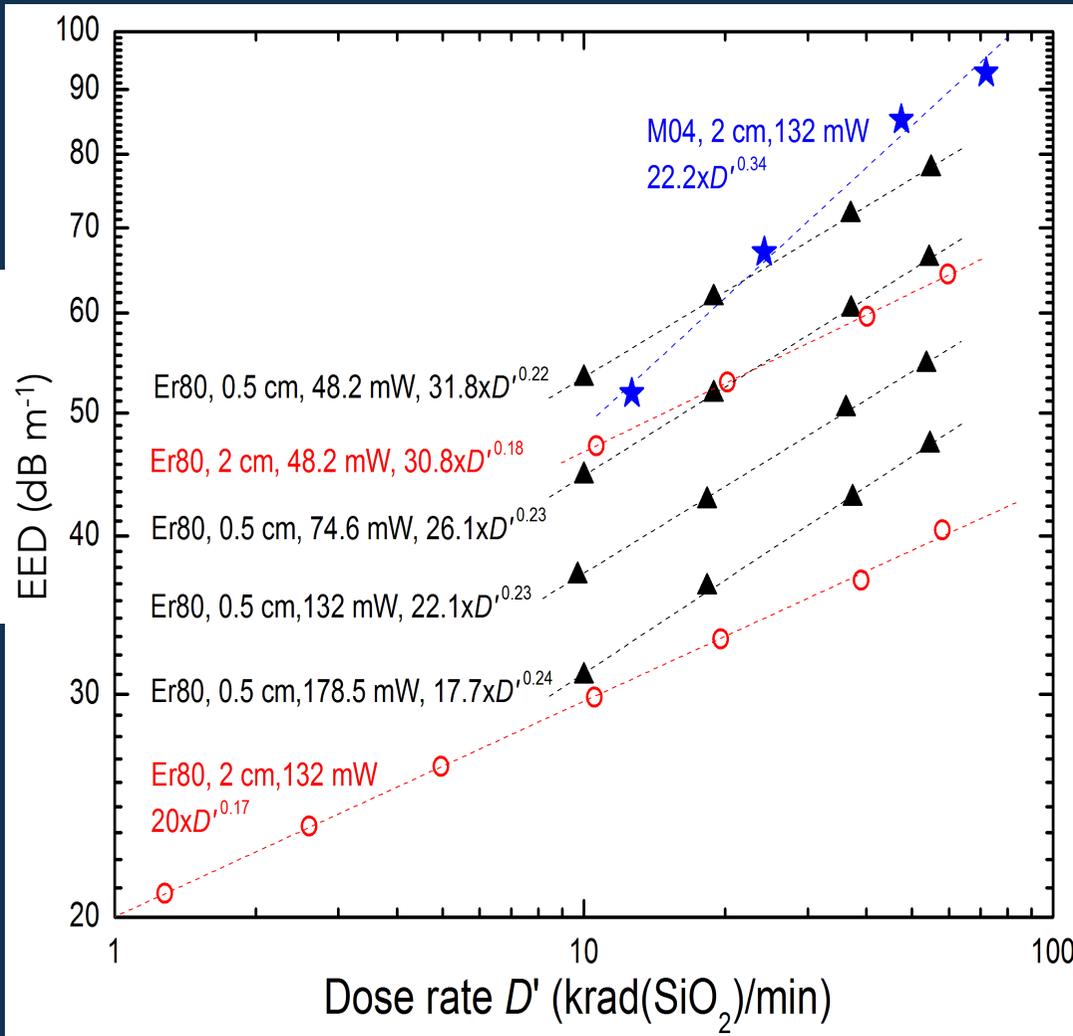
• Fibres fabriquées dans différents endroits, sur différents dispositifs (industriel vs recherche), avec différents co-dopants...

→ Les propriétés mises en évidence proviennent bien de mécanismes communs, donc suffisamment fondamentaux

1 – Caractérisation expérimentale

Résultats 3 : pompe + RX sur fibres Er

• Dépendance des dégradations d'équilibre en D' et P_{in}



EED varie en $(D'^{0.17-0.34}/P_{in}^{0.26-0.44})$, similaire au cas des fibres Yb

2 – Modèles physiques locaux

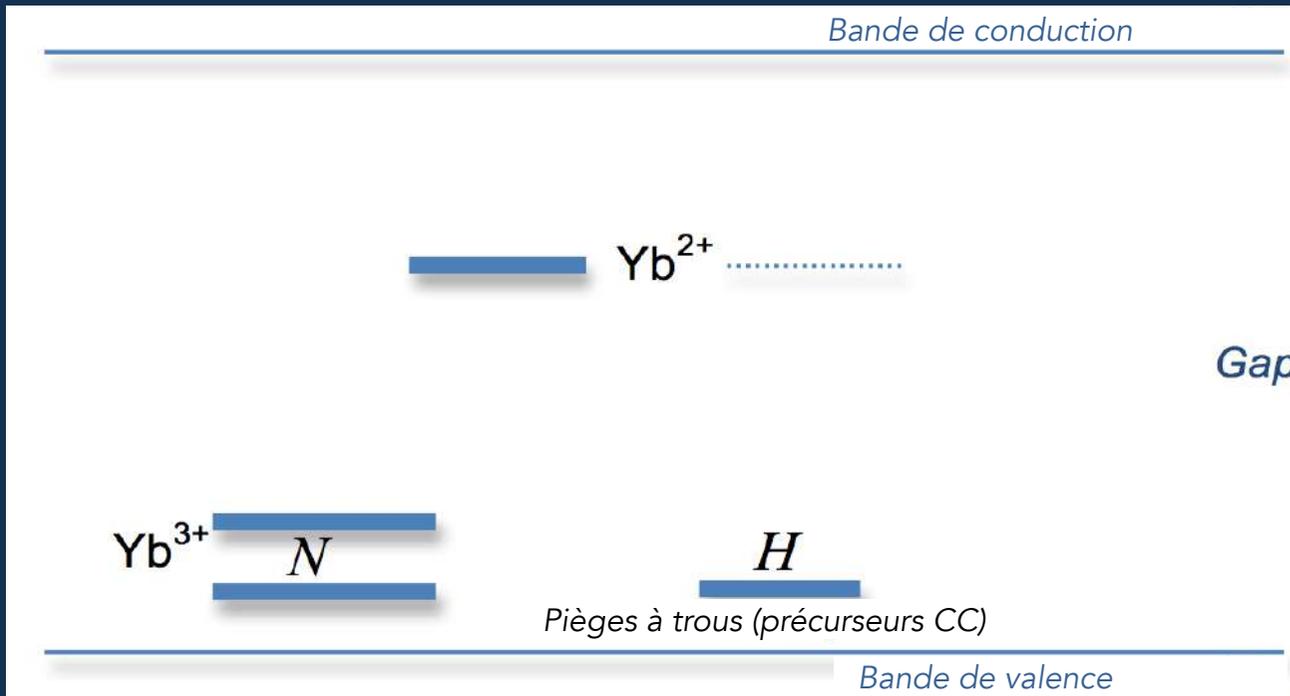
Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

Présentation du modèle local

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

- **Modèle de niveaux** (bases physiques antérieures)



Avant noircissement

- N ions Yb^{3+}
- $n = 0$ ions Yb^{2+} ions (ou plus...)
- H pièges à trous (précurseurs) :
 - Centres intrinsèques (ODC...)
 - Centres liés à Al
 - Centres liés à P
- Modèle minimal :
 - Type unique de piège à trou*
 - Niveau « moyen »*

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

• Modèle de niveaux (bases physiques antérieures)

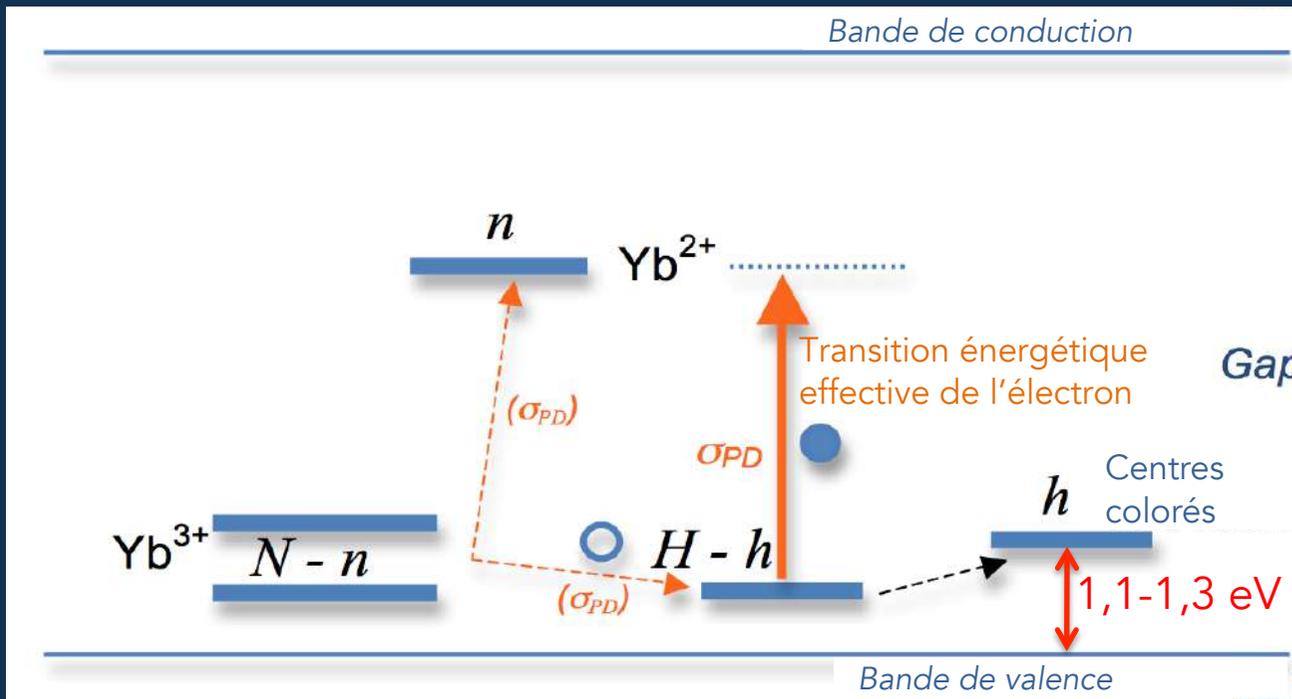


Photo-noircissement

- Transfert de charge (TC) des ions Yb^{3+} : $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+} + \text{trou piégé}$ ¹
- Désexcitation coop. de 4 ions Yb^{3+} $\approx 5 \text{ eV}$, seuil première bande TC ²
- Trous transférés vers pièges
 h centres à trous formés
= centres colorés
- Coefficient TC = σ_{PD}
- Niveau moyen : 1,1 à 1,3 eV au-dessus de BV ³
- $n = h$ ions Yb^{2+} formés

¹ D'après travaux antérieurs sur PN :

A-D. Guzman-Chávez et al., *Laser Phys. Lett.*, 4, n° 110, p 734, 2007

M. Engholm and L. Norin, *Opt. Exp.* 16, n° 2, p 1260, 2008

M. Engholm and L. Norin, *Opt. Lett.* 33, n° 11, p 1216, 2008

F. Mady et al., *Opt. Lett.* 35, n° 21, p 3541, 2010

F. Mady et al., *AIP Conf. Proc.*, 1624, p 31, 2014

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

• Modèle de niveaux (bases physiques antérieures)

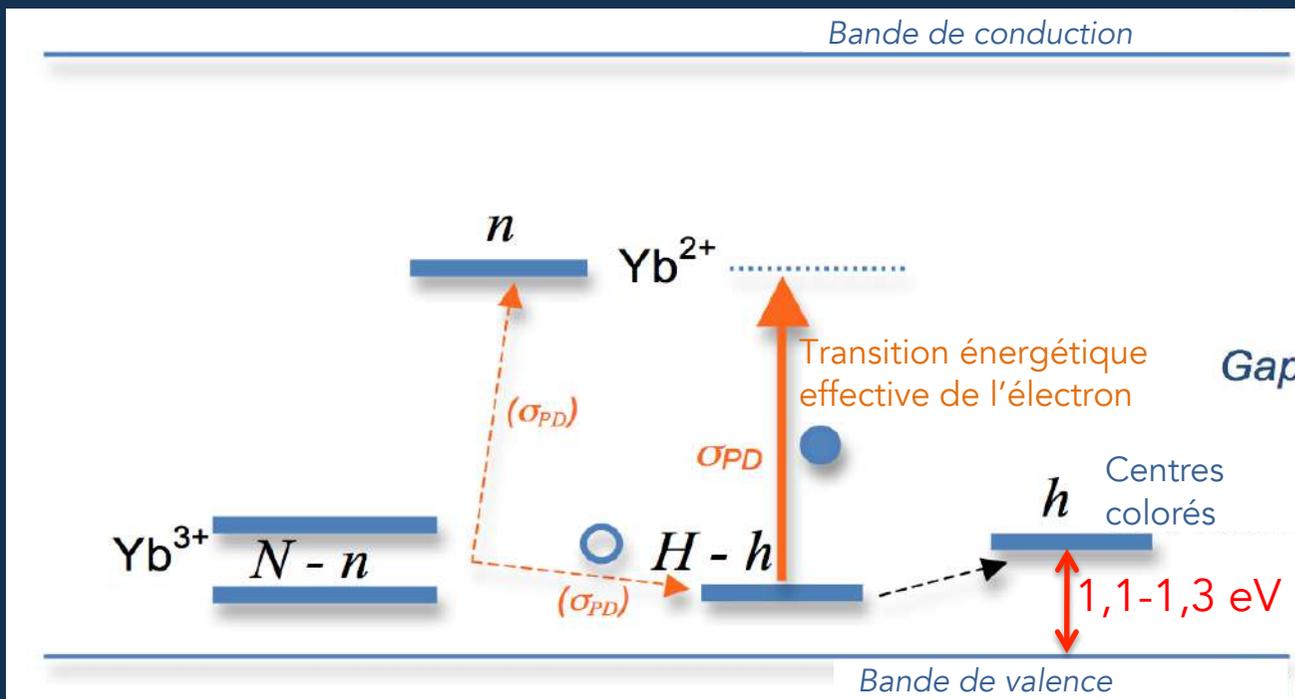


Photo-noircissement

- Transfert de charge (TC) des ions Yb^{3+} : $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Yb}^{2+} + \text{trou piégé}$ ¹
- Désexcitation coop. de 4 ions Yb^{3+} $\approx 5 \text{ eV}$, seuil première bande TC ²
- Trous transférés vers pièges
 h centres à trous formés
= centres colorés
- Coefficient TC = σ_{PD}
- Niveau moyen : 1,1 à 1,3 eV au-dessus de BV ³
- $n = h$ ions Yb^{2+} formés

² D'après travaux antérieurs (TC ions Yb^{3+} matrices alumino-silicates) :

M. Engholm et al., *Opt. Lett.* 32 n° 22, p 3352, 2007

M. Engholm and L. Norin, *Opt. Exp.* 16, n° 2, p 1260, 2008

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

• Modèle de niveaux (bases physiques antérieures)

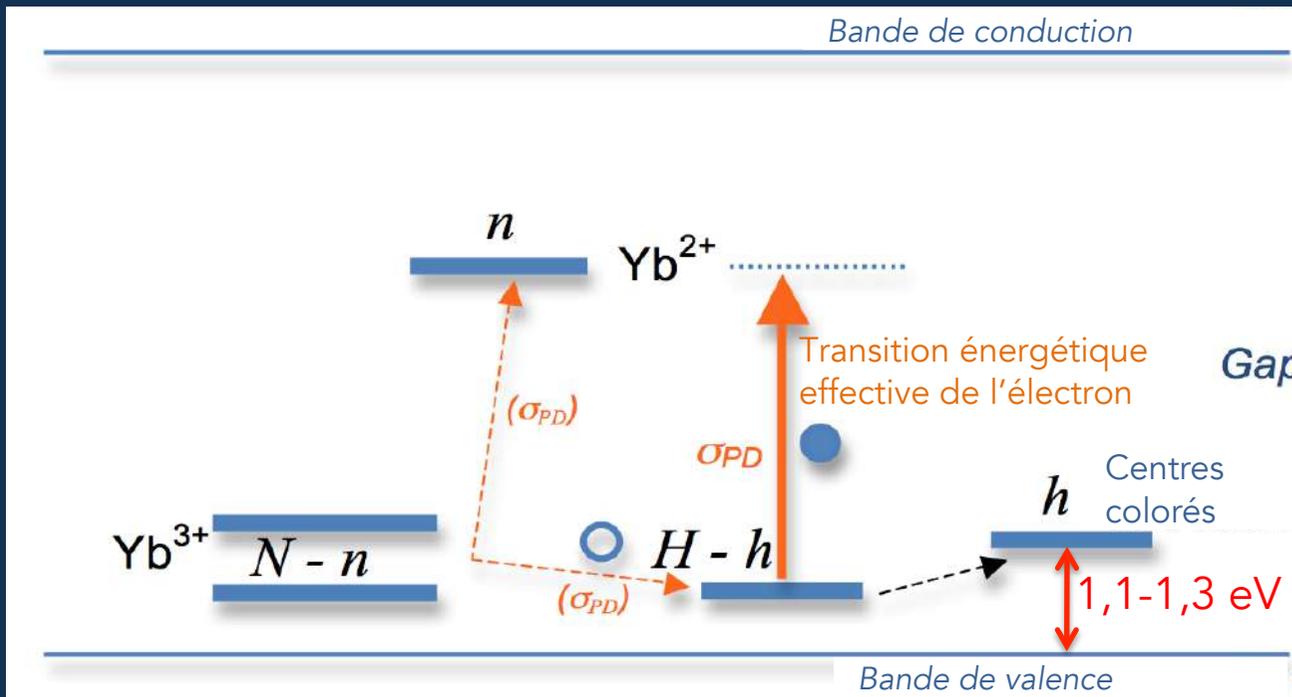


Photo-noircissement

- Transfert de charge (TC) des ions Yb³⁺ : Yb³⁺ → Yb²⁺ + trou piégé¹
- Désexcitation coop. de 4 ions Yb³⁺ ≈ 5 eV, seuil première bande TC²
- Trous transférés vers pièges
 h centres à trous formés
= centres colorés
- Coefficient TC = σ_{PD}
- Niveau moyen : 1,1 à 1,3 eV au-dessus de BV³
- $n = h$ ions Yb²⁺ formés

³ D'après travaux antérieurs sur énergies d'activation thermique de guérison du PN :

M. Leich et al., Opt. Exp. 17, n° 15, p 12588, 2009

M. J. Söderlund, Opt. Lett. 34, n° 17, p 2637, 2009

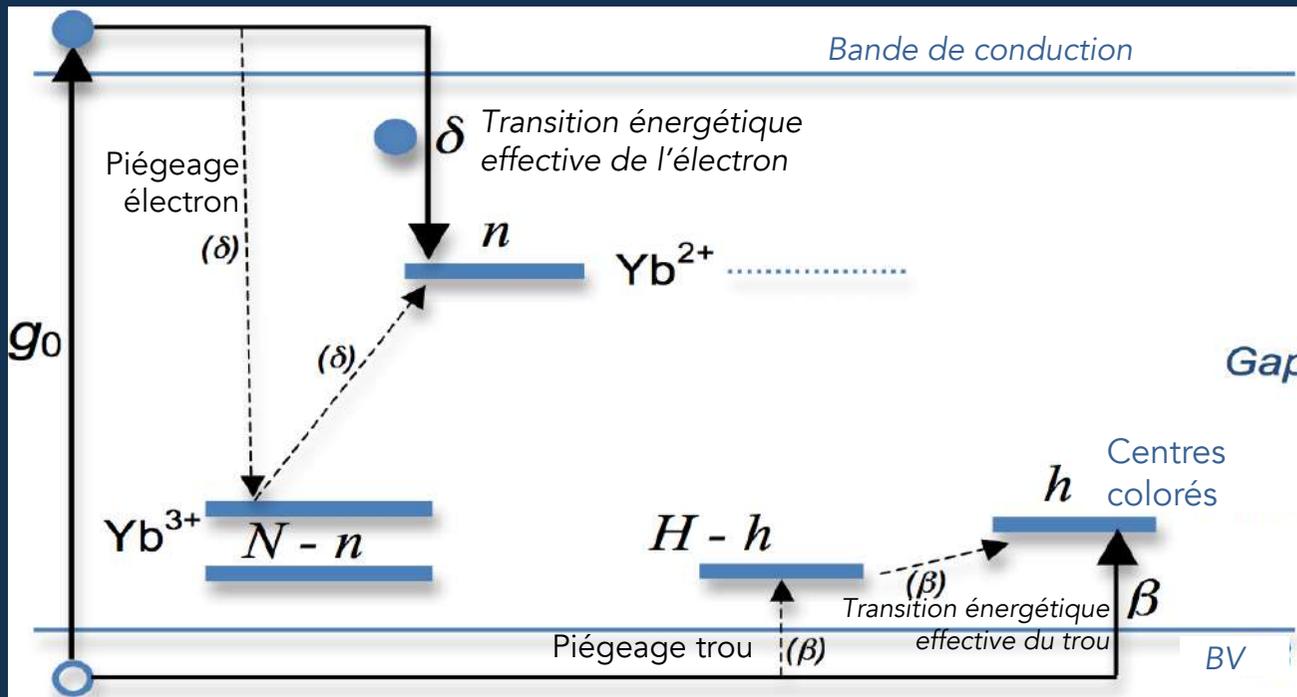
F. Mady et al., AIP Conf. Proc., 1624, p 31, 2014

J-B. Duchez, Thèse de Doctorat Université de Nice, Juin 2015

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

• Modèle de niveaux (bases physiques antérieures)



Radio-noircissement

- Excitation bande à bande
- Piégeage électrons (sur ions Yb^{3+})¹ et trous (sur précurseurs)
- g_0 = taux de génération, représente le débit de dose
- δ = coef. piégeage électrons de BC
- β = coef. piégeage trous de BV

Les pièges à trous sont les mêmes que ceux impliqués dans le PN !!¹

¹ D'après travaux antérieurs sur caractérisation du RN des fibres Yb :

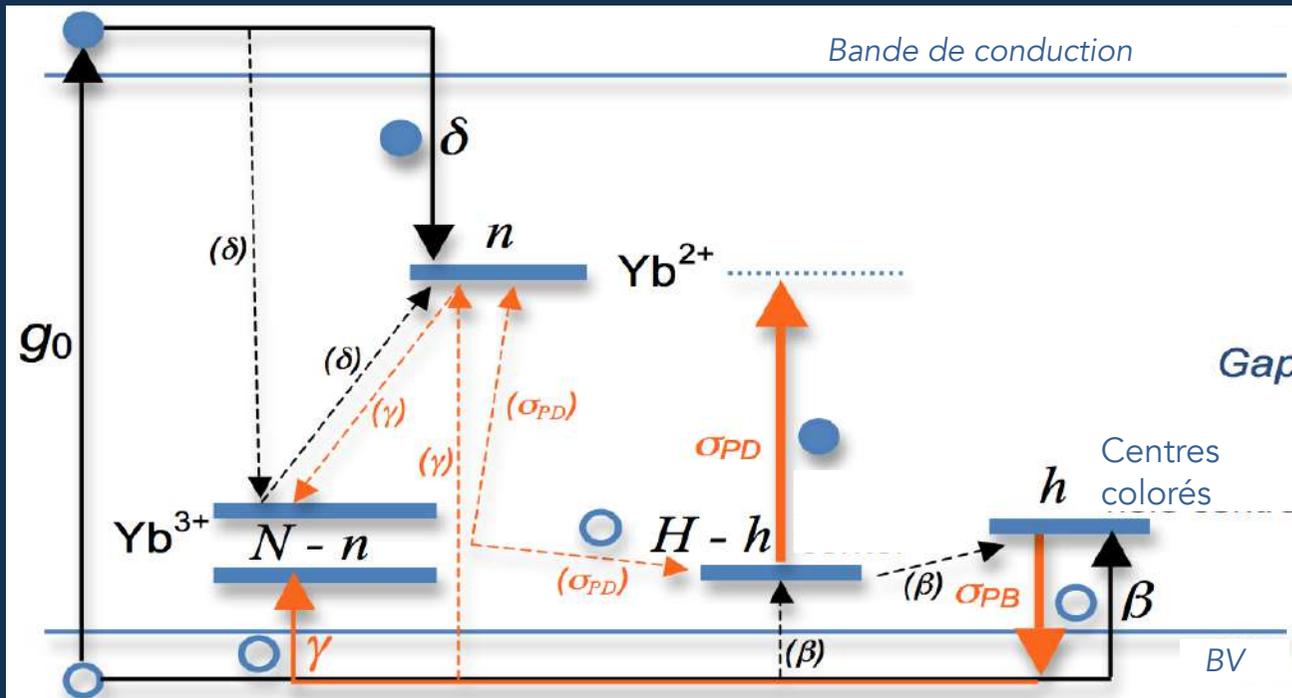
F. Mady et al., *Opt. Lett.* 35, n° 21, 136, p 3541, 2010

J-B. Duchez, *Thèse de Doctorat Université de Nice*, Juin 2015

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

- **Modèle de niveaux** (bases physiques antérieures)



Modèle PRN complet

- Inclut PN, RN et PB, modélisés d'après caractérisations expérimentales

→ Capable de simuler PRN

- Modèle physique justifié (pas de paramètre semi empirique...)

Coefficient d'atténuation induit proportionnel à $h \approx n$

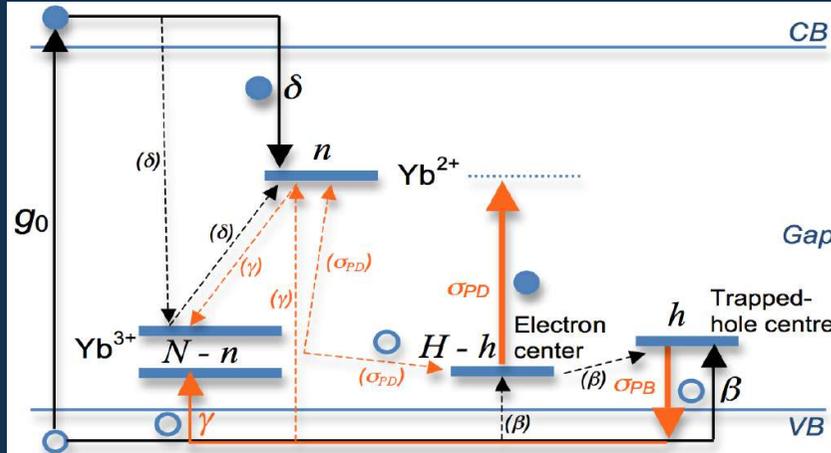
$$\Delta\alpha(\text{cm}^{-1}) = \sigma_{\text{abs}} \times h$$

Quantité à confronter aux mesures

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

• Équations



- n_c = Densité d'électrons dans BC
- h_v = Densité de trous dans BV
- x_{inv} = taux d'inversion des ions Yb³⁺ (P_p)
- τ = Durée de vie l'état excité des ions Yb³⁺
- N_V = Densité d'états équivalente BV

$$\frac{dn_c}{dt} = g_0 - \delta n_c (N - n)$$

$$\frac{dn}{dt} = \delta n_c (N - n) + \sigma_{PD} \frac{x_{inv}^4 (N - n)^4}{\tau^3} (H - h) - \gamma h_v n$$

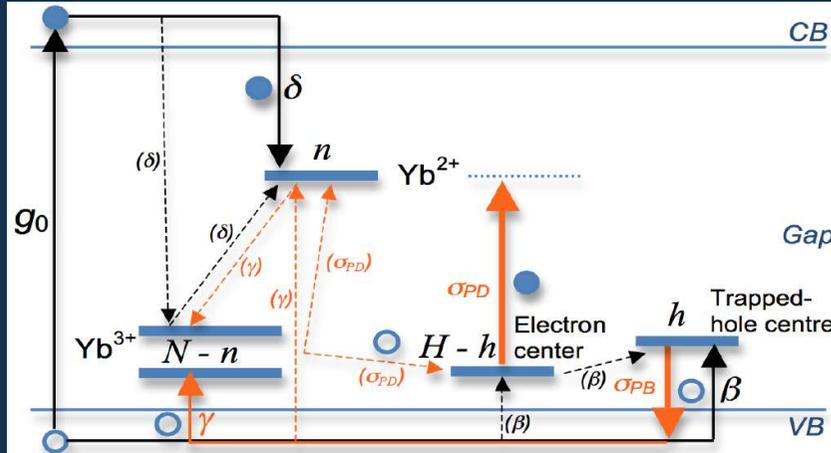
$$\frac{dh}{dt} = \beta h_v (H - h) + \sigma_{PD} \frac{x_{inv}^4 (N - n)^4}{\tau^3} (H - h) - \sigma_{PB} \frac{x_{inv}^2 (N - n)^2}{\tau^2} N_V h$$

$$\frac{dh_v}{dt} = g_0 - \beta h_v (H - h) + \sigma_{PB} \frac{x_{inv}^2 (N - n)^2}{\tau^2} N_V h - \gamma h_v n$$

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

• Équations



- n_c = Densité d'électrons dans BC
- h_v = Densité de trous dans BV
- x_{inv} = taux d'inversion des ions Yb^{3+} (P_p)
- τ = Durée de vie l'état excité des ions Yb^{3+}
- N_V = Densité d'états équivalente BV

$$\frac{dn_c}{dt} = g_0 - \delta n_c (N - n)$$

$$\frac{dn}{dt} = \delta n_c (N - n) + \sigma_{PD} \frac{x_{inv} \frac{4(N-n)^4}{\tau^3} (H - h) - \gamma h_v n}{\tau^3}$$

PN implique 4 ions Yb^{3+} excités

$$\frac{dh}{dt} = \beta h_v (H - h) + \sigma_{PD} \frac{x_{inv} \frac{4(N-n)^4}{\tau^3} (H - h) - \sigma_{PB} \frac{x_{inv} \frac{2(N-n)^2}{\tau^2} N_V h}{\tau^2}}{\tau^3}$$

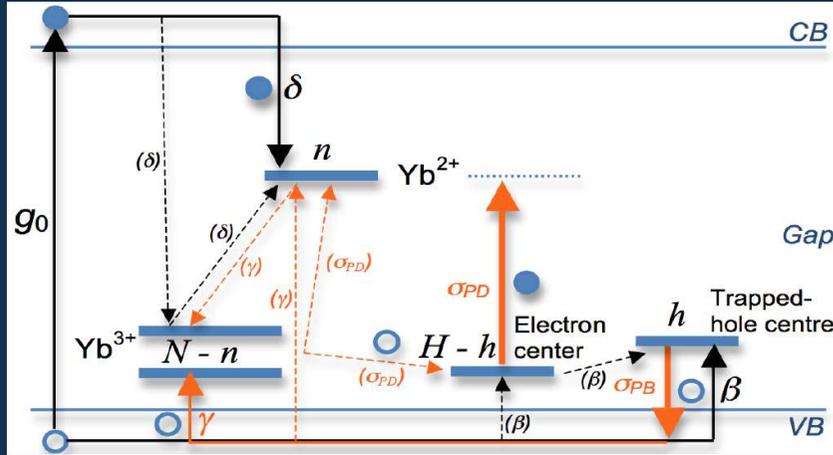
PB implique 2 ions Yb^{3+} excités

$$\frac{dh_v}{dt} = g_0 - \beta h_v (H - h) + \sigma_{PB} \frac{x_{inv} \frac{2(N-n)^2}{\tau^2} N_V h - \gamma h_v n}{\tau^2}$$

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 1 : Cas des fibres ytterbium

• Équations



Système EDO non linéaires couplées

- Solution générale (dont transitoires) :

Résolution numérique (Scilab par ex.)

- États stationnaires (NEPRN ou NEPN)

Approximation analytique pour les faibles niveaux de conversion (Yb^{3+} ou précurseurs)

$$\frac{dn_c}{dt} = g_0 - \delta n_c (N - n)$$

$$\frac{dn}{dt} = \delta n_c (N - n) + \sigma_{PD} \frac{x_{inv} (N - n)^4}{\tau^3} (H - h) - \gamma h_\nu n$$

$$\frac{dh}{dt} = \beta h_\nu (H - h) + \sigma_{PD} \frac{x_{inv} (N - n)^4}{\tau^3} (H - h) - \sigma_{PB} \frac{x_{inv} (N - n)^2}{\tau^2} N_\nu h$$

$$\frac{dh_\nu}{dt} = g_0 - \beta h_\nu (H - h) + \sigma_{PB} \frac{x_{inv} (N - n)^2}{\tau^2} N_\nu h - \gamma h_\nu n$$

PN implique 4 ions Yb^{3+} excités

PB implique 2 ions Yb^{3+} excités

2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

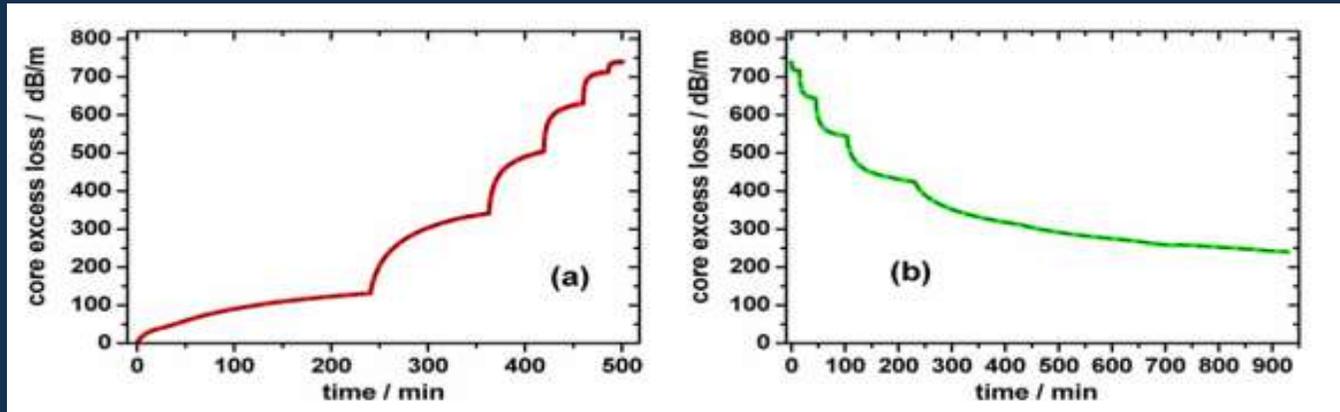
**Confrontation aux données / Validation qualitative
(Modèle local vs Mesures sur fibres courtes)**

2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

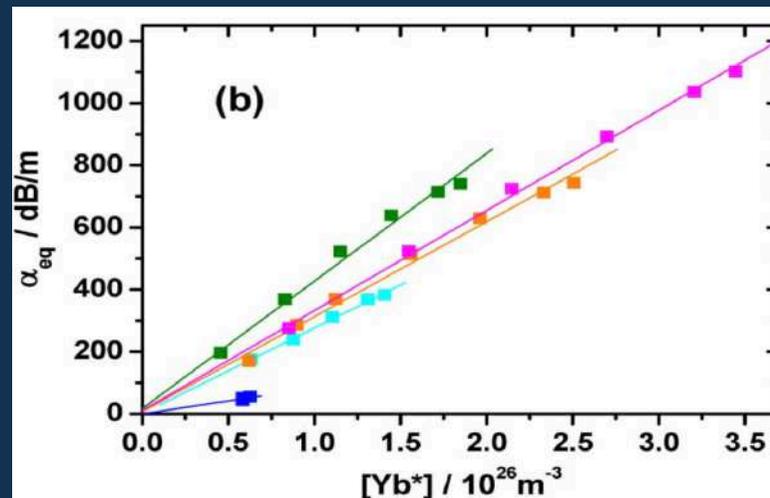
- 5 points essentiels à tester pour « valider » le modèle...

- NEPN : réversibilité avec P_{in}



S. Jetschke et al., *Opt. Exp.*, 15, no. 22, 14838, 2007

- Augmentation linéaire du NEPN avec l'inversion des ions Yb^{3+}



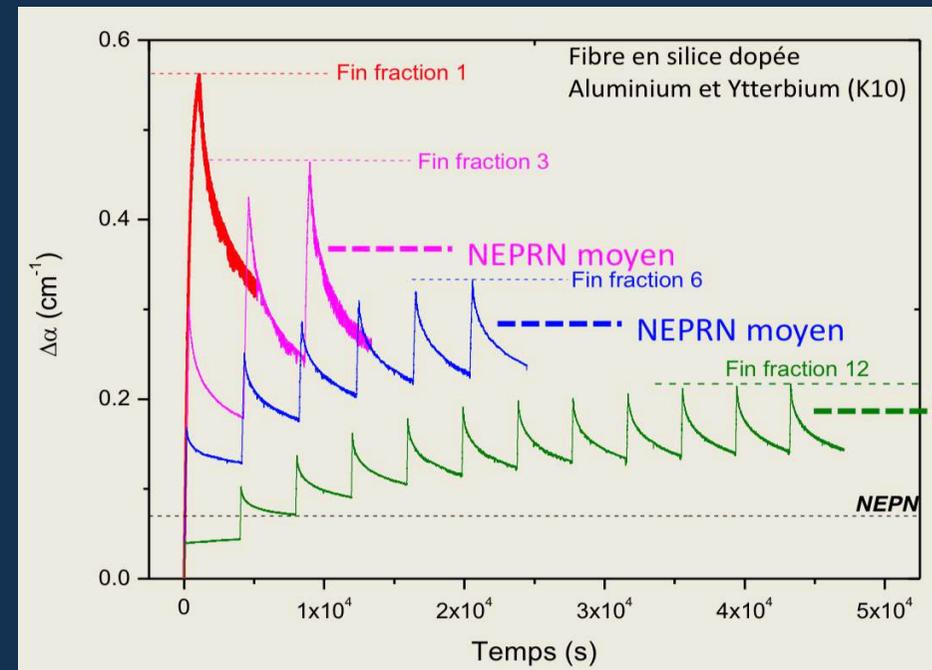
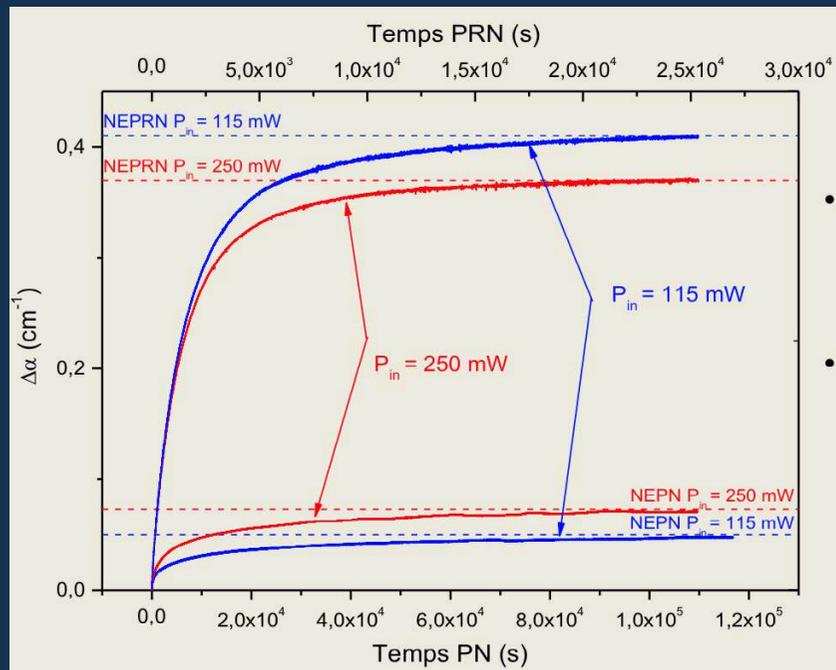
2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

- 5 points essentiels à tester pour « valider » le modèle...

- NEPRN uniquement déterminé par puissance de pompe (inversion) et débit de dose, mais pas de la dose totale...

- NEPRN et comportement en fonction de la puissance de pompe et du débit de dose

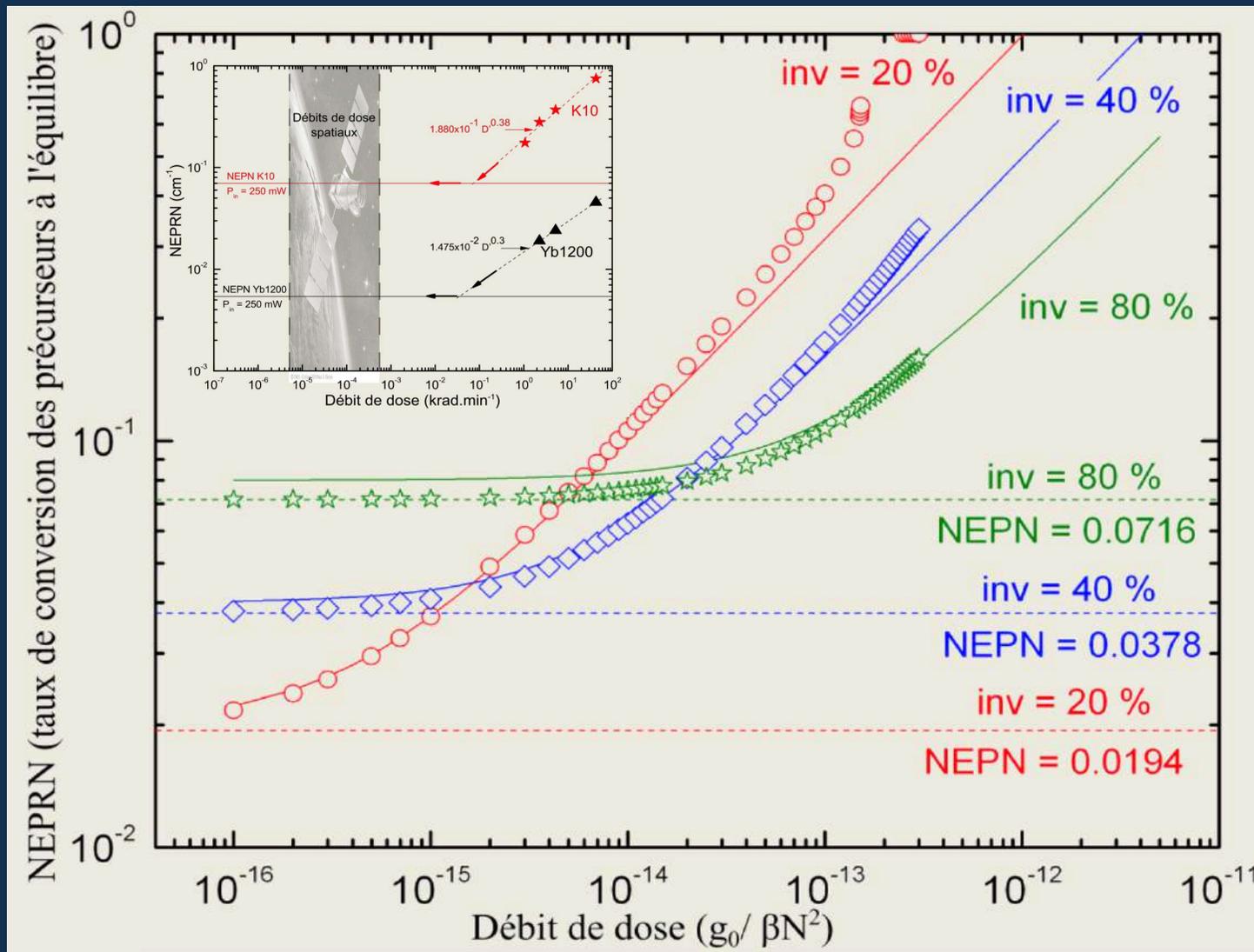


- NEPRN \rightarrow NEPN à très bas débit de dose

2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

• Prédictions typiques du modèle pour le NEPRN



Graphes :

- NEPRN : taux de conversion des précurseurs à l'équilibre, soit h/H en fonction du
- Débit réduit (sans dimension)
- Calcul à 3 taux d'inversion \neq

Points colorés

Résultats du calcul numérique

Traits colorés continus

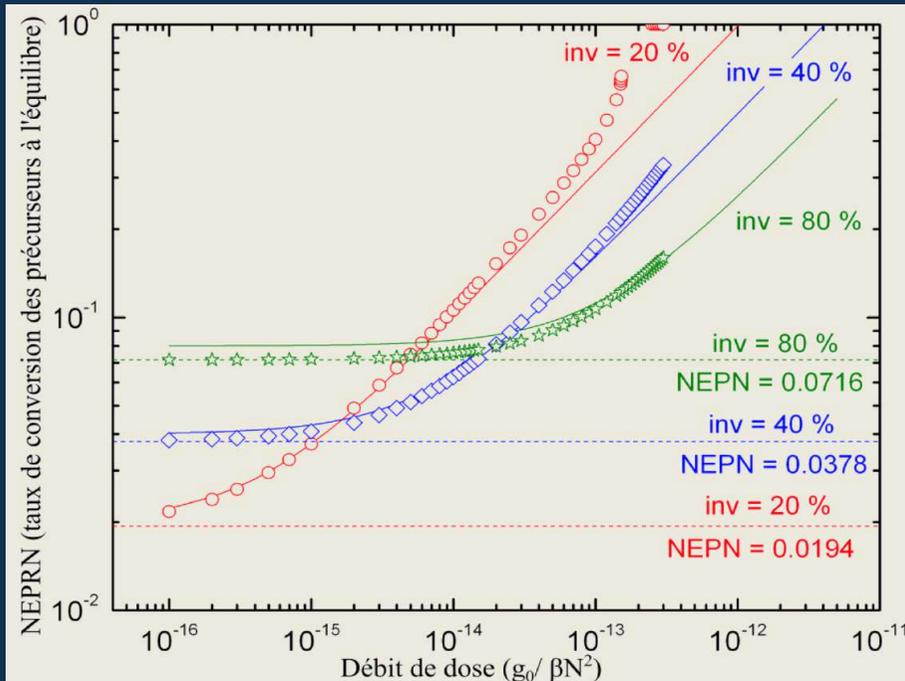
Approximation analytique stationnaire, correcte pour conversion < 20 % environ (cas pratiques...)

2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

- **Approximation analytique du NEPRN (conv. < 20 %)**

$$NEPRN = \sqrt{\frac{\beta}{\gamma N_v} \left(\frac{\sigma_{PD} N^2 x_{inv}^2}{\sigma_{PB} \tau} + \frac{g_0 \tau^2}{H \sigma_{PB} N^2 x_{inv}^2} \right)}$$

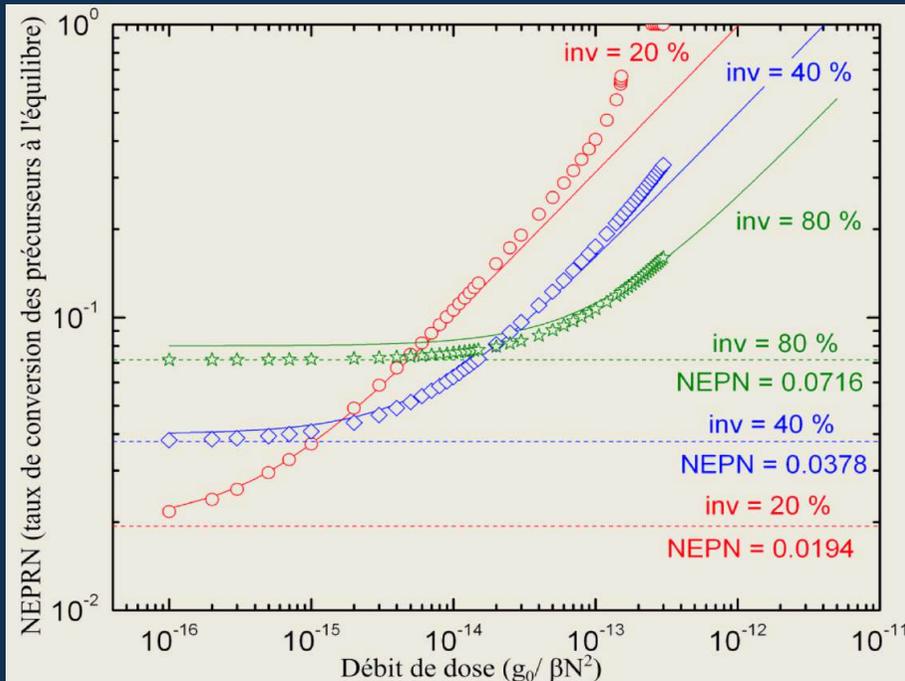


2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

- **Approximation analytique du NEPRN (conv. < 20 %)**

$$NEPRN = \sqrt{\frac{\beta}{\gamma N_v} \left(\frac{\sigma_{PD} N^2 x_{inv}^2}{\sigma_{PB} \tau} + \frac{g_0 \tau^2}{H \sigma_{PB} N^2 x_{inv}^2} \right)}$$



NEPRN ne dépend que :

- De l'inversion x_{inv} (donc de P_{in})
- Du débit de dose g_0

Aucune autre influence extrinsèque.
Le NEPRN théorique ne dépend pas de la dose cumulée, conformément aux observations... ✓

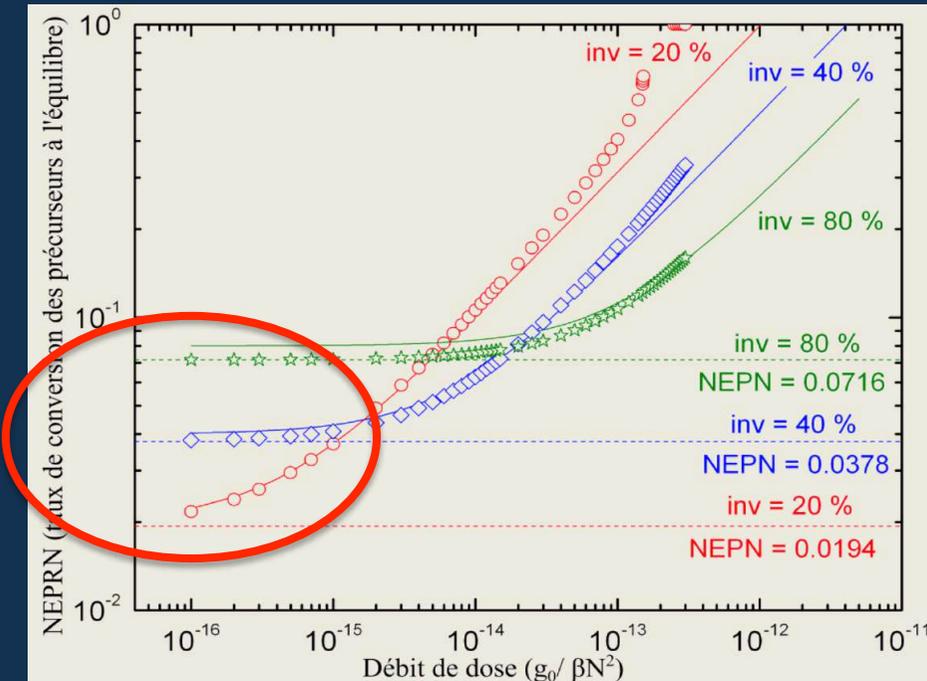
2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

- Cas du photo-noircissement « pur »

$$NEPRN = \sqrt{\frac{\beta}{\gamma N_v} \left(\frac{\sigma_{PD} N^2 x_{inv}^2}{\sigma_{PB} \tau} + \frac{g_0 \tau^2}{H \sigma_{PB} N^2 x_{inv}^2} \right)}$$

= NEPN ~~g₀ τ²~~
= 0



Cas pour lequel :

- $g_0 = 0$
- NEPN déterminé par le rapport σ_{PD}/σ_{PB} (compétition d'équilibre)
- NEPN est bien proportionnel à x_{inv}

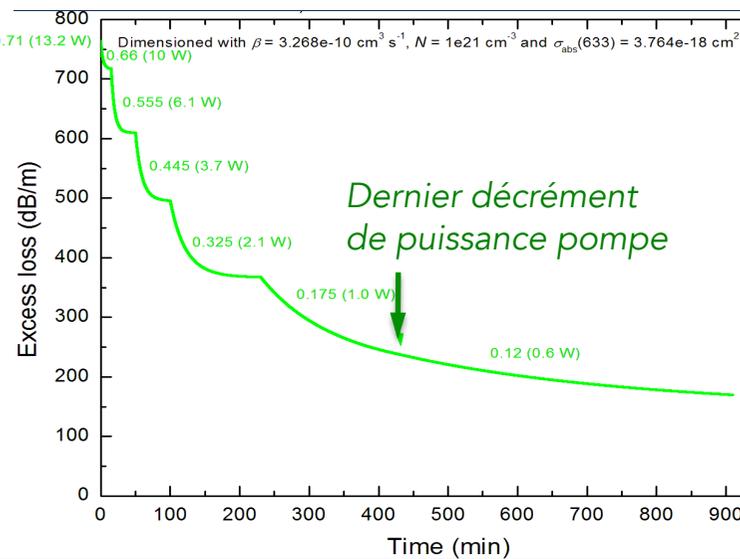
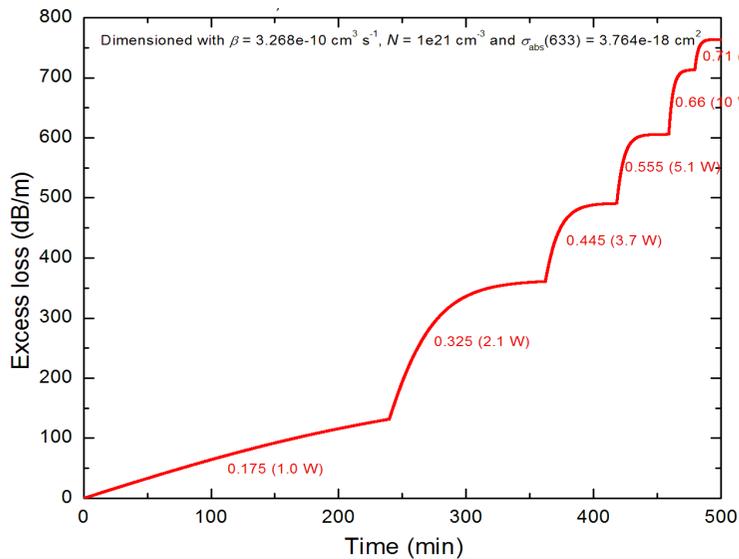
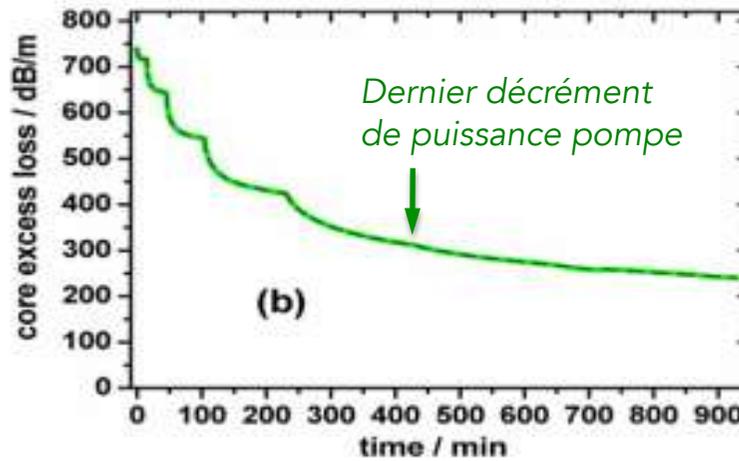
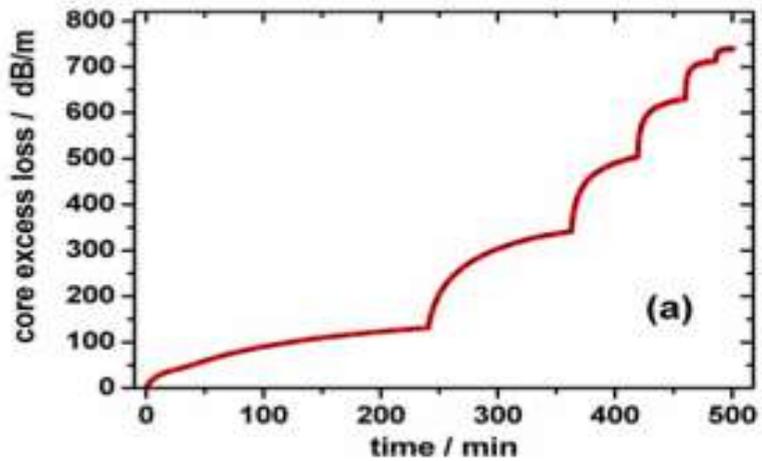


2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

• Cas du photo-noircissement « pur »

Simulation de la réversibilité des NEPN avec P_{in}



Mesure

S. Jetschke et al., *Opt. Exp.*,
15, no. 22, 14838, 2007

Calcul

Mêmes taux d'inversion
que pour la mesure



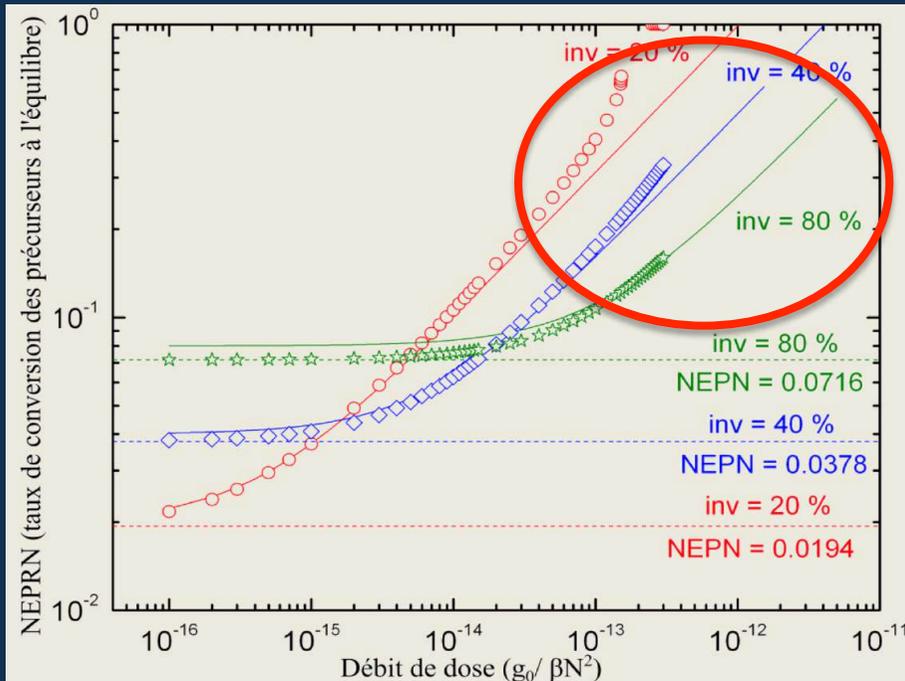
2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

- Cas d'un fort débit de dose

$$NEPRN = \sqrt{\frac{\beta}{\gamma N_v} \left(\frac{\sigma_{PD} N^2 x_{inv}^2}{\sigma_{PB} \tau} + \frac{g_0 \tau^2}{H \sigma_{PB} N^2 x_{inv}^2} \right)}$$

Terme petit



Alors :

- NEPRN déterminé par le rapport g_0/σ_{PB} (compétition d'équilibre)
 - NEPRN proportionnel à $1/x_{inv}$
- le NEPRN diminue bien si x_{inv} et donc P_{in} augmentent.

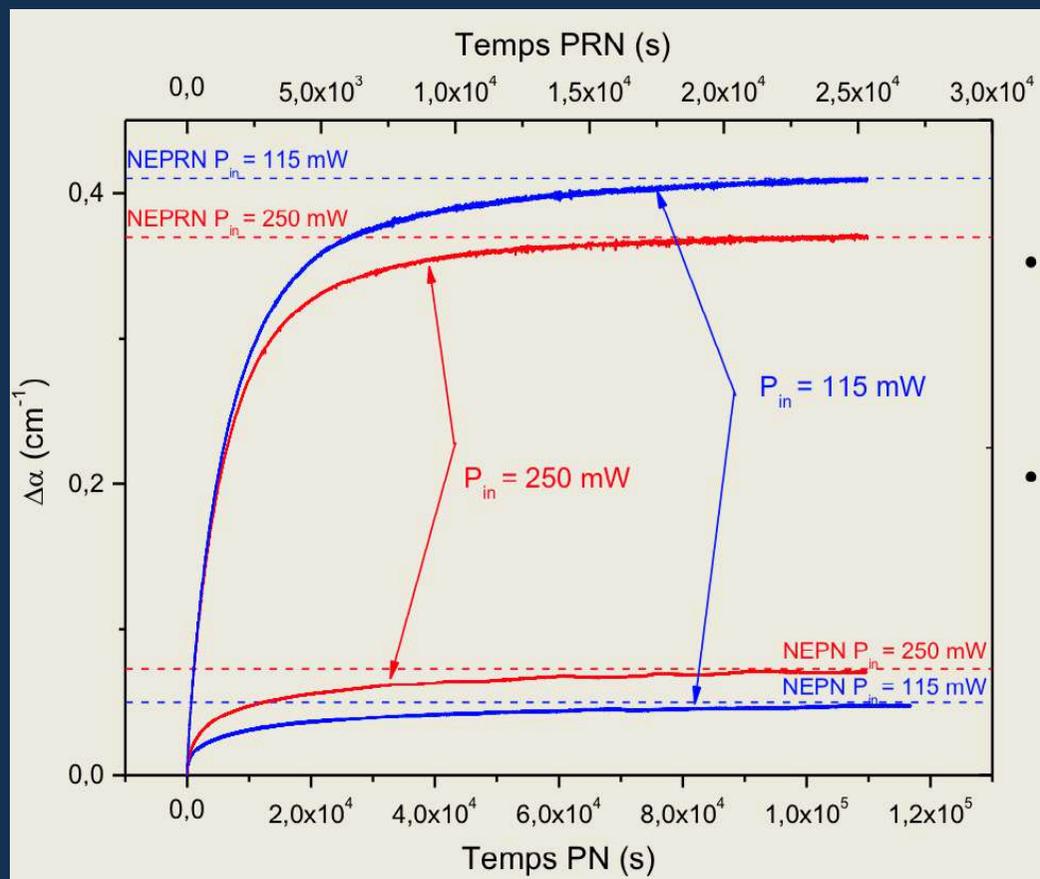
2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

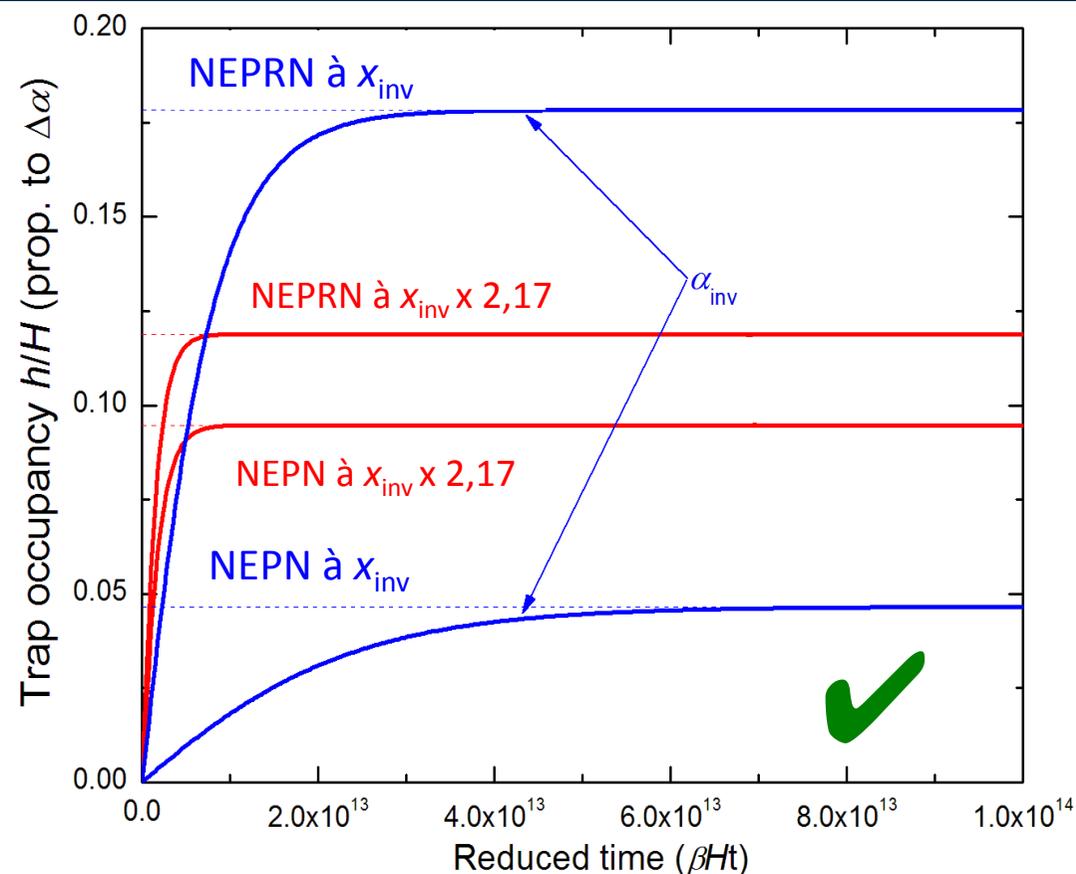
• Cas d'un fort débit de dose

Simulation de l'influence de P_{in} sur le NEPRN

Mesure



Calcul

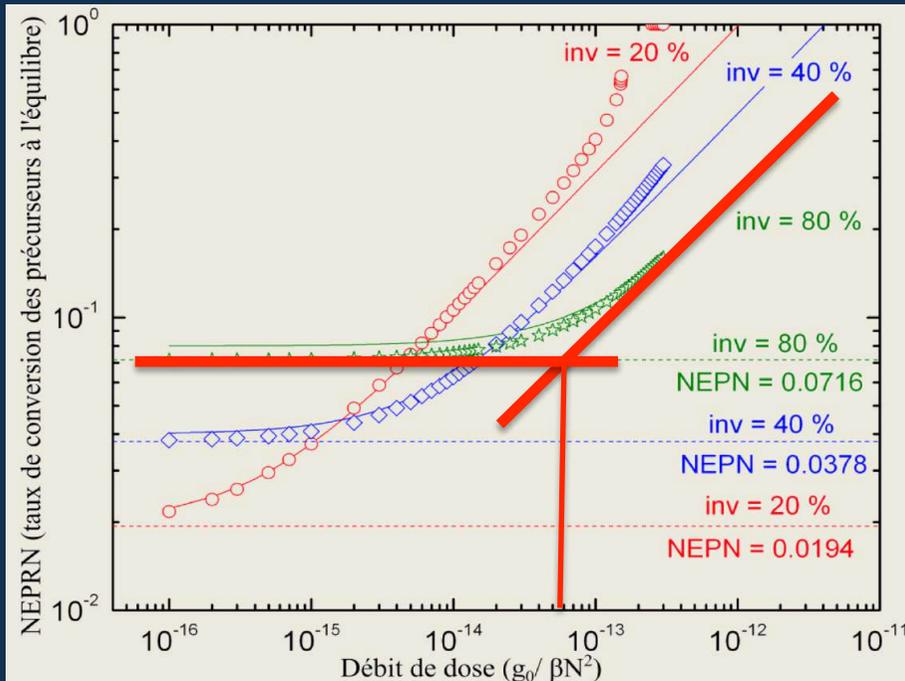


2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

• Débit de dose critique

$$NEPRN = \sqrt{\frac{\beta}{\gamma N_v} \left(\frac{\sigma_{PD} N^2 x_{inv}^2}{\sigma_{PB} \tau} + \frac{g_0 \tau^2}{H \sigma_{PB} N^2 x_{inv}^2} \right)}$$



D'après l'équation :

$$g_{critique} = \frac{\sigma_{PN} H N^4 x_{inv}^4}{\tau^3}$$

$g_0 \ll g_{critique} \rightarrow NEPRN = NEPN$

- Tout se passe alors comme si l'irradiation ionisante n'agissait pas (guérison du RN en « temps-réel »)

- $g_{critique}$ augmente avec l'inversion et donc la puissance de pompe...

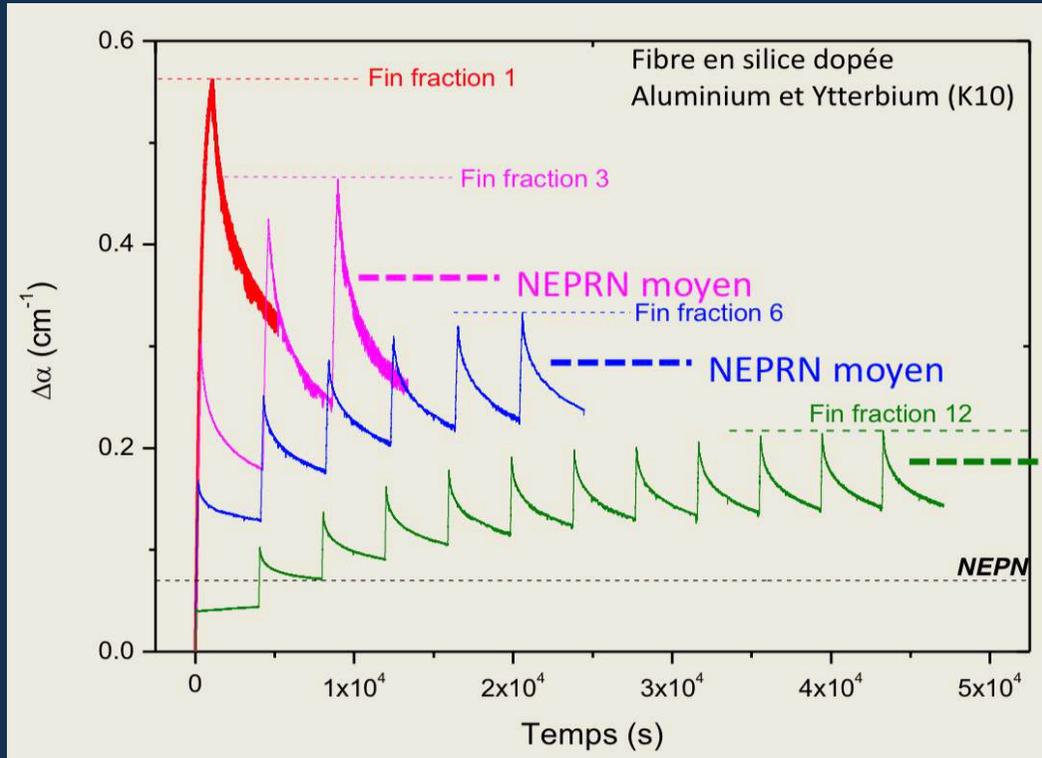
2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

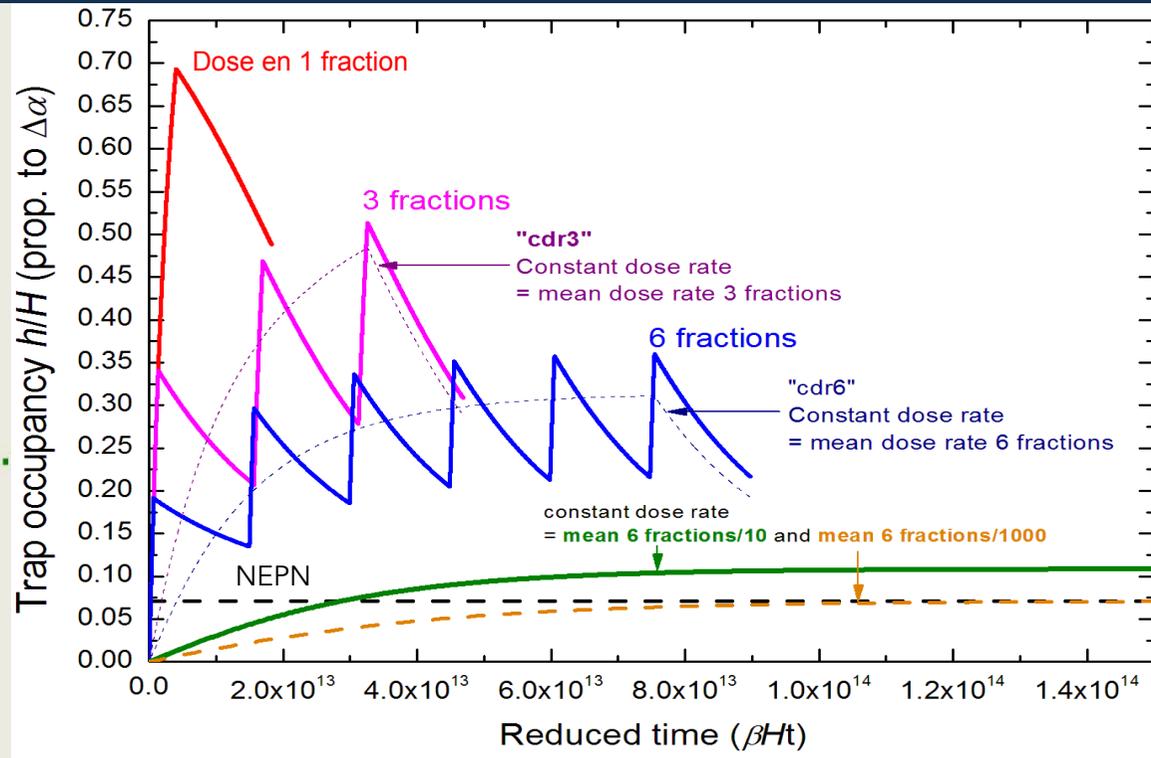
- Débit de dose critique

Simulation d'irradiations fractionnées (diminution débit moyen)

Mesure



Calcul



2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 1 (fibres ytterbium)

- **Validité qualitative du modèle**

- Tous les comportements connus ou établis de manière originale sont reproduits par le modèle physique local

 - *Tous les « ingrédients » physiques essentiels sont inclus*

- Cinétiques transitoires pas correctement rendues

 - *Raffiner le modèle, notamment avec une distribution de niveaux pour décrire les états de trous piégés (centres colorés)...*

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 2 : Cas des fibres erbium

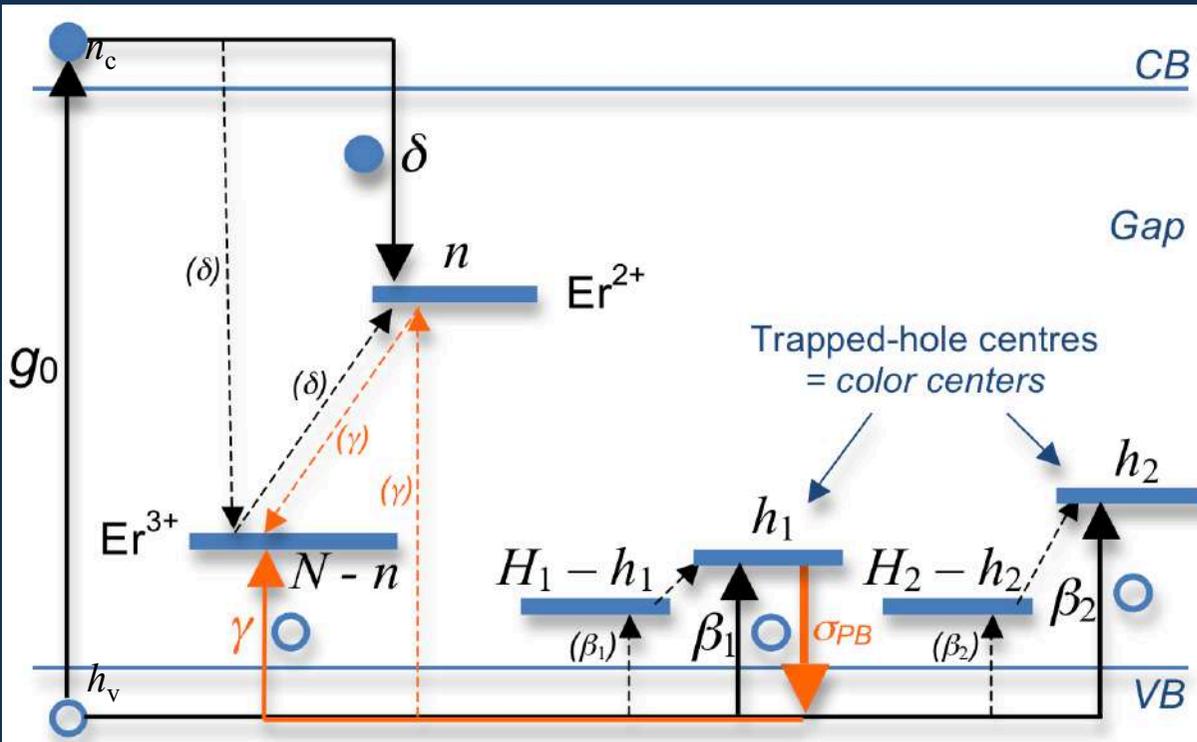
Présentation du modèle :
Similaire à celui des fibres Yb, mais sans PN...

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 2 : Cas des fibres erbium

Mécanismes inclus

- Excitation de paires électrons-trous due à l'irradiation ionisante, débit g_0

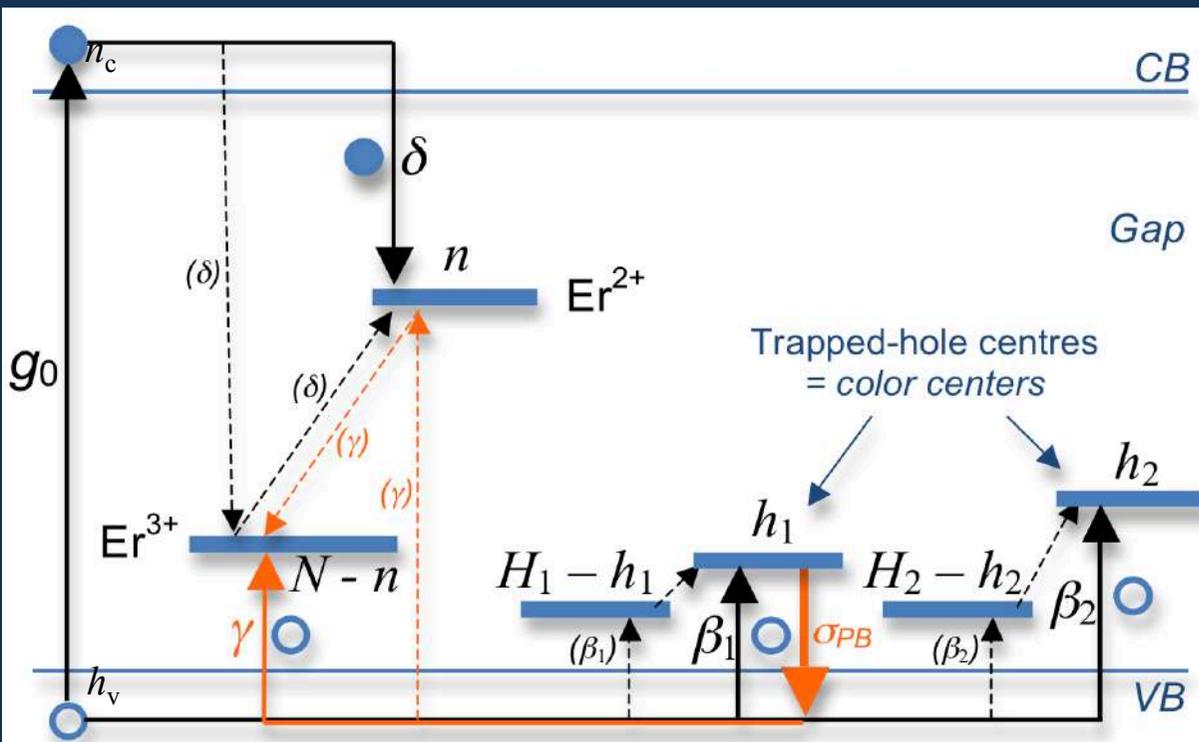


2 – Modèles physiques locaux

Modèle 2 : Cas des fibres erbium

Mécanismes inclus

- Excitation de paires électrons-trous due à l'irradiation ionisante, débit g_0
- Electrons principalement capturés par ions Er^{3+} pour former ions divalents Er^{2+} ¹
→ transition δ
- Trous piégés par précurseurs, formant les centres colorés responsables de l'ARI
→ transitions β_1 et β_2



¹Mécanisme similaire à Yb^{3+} , déduit de nos caractérisations :

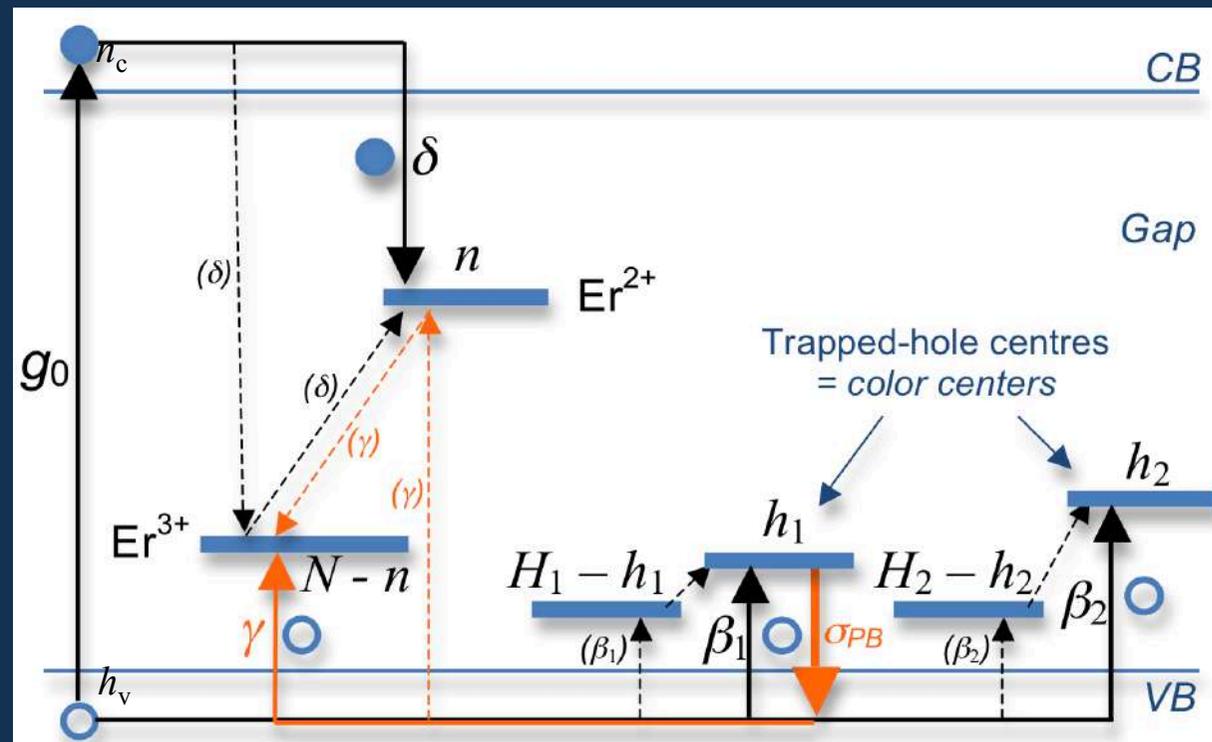
Y. Mebrouk, F. Mady, M. Benabdesselam, J-B. Duchez, W. Blanc, *Opt. Lett.* **39**, 6154, 2014

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 2 : Cas des fibres erbium

Mécanismes inclus

- Excitation de paires électrons-trous due à l'irradiation ionisante, débit g_0
- Electrons principalement capturés par ions Er^{3+} pour former ions divalents Er^{2+} ¹
→ transition δ
- Trous piégés par précurseurs, formant les centres colorés responsables de l'ARI
→ transitions β_1 et β_2
- Absorption à 2 photons de pompe conduit à la photo-ionisation des centres à trous les moins profonds
→ transition σ_{PB}



¹Mécanisme similaire à Yb^{3+} , déduit de nos caractérisations :

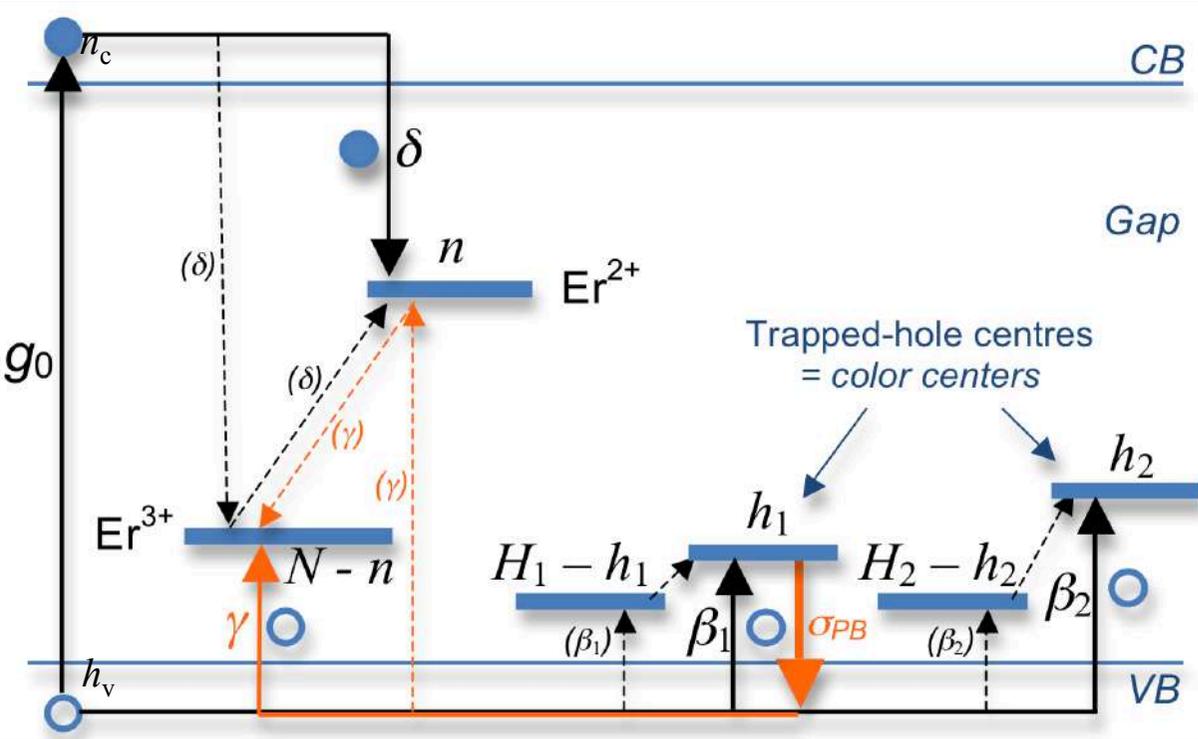
Y. Mebrouk, F. Mady, M. Benabdesselam, J-B. Duchez, W. Blanc, *Opt. Lett.* **39**, 6154, 2014

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 2 : Cas des fibres erbium

Mécanismes inclus

- Excitation de paires électrons-trous due à l'irradiation ionisante, débit g_0
- Electrons principalement capturés par ions Er^{3+} pour former ions divalents Er^{2+} ¹
→ transition δ
- Trous piégés par précurseurs, formant les centres colorés responsables de l'ARI
→ transitions β_1 et β_2
- Absorption à 2 photons de pompe conduit à la photo-ionisation des centres à trous les moins profonds
→ transition σ_{PB}
- Trous photo-libérés se recombinent avec ions Er^{2+} pour reformer Er^{3+}
→ transition γ



¹Mécanisme similaire à Yb^{3+} , déduit de nos caractérisations :

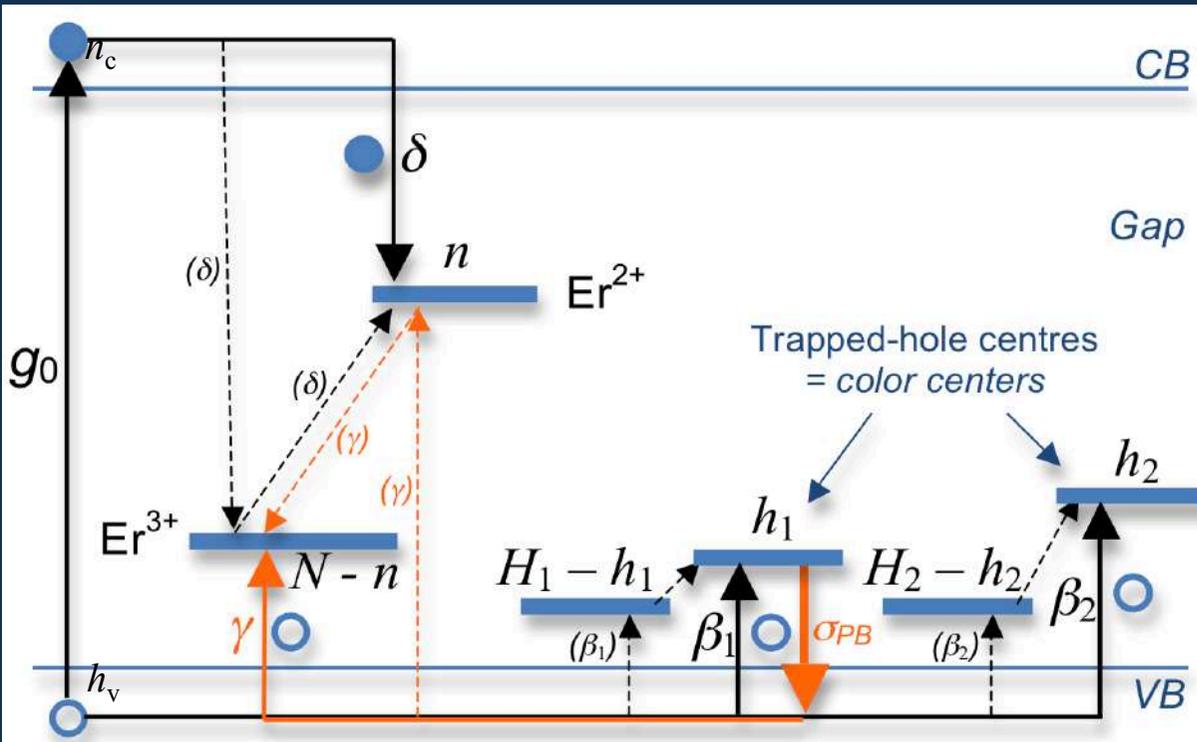
Y. Mebrouk, F. Mady, M. Benabdesselam, J-B. Duchez, W. Blanc, *Opt. Lett.* **39**, 6154, 2014

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 2 : Cas des fibres erbium

Mécanismes inclus

- Excitation de paires électrons-trous due à l'irradiation ionisante, débit g_0
- Electrons principalement capturés par ions Er^{3+} pour former ions divalents Er^{2+} ¹
→ transition δ
- Trous piégés par précurseurs, formant les centres colorés responsables de l'ARI
→ transitions β_1 et β_2
- Absorption à 2 photons de pompe conduit à la photo-ionisation des centres à trous les moins profonds
→ transition σ_{PB}
- Trous photo-libérés se recombinent avec ions Er^{2+} pour reformer Er^{3+}
→ transition γ
- Etats de trous piégés profonds (h_2) ne sont pas photo-ionisés → ARI résiduelle



¹Mécanisme similaire à Yb^{3+} , déduit de nos caractérisations :

Y. Mebrouk, F. Mady, M. Benabdesselam, J-B. Duchez, W. Blanc, *Opt. Lett.* **39**, 6154, 2014

2 – Modèles physiques locaux

Modèle 2 : Cas des fibres erbium

Système ODE non linéaires couplées

$$\frac{dn_c}{dt} = g_0 - \delta n_c (N - n)$$

$$\frac{dn}{dt} = \delta n_c (N - n) - \gamma h_v n$$

$$\frac{dh_1}{dt} = \beta_1 h_v (H_1 - h_1) - \sigma_{PB} P_{in}^2 N_V h_1$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \beta_2 h_v (H_2 - h_2)$$

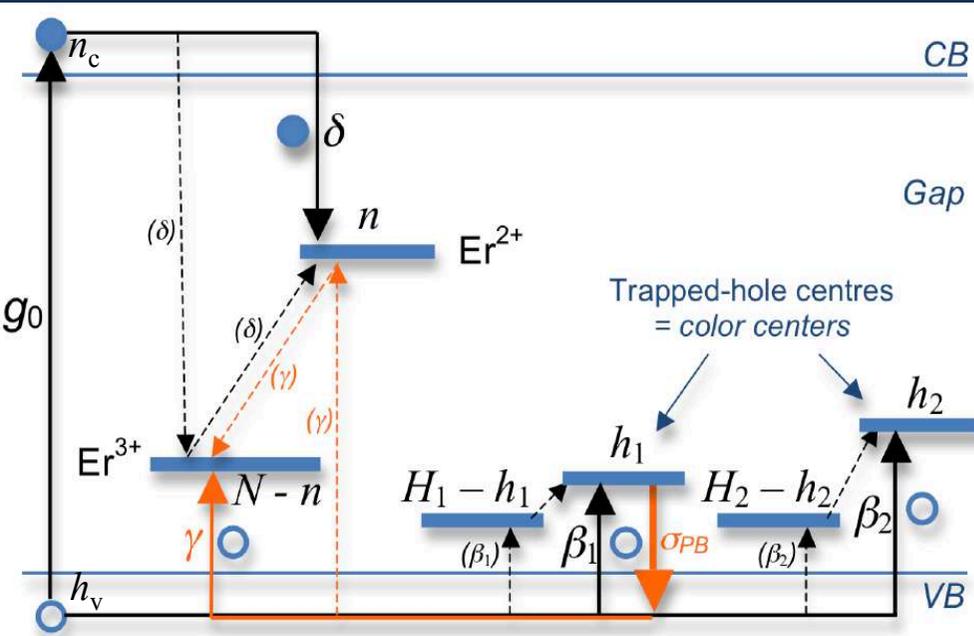
$$\frac{dh_v}{dt} = g_0 - \beta_1 h_v (H_1 - h_1) - \beta_2 h_v (H_2 - h_2) + \sigma_{PB} P_{in}^2 N_V h_1 - \gamma h_v n$$

Solutions recherchées numériquement

L'ARI calculée est proportionnelle à la densité totale de CC ($h_1 + h_2$) in cm^{-3}

$$\text{ARI}_{\text{simul}} (\text{dB m}^{-1}) = 434.29 \times \sigma_{\text{CC}} \times (h_1 + h_2)$$

où σ_{CC} est la section efficace d'absorption par les CC @980 nm



2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 2 (fibres erbium)

Confrontation aux données / Validation qualitative

2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 2 (fibres erbium)

- Comme pour fibres Yb, le modèle reproduit correctement les divers comportements locaux observés
- Accord qualitatif obtenu sur plusieurs décades des paramètres physiques
- Pour les exemples suivants, on a pris comme ordre de grandeur raisonnable :
 - Densité initiale d'ions erbium : $N = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (cas de la fibre Er80)
 - Densité totale de précurseurs (pièges à trous) : $H_1 + H_2 = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
 - Densité de pièges à trous superficiels (non profonds) : $H_1 = 0.9 \times (H_1 + H_2)$
 - Coefficient de piégeage des électrons : $\delta = 1.26 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
 - Coefficients de piégeage des trous : $\beta_1 = 1.24 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ and $\beta_2 = 1.26 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
 - Coefficient de recombinaison des trous : $\gamma = 1.26 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
 - Coefficient de photo-ionisation : $\sigma_{PB} \times N_V = 4 \times 10^{-7} \text{ mW}^{-2} \text{ s}^{-1}$

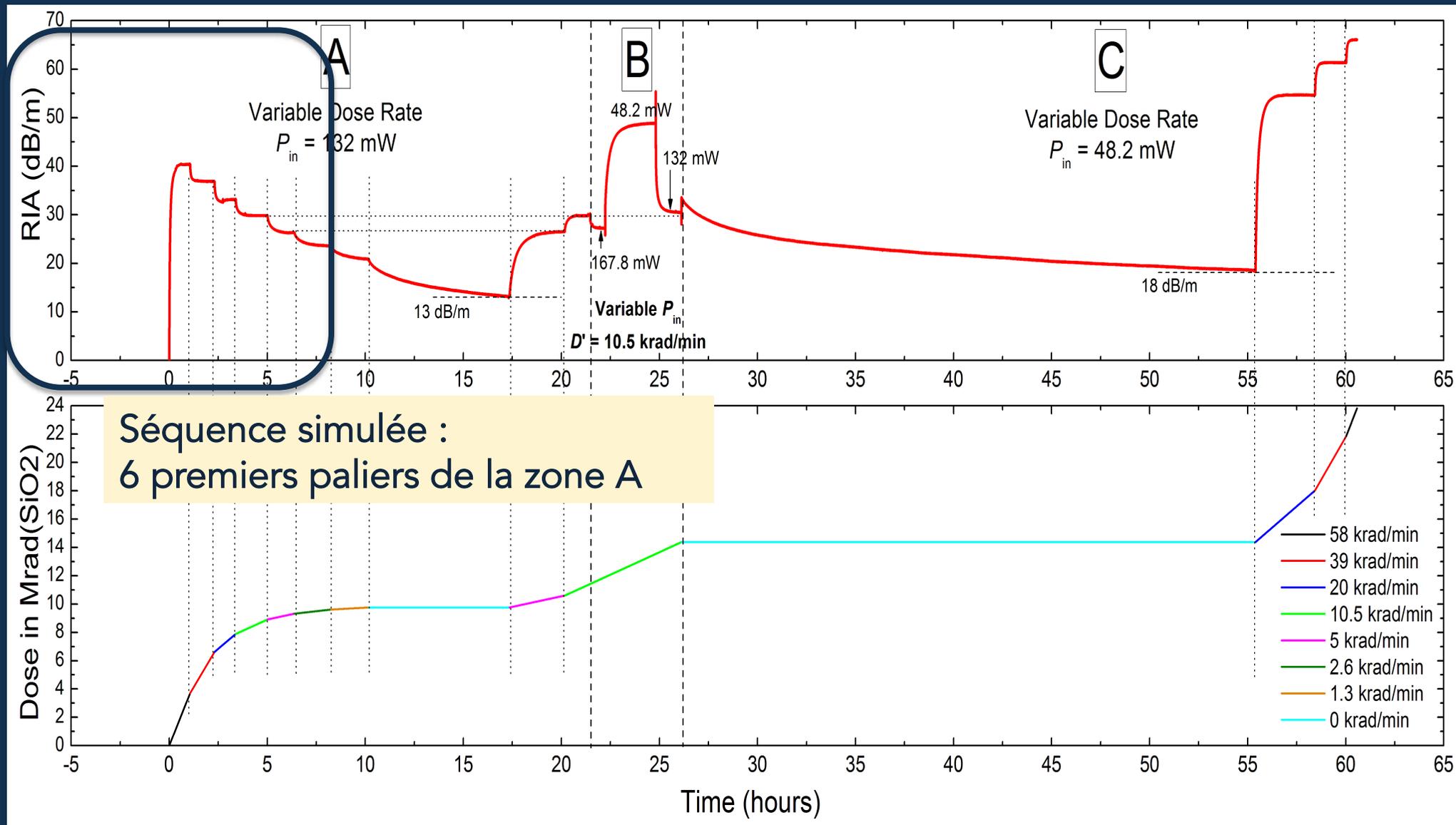
Pour convertir l'ARI calculée en dB m⁻¹:

- Section efficace d'absorption des centres colorés @980 nm: $\sigma_{cc} = 4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$

2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 1: Effets de débits de dose

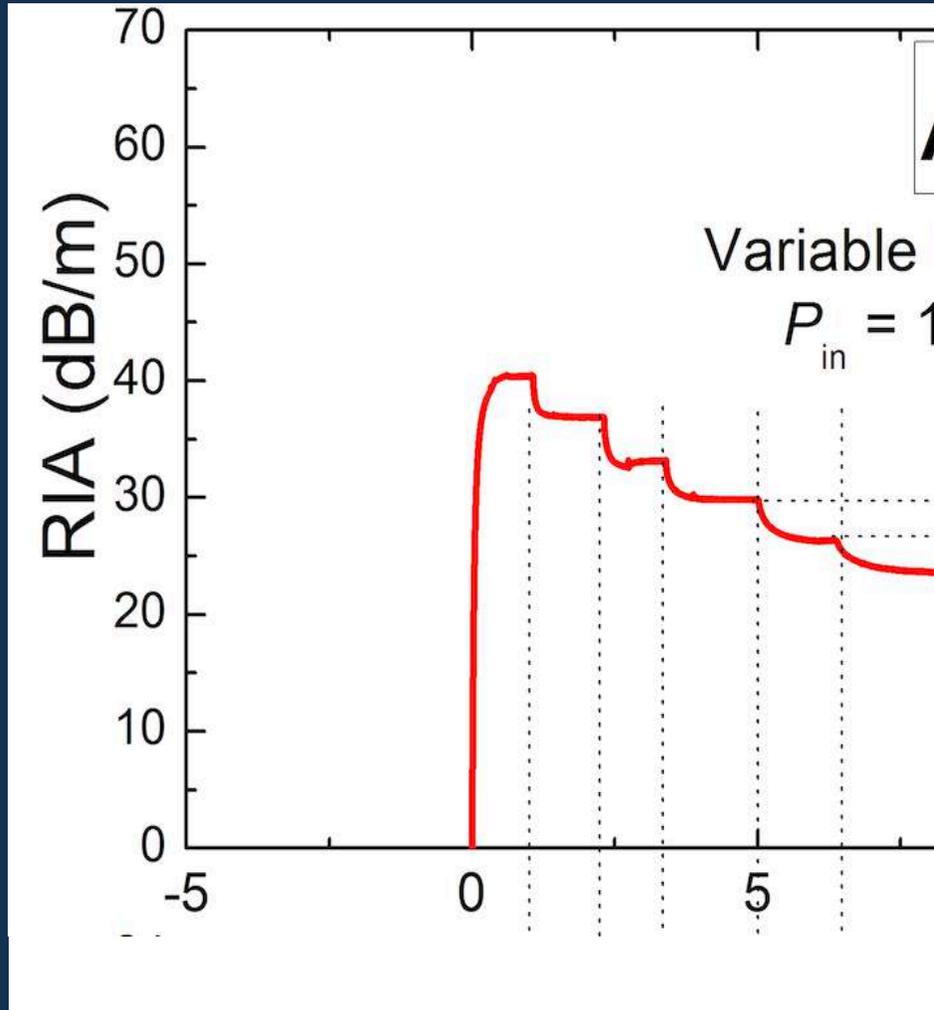


2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 1: Effets de débits de dose

Expérience

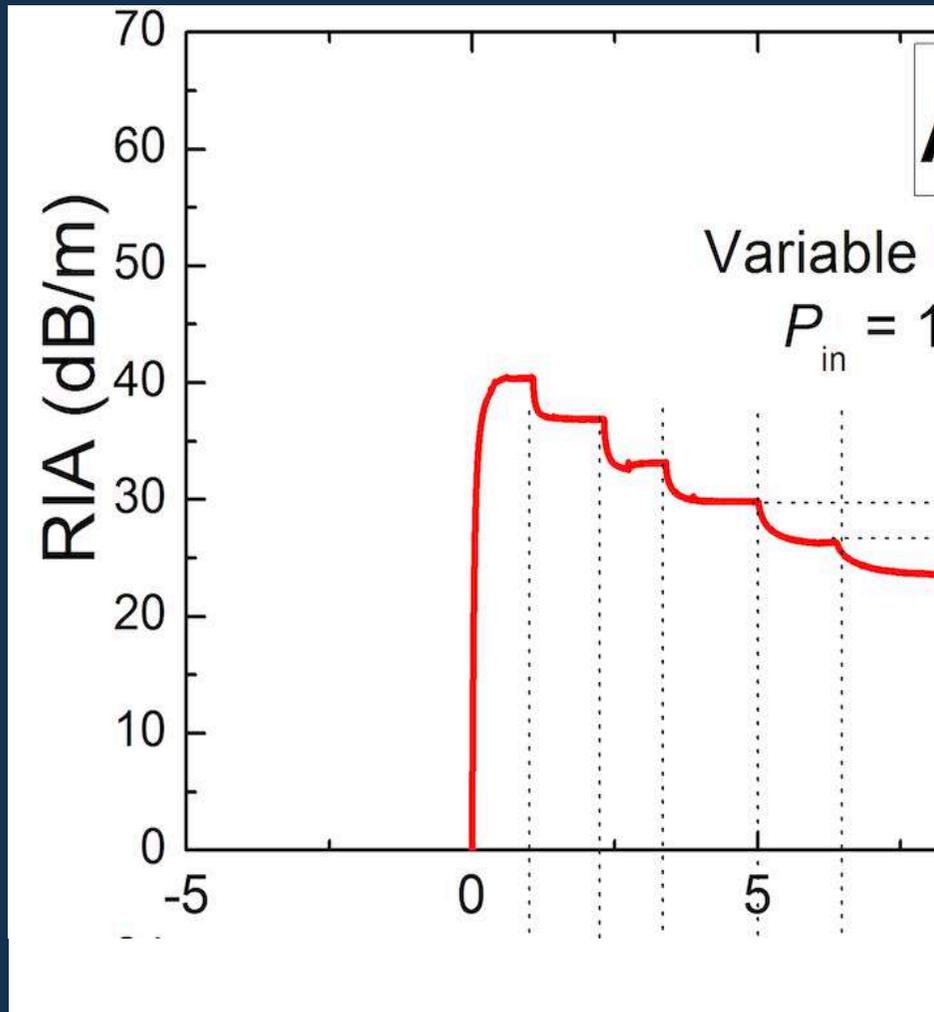


2 – Modèles physiques locaux

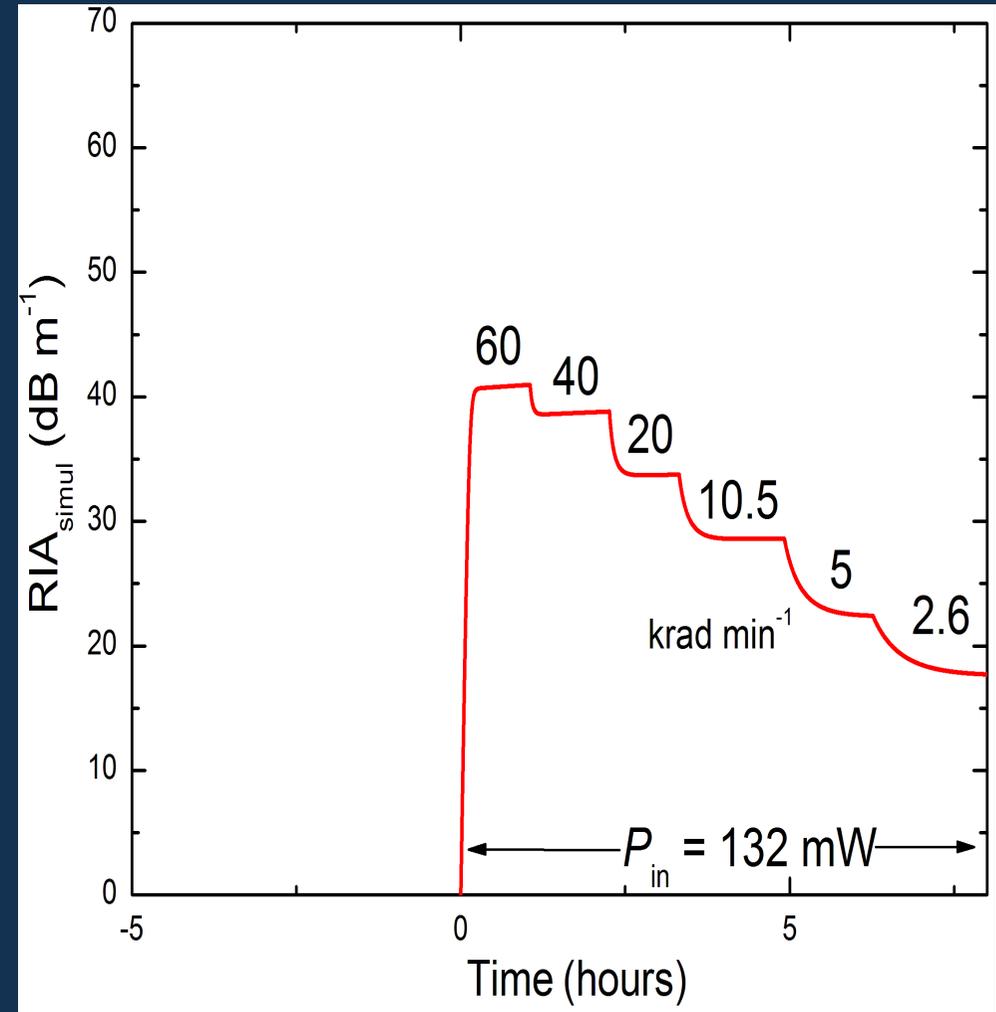
Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 1: Effets de débits de dose

Expérience



Simulation avec mêmes P_{in} et D'

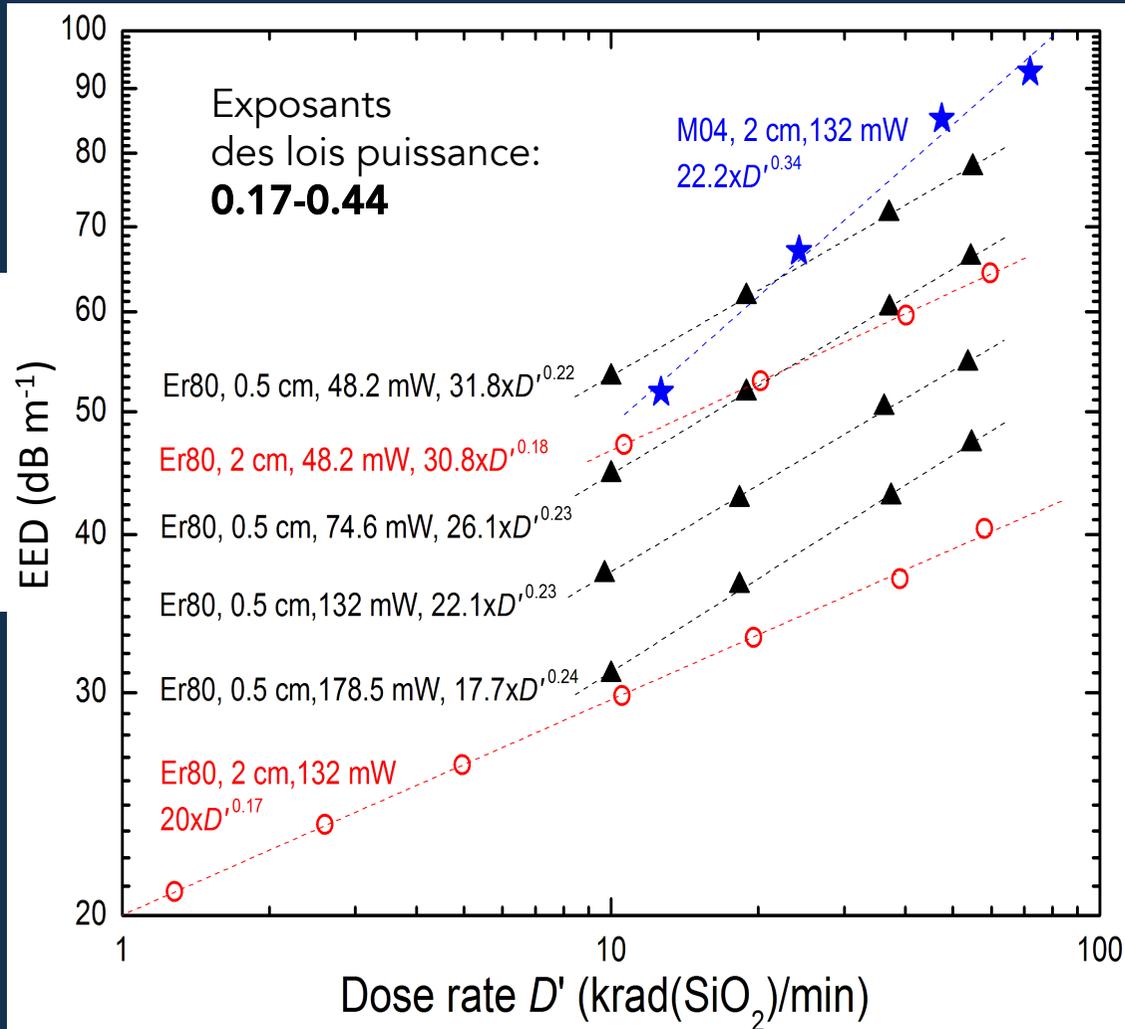


2 – Modèles physiques locaux

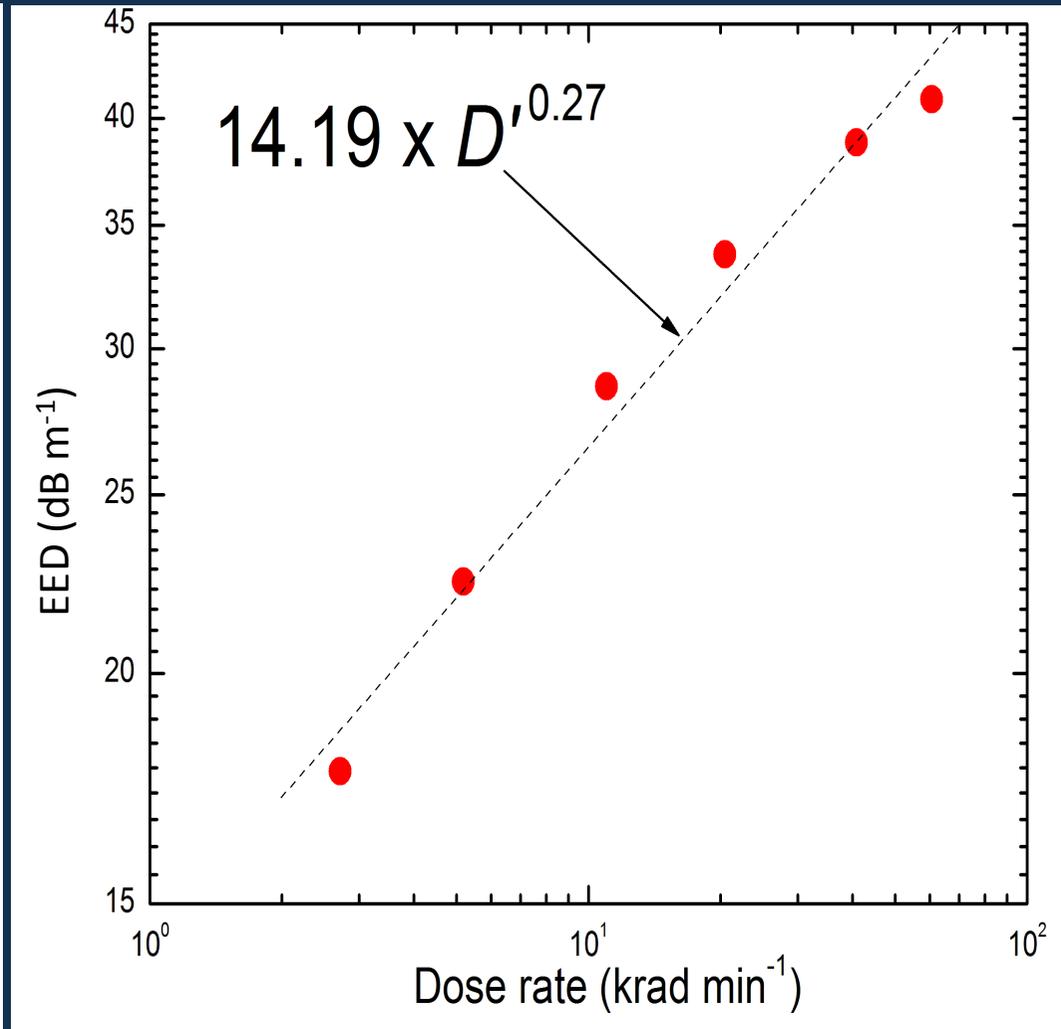
Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 1: Effets de débits de dose

Expérience



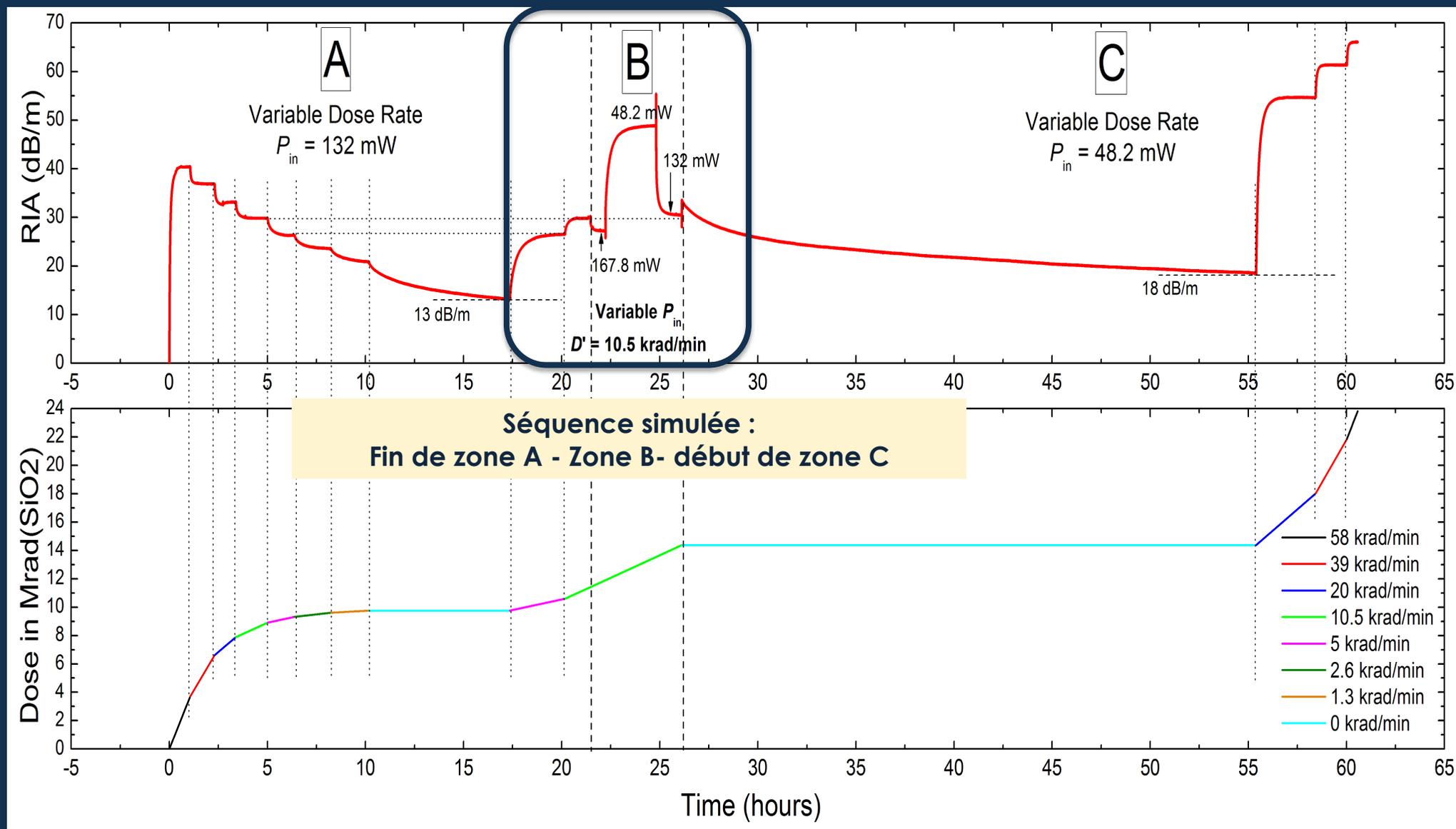
Simulation avec mêmes P_{in} et D'



2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 2 : Effets de la puissance de pompe

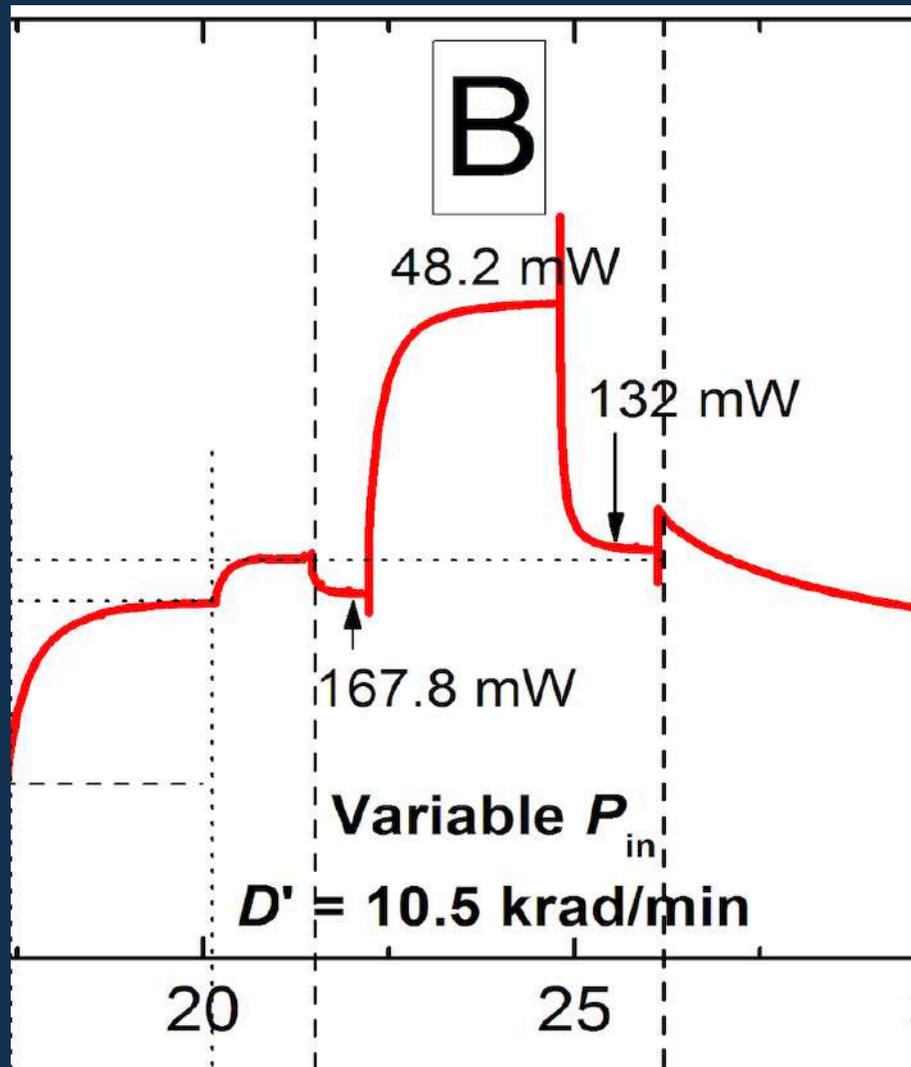


2 – Modèles physiques locaux

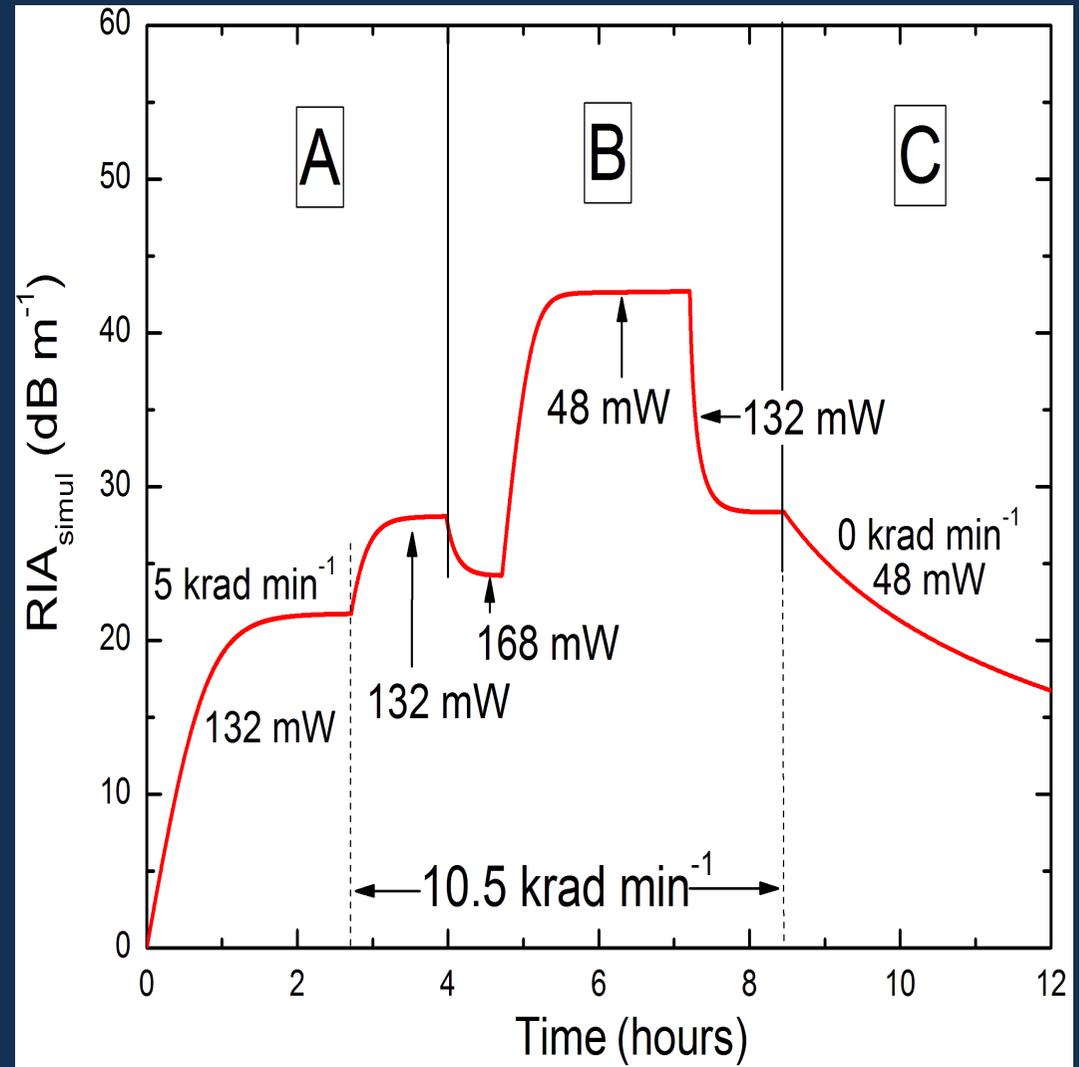
Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 2 : Effets de la puissance de pompe

Expérience



Simulation with same P_{in} and D'

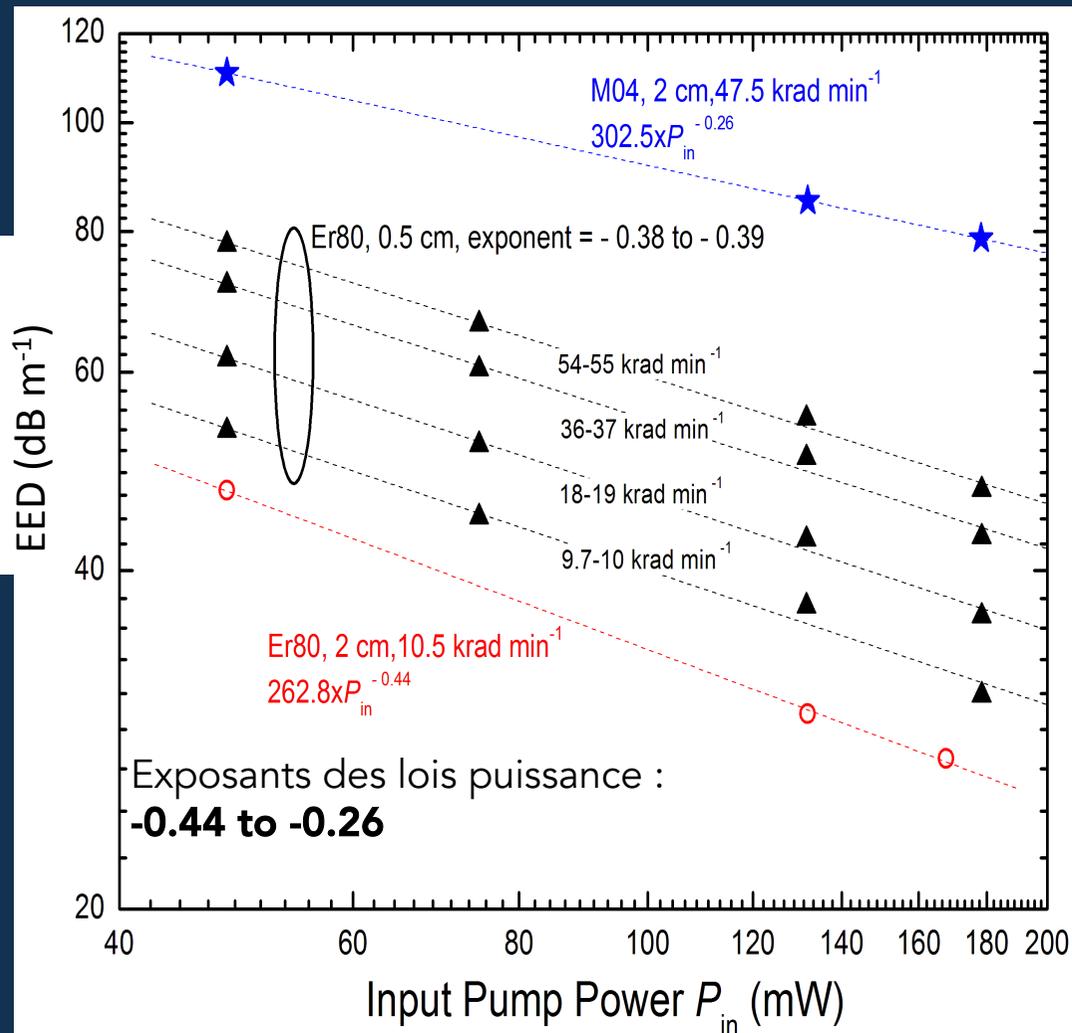


2 – Modèles physiques locaux

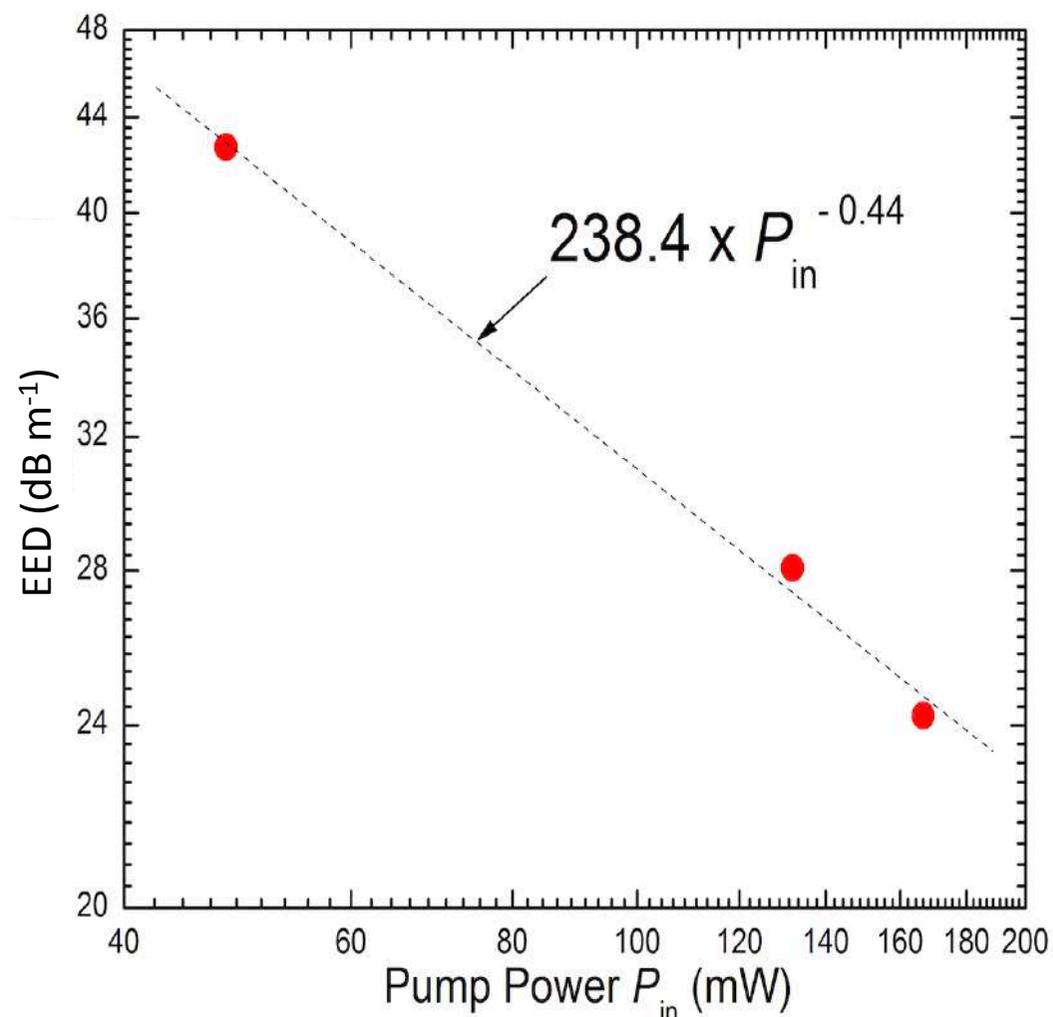
Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 2 : Effets de la puissance de pompe

Expérience



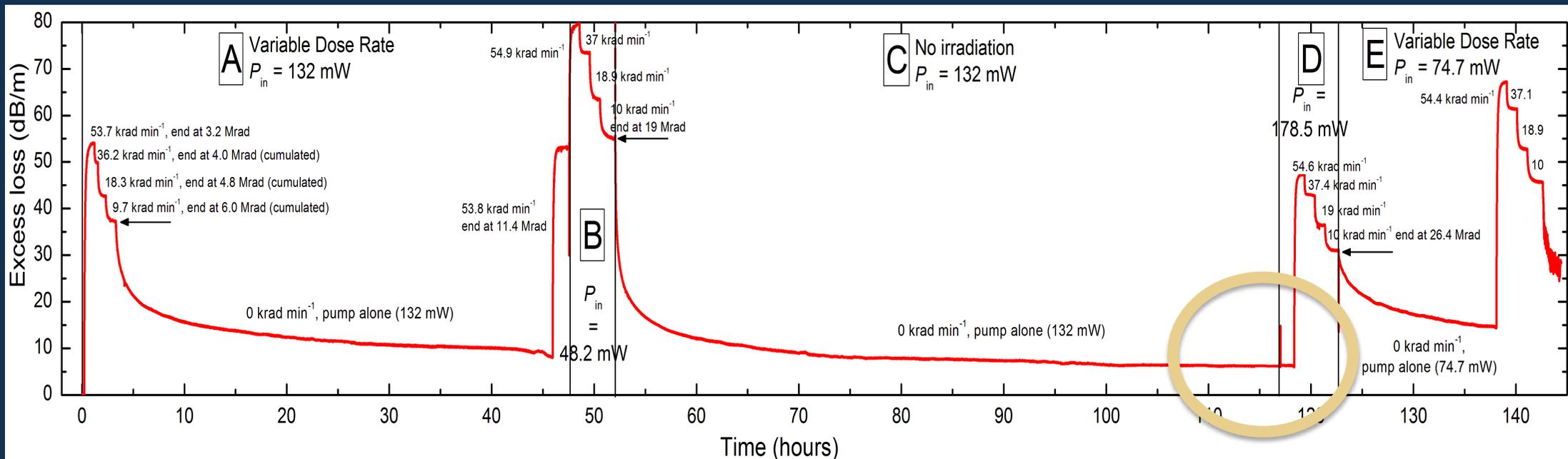
Simulation with same P_{in} and D'



2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 3 : ARI résiduelle



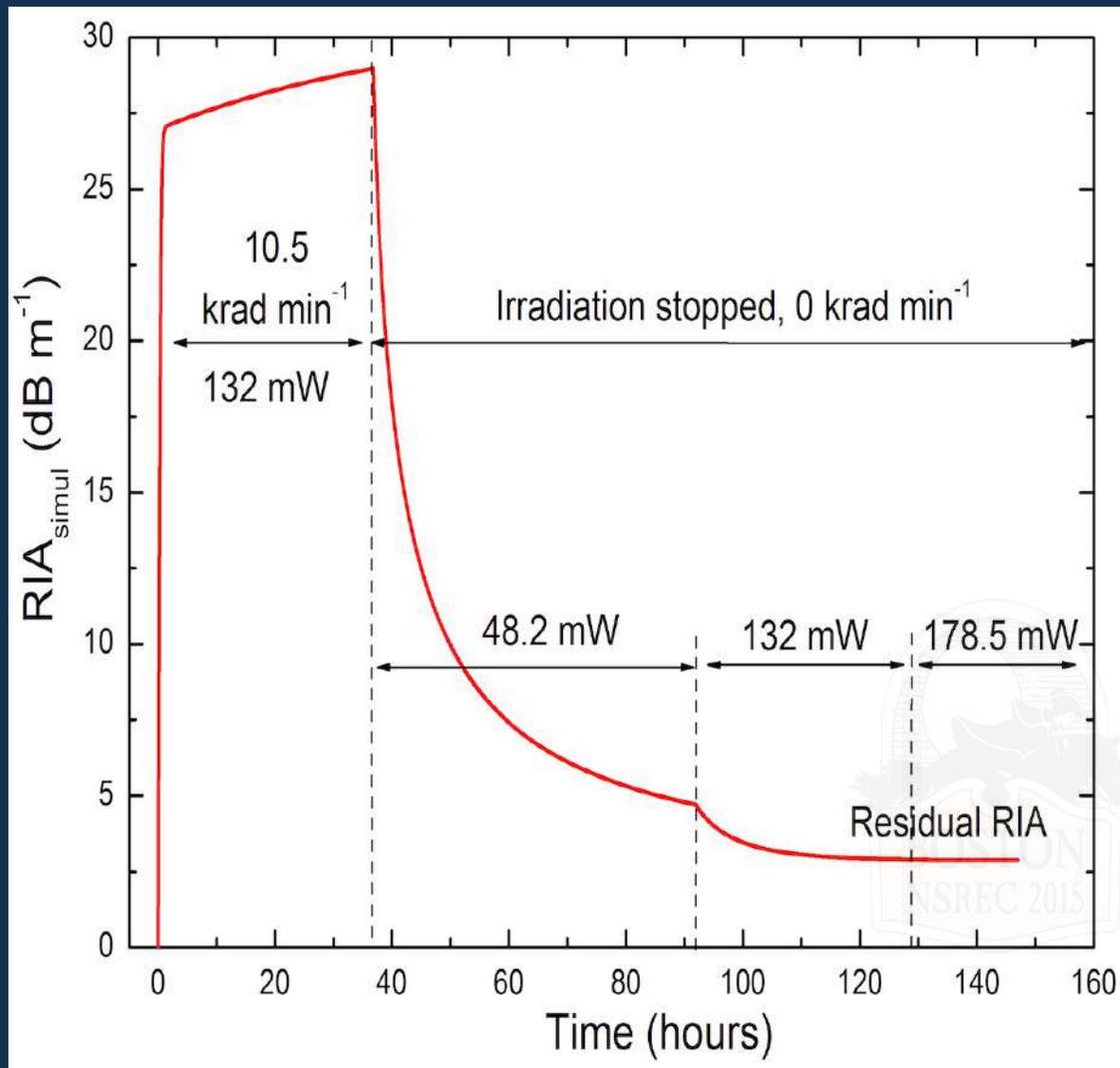
- ARI résiduelle après photo-blanchiment pur :
Une fois atteinte, ne diminue plus lorsque la puissance de pompe est augmentée

2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 3 : ARI résiduelle

Simulation



- PB (pas de RX) accéléré quand P_{in} augmentée

- Une fois atteinte, l'ARI résiduelle ne diminue plus, même si P_{in} est augmentée

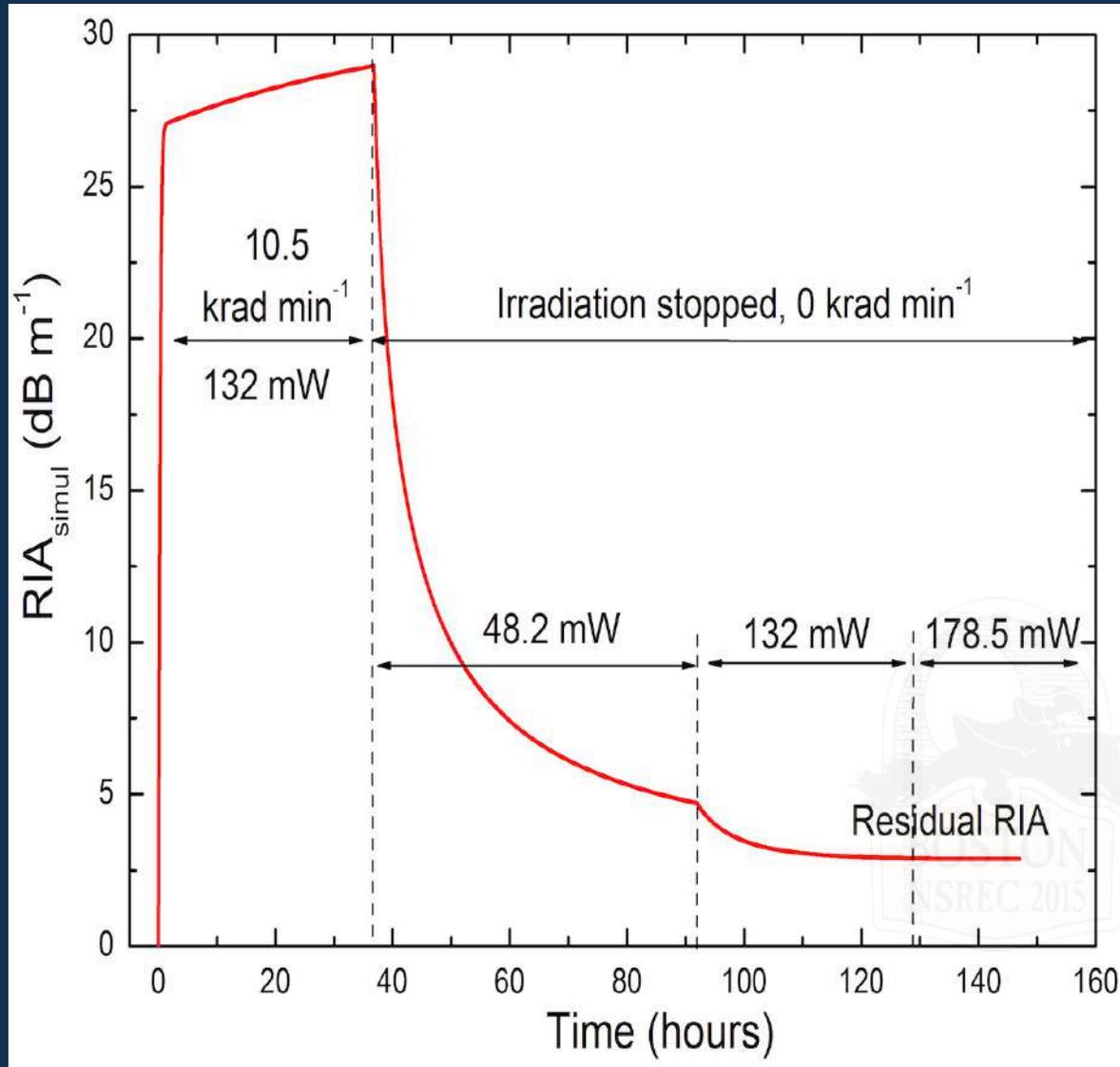


2 – Modèles physiques locaux

Validation modèle 2 (fibres erbium)

Test 3 : ARI résiduelle

Simulation



- PB (pas de RX) accéléré quand P_{in} augmentée

- Une fois atteinte, l'ARI résiduelle ne diminue plus, même si P_{in} est augmentée



Tous les comportements originaux rapportés ici sont reproduits par le modèle...

CONCLUSION

- Photo-blanchiment par la pompe dans les fibres Er et Yb caractérisé en détails dans les conditions adéquates (échantillons de fibres courts)
 - Des états d'équilibre locaux de la dégradation (ARI) existent.
 - Ils sont déterminés par la puissance de pompe disponible localement et le débit de dose.
 - Leur variation suit une loi puissance pour fibres Er et Yb : (D'^a/P_{in}^b)
 - Cette propriété, somme toute très logique, n'avait pu être mise en évidence plus tôt, car travail habituel sur fibres longues (longueurs « réelles »)

→ **Implications importantes pour les applications bas débits !!**

- Modèles locaux de dégradation des fibres Er et Yb (\neq mises en évidence)
 - Modèles physiques, fondé sur des mécanismes pertinents. Pas de semi-empirique.
 - Prennent naturellement en compte l'interaction radiation ionisante/pompe,
 - Modèles demandant à être raffinés (distribution de niveaux de centres à trous)
 - Contiennent a priori déjà la physique suffisante pour reproduire les comportements originaux observés (*au minimum : modèle équivalent « tout se passe comme si... »*)
- Modèles à capacité prédictive
 - Modèles locaux pouvant être implémentés dans des codes de simulation d'amplificateurs optiques fibrés longs résolus spatialement (puissance pompe, ESA et signal distribués...)

Merci pour votre attention

