

# Coq passe le bac

Catherine Lelay

Toccata, Inria Saclay – Île-de-France

Journées Francophones des Langages Applicatifs  
Fréjus – 10 janvier 2014

# Coq passe le Bac

## Description de l'expérience

Passer le Bac de mathématiques 2013,

# Coq passe le Bac

## Description de l'expérience

Passer le Bac de mathématiques 2013,  
en Coq,

# Coq passe le Bac

## Description de l'expérience

Passer le Bac de mathématiques 2013,  
en Coq,  
en même temps que les élèves,

# Coq passe le Bac

## Description de l'expérience

Passer le Bac de mathématiques 2013,  
en Coq,  
en même temps que les élèves,  
puis présenter les résultats à des enseignants de Lycée.

# Coq passe le Bac

## Description de l'expérience

Faire les **exercices d'analyse** du Bac de mathématiques 2013,  
en Coq,  
en même temps que les élèves,  
puis présenter les résultats à des enseignants de Lycée.

# Coq passe le Bac

## Description de l'expérience

Faire les **exercices d'analyse** du Bac de mathématiques 2013,  
en Coq,  
en même temps que les élèves,  
puis présenter les résultats à des enseignants de Lycée.

### Remerciements :

- M. Michalak et Mme Roudneff pour l'organisation de cette journée.
- Mme Guérin et M. Biset pour leur accueil.
- M. Taillet, Mme Levi, Mme Marquier, M. Jospin et M. Gabilly pour leur attention et leurs remarques.

## Pourquoi cette expérience ?

- Vérifier que les bibliothèques utilisées couvrent au moins le programme d'analyse du Lycée

## Pourquoi cette expérience ?

- Vérifier que les bibliothèques utilisées couvrent au moins le programme d'analyse du Lycée
- Expérimenter l'usage d'un assistant de preuve dans un cadre pédagogique

## Pourquoi cette expérience ?

- Vérifier que les bibliothèques utilisées couvrent au moins le programme d'analyse du Lycée
- Expérimenter l'usage d'un assistant de preuve dans un cadre pédagogique
- Évaluer la lisibilité des démonstrations pour des non spécialistes

- 1 Description
- 2 Les bibliothèques
- 3 Baccalauréat 2013
- 4 L'entretien avec les enseignants
- 5 Conclusion

# La bibliothèque standard de Coq : Reals

Bibliothèque créée par Micaela Mayero

Axiomatisation classique des nombres réels

# La bibliothèque standard de Coq : Reals

Bibliothèque créée par Micaela Mayero

Axiomatisation classique des nombres réels

Contenu :

- Limites finies de suites et de fonctions
- Dérivabilité
- Intégrale de Riemann
- Fonctions de référence

# La bibliothèque standard de Coq : Reals

Bibliothèque créée par Micaela Mayero

Axiomatisation classique des nombres réels

Contenu :

- Limites finies de suites et de fonctions
- Dérivabilité
- Intégrale de Riemann
- Fonctions de référence

Particularité :

- Utilisation de types dépendants pour écrire les dérivées et les intégrales

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	: Finies et $+\infty$
Opérations	: Finies
Suites géométriques	: Non

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	: Finies et $+\infty$
Opérations	: Finies
Suites géométriques	: Non
<b>Limites de fonctions</b>	: Finies
Opérations	: Finies
Théorème des valeurs intermédiaires	: cas fini

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	: Finies et $+\infty$
Opérations	: Finies
Suites géométriques	: Non
<b>Limites de fonctions</b>	: Finies
Opérations	: Finies
Théorème des valeurs intermédiaires	: cas fini
<b>Dérivées</b>	: OK
Opérations	: OK
Sens de variation	: OK

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	: Finies et $+\infty$
Opérations	: Finies
Suites géométriques	: Non
<b>Limites de fonctions</b>	: Finies
Opérations	: Finies
Théorème des valeurs intermédiaires	: cas fini
<b>Dérivées</b>	: OK
Opérations	: OK
Sens de variation	: OK
<b>Fonctions de référence</b>	: OK
Dérivées	: OK
Limites	: Finies
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	: Non

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	: Finies et $+\infty$
Opérations	: Finies
Suites géométriques	: Non
<b>Limites de fonctions</b>	: Finies
Opérations	: Finies
Théorème des valeurs intermédiaires	: cas fini
<b>Dérivées</b>	: OK
Opérations	: OK
Sens de variation	: OK
<b>Fonctions de référence</b>	: OK
Dérivées	: OK
Limites	: Finies
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	: Non
<b>Intégration</b>	: Riemann
Linéarité, positivité, Chasles	: Oui
Primitives de $u' e^u, u' u^n, \dots$	: Non

# La bibliothèque Coquelicot

## Objectif initial

Concevoir une bibliothèque d'analyse réelle facile à utiliser  
pour l'assistant de preuve Coq.

# La bibliothèque Coquelicot

## Objectif initial

Concevoir une bibliothèque d'analyse réelle **facile à utiliser**  
pour l'assistant de preuve Coq.

# La bibliothèque Coquelicot

## Objectif initial

Concevoir une bibliothèque d'analyse réelle **facile à utiliser**  
pour l'assistant de preuve Coq.

- Compatible avec la bibliothèque standard

# La bibliothèque Coquelicot

## Objectif initial

Concevoir une bibliothèque d'analyse réelle **facile à utiliser**  
pour l'assistant de preuve Coq.

- Compatible avec la bibliothèque standard
- Limites généralisées

# La bibliothèque Coquelicot

## Objectif initial

Concevoir une bibliothèque d'analyse réelle **facile à utiliser**  
pour l'assistant de preuve Coq.

- Compatible avec la bibliothèque standard
- Limites généralisées
- Fonctions totales pour écrire les limites, les dérivées et les intégrales

# La bibliothèque Coquelicot

## Objectif initial

Concevoir une bibliothèque d'analyse réelle **facile à utiliser**  
pour l'assistant de preuve Coq.

- Compatible avec la bibliothèque standard
- Limites généralisées
- Fonctions totales pour écrire les limites, les dérivées et les intégrales

<http://coquelicot.saclay.inria.fr/>

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	:	$\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$
Suites géométriques	:	Non
<hr/>		
<b>Limites de fonctions</b>	:	$\mathbb{R}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$
Valeurs intermédiaires	:	$\mathbb{R}$
<hr/>		
<b>Dérivées</b>	:	OK
Opérations	:	OK
Sens de variation	:	OK
<hr/>		
<b>Fonctions de référence</b>	:	OK
Dérivées	:	OK
Limites	:	$\mathbb{R}$
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	:	Non
<hr/>		
<b>Intégration</b>	:	Riemann
Linéarité, positivité, Chasles	:	Oui
Primitives de $u' e^u, u' u^n, \dots$	:	Non

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	:	$\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Suites géométriques	:	Non	
<b>Limites de fonctions</b>	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Valeurs intermédiaires	:	$\mathbb{R}$	
<b>Dérivées</b>	:	OK	
Opérations	:	OK	
Sens de variation	:	OK	
<b>Fonctions de référence</b>	:	OK	
Dérivées	:	OK	
Limites	:	$\mathbb{R}$	
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	:	Non	
<b>Intégration</b>	:	Riemann	
Linéarité, positivité, Chasles	:	Oui	
Primitives de $u' e^u, u' u^n, \dots$	:	Non	

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	:	$\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Suites géométriques	:	Non	OK
<b>Limites de fonctions</b>	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Valeurs intermédiaires	:	$\mathbb{R}$	
<b>Dérivées</b>	:	OK	
Opérations	:	OK	
Sens de variation	:	OK	
<b>Fonctions de référence</b>	:	OK	
Dérivées	:	OK	
Limites	:	$\mathbb{R}$	
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	:	Non	
<b>Intégration</b>	:	Riemann	
Linéarité, positivité, Chasles	:	Oui	
Primitives de $u' e^u, u' u^n, \dots$	:	Non	

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	:	$\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Suites géométriques	:	Non	OK
<b>Limites de fonctions</b>	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Valeurs intermédiaires	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}} + \nearrow$
<b>Dérivées</b>	:	OK	
Opérations	:	OK	
Sens de variation	:	OK	
<b>Fonctions de référence</b>	:	OK	
Dérivées	:	OK	
Limites	:	$\mathbb{R}$	
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	:	Non	
<b>Intégration</b>	:	Riemann	
Linéarité, positivité, Chasles	:	Oui	
Primitives de $u' e^u, u' u^n, \dots$	:	Non	

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	:	$\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Suites géométriques	:	Non	OK
<b>Limites de fonctions</b>	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Valeurs intermédiaires	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}} + \nearrow$
<b>Dérivées</b>	:	OK	
Opérations	:	OK	
Sens de variation	:	OK	
<b>Fonctions de référence</b>	:	OK	
Dérivées	:	OK	
Limites	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	:	Non	$\overline{\mathbb{R}}$
<b>Intégration</b>	:	Riemann	
Linéarité, positivité, Chasles	:	Oui	
Primitives de $u'e^u, u'u^n, \dots$	:	Non	

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	:	$\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Suites géométriques	:	Non	OK
<b>Limites de fonctions</b>	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
Valeurs intermédiaires	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}} + \nearrow$
<b>Dérivées</b>	:	OK	
Opérations	:	OK	
Sens de variation	:	OK	
<b>Fonctions de référence</b>	:	OK	
Dérivées	:	OK	
Limites	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	:	Non	$\overline{\mathbb{R}}$
<b>Intégration</b>	:	Riemann	
Linéarité, positivité, Chasles	:	Oui	
Primitives de $u'e^u, u'u^n, \dots$	:	Non	OK

# Le programme d'analyse de terminale S en Coq

<b>Limites de suites</b>	:	$\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$	$\overline{\mathbb{R}}$	
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$	
Suites géométriques	:	Non	OK	
<b>Limites de fonctions</b>	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$	
Opérations	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$	
Valeurs intermédiaires	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$ + ↗	$\overline{\mathbb{R}}$
<b>Dérivées</b>	:	OK		
Opérations	:	OK		
Sens de variation	:	OK		
<b>Fonctions de référence</b>	:	OK		
Dérivées	:	OK		
Limites	:	$\mathbb{R}$	$\overline{\mathbb{R}}$	$\overline{\mathbb{R}} \cup \{a^\pm\}$
$\lim_{x \rightarrow +\infty} e^x/x, \lim_{x \rightarrow 0^+} x \ln x, \dots$	:	Non	$\overline{\mathbb{R}}$	$\overline{\mathbb{R}} \cup \{a^\pm\}$
<b>Intégration</b>	:	Riemann		
Linéarité, positivité, Chasles	:	Oui		
Primitives de $u'e^u, u'u^n, \dots$	:	Non	OK	

- 1 Description
- 2 Les bibliothèques
- 3 Baccalauréat 2013
- 4 L'entretien avec les enseignants
- 5 Conclusion

# Baccalauréat 2013

- Exercice 1 Probabilités
- Exercice 2 Étude de fonction
- Exercice 3 Géométrie
- Exercice 4 Étude de suite

# Baccalauréat 2013

Exercice 2 Étude de fonction

Exercice 4 Étude de suite

## “Faire les exercices d’analyse”

- Démontrer que pour tout entier naturel  $n$ ,  $u_n \leq n + 3$ .

# “Faire les exercices d’analyse”

- Démontrer que pour tout entier naturel  $n$ ,  $u_n \leq n + 3$ .

**Lemma** Q2a : forall n, u n <= INR n + 3.

# “Faire les exercices d’analyse”

- Démontrer que pour tout entier naturel  $n$ ,  $u_n \leq n + 3$ .

**Lemma** Q2a : `forall n, u n <= INR n + 3`.

- Déterminer la limite de  $f$  en  $+\infty$ .

# “Faire les exercices d’analyse”

- Démontrer que pour tout entier naturel  $n$ ,  $u_n \leq n + 3$ .

**Lemma** Q2a : `forall n, u n <= INR n + 3`.

- Déterminer la limite de  $f$  en  $+\infty$ .

**Lemma** `Lim_f_p_infty : is_lim f p_infty 0`.

# “Faire les exercices d'analyse”

- Démontrer que pour tout entier naturel  $n$ ,  $u_n \leq n + 3$ .

**Lemma** Q2a : `forall n, u n <= INR n + 3`.

- Déterminer la limite de  $f$  en  $+\infty$ .

**Lemma** `Lim_f_p_infty : is_lim f p_infty 0`.

- Déterminer la limite de  $f$  en 0.

# “Faire les exercices d'analyse”

- Démontrer que pour tout entier naturel  $n$ ,  $u_n \leq n + 3$ .

**Lemma** Q2a : `forall n, u n <= INR n + 3`.

- Déterminer la limite de  $f$  en  $+\infty$ .

**Lemma** `Lim_f_p_infty : is_lim f p_infty 0`.

- Déterminer la limite de  $f$  en 0.

**Lemma** `Lim_f_0 : is_lim (fun x => f (Rabs x)) 0 m_infty`.

## Exercice 2

Étude de la fonction  $f(x) = \frac{a + b \ln x}{x}$  avec  $a = b = 2$ .

## Exercice 2

Étude de la fonction  $f(x) = \frac{a + b \ln x}{x}$  avec  $a = b = 2$ .

- 1 Détermination de  $a$  et  $b$  à partir de la lecture d'une courbe
- 2 Tableau de variation
- 3 Solutions de  $f(x) = 1$
- 4 Algorithme : approximation de l'une des solutions de  $f(x) = 1$
- 5 Démontrer que  $\int_{\frac{1}{e}}^1 f(x) dx = 1$

## Exercice 2

Étude de la fonction  $f(x) = \frac{a + b \ln x}{x}$  avec  $a = b = 2$ .

- 1 Détermination de  $a$  et  $b$  à partir de la lecture d'une courbe
- 2 Tableau de variation
- 3 Solutions de  $f(x) = 1$
- 4 Algorithme : approximation de l'une des solutions de  $f(x) = 1$
- 5 Démontrer que  $\int_{\frac{1}{e}}^1 f(x) dx = 1$

2h30, 2 définitions, 15 lemmes, 280 lignes de preuves

## Bilan de l'exercice 2

Points du programme :

- ⊕ Dérivées et intégrales de fonction
- ⊖ Limites de  $\ln$  et  $x \mapsto \frac{1}{x}$  en 0
- ⊕ Autres limites de fonctions
- ⊕ Théorème des valeurs intermédiaires pour les fonctions strictement croissantes
- ⊖ Unicité de la solution
- ⊖ Cas des fonctions décroissantes

## Bilan de l'exercice 2

Points du programme :

- ⊕ Dérivées et intégrales de fonction
- ⊖ Limites de  $\ln$  et  $x \mapsto \frac{1}{x}$  en 0
- ⊕ Autres limites de fonctions
- ⊕ Théorème des valeurs intermédiaires pour les fonctions strictement croissantes
- ⊖ Unicité de la solution
- ⊖ Cas des fonctions décroissantes

Problèmes annexes :

- ⊖ Résolution d'inégalités (ex :  $0 < 4x$ )
- ⊖ Gestion des opérations avec  $+\infty$  et  $-\infty$

## Bilan de l'exercice 2

Points du programme :

- ⊕ Dérivées et intégrales de fonction
- ⊖ Limites de  $\ln$  et  $x \mapsto \frac{1}{x}$  en 0
- ⊕ Autres limites de fonctions
- ⊕ Théorème des valeurs intermédiaires pour les fonctions strictement croissantes
- ⊖ Unicité de la solution (maintenant ⊕)
- ⊖ Cas des fonctions décroissantes (maintenant ⊕)

Problèmes annexes :

- ⊖ Résolution d'inégalités (ex :  $0 < 4x$ )
- ⊖ Gestion des opérations avec  $+\infty$  et  $-\infty$

## Bilan de l'exercice 2

Points du programme :

- ⊕ Dérivées et intégrales de fonction
- ⊖ Limites de  $\ln$  et  $x \mapsto \frac{1}{x}$  en 0 (maintenant ⊕)
- ⊕ Autres limites de fonctions
- ⊕ Théorème des valeurs intermédiaires pour les fonctions strictement croissantes
- ⊖ Unicité de la solution (maintenant ⊕)
- ⊖ Cas des fonctions décroissantes (maintenant ⊕)

Problèmes annexes :

- ⊖ Résolution d'inégalités (ex :  $0 < 4x$ )
- ⊖ Gestion des opérations avec  $+\infty$  et  $-\infty$

## Exercice 4

$$\text{Étude de la suite } \begin{cases} u_0 = 2 \\ u_{n+1} = \frac{2}{3}u_n + \frac{1}{3}n + 1 \end{cases}$$

# Exercice 4

$$\text{Étude de la suite } \begin{cases} u_0 = 2 \\ u_{n+1} = \frac{2}{3}u_n + \frac{1}{3}n + 1 \end{cases}$$

- 1 Premières valeurs, conjecture sur le sens de variation
- 2 Étude du sens de variation
- 3 Limite de la suite
- 4 Limite de  $S_n = \sum_{k=0}^n u_k$  et  $T_n = \frac{S_n}{n^2}$

# Exercice 4

$$\text{Étude de la suite } \begin{cases} u_0 = 2 \\ u_{n+1} = \frac{2}{3}u_n + \frac{1}{3}n + 1 \end{cases}$$

- 1 Premières valeurs, conjecture sur le sens de variation
- 2 Étude du sens de variation
- 3 Limite de la suite
- 4 Limite de  $S_n = \sum_{k=0}^n u_k$  et  $T_n = \frac{S_n}{n^2}$

1h00, 4 définitions, 15 lemmes, 141 lignes de preuves

## Bilan de l'exercice 4

Points du programme :

- ⊕ Limites de suite
- ⊕ Suites géométriques
- ⊕ Somme de suites arithmétiques

## Bilan de l'exercice 4

Points du programme :

- ⊕ Limites de suite
- ⊕ Suites géométriques
- ⊕ Somme de suites arithmétiques

Problème annexe :

- ⊖ Gestion des opérations avec  $+\infty$  et  $-\infty$

# L'entretien avec les enseignants

- 1 Présentation des outils
- 2 Présentation des résultats
- 3 Discussion

# L'entretien avec les enseignants

- 1 Présentation des outils
- 2 Présentation des résultats
- 3 Discussion

## Pourquoi cet entretien ?

- Évaluer la lisibilité des énoncés et des preuves avec des non-spécialistes de Coq

## Pourquoi cet entretien ?

- Évaluer la lisibilité des énoncés et des preuves avec des non-spécialistes de Coq
- Évaluer l'intérêt pédagogique avec des spécialistes de la pédagogie numérique

## Difficultés liées à Coq

- Preuve en arrière

## Difficultés liées à Coq

- Preuve en arrière
- quelques minutes d'adaptation

## Difficultés liées à Coq

- Preuve en arrière
- quelques minutes d'adaptation
- Compréhension des tactiques utilisées

## Difficultés liées à Coq

- Preuve en arrière  
→ quelques minutes d'adaptation
  
- Compréhension des tactiques utilisées  
→ quasi-immédiat pour "apply"

## Difficultés liées à Coq

- Preuve en arrière
  - quelques minutes d'adaptation
  
- Compréhension des tactiques utilisées
  - quasi-immédiat pour “apply”
  - un peu plus de temps pour les autres tactiques

## Retour des enseignants

- Preuve formelle

## Retour des enseignants

- Preuve formelle

- ⊕ tout doit être démontré

## Retour des enseignants

- Preuve formelle

- ⊕ tout doit être démontré

- ⊖ tout doit être démontré (ex :  $0 < 4x$ )

# Retour des enseignants

- Preuve formelle
  - ⊕ tout doit être démontré
  - ⊖ tout doit être démontré (ex :  $0 < 4x$ )
  - ⇒ utilisation de “`admit`” à la place de tactiques adaptées

# Retour des enseignants

- Preuve formelle
  - ⊕ tout doit être démontré
  - ⊖ tout doit être démontré (ex :  $0 < 4x$ )
  - ⇒ utilisation de “`admit`” à la place de tactiques adaptées
- Coquelicot : Bibliothèque riche

# Retour des enseignants

- Preuve formelle
  - ⊕ tout doit être démontré
  - ⊖ tout doit être démontré (ex :  $0 < 4x$ )
  - ⇒ utilisation de “`admit`” à la place de tactiques adaptées
- Coquelicot : Bibliothèque riche
  - ⊕ adaptée aux programme

# Retour des enseignants

- Preuve formelle
  - ⊕ tout doit être démontré
  - ⊖ tout doit être démontré (ex :  $0 < 4x$ )
  - ⇒ utilisation de “admit” à la place de tactiques adaptées
- Coquelicot : Bibliothèque riche
  - ⊕ adaptée aux programme
  - ⊖ documentation

# Retour des enseignants

- Preuve formelle
  - ⊕ tout doit être démontré
  - ⊖ tout doit être démontré (ex :  $0 < 4x$ )
  - ⇒ utilisation de “admit” à la place de tactiques adaptées
- Coquelicot : Bibliothèque riche
  - ⊕ adaptée aux programme
  - ⊖ documentation
  - ⇒ interface “à la GéoGébra” pour disposer de menus interactifs

## Et si c'était à refaire ?

- Améliorer la présentation des tactiques de base
- Présenter les conventions de nommage des théorèmes
- Tester les améliorations apportées à Coquelicot

## Bilan de l'expérience

- Vérifier que la bibliothèque couvre au moins le programme d'analyse du Lycée
- Expérimenter l'usage d'un assistant de preuve dans un cadre pédagogique
- Évaluer la lisibilité des démonstrations pour des non spécialistes

## Bilan de l'expérience

- Vérifier que la bibliothèque couvre au moins le programme d'analyse du Lycée
- Expérimenter l'usage d'un assistant de preuve dans un cadre pédagogique
- Évaluer la lisibilité des démonstrations pour des non spécialistes

## Bilan de l'expérience

- Vérifier que la bibliothèque couvre au moins le programme d'analyse du Lycée
- Expérimenter l'usage d'un assistant de preuve dans un cadre pédagogique
- Évaluer la lisibilité des démonstrations pour des non spécialistes

## Bilan de l'expérience

- Vérifier que la bibliothèque couvre au moins le programme d'analyse du Lycée
- Expérimenter l'usage d'un assistant de preuve dans un cadre pédagogique
- Évaluer la lisibilité des démonstrations pour des non spécialistes

## Améliorations de Coquelicot

Conséquence de l'expérience :

- Généralisation de la notion de limite  
→ Limites à droite et à gauche

# Améliorations de Coquelicot

Conséquence de l'expérience :

- Généralisation de la notion de limite  
→ Limites à droite et à gauche

En cours :

- Hiérarchie algébrique (groupe, anneau, espace vectoriel)
- Limites, intégrales et différentielles pour  $\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{R}^n, M_n(\mathbb{R}), \dots$

# Améliorations de Coquelicot

Conséquence de l'expérience :

- Généralisation de la notion de limite  
→ Limites à droite et à gauche

En cours :

- Hiérarchie algébrique (groupe, anneau, espace vectoriel)
- Limites, intégrales et différentielles pour  $\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{R}^n, M_n(\mathbb{R}), \dots$

Projet : Automatisation

- Dérivées, limites, intégrales
- Inégalités dans  $\mathbb{R}$ , égalités dans  $\overline{\mathbb{R}}$

# Perspectives

## Un TP pour Première ou Terminale

Pré-requis :

- Interface adaptée
- Documentation claire
- Tactiques puissantes, simples à utiliser

<https://www.lri.fr/~lelay/>



Des questions ?

<http://coquelicot.saclay.inria.fr/>