

*Modélisation de la
Fonction de Distribution de la
Réflectance Bidirectionnelle (FDRB)
par Ondelettes pour le
Rendu Physiquement Réaliste*

Présenté par Luc Claustres

Directeur de thèse : R. Caubet

Encadrants : M. Paulin et Y. Boucher

Plan de la présentation



- Introduction à la problématique
- Travaux
 - développement du modèle
 - évaluation du modèle
 - application du modèle au rendu physiquement réaliste
- Conclusions
- Perspectives

Définition [Nicodemus75]

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_i d\omega_i}$$

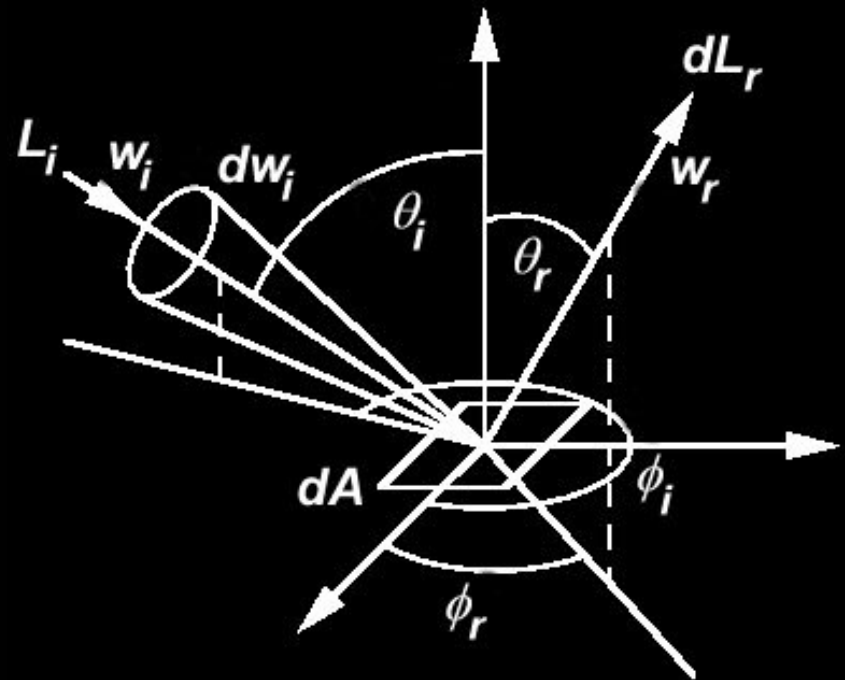
$\omega_i = (\theta_i, \phi_i)$ Direction d'incidence ou d'éclairement, angles zénithaux

$\omega_r = (\theta_r, \phi_r)$ Direction de réflexion ou d'observation, angles azimutaux

λ Longueur d'onde

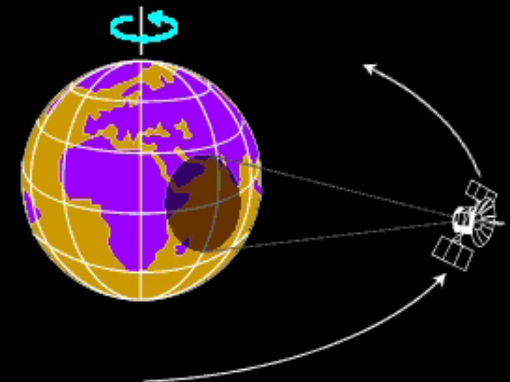
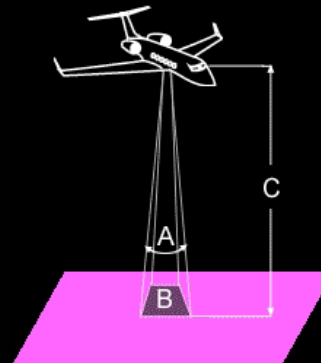
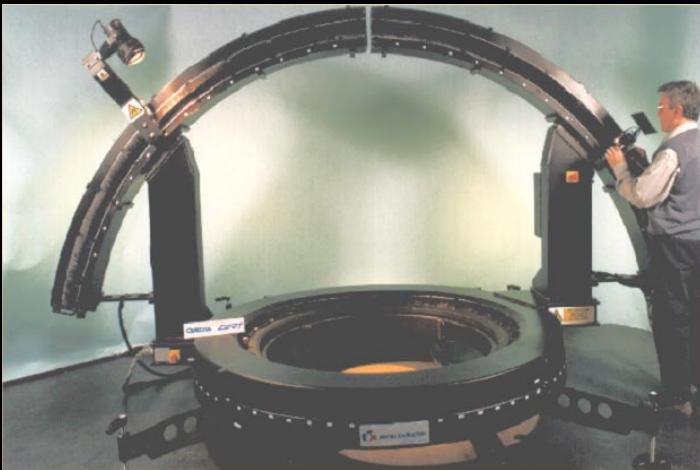
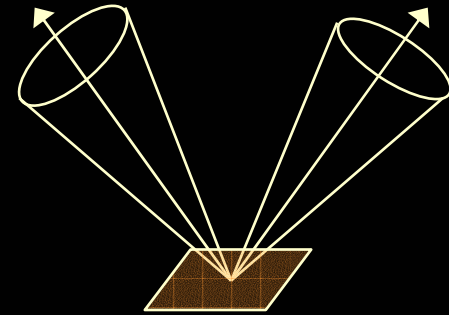
- Propriétés

- strictement positive
- conservation de l'énergie
- isotropie/anisotropie



« Mesure » de la FDRB

- Mesure réelle : Facteur de Réflectance Biconique
- Possible à différentes échelles

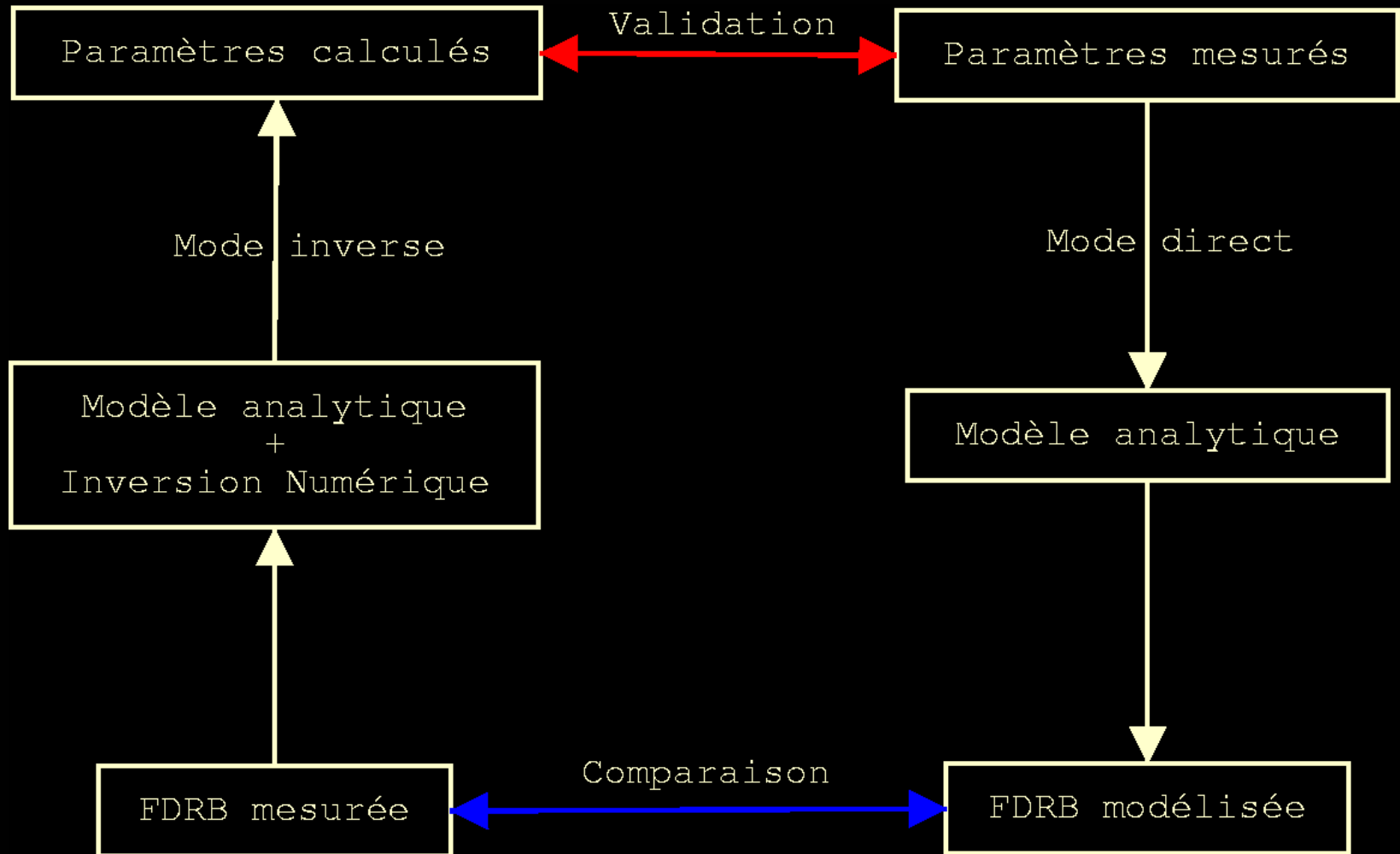


Des mesures aux modèles



- Pourquoi ne pas utiliser directement des mesures ?
 - compression
 - performances
 - fonctionnalités additionnelles
- Modélisation explicite de la surface
 - comprendre les phénomènes physiques et en déduire la FDRB
 - connaissance « intime » de la surface nécessaire
 - calculs complexes
- Modélisation implicite de la surface
 - trouver une représentation simple de la FDRB
 - aucune théorie ou hypothèse restrictive sous-jacente
 - nécessite des mesures + inversion

Approche analytique [Verstraete90]

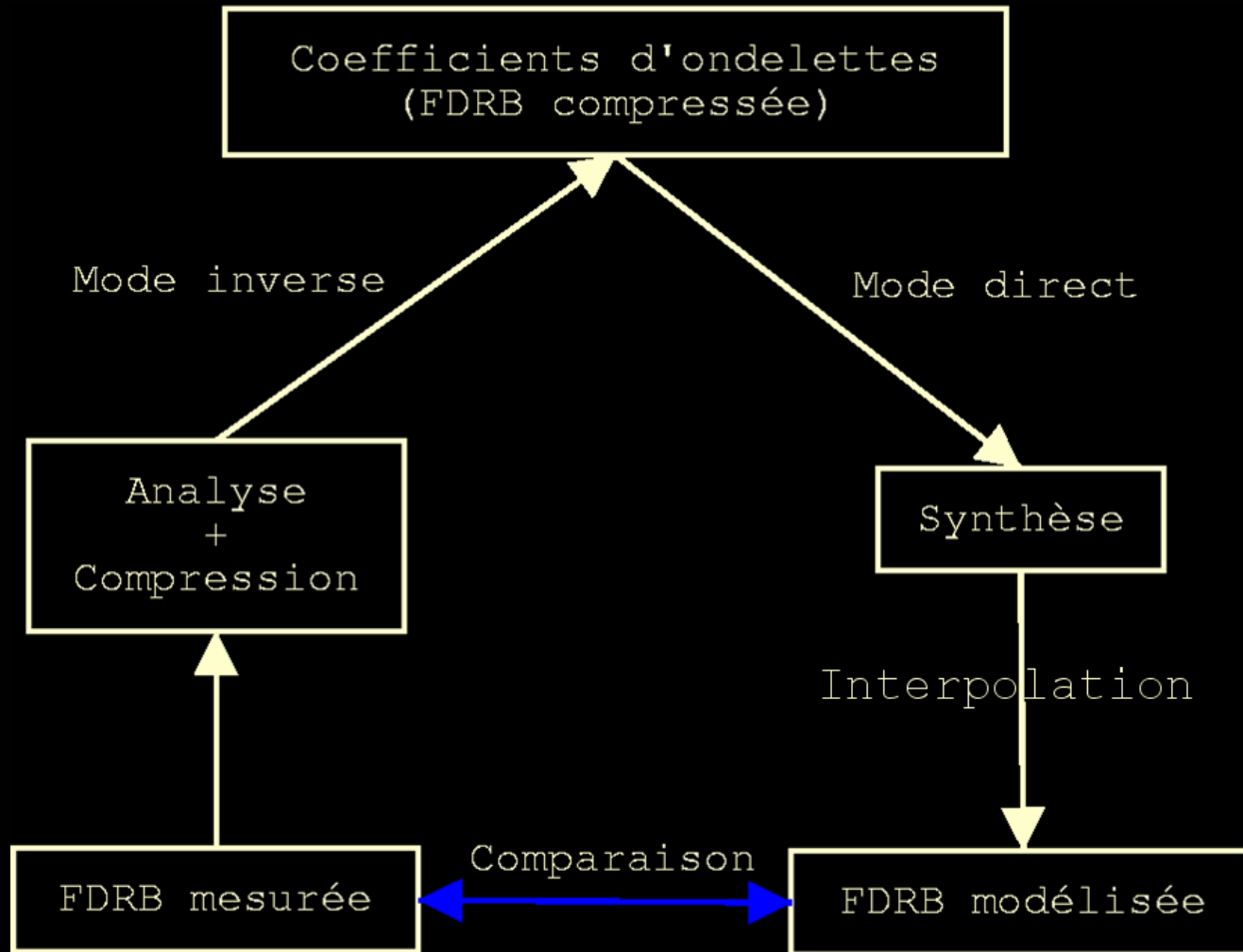


De l'analytique au numérique



- Limitations des modèles analytiques
 - méthodes d'ajustement numériques parfois instables
 - convergence
 - précision
 - sensibilité aux conditions initiales (non-linéarité)
 - trop spécifiques
 - domaine angulaire/spectral restreint
 - classe de surface
 - souvent impossibles à utiliser de manière indirecte
 - aucun vrai modèle spectral
- Modélisation numérique universelle
 - réseaux de neurones
 - ondelettes

Approche numérique



Avantages des ondelettes

- Compression

- Multirésolution

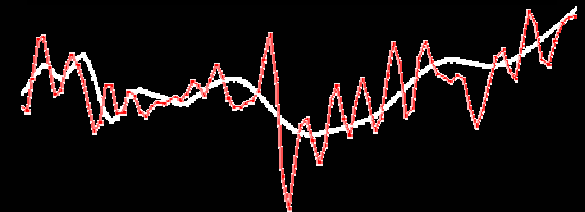
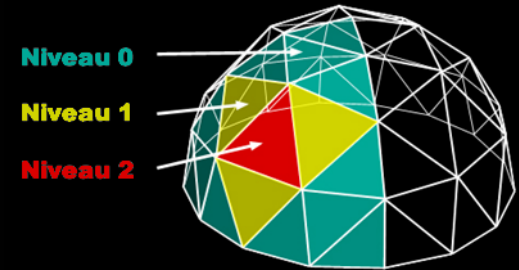
- Débruitage

- Vitesse

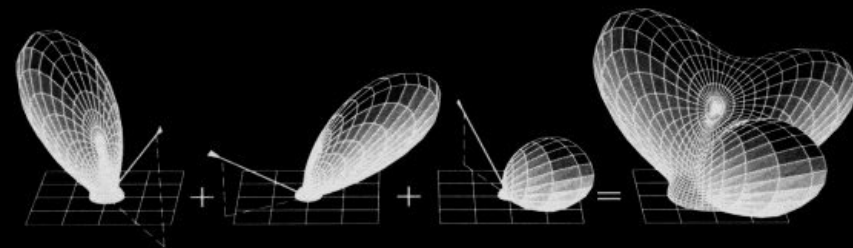
- Linéarité

- Adaptées aux signaux basses fréquences avec hautes fréquences localisées : typiquement surfaces spéculaires

Amplitude des coefficients d'ondelettes ↔ Importance dans la représentation du signal



$$O(n) \neq O(n \log n)$$



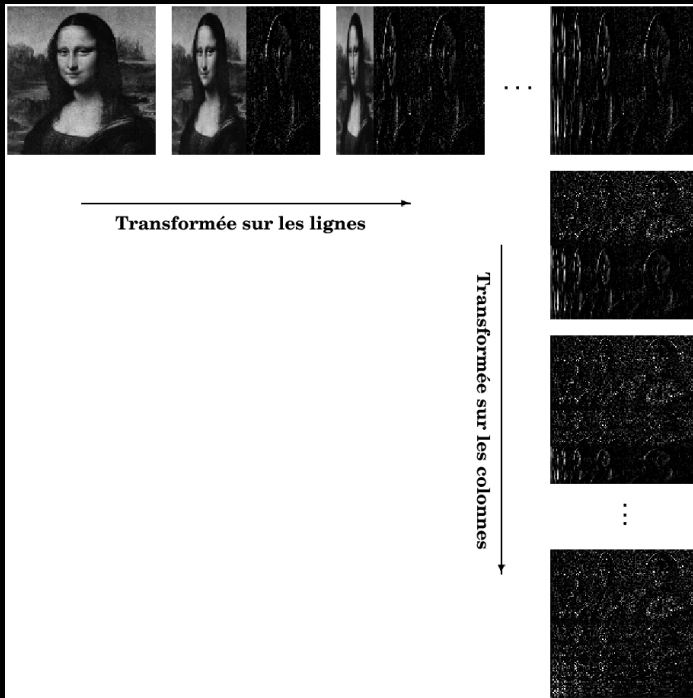
Plan de la présentation



- Introduction à la problématique
- Travaux
 - développement du modèle
 - évaluation du modèle
 - application du modèle au rendu physiquement réaliste
- Conclusions
- Perspectives

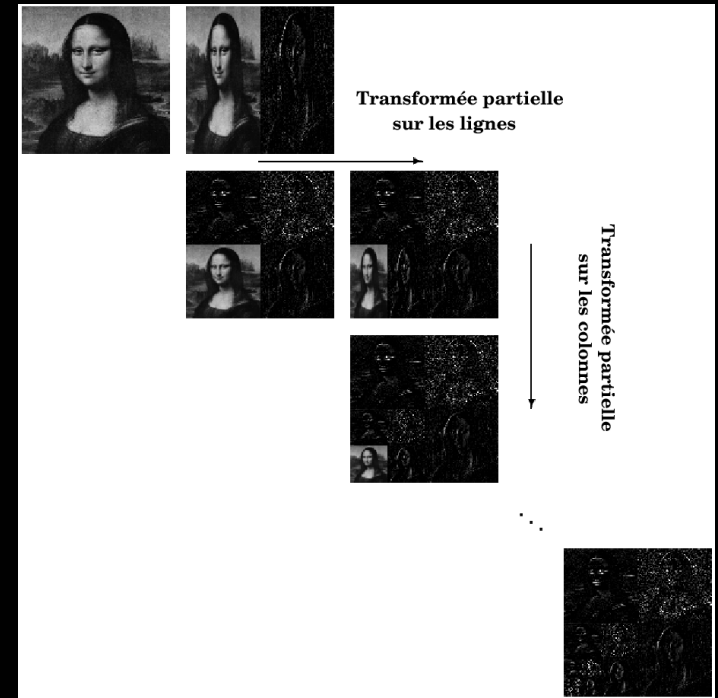
Ondelettes multi-dimensionnelles : R^n

Approche standard



produit de décompositions

Approche non-standard



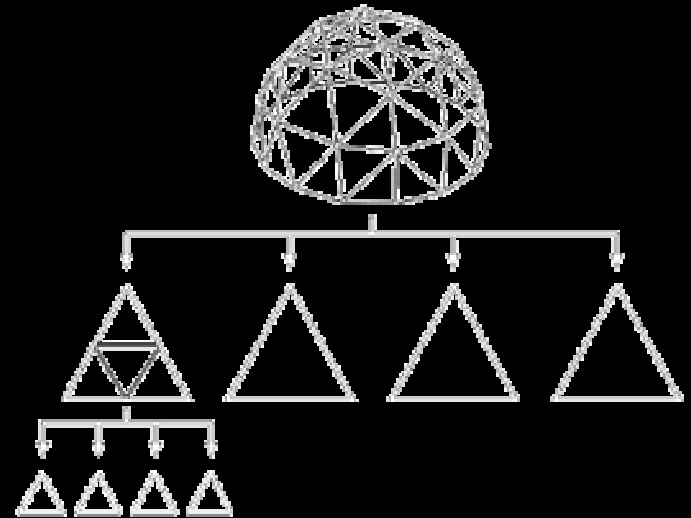
produit de fonctions de base

Ondelettes sphériques [Schröder95]

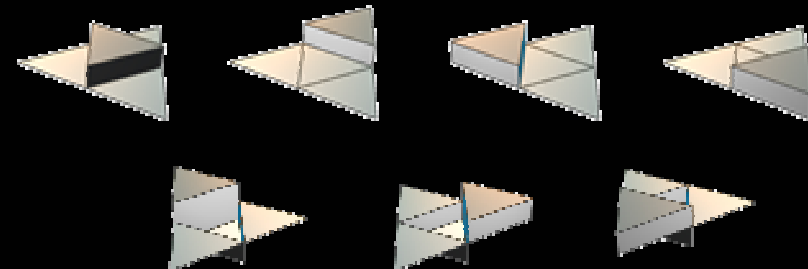
- Subdivision récursive d'une base pyramidale, composée de triangles
 - projection à chaque niveau
 - utilisable sur la sphère ou l'hémisphère
 - régulière en angle solide



- Structure multirésolution
 - lien père-fils
 - quad-tree



- Extension simple de la base de Haar
 - fonctions d'échelle
 - fonctions d'ondelette



Ondelettes et représentation de FDRB

- Une FDRB dans le cas le plus général est définie sur $H^2 \times H^2 \times R \rightarrow R$
- Ondelettes multi-dimensionnelles
 - + de nombreuses bases disponibles
 - nécessite une transformation pour passer de $H^2 \times H^2$ à R^4
 - compression/transformation globale
- Ondelettes sphériques
 - + indépendantes de la paramétrisation de la sphère en (θ, φ)
 - restreintes à H^2 (incidence fixée)
 - impossible de gérer la dépendance spectrale (1D)
- L'idéal est de combiner ces deux approches

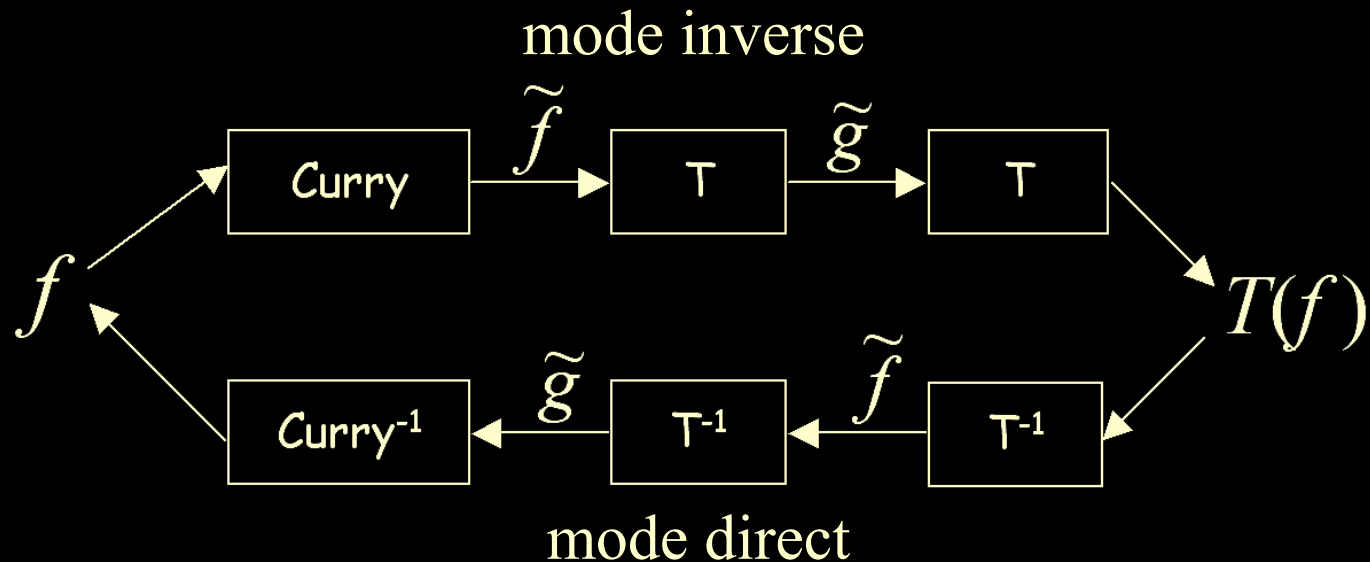
Transformée par ondelettes générique

- La transformée par ondelettes peut être vue comme un opérateur linéaire d'ordre supérieur
 - analyse $T : (f : A \rightarrow B) \mapsto T(f)$
 - synthèse $T^{-1} : T(f) \mapsto (f : A \rightarrow B)$
 - linéarité $T(\alpha f + \beta g) = \alpha T(f) + \beta T(g)$
 - isomorphisme $T^{-1}(T(f)) = f$
- La théorie du lambda-calcul [Barandregt84] permet de formaliser la notion très générale de fonction
- La *curryfication* [Révész88] transforme la définition d'une fonction en conservant la même *sémantique*

$$f : A \times B \rightarrow C \equiv \tilde{f} : A \rightarrow (\tilde{g} : B \rightarrow C)$$

Transformée par ondelettes générique

- Processus de transformation
 - structurer le signal selon chaque espace (curryfication)
 - appliquer une transformée + compression sur chaque espace
- Processus de transformation inverse
 - appliquer une transformée inverse sur chaque espace
 - restructurer le signal dans l'ordre original (décurryfication)



Apports de la généricité

- Analyse/Synthèse partielle selon une dimension préférentielle
- Plusieurs niveaux de compression
- Compression adaptative par espace, i.e. le seuil est calculé en fonction des variations locales du signal

$$s_{local} = s_{global} \cdot \sqrt{\left| \frac{\max}{\tilde{s}} - \frac{\min}{\tilde{s}} \right|}$$

- La qualité de la modélisation pour un taux de compression fixé dépend de la séquence d'espaces choisie lors de la curryfication
- Transformée générique \equiv vision d'ordre supérieur de l'approche standard

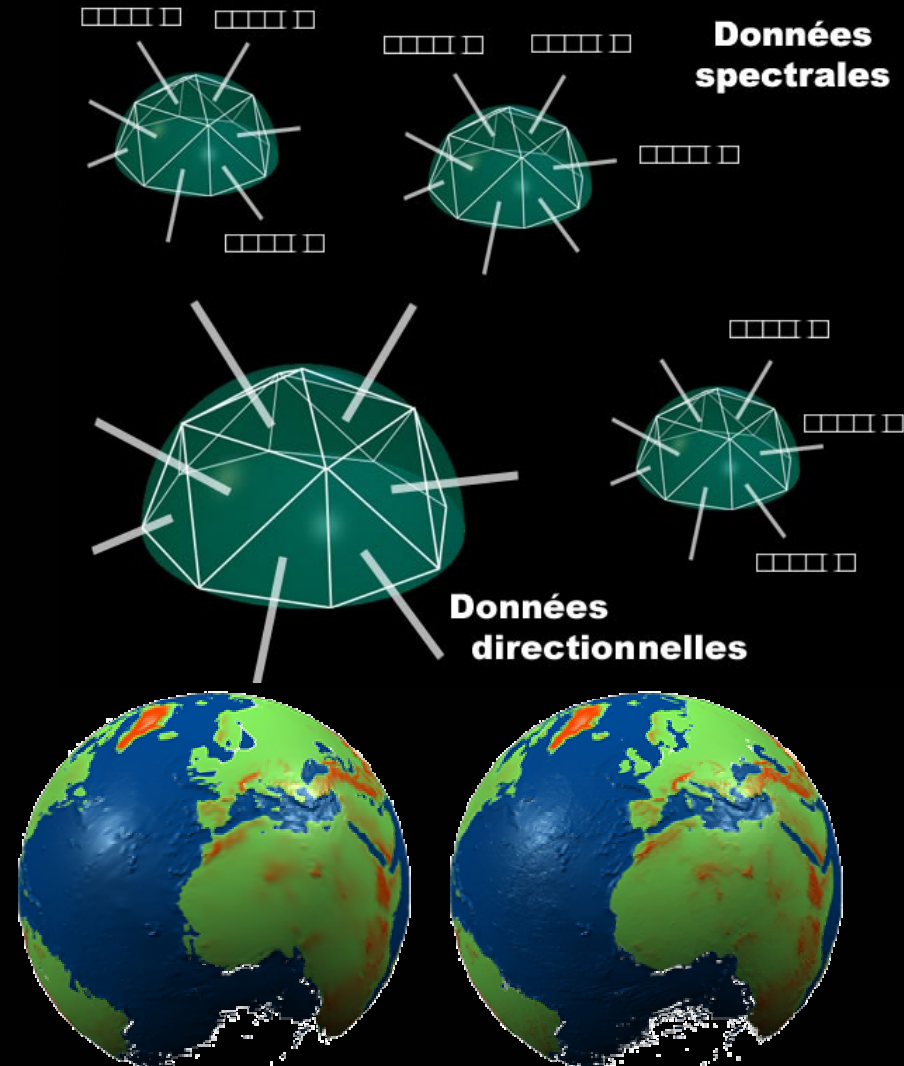
Généricité et FDRB

- La FDRB, comme tout terme radiométrique, est décomposable :
 - aspect directionnel : ondelettes sphériques sur H^2
 - aspect spectral : ondelettes unidimensionnelles sur R
- Pour la dimension spectrale
 - large choix de bases (52)
 - sélection selon un critère utilisateur (compression/erreur)
- Séquence des espaces choisie :
 - 1) directions d'incidence
 - 2) directions de réflexion
 - 3) longueur d'onde

Généricité et FDRB

Une transformation par ondelettes sphériques générique peut se définir indifféremment sur :

- Une valeur (monochromatique)
 - réflectance directionnelle-hémisphérique
 - émissivité directionnelle
- Un spectre
 - réflectance d-h spectrale
 - émissivité directionnelle spectrale
- Une subdivision sphérique
 - FDRB monochromatique
- Une subdivision sphérique + spectre
 - FDRB spectrale
- Des objets définissant un espace vectoriel normé...



Implémentation informatique

- Architecture logicielle
 - programmation par objet générique (C++)
- Structure de stockage
 - arbre linéaire semi-statique [Müller99]
 - développement d'une algèbre sur les tableaux

1	0	1	1	1	0	0	0
0.1	0.24	0.36	0.8				
Numéro de bande : 0							



1	1	1	0	1	0	1	0
0.14	0.4	0.6	0.2	0.8			
Numéro de bande : 4							



— — —

1	0	1	1	0	0	0	1
0.1	0.24	0.36	0.8				
Numéro de bande : 4							

+

=

1	0	1	1	0	1	0	1
0.14	0.04	0.06	0.2	0.2			
Numéro de bande : 4							

1	0	1	1	0	1	0	1
0.24	0.28	0.42	0.2	1.0			
Numéro de bande : 4							

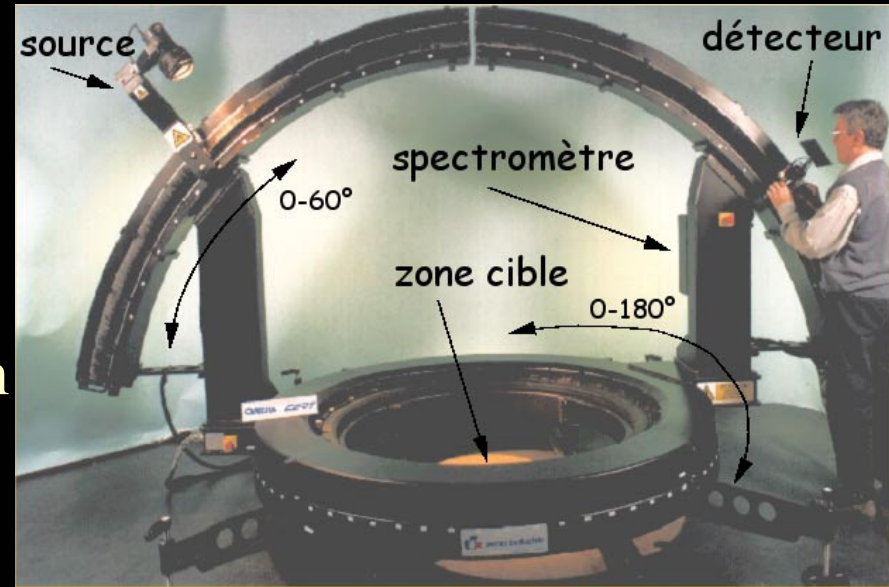
Plan de la présentation



- Introduction à la problématique
- Travaux
 - développement du modèle
 - évaluation du modèle
 - application du modèle au rendu physiquement réaliste
- Conclusions
- Perspectives

Mesures : goniomètre ONERA-DOTA

- Source incohérente
- Précision absolue $> 5\%$
- Taille cible : de 2cm à 22cm
- Angle zénithal : 0° to 60°
- Angle azimutal relatif : 0° to 180°
- Bande spectrale : 420nm to 950nm
- Résolution spectrale : 3nm
- Mesures de polarisation possible
- Nombre de points de mesure :
474 directions, 1024 longueurs d'onde = 485 376 points
- Mesure de nombreux échantillons :
 - naturels (bois, sable, herbe, gravier, goudron)
 - artificiels (mélaminé, plastique, toile, peintures, spectralon, velours)



Evaluation : estimateurs de l'erreur

- Ecart moyen
- Erreur quadratique moyenne
- Maximum de l'écart absolu
- Ecart moyen relatif
- Erreur quadratique moyenne relative
- Maximum de l'écart relatif
- Angle spectral

$$\epsilon_1^a = \frac{1}{n} \sum_i |f'_i - f_i|$$

$$\epsilon_2^a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (f'_i - f_i)^2}$$

$$\epsilon_\infty^a = \max_i |f'_i - f_i|$$

$$\epsilon_1^r = \frac{1}{n} \sum_i \frac{|f'_i - f_i|}{f_i}$$

$$\epsilon_2^r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i \frac{(f'_i - f_i)^2}{f_i^2}}$$

$$\epsilon_\infty^r = \max_i \frac{|f'_i - f_i|}{f_i}$$

$$as(\vec{s}_1, \vec{s}_2) = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2}{\|\vec{s}_1\| \cdot \|\vec{s}_2\|}\right)$$

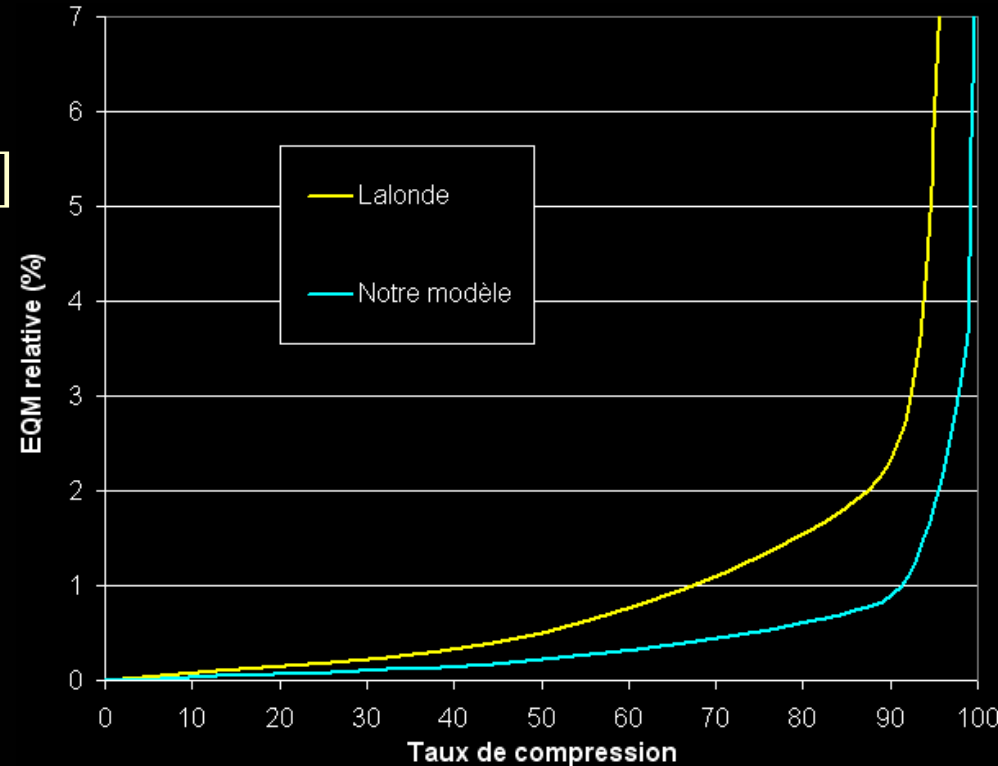
Evaluation du modèle : démarche



- Tests de non-régression
- Evaluation de l'erreur de modélisation / taux de compression
- Apport de la compression générique
- Etude de sensibilité au bruit de mesure
- Tests de performances

Evaluation / travaux antérieurs

- Modèle de Lalonde [Lalonde97]
 - approche non-standard 4D
 - 3 bases implémentées
 - non spectral
 - pas d'isotropie



- Comparaison sur un jeu de mesures virtuel obtenu à partir du modèle de FDRB analytique de Phong [Phong75]
- Meilleure exploitation de la cohérence incidente

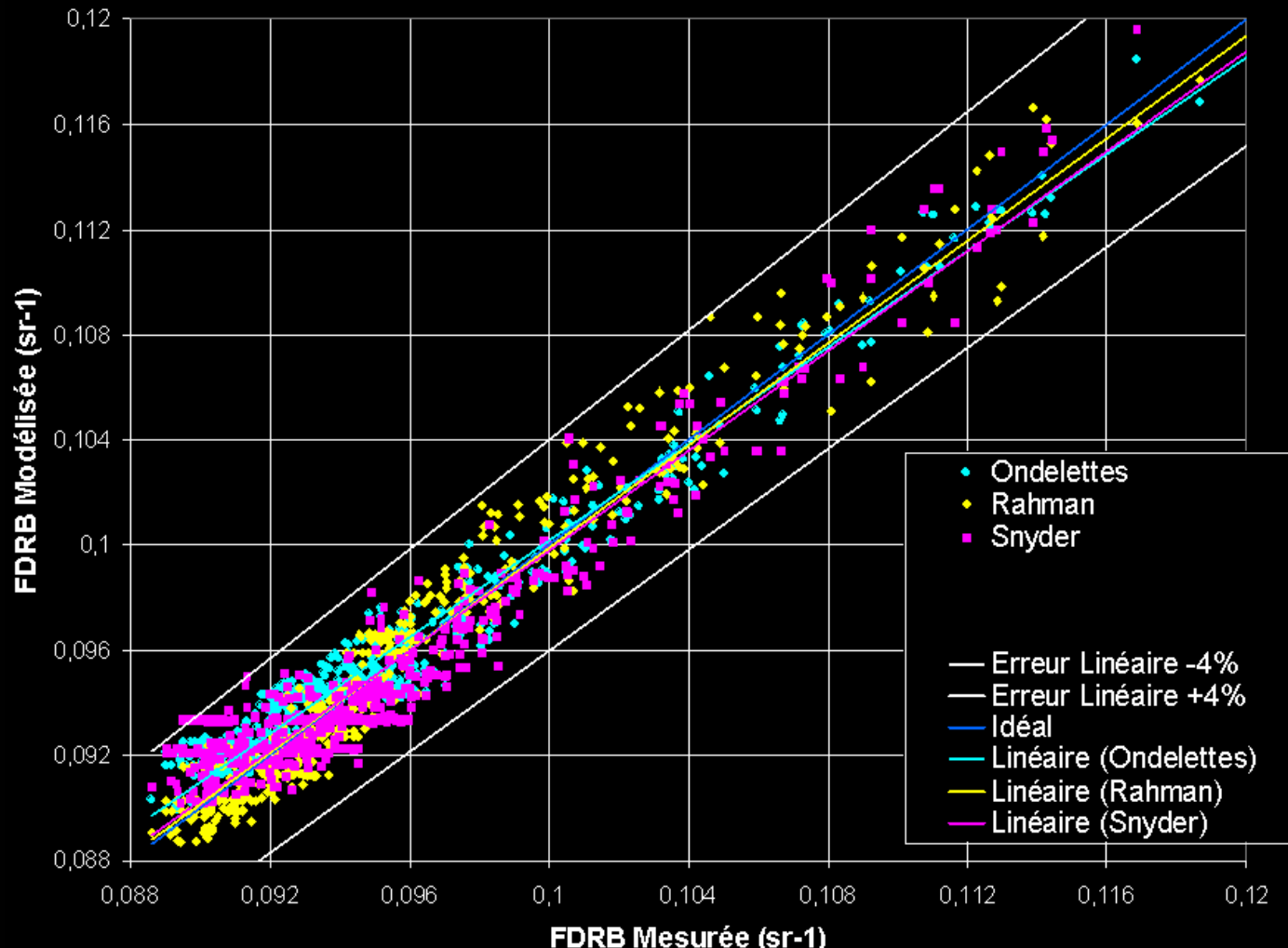
Evaluation / modèles analytiques



- Utilisation du code d'inversion de l'ONERA
 - une vingtaine de modèles analytiques
 - méthode d'inversion non-linéaire du simplex
 - sélection des meilleurs paramètres selon l'erreur de modélisation
- Inversion sur les mêmes jeux de mesures à longueur d'onde fixée
- Exemples
 - sable : 800 nm
 - plastique : 650 nm

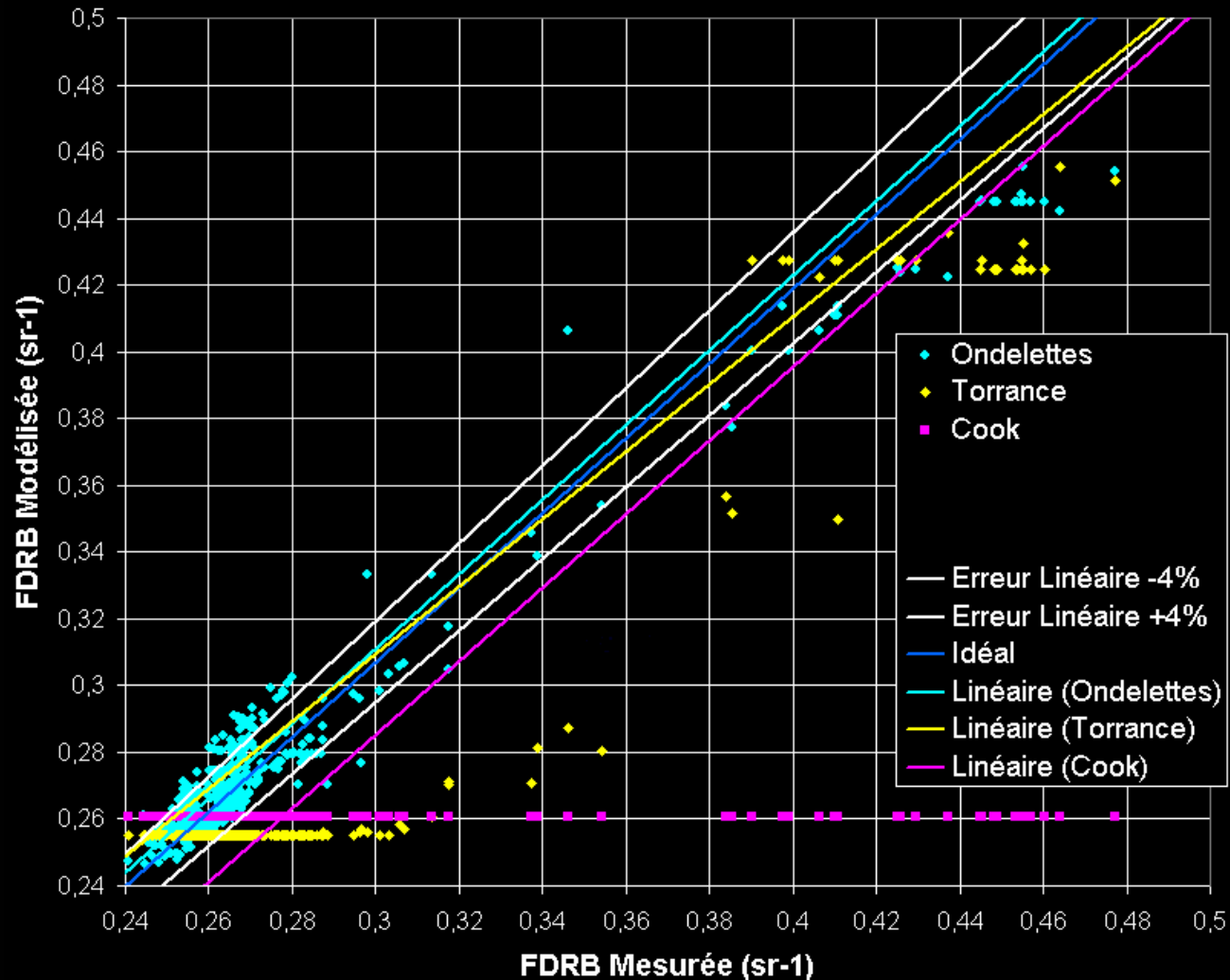
Evaluation / modèles analytiques

- Surfaces plutôt diffuses: la modélisation est comparable avec un taux de compression $> 20:1$



Evaluation / modèles analytiques

- La modélisation est meilleure pour les surfaces spéculaires



Evaluation du modèle : démarche



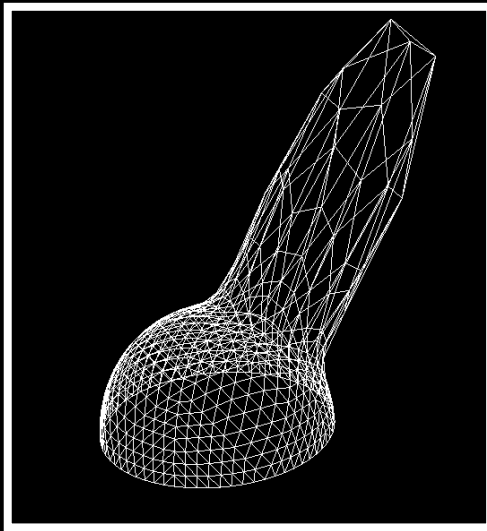
- Tests de non-régression
- Evaluation de l'erreur de modélisation / taux de compression
- Apport de la compression générique
- Etude de sensibilité au bruit de mesure
- Tests de performances

Evaluation : FDRB isotropes

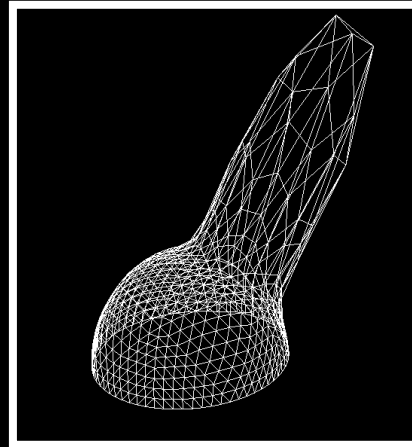
- Données
 - mesures réelles : herbe, spectralon, plastique, toile, sable, bois, mélaminé
 - mesures simulées : modèle analytique de Lewis [Lewis93]
- Résultats
 - erreur globale souvent $< 5\%$ avec un taux de compression $> 20:1$
 - meilleurs dans le cas spectral : spectres lisses
 - moins bons pour les surfaces spéculaires (plastique)
- Amélioration de la compression pour la spécularité
 - niveau de subdivision
 - seuil adapté au niveau local

r_c	global	local
128:1	37 %	20 %
256:1	41 %	30 %

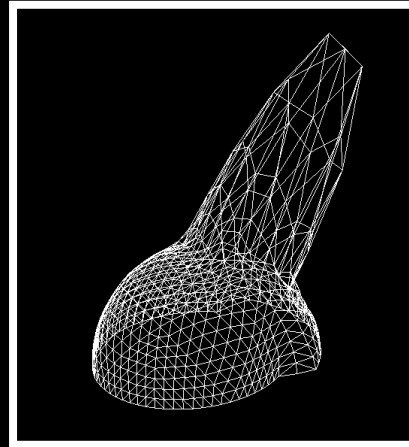
Evaluation : exemple de compression



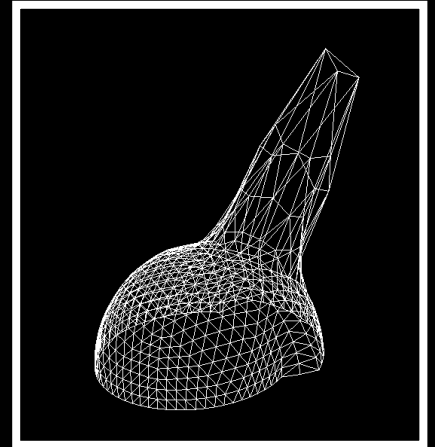
Original



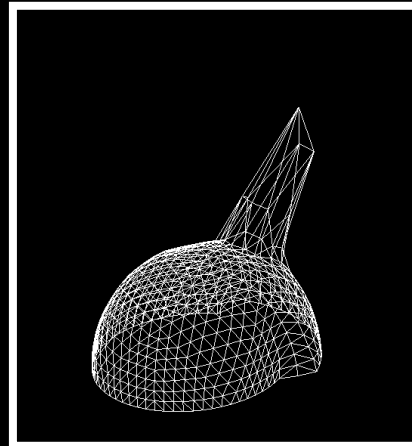
10:1



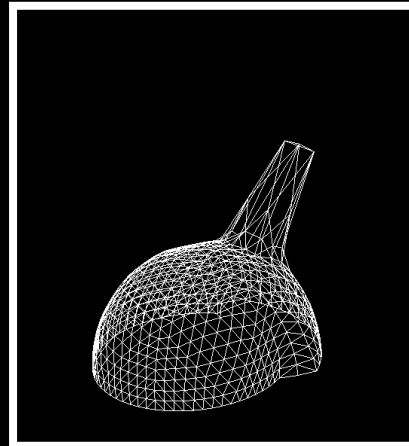
20:1



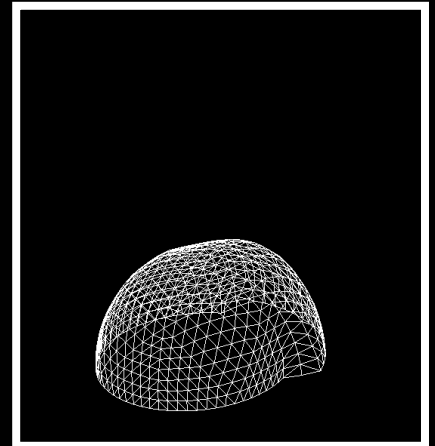
30:1



50:1



100:1



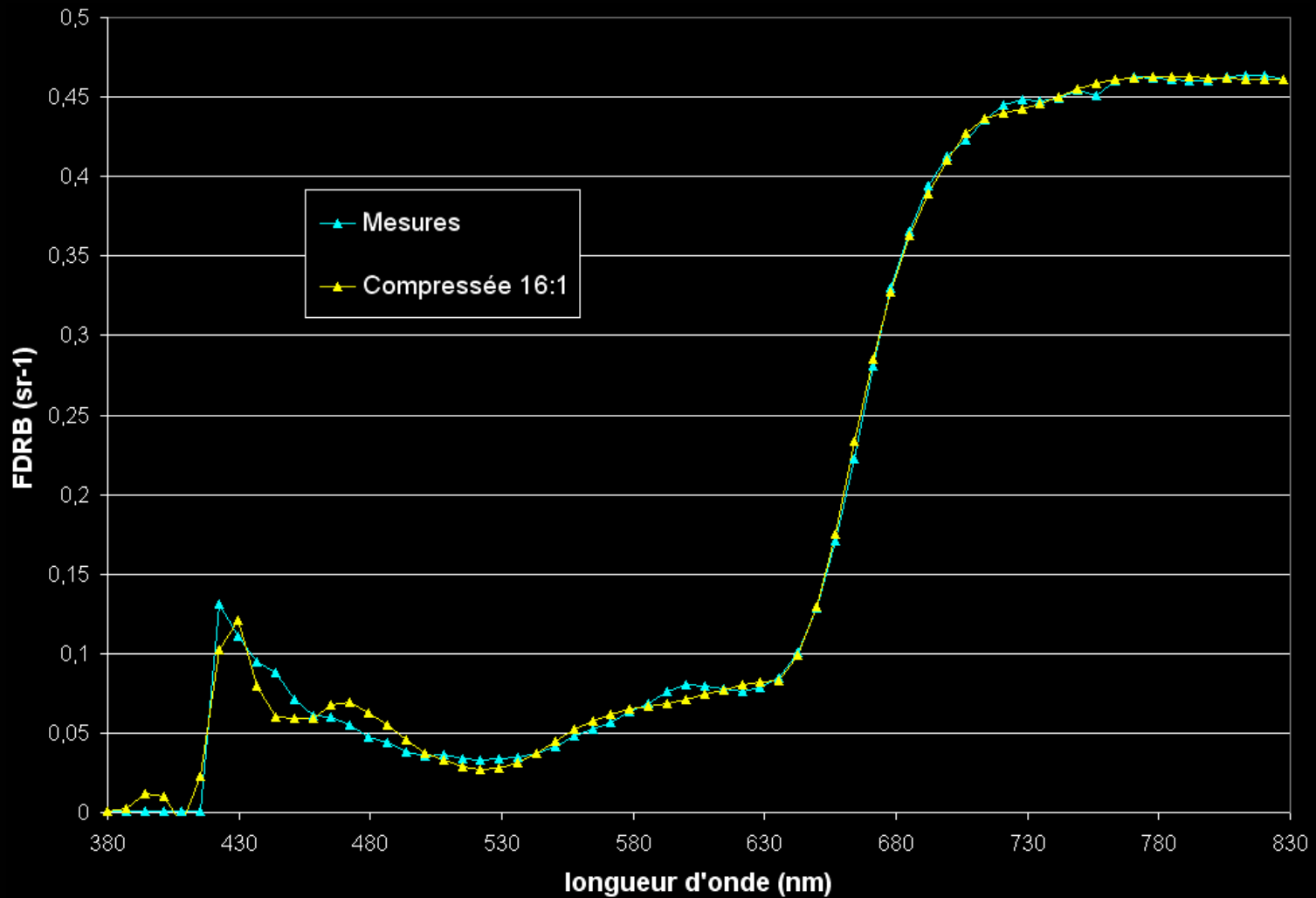
200:1

Evaluation : FDRB anisotropes



- Données
 - mesures réelles : velours
 - mesures simulée : modèle analytique de Ward [Ward92]
- Résultats
 - erreurs comparables au cas isotrope pour les mesures simulées
 - erreur L_2 importante au-delà de 16:1 pour les données réelles
 - sensibilité dans les zones de faible niveau
 - nécessité de borner les valeurs < 0 à cause du bruit
 - oscillations : phénomène de Gibbs [Jeffreys88]

Evaluation : FDRB anisotropes



Evaluation du modèle : démarche



- Tests de non-régression
- Evaluation de l'erreur de modélisation / taux de compression
- Apport de la compression générique
- Etude de sensibilité au bruit de mesure
- Tests de performances

Evaluation : compression générique

- FDRB anisotrope à λ fixé
 - cohérence entre incidences

r_c	sans	avec	gain (%)
8:1	7,8 %	5,4 %	44
16:1	25 %	15 %	66
64:1	35 %	28 %	25

- FDRB isotrope spectrale
 - cohérence entre spectres

r_c	sans	avec	gain (%)
8:1	4,2 %	1,9 %	121
16:1	11 %	7,5 %	46
64:1	22 %	9,4 %	134

- Problème du choix des différents seuils à chaque niveau

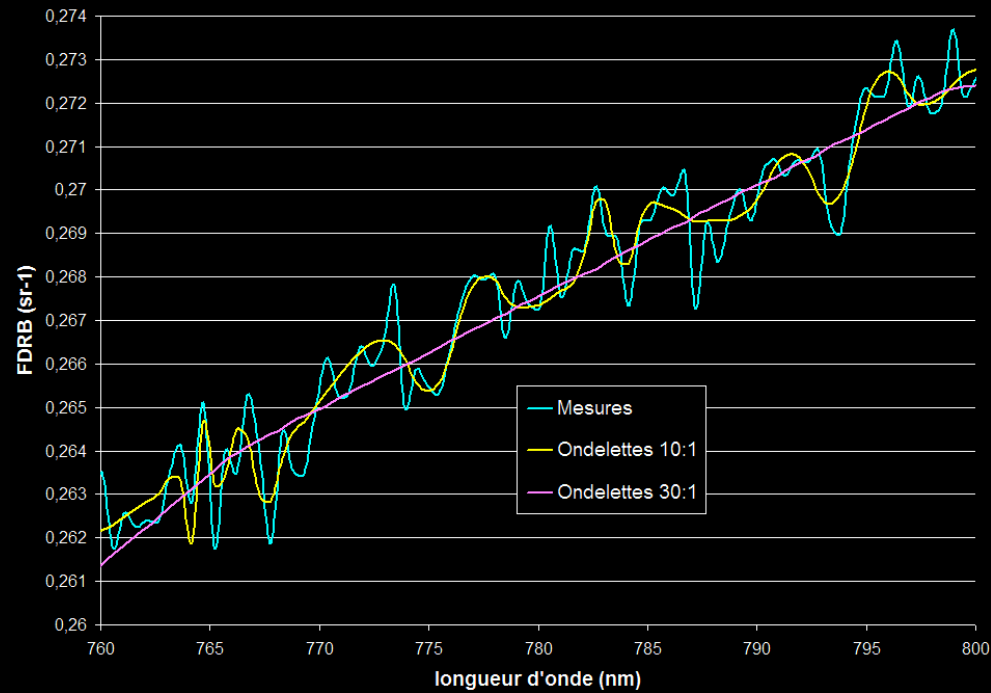
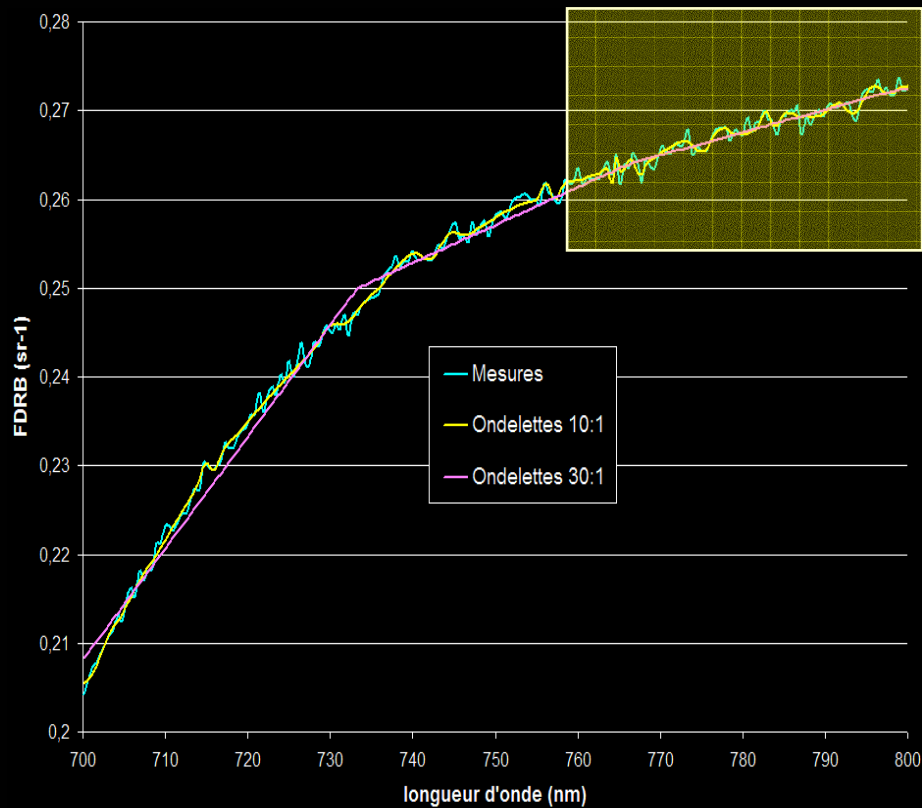
Evaluation du modèle : démarche



- Tests de non-régression
- Evaluation de l'erreur de modélisation / taux de compression
- Apport de la compression générique
- Etude de sensibilité au bruit de mesure
- Tests de performances

Compression = débruitage + lissage

FDRB de la toile



Etude de sensibilité : données



- Choix du bruit de mesure simulé
 - gaussien
 - multiplicatif/additif
- Détermination de niveaux réalistes
 - étude des mesures
- Choix du jeu de mesure virtuel idéal
 - noyau directionnel : modèle de Lewis
 - noyau spectral : sinusoïde à fréquence variable
- Choix de la modélisation de référence
 - niveau de subdivision sphérique égal à 3
 - échantillonnage spectral de 2 nm
 - taux de compression

Etude de sensibilité : démarche



- Référence : jeu idéal exempt de bruit compressé
 - 1) Bruiter le jeu idéal exempt de bruit
 - 2) Evaluer l'erreur initiale
 - 3) Modéliser dans les mêmes conditions que la référence
 - 4) Evaluer les erreurs / au jeu idéal
 - 5) Comparer avec les résultats de la référence
- Le modèle est peu sensible au bruit de mesure si les différences observées en phase 5 sont minimales

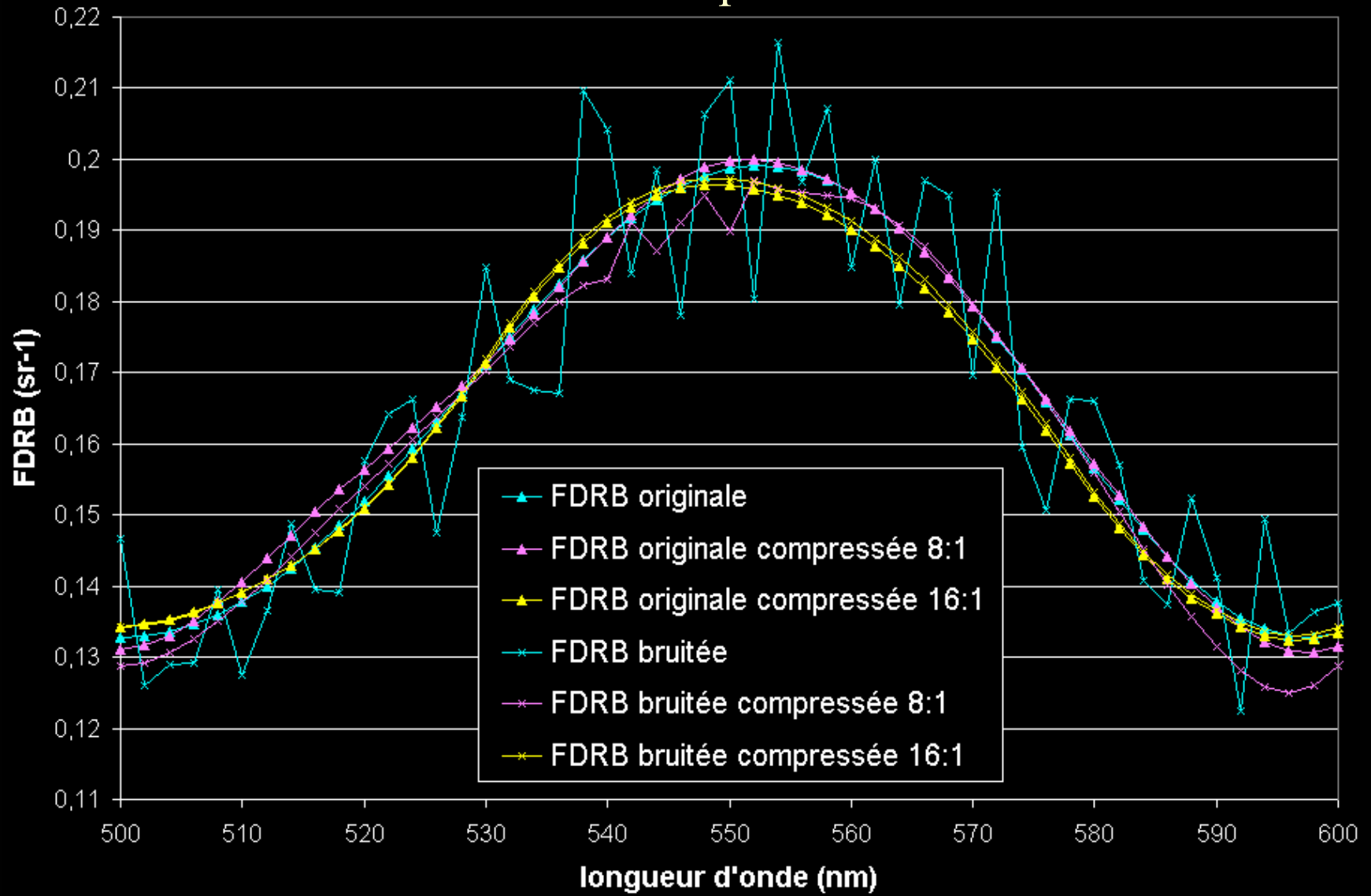
Etude de sensibilité : résultats



- Pour des niveaux $\leq 5\%$ suppression quasi-complète du bruit si la compression est assez importante
- Au-delà amélioration sensible du jeu de mesures
 - FDRB bruitée compressée \rightarrow FDRB non bruitée compressée
 - convergence vers la *forme* initiale du spectre : angles spectraux
- Problème du seuil de compression
 - éliminer le bruit mais pas le signal

Etude de sensibilité : résultats

bruit multiplicatif 5%



Evaluation du modèle : démarche



- Tests de non-régression
- Evaluation de l'erreur de modélisation / taux de compression
- Apport de la compression générique
- Etude de sensibilité au bruit de mesure
- Tests de performances

Evaluation : coût mémoire

	Cas	Monochromatique		Spectral	
	FDRB	Isotrope	Anisotrope	Isotrope	Anisotrope
Etat Initial (1:1)	#	16 384	1 048 576	1 228 800	67 108 864
	Ko	171	10 674	13 456	740 764
Etat Compressé (16:1)	#	1 024	65 536	76 800	4 194 304
	Ko	24	1 006	2 217	111 627
Etat Compressé (64:1)	#	256	16 348	7 213	216 175
	Ko	7	441	865	28 265

Evaluation : temps de calcul

- Temps d'évaluation moyen (μs)

Cas	Monochromatique		Spectral	
	Isotrope	Anisotrope	Isotrope	Anisotrope
Etat Initial (1:1)	3,58	3,91	52,16	55,76
Compressé (16:1)	6,38	8,52	48,56	70,25
Compressé (64:1)	7,47	81,22	51,88	111,13

FDRB	Isotrope	Anisotrope
Harmoniques sphériques	55	115
Ondelettes	4	9

- Inversion (s)

FDRB	Isotrope	Anisotrope
Harmoniques sphériques	0,092	16 950
Ondelettes	0,003	56

(AthlonXP 1800+~1.53Ghz)

Plan de la présentation



- Introduction à la problématique
- Travaux
 - développement du modèle
 - évaluation du modèle
 - application du modèle au rendu physiquement réaliste
- Conclusions
- Perspectives

Apports du modèle par ondelettes



- Logiciel de rendu physiquement réaliste *Ray Of Light*
 - architecture modulaire sous forme de *plugins*
 - description de la scène
 - algorithmes d'éclairage
- Unification des représentations de fonctions de distribution
 - FDRB/FDTB
 - DPS
 - FDE
 - fonctions de phase
- Dérivation d'un schéma d'échantillonnage par importance
 - méthode indirecte (inversion numérique de la fonction)
 - efficace en utilisant la multi-résolution
- Optimisation de calculs spectraux

Modélisation de FDRB mesurées

mélaminé



velours



plastique



toile



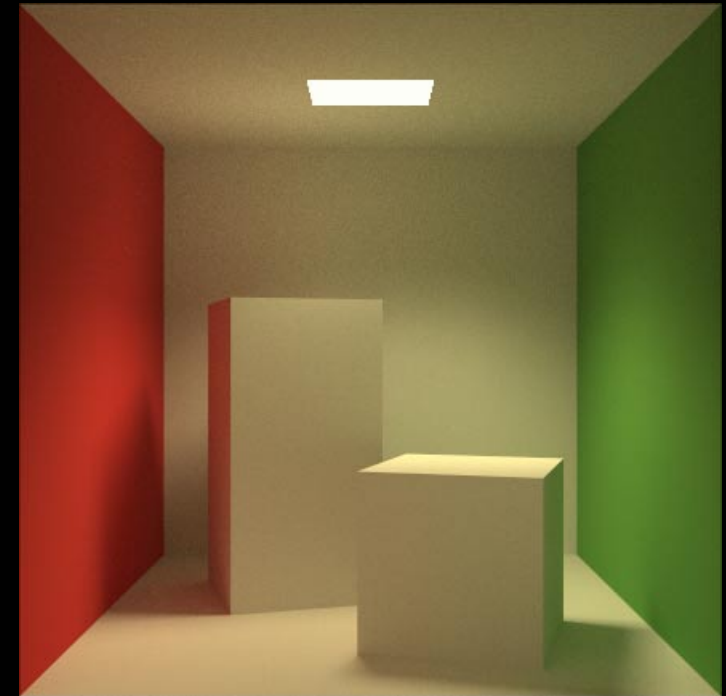
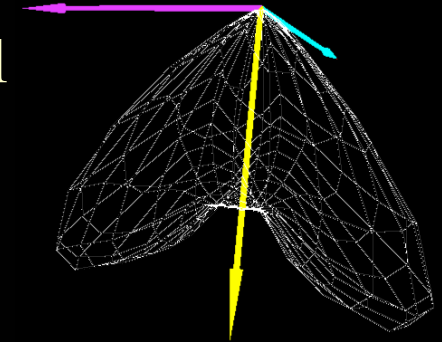
toile



velours satiné

Modélisation d'autres termes

- Moins bonne que pour les FDRB
 - erreur relative $< 10\%$ pour compression $> 20:1$
 - spectres moins lisses
 - plusieurs lobes

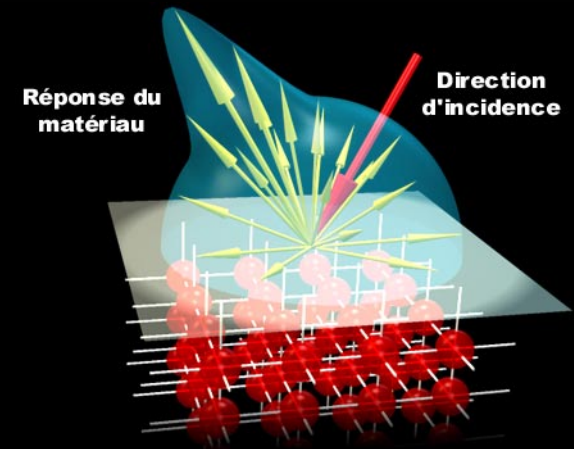


Echantillonnage d'importance

- Résolution de l'équation du rendu par intégration de Monte Carlo

$$L_r(x, \theta_r, \phi_r) = L_e(x, \theta_r, \phi_r) + \int_{\Omega_i} f_r(x, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) L_i(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

- Densité de probabilité optimale $p \propto f_r \cos \theta_i$



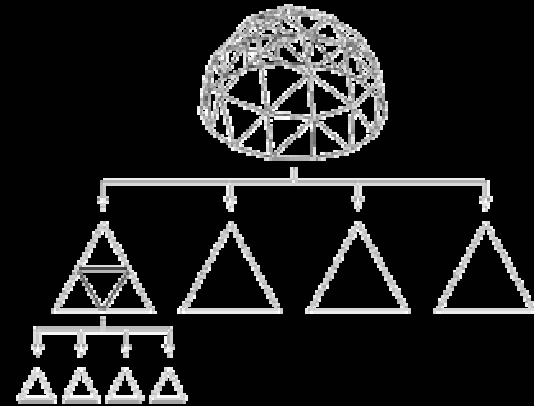
A FINIR

Echantillonnage d'importance

- Algorithme

- sélection d'un triangle selon son importance dans l'hémisphère

$$p(T_j^k) = \frac{v(T_j^k) \cdot d\omega(T_j^k)}{\int f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) d\omega_r}$$



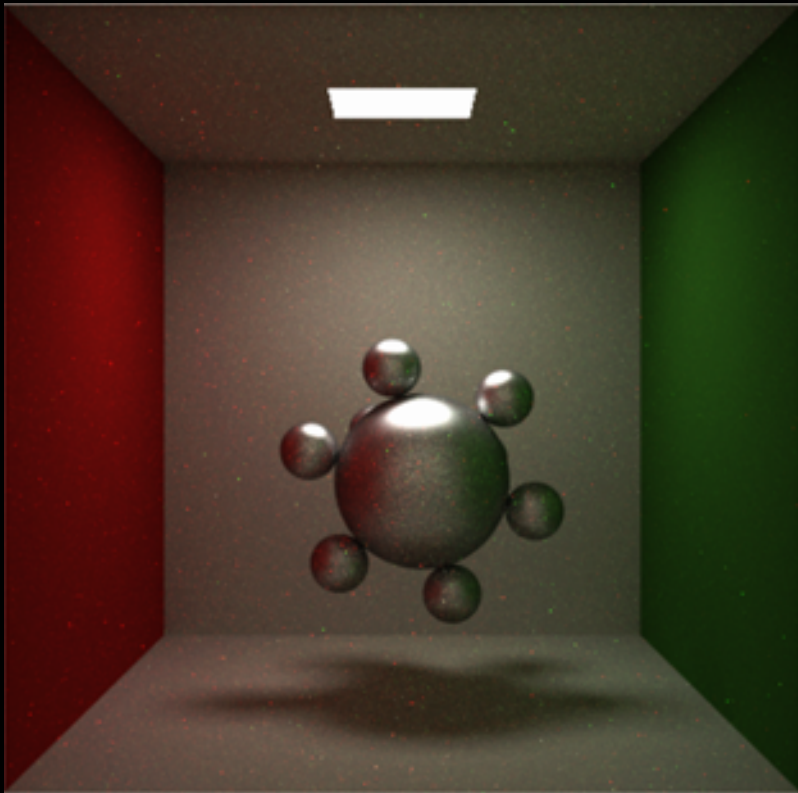
- processus de sélection récursif en $O(\log_4 n)$

- sélection uniforme de la direction dans le triangle

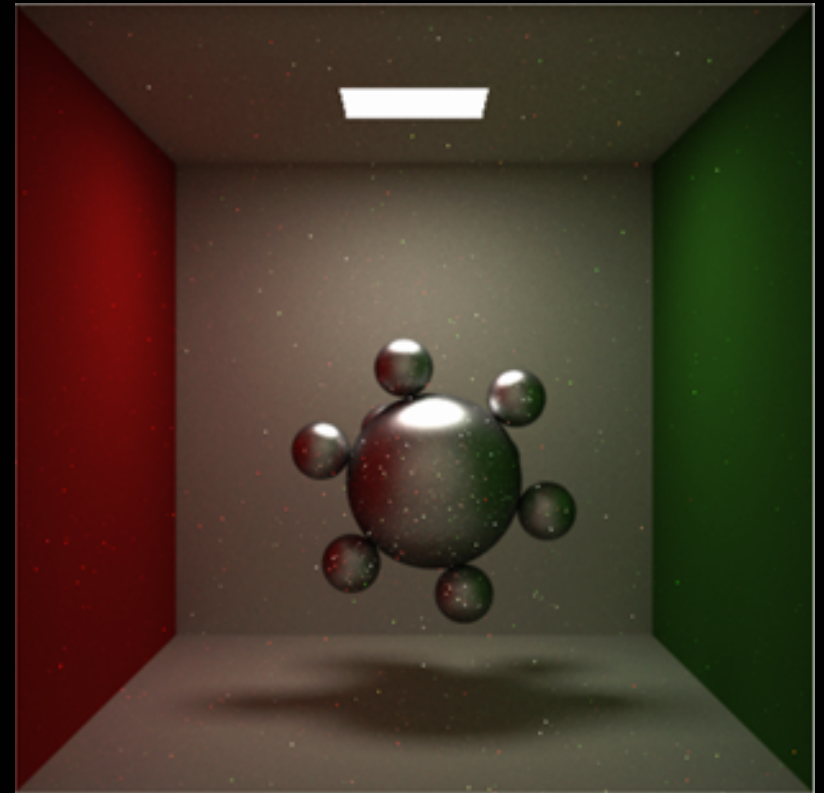
$$p(\omega_r) = p(T_j^k) \frac{1}{A(T_j^k)}$$

Echantillonnage d'importance

- Comparaison avec différentes méthodes
 - jeu de mesure virtuel (modèle de Lewis [Lewis93])
 - 1000 rayons par pixel

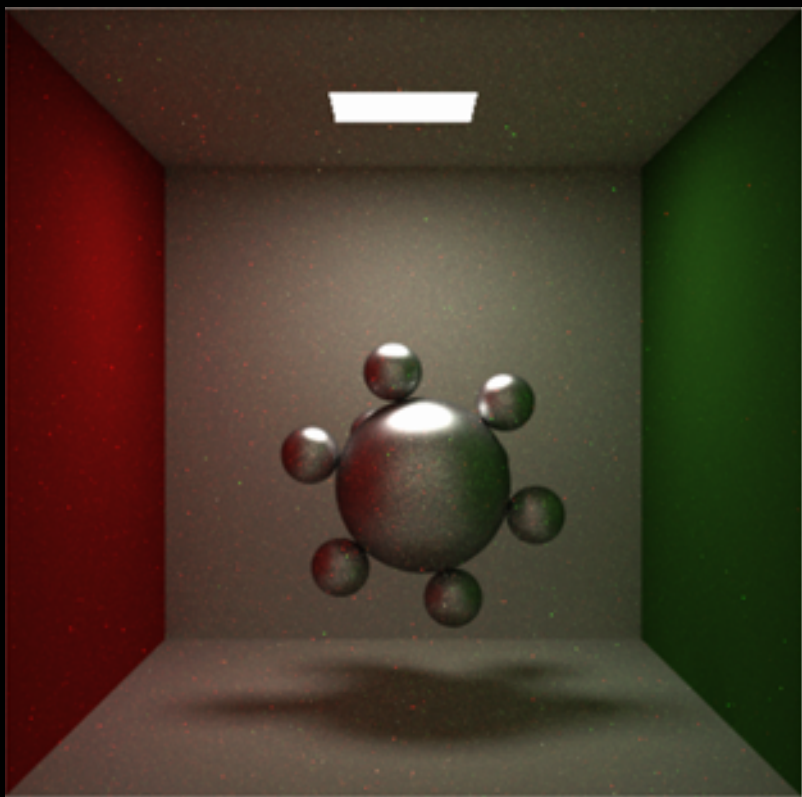
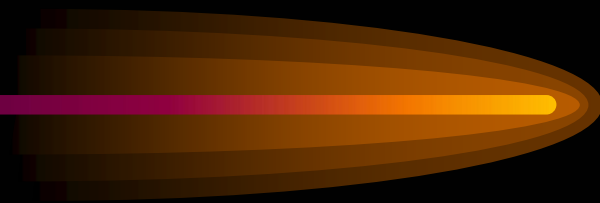


uniforme

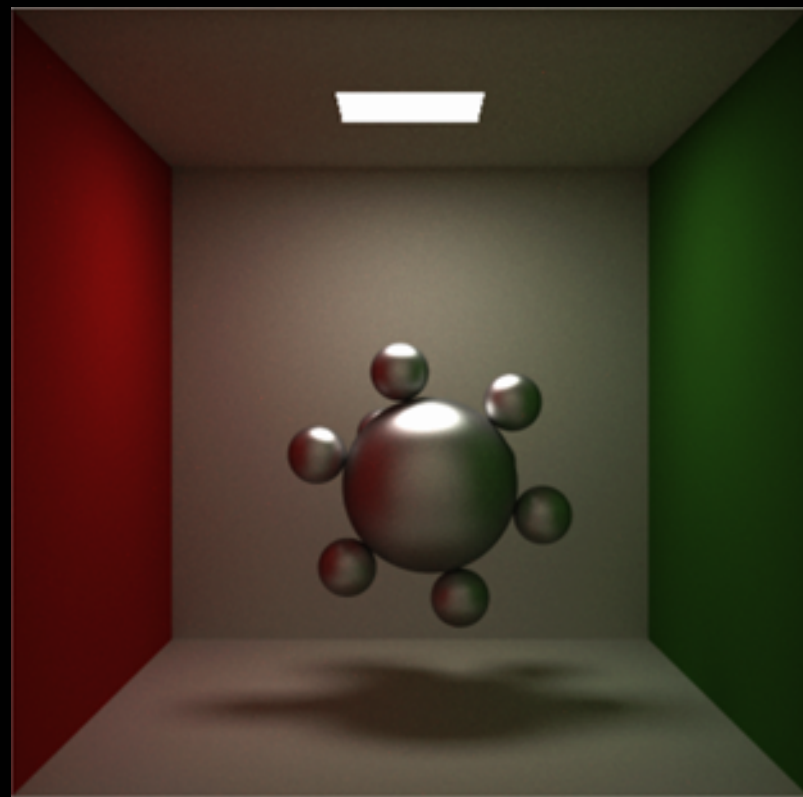


analytique

Echantillonnage d'importance

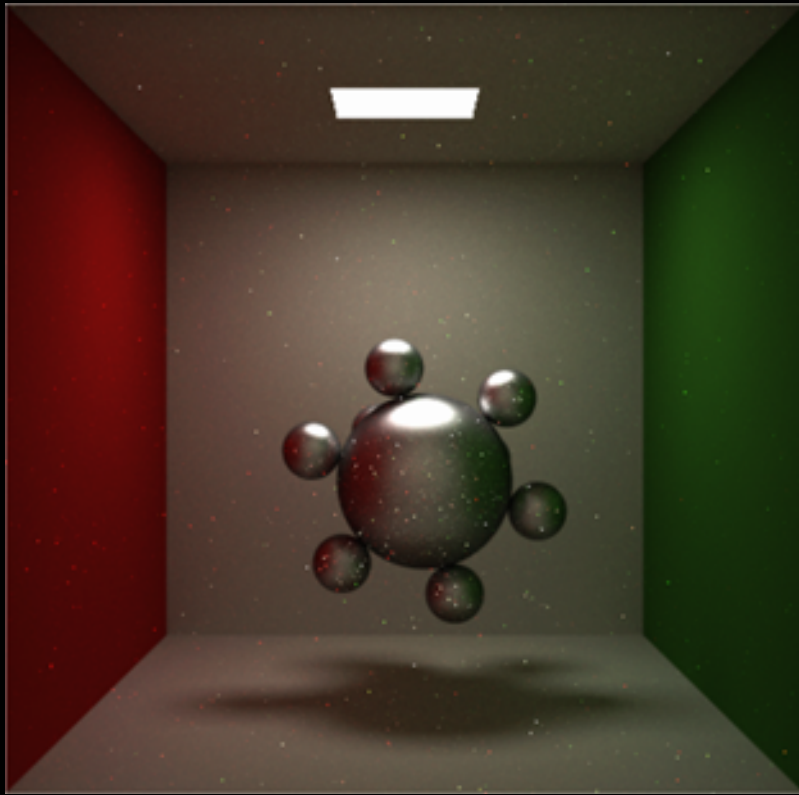
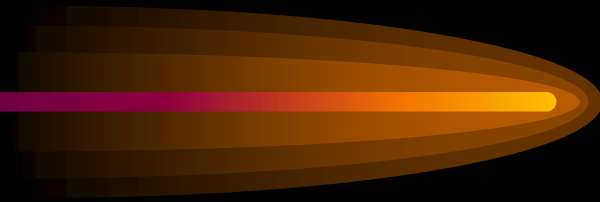


uniforme

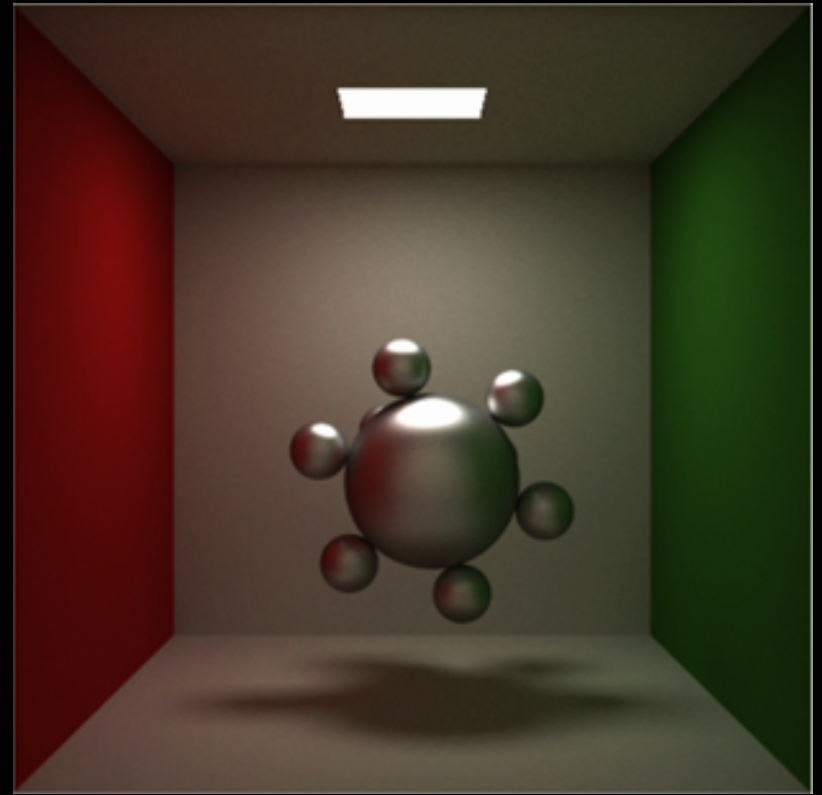


ondelettes

Echantillonnage d'importance



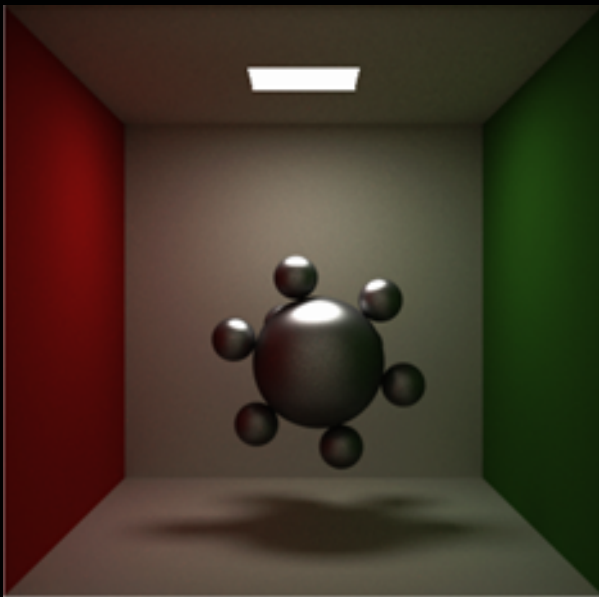
analytique



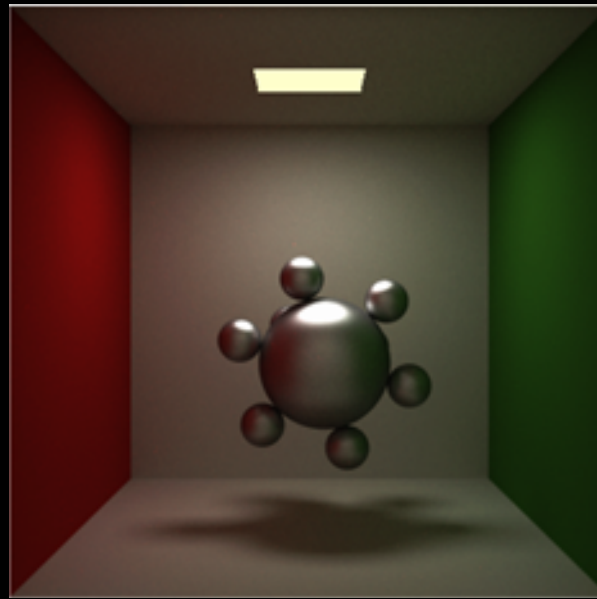
ondelettes

Echantillonnage d'importance

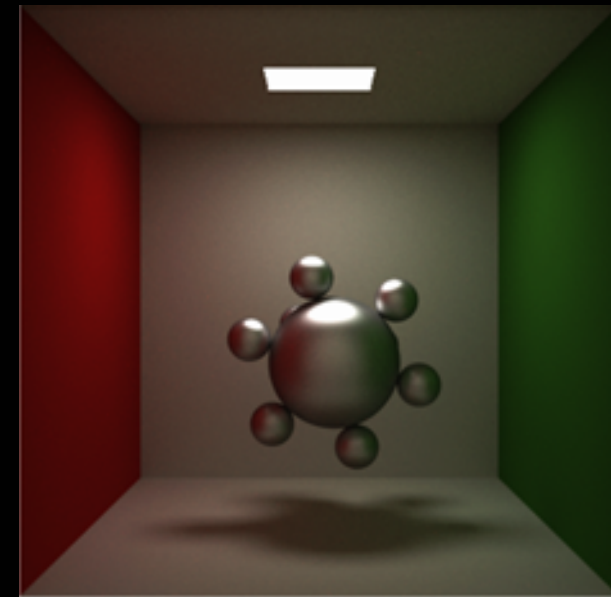
- Niveau de sélection du triangle ajustable
 - au maximum celui des mesures
 - en fonction du type de la surface (spéculaire ou diffuse)
- Compromis temps de calcul/précision



niveau 0



niveau 1



niveau 2

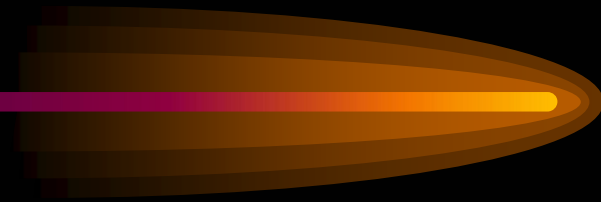
Echantillonnage d'importance

- Résultats quantitatifs (1000 rayons par pixel)

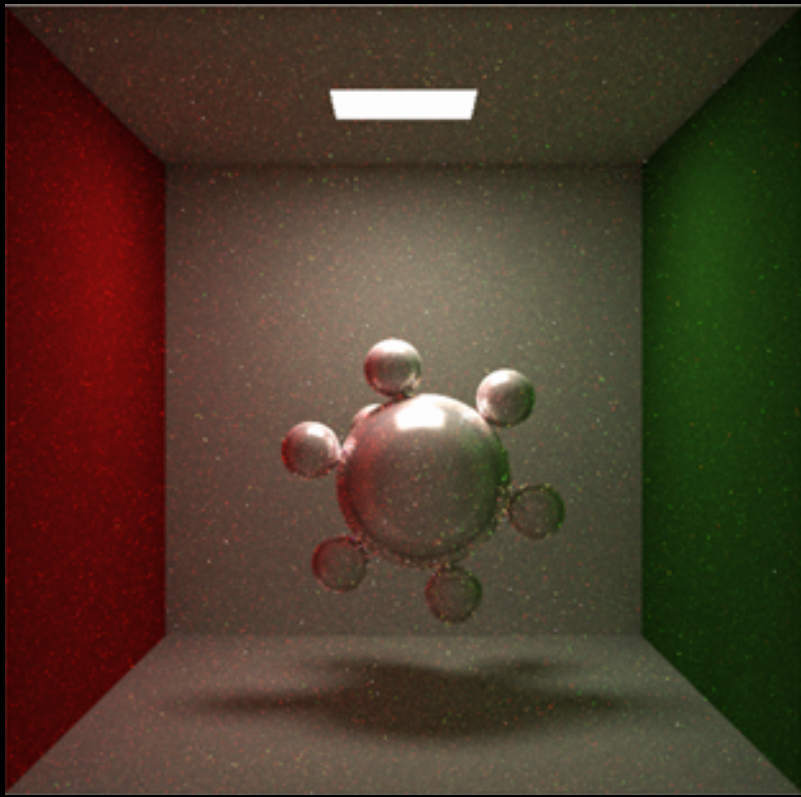
échantillonnage	variance	gain
uniforme	0.0094	référence
analytique	0.0074	21 %
ondelettes	0.0062	34 %

- Résultats qualitatifs
 - uniforme : image uniformément bruitée
 - analytique : image localement bruitée
 - ondelettes : bon compromis

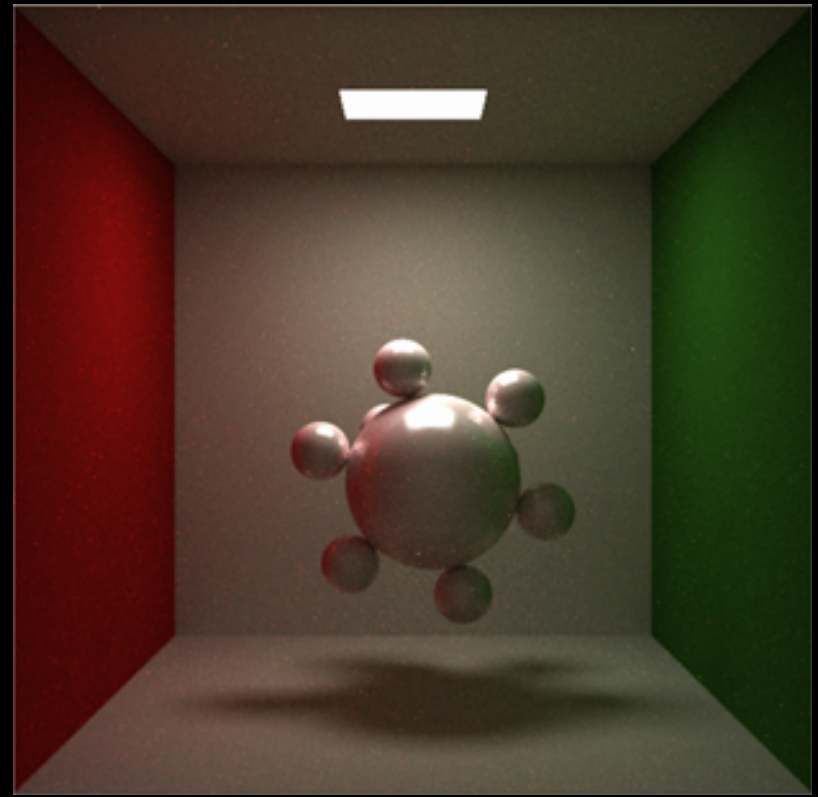
Echantillonnage d'importance



FDRB mesurée du plastique, 512 rayons par pixel

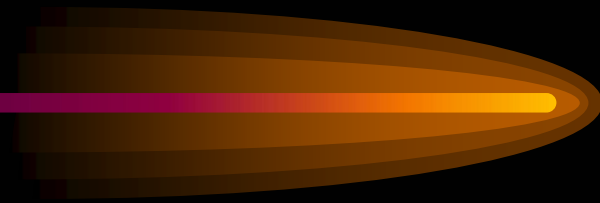


uniforme

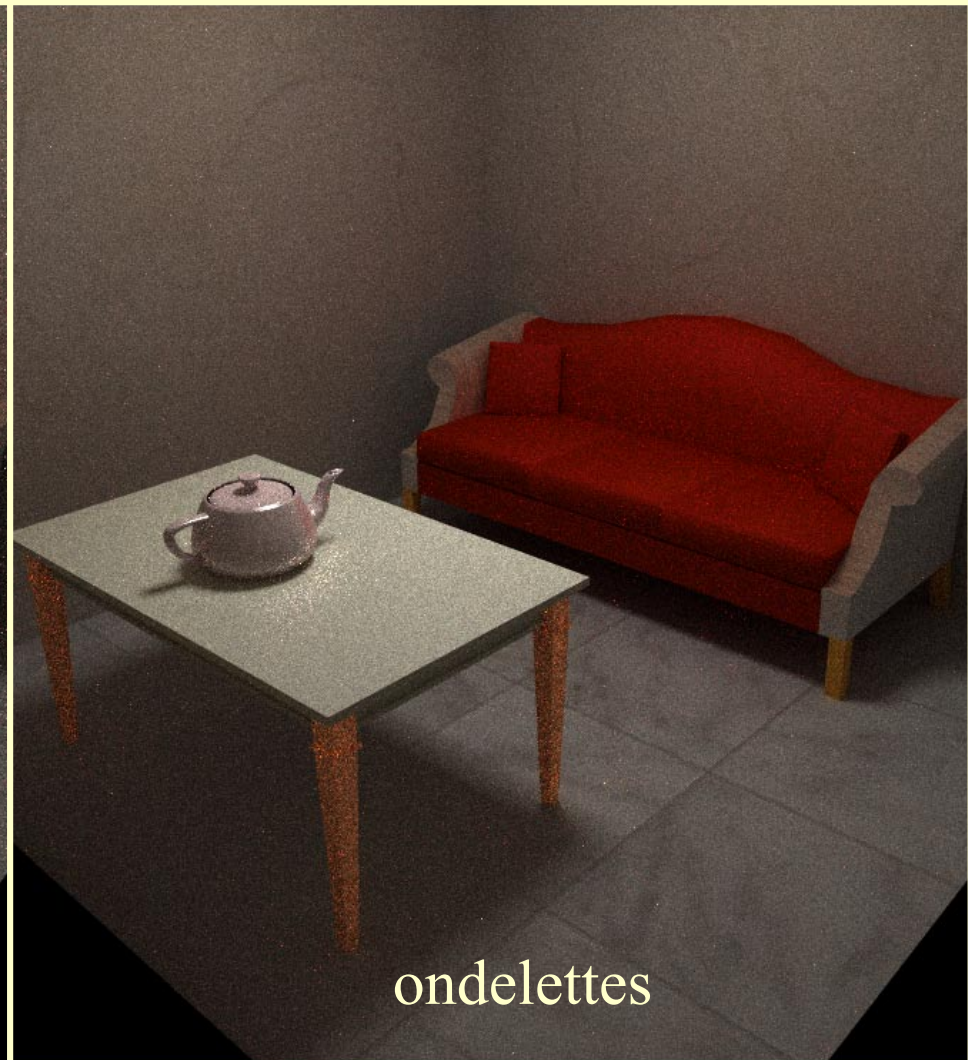
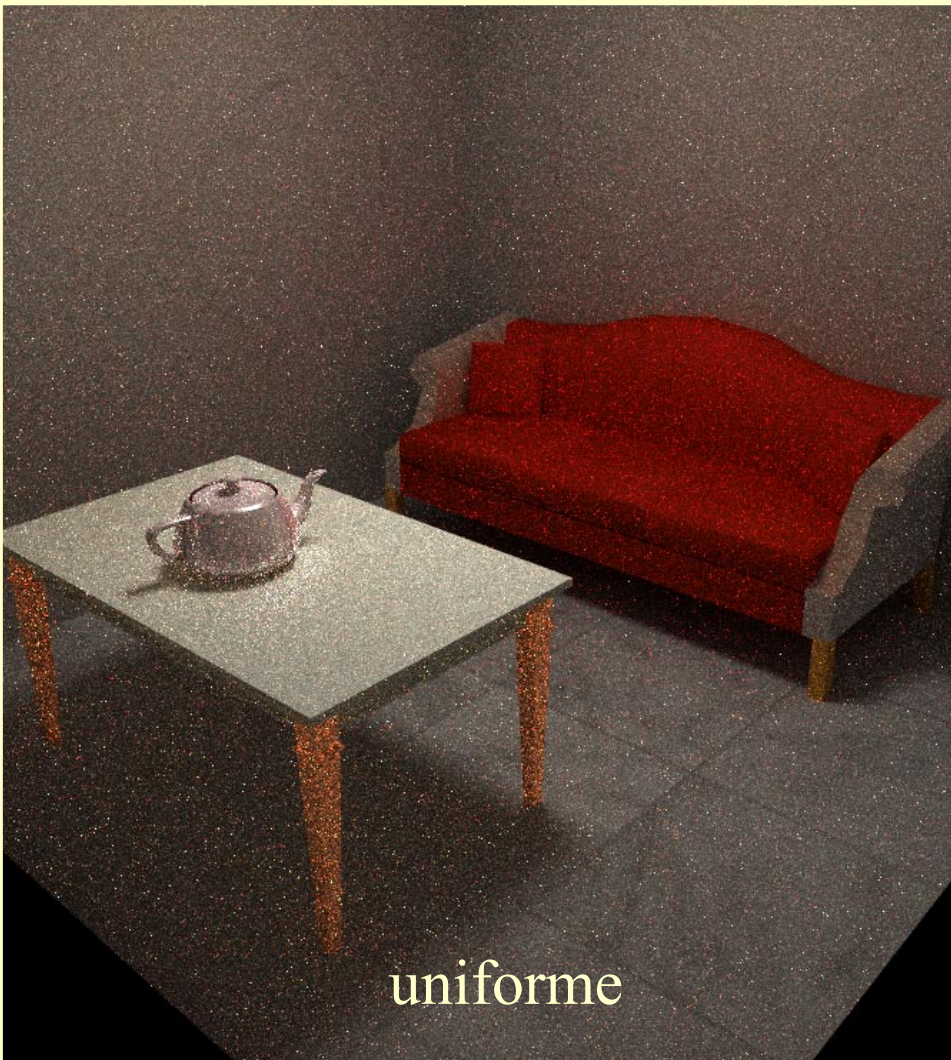


ondelettes

Echantillonnage d'importance



Scène utilisant 4 FDRB mesurées : toile, spectralon, plastique, mélaminé



Echantillonnage d'importance

- Résultats quantitatifs

type d'échantillonnage	rayons par pixel	variance		temps de calcul
		valeur	gain	
uniforme	128	0.043	référence	référence
ondelettes	128	0.024	45 %	+ 27 %
ondelettes	32	0.039	10 %	- 69 %

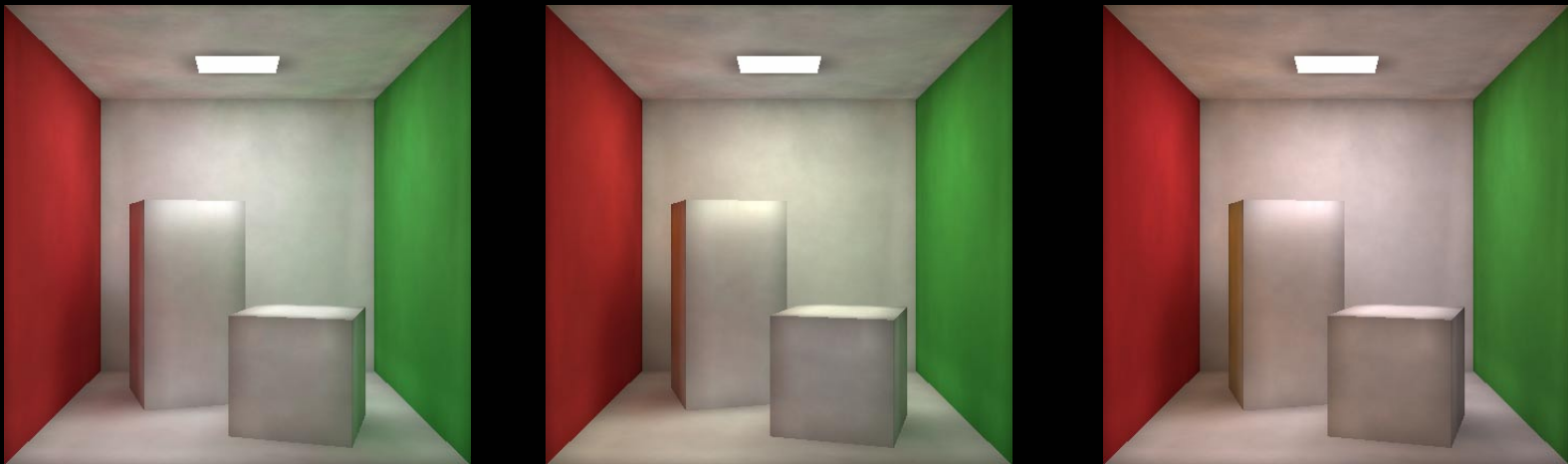
- L'amélioration peut être utilisée sur deux plans
 - pour un nombre de rayons fixé la qualité est améliorée
 - pour une qualité fixée on restreint le nombre de rayon

Optimisation des calculs spectraux

- Interpolation de la FDRB
- Intégration de la FDRB
- Carte de « photons »

Calcul	$\rho(2\pi, 2\pi, \lambda)$	$\rho(\omega_i, 2\pi, \lambda)$	$f_r(\omega_i, \omega_r, \lambda)$
Non compressée	123 s	12.6 ms	114 μs
Compressée (20 :1)	17 s	6.61 ms	58 μs
Gain (%)	1382	52	51

- chaque photon transporte un spectre
- au moment du stockage compression du spectre



t_c	mémoire	collecte (s)	gain (%)
0% (référence)	70 Mo	2792	0
90%	7 Mo	447	625
95%	3.5 Mo	410	681

Plan de la présentation



- Introduction à la problématique
- Travaux
 - développement du modèle
 - évaluation du modèle
 - application du modèle au rendu physiquement réaliste
- Conclusions
- Perspectives

Conclusions : apports



- Développement d'un nouveau modèle de FDRB numérique
 - universel : non-restrictif
 - flexible : utilisable pour les différents types de FDRB et d'autres termes
 - extensible : ajout simple des dépendances via la généricité
 - efficace
 - rapport taux de compression/erreur de modélisation correct
 - temps de projection et d'évaluation de la FDRB faibles
 - peu sensible au bruit de mesure faible mais réaliste
- Optimisation de la compression des données
 - transformée générique
 - seuillage relatif
- Définition d'un schéma d'échantillonnage par importance
 - efficace et ajustable
 - modèle utilisable de façon direct et indirecte
- Optimisation possible de certains calculs spectraux

Conclusions : points durs



- Choix des seuils de compression pour chaque espace
- Niveau de compression pour la suppression du bruit
- Sur-échantillonnage du pic spéculaire
- Échantillonnage par importance et rendu spectral

Plan de la présentation



- Introduction à la problématique
- Travaux
 - développement du modèle
 - évaluation du modèle
 - application du modèle au rendu physiquement réaliste
- Conclusions
- Perspectives

Perspectives



- Calculs spectraux complets dans l'espace des ondelettes
 - nécessite la définition d'un opérateur produit entre deux spectres
- Contrôle global automatique de l'erreur lors de la compression
 - problème : différents seuils peuvent fournir la même erreur globale
- Bases sur mesure (algorithme *BestBasis* [Chen91])
- Implémentation matérielle (reformulation)
- Aspect multi-échelle
 - gestion de mesures à différentes échelles de surface analysée
- Méthodes d'interpolation spécifiques

That's all folk !



Merci de votre attention

Questions ?