

# Techniques avancées de génération de code pour la performance

Jules Pénuchot

**Université Paris-Saclay**

*Equipe ParSys*

Thèse sous la direction de *Joël Falcou*

Soutenue le 24/09/2024 à l'Université Paris-Saclay

# Le HPC: un paysage de plus en plus complexe

## Le matériel:

- Plus de *parallélisme(s)*: CPUs multi-coeurs, SIMD, GPUs  
Exemples: AMD EPYC, Fujitsu A64FX
- Plus de *spécialisation*: TPU, FPGA  
Exemples: Cerebras WSE-3

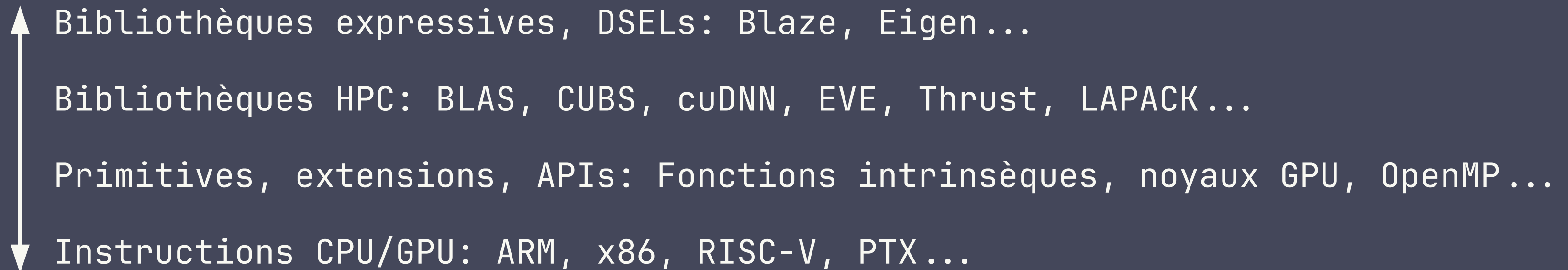
## Bibliothèques, langages, et applications:

- Une compatibilité de plus en plus *large*
- Des domaines de plus en plus *diversifiés*

*Comment assurer la portabilité et la pérennité du code haute performance ?*

# Le millefeuille d'abstractions du HPC en C++

Haut niveau: Intention



Bas niveau: Matériel

# Concilier abstraction et performance

- Des abstractions **à forte capacité d'adaptation**:
  - Différents types de processeurs (CPU/GPU)
  - Différents jeux d'instructions
  - Différents paramètres de tuning (taille de cache, etc.)
- Des abstractions **performantes**:
  - Autant que possible, **résolues à la compilation**

**Pour ces raisons, on se tourne vers la métaprogrammation**

# La métaprogrammation pour la performance

- **Métaprogramme**: programme consommant et/ou générant du code.
  - Exemples: LISP, C, Rust, Haskell, MetaOCaml, etc...
- En C++, les bibliothèques HPC utilisent très majoritairement **la métaprogrammation de templates**
  - **Principe**: utiliser les types pour effectuer des calculs à la compilation
  - **Intérêts**: évaluation partielle, composabilité, nouvelles abstractions
  - **Exemples**: Thrust, EVE, HPX

*Peut-on aller plus haut en niveau d'abstraction ?*

**Oui, via les Domain Specific Embedded Languages**

# Les Domain Specific Embedded Languages (DSELs)

- En C++, les langages dédiés embarqués utilisent la **surcharge d'opérateurs** et les **expression templates** pour la génération de code.
- **Expression templates**: représentation d'expressions algébriques sous forme d'arborescences de templates de types.

## Exemple: Blaze

```
#include <blaze/Blaze.h>

int main() {
    blaze::DynamicMatrix<int> mat_a({{4, -2, 5}}), mat_b({{2}, {5}, {-3}});

    // Add<DynamicMatrix<int>, Trans<DynamicMatrix<int>>>
    auto expr = mat_a + trans(mat_b);

    blaze::DynamicMatrix<int> mat_c = expr; // Génération de code à l'assignation
}
```

# Problématiques des DSEL pour le HPC

- Temps de compilation
- Difficulté de la métaprogrammation de templates
- DSELs pour le calcul numérique limités à la syntaxe C++

# Problématiques des DSEL pour le HPC

- Temps de compilation  
*Quels outils pour analyser les temps de compilation ?*
- Difficulté de la métaprogrammation de templates  
*Quelles nouvelles abstractions pour la métaprogrammation ?*
- DSELs pour le calcul numérique limités à la syntaxe C++  
*Aller au-delà de la syntaxe C++ : comment et avec quel impact ?*



# Les travaux de cette thèse

- **Portabilité des bibliothèques HPC "classiques"**
  - Génération de noyaux de calcul SIMD
- **Analyse des temps de compilation**
  - Nouvelle méthode de benchmarking pour les métaprogrammes
- **Techniques d'implémentation des DSELs**
  - Nouvelles méthodes pour leur implémentation
  - DSEL arbitraires appliqués au calcul numérique

# Génération de noyaux de calcul SIMD

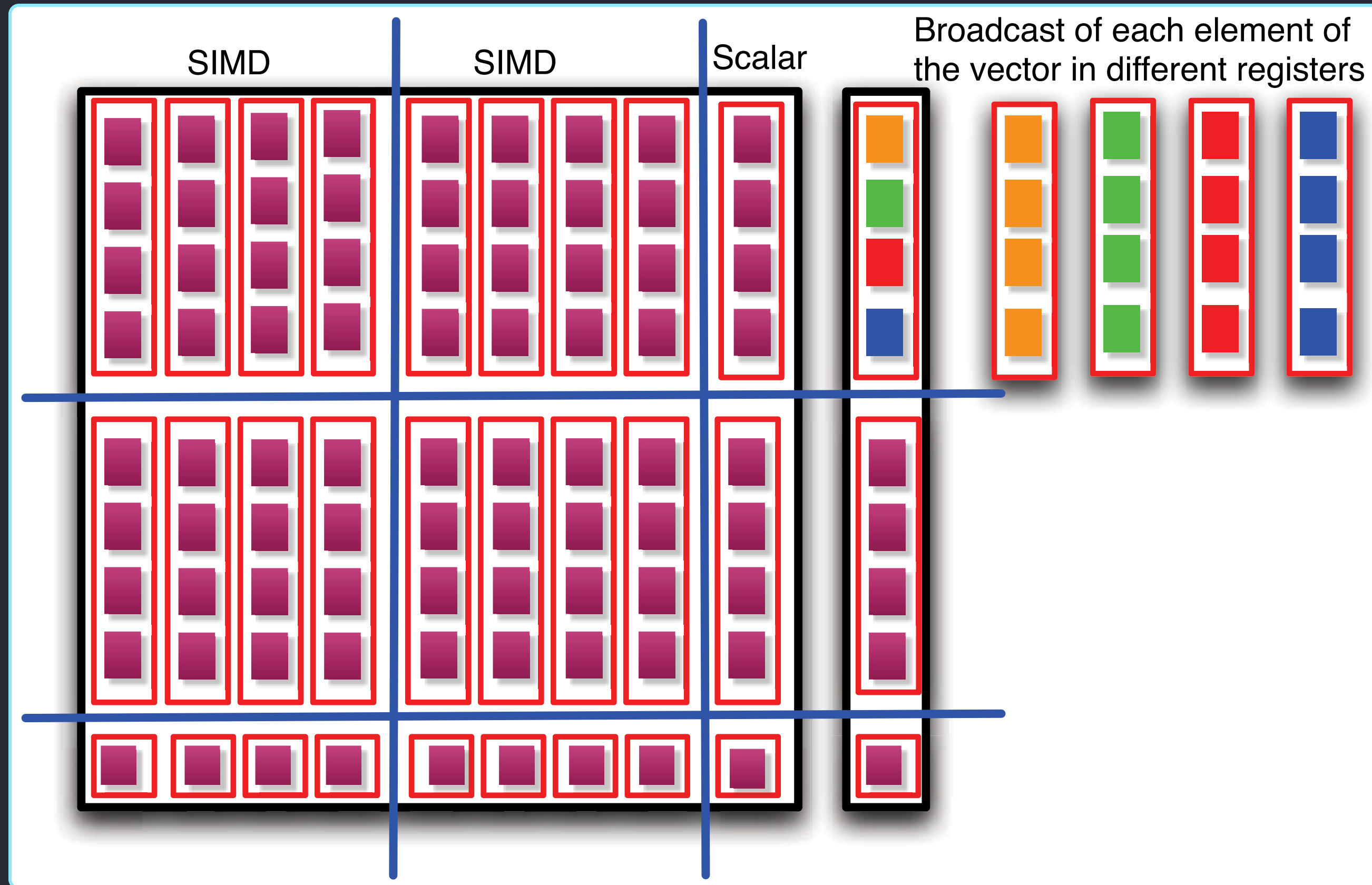
- **General Matrix-Vector multiply** (*GEMV*)  
*matrice column-major*
  - Référence: implémentation en **assembleur** dans OpenBLAS
  - Optimisée manuellement pour **chaque architecture**
  - Le coût des abstractions est **critique**

**Comment générer du code performant au lieu de le réimplémenter pour chaque architecture?**

# Génération de noyaux GEMV performants

- Deux techniques pour son optimisation:
  - Utilisation des instructions vectorielles
  - Déroulage des boucles pour exploiter le pipelining des instructions
- Générer du code quelle que soit l'architecture
  - Exploiter les architectures SIMD de manière portable, et dont la taille est connue à la compilation  
*boost.simd/EVE*
  - Automatiser le déroulage  
*déroulage automatique par template metaprogramming*

# GEMV optimisé: broadcast, produit, réduction SIMD



# Implémentation générique de GEMV

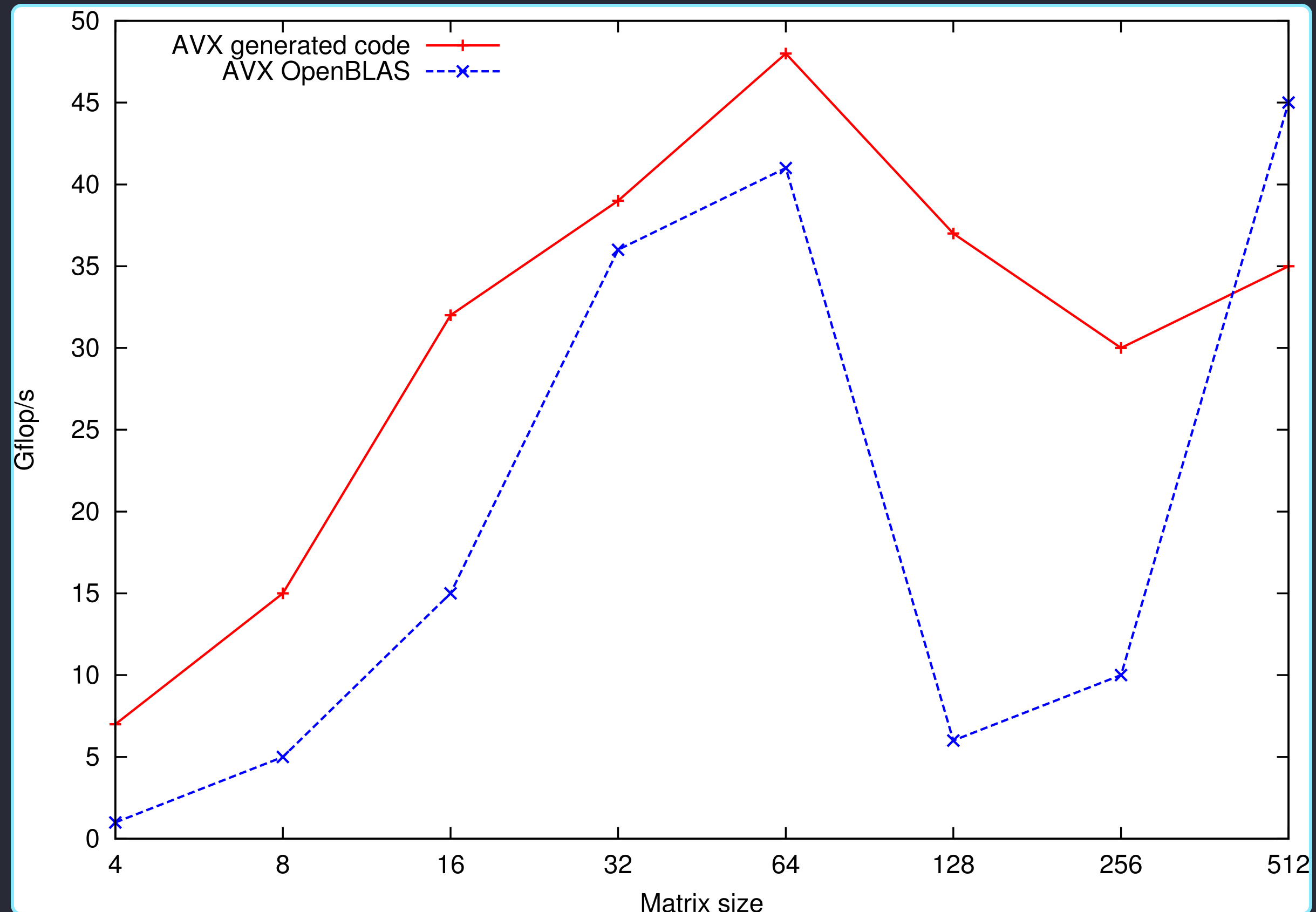
```
template <typename T, std::size_t M, std::size_t N>
void gemv(mat<T, M, N> &mat, vec<T, N> &vec, vec<T, N> &r) {
    constexpr auto Size = eve::wide<T>::static_size;
    constexpr auto SIMD_M = eve::align(M, eve::under{Size});
    constexpr auto SIMD_N = eve::align(N, eve::under{Size});

    for_constexpr<0, SIMD_N, Size>([&](auto j) {
        eve::wide<T> pvec(&vec[j]), mulp_arr[Size];
        for_constexpr<0, Size>([&](auto idx) { mulp_arr[idx] = eve::broadcast<idx>(pvec); });

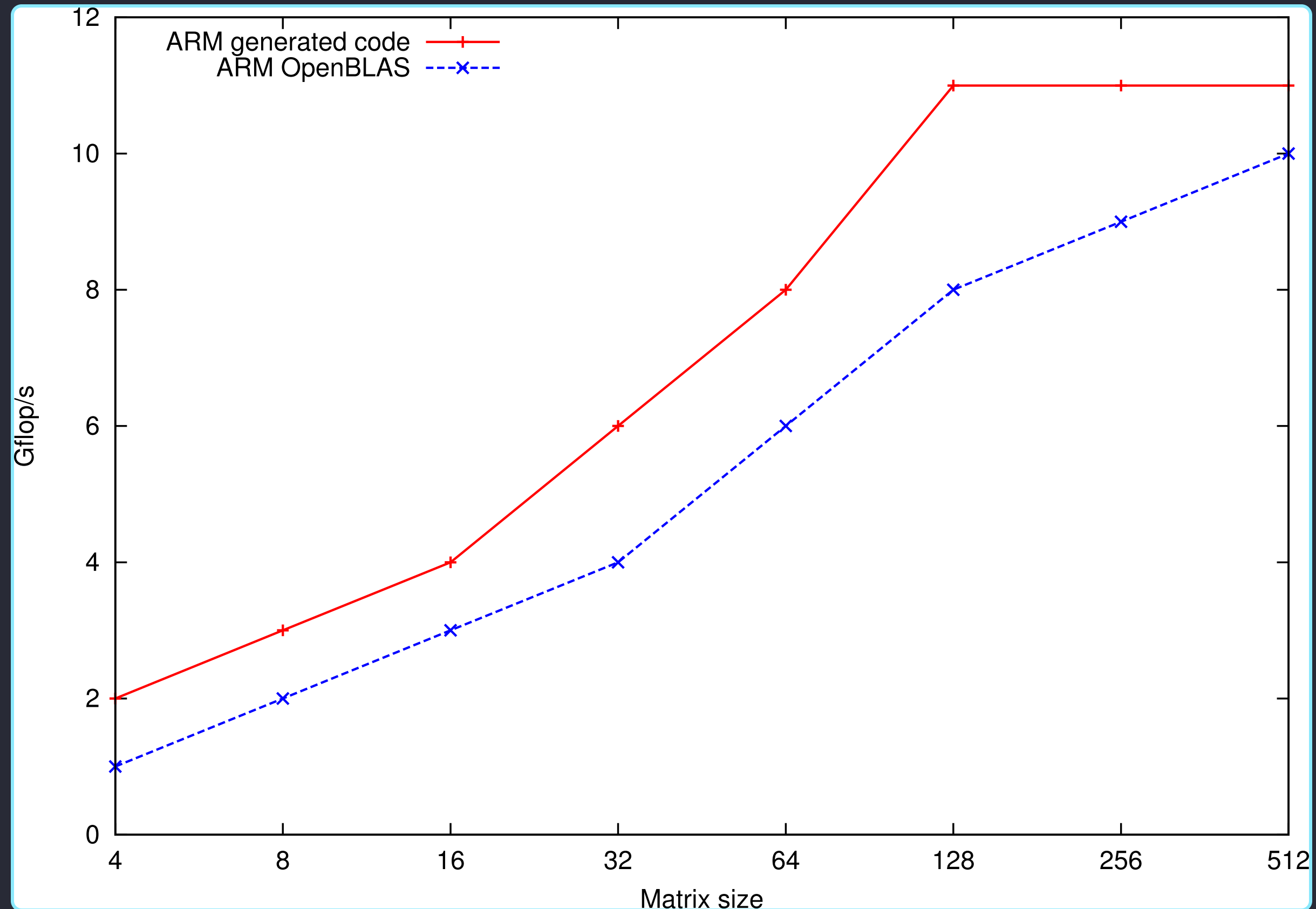
        for_constexpr<0, SIMD_M>([&](auto I) {
            eve::wide<T> resp(&res[i + (I * Size)]);

            for_constexpr<0, Size>([&](auto J) {
                eve::wide<T> matp(&mat[i + (I * Size), j + J]);
                resp = eve::fma(matp, mulp_arr[J], resp);
                eve::store(resp, &r[i + (I * Size)]);
            });
        }) // Scalar code follows ...
    })
}
```

# GEMV: Code généré vs OpenBLAS - x86 (Intel i5-7200)



# GEMV: Code généré vs OpenBLAS - ARM (ARM Cortex A57)



# GEMV: Conclusion

- Grâce à la métaprogrammation:
  - Les performances des noyaux générés sont **très bonnes**
  - Le code est **compact**
  - Le code est **portable**
  - Il bénéficie des **optimisations du compilateur**
- Mais...
  - Les temps de compilation sont notablement **plus longs**
  - On ne sait pas précisément **pourquoi**



# Les travaux de cette thèse

- Portabilité des bibliothèques HPC "classiques"
- Analyse des temps de compilation
  - Nouvelle méthode de benchmarking pour les métaprogrammes
- Techniques d'implémentation des DSELs

# L'exécution de programmes à la compilation en C++

- Croissance du support et de l'utilisation de la métaprogrammation:
  - *C++98*: templates récursifs
  - *C++11*: parameter pack, constexpr
  - *C++17*: if constexpr
  - *C++20*: concepts, constexpr new, std::vector, std::string
  - *C++23*: std::unique\_ptr
- **Comment comparer l'efficacité des techniques de métaprogrammation?**  
Exemple: *SFINAE* vs *if constexpr* vs *concepts*
- Temps de **compilation** vs temps de **développement**
- **Besoin d'outils d'analyse des temps de compilation**

# L'analyse des temps de compilation

- **Templight:** Zoltán Borók-Nagy, Zoltán Porkoláb, József Mihalicza, 2009  
Profiling et debug d'instanciation de templates
- **Build-bench:** Fred Tingaud, 2017  
Benchmarking basique sans analyse
- **Metabench:** Louis Dionne, 2017  
Analyse de temps de compilation, export en fichiers web

**Aucun outil ne permet des analyses détaillées, complètes, et reproductibles**

# ctbench

- **Objectif:** Analyse des temps de compilation via le profiler de Clang
- **Orienté C++:** API CMake, configuration JSON, bibliothèque C++, utilisation du préprocesseur pour l'instanciation des benchmarks
- **Fonctionnalités:**
  - Permet de **filtrer, agréger, et analyser les événements de compilation** de manière configurable, puis de tracer des courbes
  - Génère des graphes dans plusieurs formats: SVG, PNG, etc.
  - S'adapte à d'autres compilateurs (*mesure des temps d'exécution*)

*Publié dans le Journal of Open-Source Software 2023*

# Cas d'usage de ctbench

- Entiers sous forme de types

```
template <std::size_t N> struct ct_uint_t {  
    static constexpr std::size_t value = N;  
};
```

- Addition d'un pack d'entiers

```
constexpr auto foo() {  
    return []<std::size_t... Is>(std::index_sequence<Is...>) {  
        return sum(ct_uint_t<Is>{}...);  
    }  
    (std::make_index_sequence<BENCHMARK_SIZE>{});  
}  
  
constexpr std::size_t result = decltype(foo())::value;
```

# Cas d'usage de ctbench

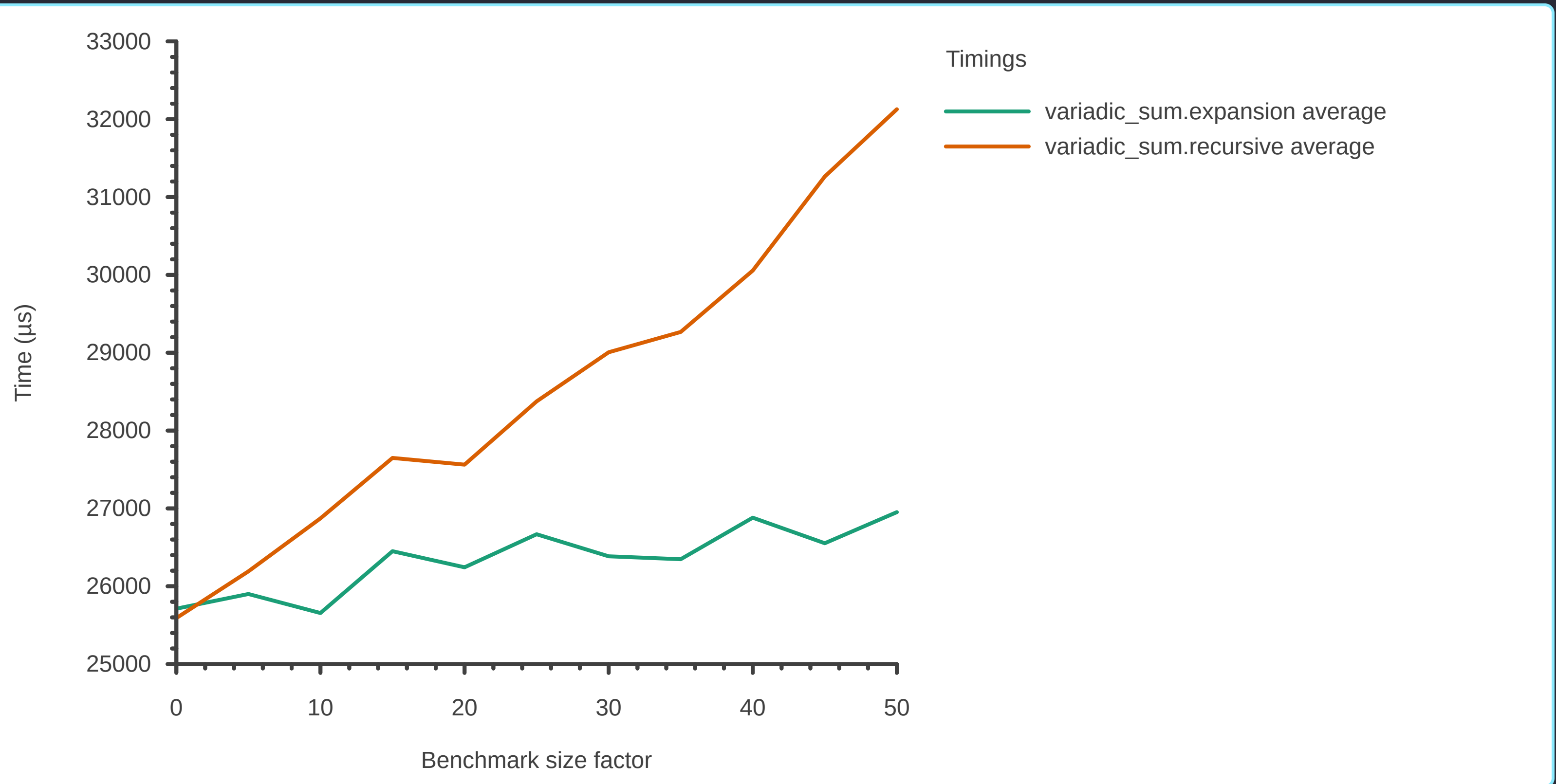
- **1e implémentation:** récursion (C++11)

```
template<typename ... Ts> constexpr auto sum();  
template <> constexpr auto sum() { return ct_uint_t<0>{}; }  
template <typename T> constexpr auto sum(T const &) { return T{}; }  
  
template <typename T, typename... Ts>  
constexpr auto sum(T const &, Ts const &...tl) {  
    return ct_uint_t<T::value + decltype(sum(tl...))::value>{};  
}
```

- **2e implémentation:** fold expression (C++17)

```
template<typename ... Ts> constexpr auto sum();  
template <> constexpr auto sum() { return ct_uint_t<0>{}; }  
  
template <typename... Ts> constexpr auto sum(Ts const &...) {  
    return ct_uint_t<(Ts::value + ... + 0)>{};  
}
```

# Cas d'usage de ctbench: Récursion vs fold expression



## ctbench: Conclusion

- Disponible en open-source: [github.com/jpenuchot/ctbench](https://github.com/jpenuchot/ctbench)
- L'outil est facilement **installable et réutilisable**
- Il permet d'effectuer des **analyses reproductibles** des temps de compilation
- **Applications:**
  - Estimation globale de l'impact sur le temps de compilation
  - Comparaison des techniques de métaprogrammation
  - Peut nous guider dans l'implémentation de **métaprogrammes plus complexes**



# Les travaux de cette thèse

- Portabilité des bibliothèques HPC "classiques"
- Analyse des temps de compilation
- Techniques d'implémentation des DSELs
  - Nouvelles méthodes pour leur implémentation
  - DSEL arbitraires appliqués au calcul numérique

# Etat de l'art des DSEL

- **Pour le calcul numérique:** Eigen (2009), Blaze (2012), NT2 (2014)

```
#include <blaze/Blaze.h>

int main() {
    blaze::DynamicMatrix<int> mat_a({{4, -2, 5}}), mat_b({{2}, {5}, {-3}});
    blaze::DynamicMatrix<int> mat_c = mat_a + trans(mat_b);
}
```

- **Problème:** la syntaxe C++ limite celle des DSELs pour le calcul numérique
- **Est-il possible de s'affranchir de la syntaxe C++?**

# Compile Time Regular Expressions (CTRE)

*Hana Dusíková, 2018*

*[github.com/hanickadot/compile-time-regular-expressions](https://github.com/hanickadot/compile-time-regular-expressions)*

Parsing d'expressions régulières PCRE et transformation en code C++

```
std::optional<std::string_view> extract_number(std::string_view s) noexcept
{
    if (auto m = ctre::match<"[a-z]+([0-9]+)">(s)) // Génération du matcher
        return m.get<1>().to_view();
    else return std::nullopt;
}
```

CTRE utilise un **parser d'expressions PCRE** à la compilation

- **Quelles techniques pour généraliser cette idée ?**
- **Peut-on appliquer ces techniques aux DSEs pour le calcul numérique ?**

# Vers des compilateurs embarqués constexpr

- **constexpr**: rend des fonctions exécutables à la compilation
- Nouvelles fonctionnalités constexpr:
  - Allocation dynamique
  - Support de la bibliothèque standard (`std::vector`, `std::unique_ptr...`)

```
constexpr std::vector<int> foo() { return {0, 1, 2, 3}; }
```

**Idée:** peut-on développer un parser constexpr et passer son résultat en paramètre template ?

```
template <auto Value> struct my_type {};  
my_type<foo()> my_value; // ERREUR
```

*Comment contourner cette contrainte ?*

# Le langage Brainfuck

Token	Sémantique	Token	Sémantique
>	ptr++;	<	ptr--;
+	++(*ptr);	-	--(*ptr);
.	putchar(*ptr);	,	(*ptr) = getchar();
[	while(*ptr) {	]	}

- **Propriétés du langage:**
  - 1 token = un noeud d'AST
  - Langage structuré
- *hello-world.bf*

```
+++++++ [>++++ [> ++> +++> +++> +<<<<- ]> +> +> —>> + [< ] ← ]
>> .> --- .+++++++ .. +++ .>> .← .< .+++ .----- .----- .>>+ .> ++ .
```

# Un parser Brainfuck

```
std::tuple<ast_block_t, token_vec_t::const_iterator>
parse_block(token_vec_t::const_iterator parse_begin,
            token_vec_t::const_iterator parse_end) {
    std::vector<ast_node_ptr_t> block_content;
    for (; parse_begin != parse_end; parse_begin++) {
        if (*parse_begin == while_end_v) {
            return {std::move(block_content), parse_begin};
        } else if (*parse_begin == while_begin_v) {
            auto [while_block_content, while_block_end] =
                parse_block(parse_begin + 1, parse_end);
            block_content.push_back(
                std::make_unique<ast_while_t>(std::move(while_block_content)));
            parse_begin = while_block_end;
        } else if (*parse_begin != nop_v) {
            block_content.push_back(
                ast_node_ptr_t(std::make_unique<ast_token_t>(*parse_begin)));
        }
    }
    return {ast_block_t(std::move(block_content)), parse_end};
}
```

# Un parser Brainfuck constexpr

```
constexpr std::tuple<ast_block_t, token_vec_t::const_iterator>
parse_block(token_vec_t::const_iterator parse_begin,
            token_vec_t::const_iterator parse_end) {
    std::vector<ast_node_ptr_t> block_content;
    for (; parse_begin != parse_end; parse_begin++) {
        if (*parse_begin == while_end_v) {
            return {std::move(block_content), parse_begin};
        } else if (*parse_begin == while_begin_v) {
            auto [while_block_content, while_block_end] =
                parse_block(parse_begin + 1, parse_end);
            block_content.push_back(
                std::make_unique<ast_while_t>(std::move(while_block_content)));
            parse_begin = while_block_end;
        } else if (*parse_begin != nop_v) {
            block_content.push_back(
                ast_node_ptr_t(std::make_unique<ast_token_t>(*parse_begin)));
        }
    }
    return {ast_block_t(std::move(block_content)), parse_end};
}
```

# Génération de programmes Brainfuck

- **Intuition:** On souhaite traduire des AST en expression templates
  - *Comment passer la mémoire dynamique en paramètre de templates ?*
  - On passe pas les noeuds, on passe leurs **fonctions génératrices**

```
constexpr std::vector<int> foo() { return {0, 1, 2, 3}; }

template <auto Value> struct my_type {};

// my_type<foo()> my_value; // ERREUR
my_type<foo> my_value;      // OK
```

- Visite de l'AST en passant récursivement les génératrices des sous-noeuds
  - Fonction de parsing appelée **autant de fois qu'il y a de noeuds**.
  - **Quel est l'impact sur les performances ?**  
 **$O(N^2)$  ?**



# Temps de génération via expression templates

*Temps de compilation en secondes*

Backend	Hello World	Hello World x2	Mandelbrot
Noeuds d'AST	106	212	11672
Avec expression templates	19.18	74.51	Failure (timeout)

- Avec les expression templates:
  - Temps de compilation insatisfaisants, **quadratiques**
  - Représentation intermédiaire superflue
- Sans les expression templates ?
  - Il suffit de **générer le code directement**

# Temps de génération sans expression templates

*Temps de compilation en secondes*

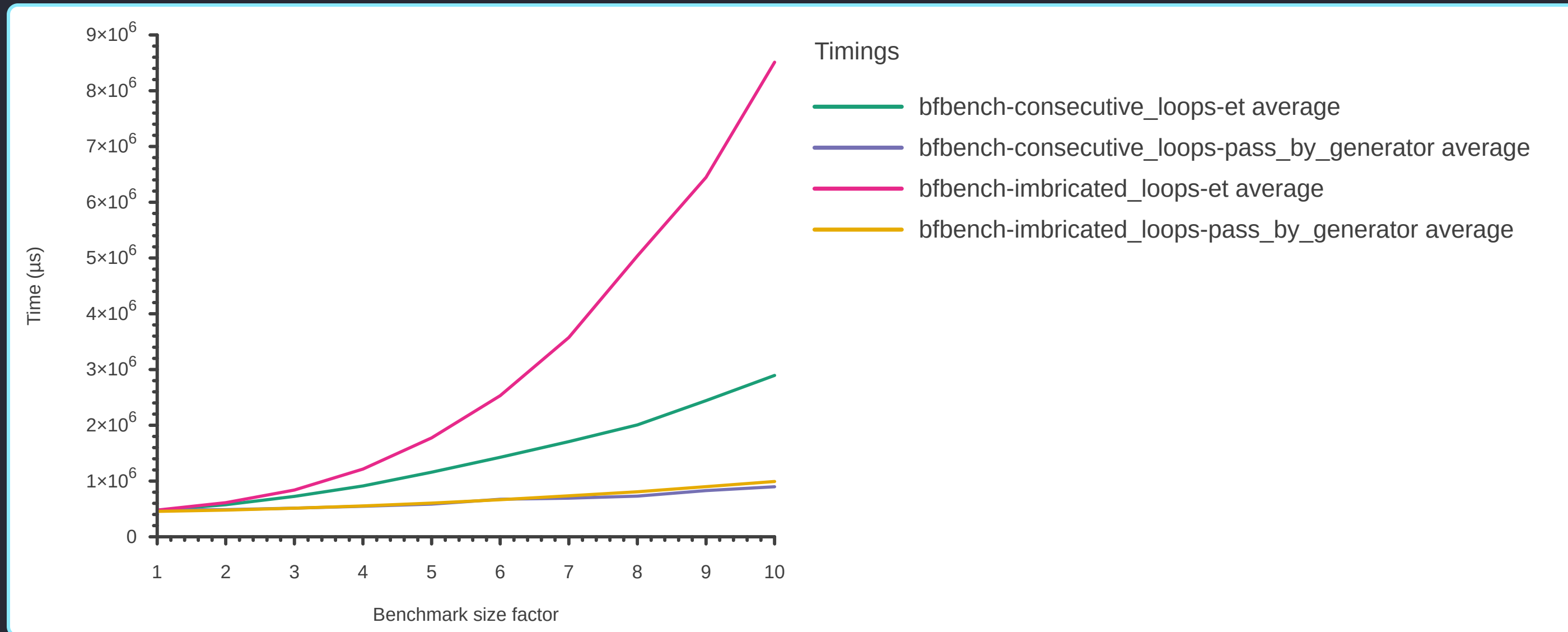
Backend	Hello World	Hello World x2	Mandelbrot
Noeuds d'AST	106	212	11672
Avec expression templates	19.18	74.51	Failure (timeout)
Sans expression templates	3.55	12.73	Failure (timeout)

- Sans les expression templates:
  - Gain de performances considérable
  - **Toujours quadratique**
- Il faut une solution pour passer à l'échelle **sur des grands cas**

*Qu'est-ce qu'il se passe sur des benchmarks de plus petite taille ?*

# Benchmarks synthétiques de petite taille

- Boucles imbriquées: `[[...]]` (*AST profond*)
- Boucles consécutives: `[][]...` (*AST large*)



- La **forme** des expression templates influe sur le temps de compilation

# Conversion de tableaux dynamiques en tableaux statiques

```
constexpr std::vector<int> foo() { return {0, 1, 2, 3}; }
template <auto Value> struct my_type {};

constexpr auto foo_arr() {
    std::array<int, foo().size()> array; // foo().size() est constexpr
    std::ranges::copy(foo(), array.begin());
    return array;
}

my_type<foo_arr()> my_value; // OK
```

- Méthode **généralisable** pour passer des tableaux dynamiques en paramètres de templates
- Pour passer un AST en paramètre de template, il suffit de le sérialiser
- **Réduction de la complexité**: la génératrice n'est appelée que 2 fois

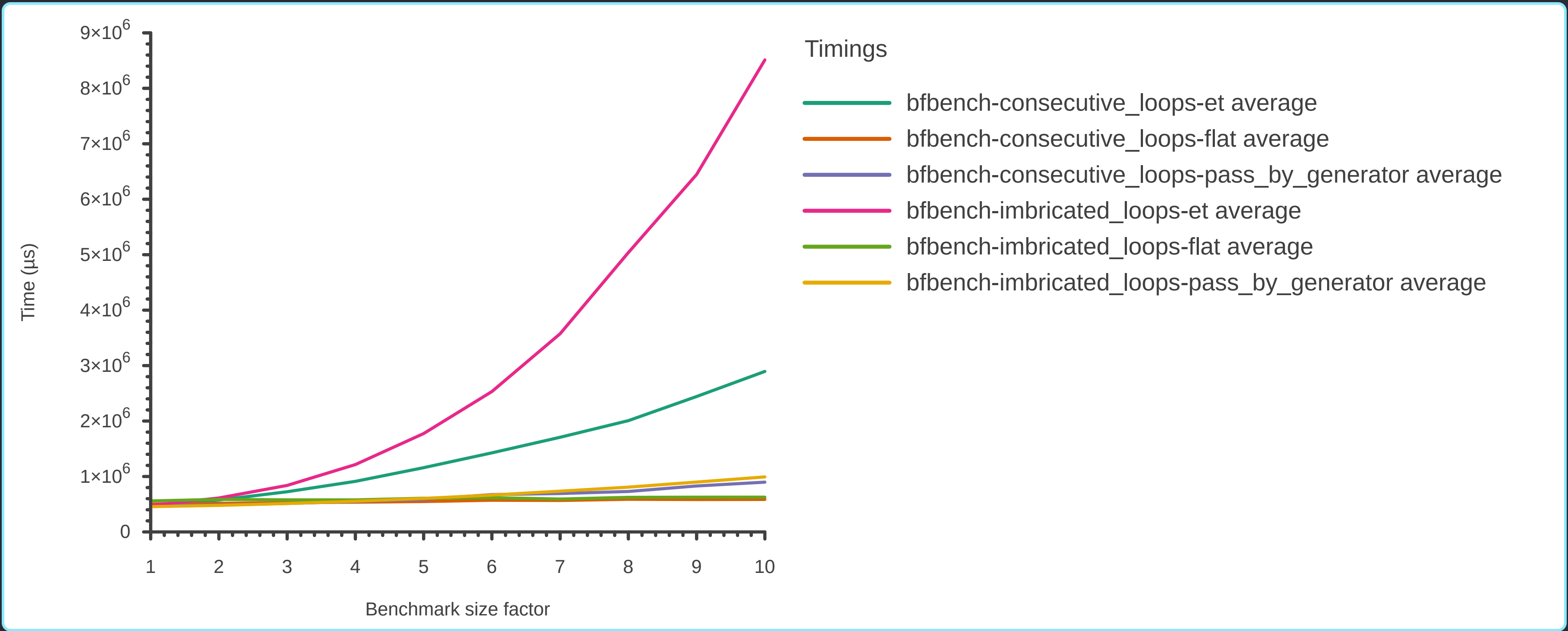
# Temps de compilation via sérialisation

Backend	Hello World	Hello World x2	Mandelbrot
Noeuds d'AST	106	212	11672
Gen. avec ET	19.18	74.51	Failure (timeout)
Gen. sans ET	3.55	12.73	Failure (timeout)
Sérialisation	0.63	0.80	18.16

- Temps de compilation **linéaire**
- Coût d'implémentation **non négligeable**:
  - Représentation intermédiaire sérialisée
  - Fonctions de sérialisation

→ **Temps d'implémentation vs temps de compilation**

# Benchmarks synthétiques de petite taille



Impact négligeable sur les cas de petite taille

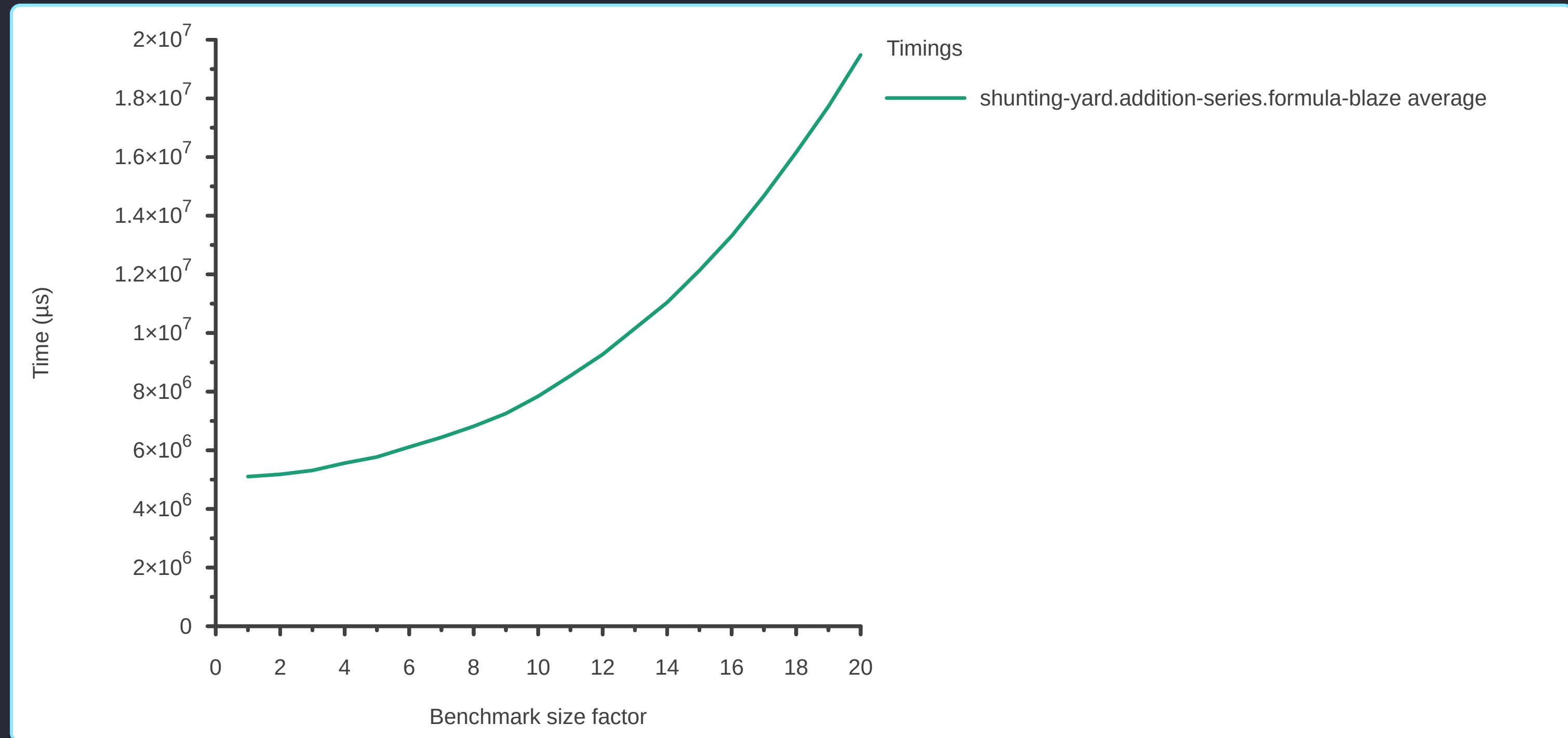
# Application pour le calcul numérique

- **Langage mathématique simple:** Tiny Math Language, inspiré d'AsciiMath

```
static constexpr auto formula = "sin(x + 3) / 3 * y ^ 2";  
auto function = tml::codegen<formula>(); // Génère une fonction générique  
  
auto res_scalar = function(8.3, 42.8);  
  
blaze::DynamicVector<float> vector_x(16, 1.), vector_y(16, 12.);  
blaze::DynamicVector<float> res_vec = function(vector_x, vector_y);
```

- **Parser:** Shunting-Yard (Dijkstra, 1961)
  - Précédence et associativité des opérateurs
  - Sortie en **notation postfix**, *exemple:  $2 + 3 + 4 \rightarrow 2\ 3 + 4 +$*
  - Nécessite une pile implémentée par un tuple  
→ Temps de compilation non-linéaire ?

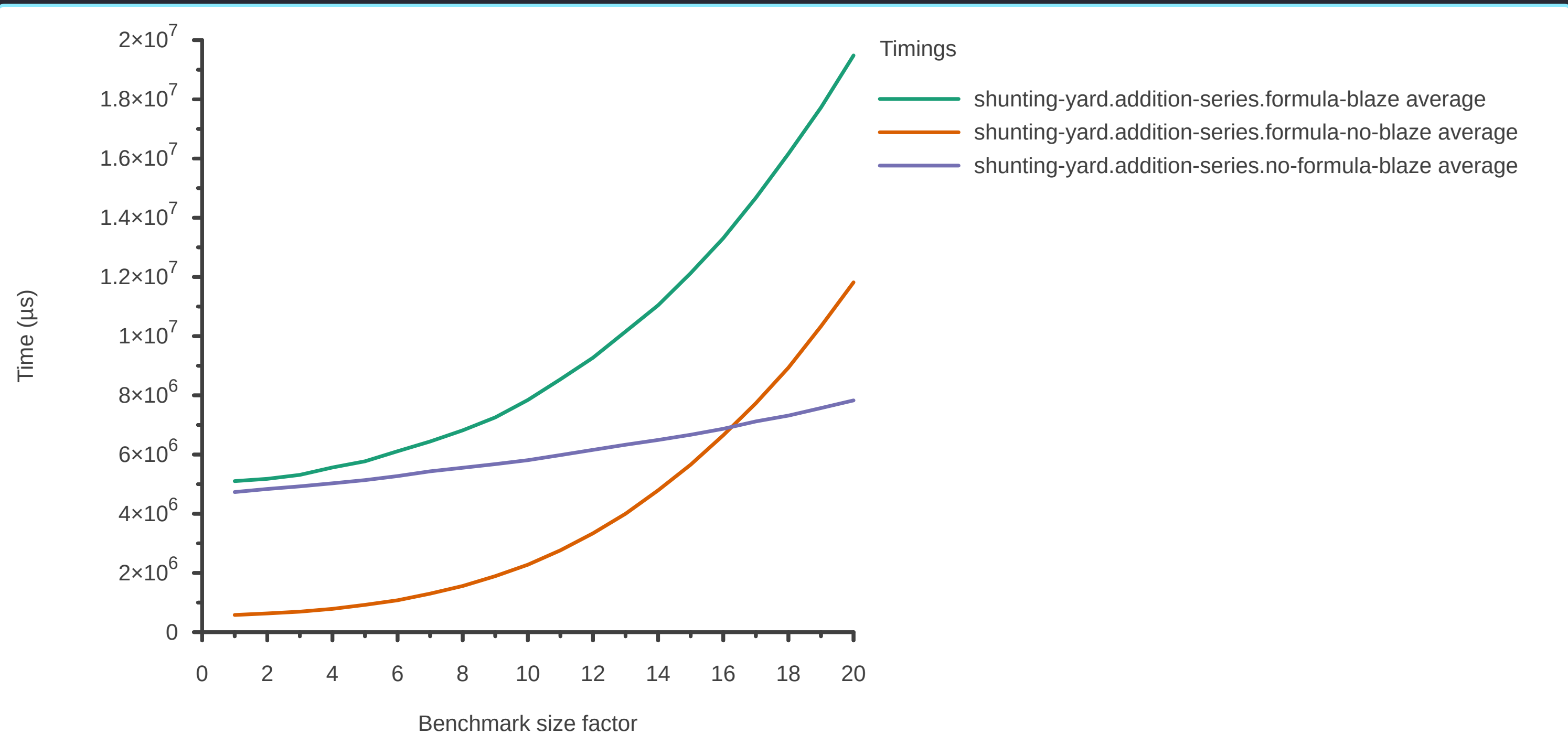
# Temps de compilation de Blaze et TML



*Mesures de temps de compilation pour des séries d'additions  
( $0 + x + y + \dots$ )*



# Temps de compilation de Blaze et TML



Mesures de temps de compilation pour des séries d'additions  
(0 + x + y + ...)

## DSEs: Conclusion

- Implémentations et benchmarks: [github.com/jpenuchot/poacher](https://github.com/jpenuchot/poacher)
- **Résultats:**
  - On peut s'affranchir de la syntaxe C++
  - Techniques de génération de code adaptées à différents cas (*prototypage, expressions simples, programmes de grande taille*)
  - On peut combiner ces abstractions avec des bibliothèques existantes
- **Utilité de ctbench:**
  - Validation des hypothèses sur les temps de compilation
  - Analyse fine des résultats finaux

# Conclusions

- **Etat de l'art: des métaprogrammes de "seconde zone"**
  - Les templates limitent la métaprogrammation C++ constexpr
  - Les outils d'analyse de temps de compilation sont insuffisants
- **Première contribution: ctbench**
  - Analyse des temps de compilation
  - Reproductibilité
  - Contribue à l'optimisation des métaprogrammes
- **Deuxième contribution: parsing de DSELS arbitraires**
  - Stratégie d'implémentation à faible coût de compilation
  - Démonstration de leur utilisation pour le calcul numérique

# Perspectives

- **Benchmarking:**

- Améliorer les outils existants
- Données de profiling pour GCC

- **Génération de code:**

- *Proposer un modèle de métaprogrammation plus direct:*
  - Mémoire dynamique en paramètre de templates
  - Réflexion + réification
- *Amélioration des DSEs en C++23:*
  - Sérialisation automatique vers une IR générique
  - Générateurs de parsers constexpr

# Perspectives

- Externalisation des paramètres:

```
static constexpr auto formula = "sin( $\lambda$  + 3) / 3 *  $\omega$  ^ 2";  
auto function = tml::codegen<formula>(); // Génère un objet fonction générique  
  
auto res = function("_lambda" = 3.5, "_omega" = 32.2)
```

- Intégration de langages pré-existants:

```
static constexpr auto program = R"function ave = calculateAverage(x)  
    ave = sum(x(:)) / numel(x);  
end";  
  
auto function = matlab::codegen<program, "calculateAverage">();  
auto res = function("x" = std::vector<double>{1.2, 2.4, 3., .1});
```

**Merci de votre attention**

# Contributions

- *Modern Generative Programming for Optimizing Small Matrix-Vector Multiplication*  
Jules Pénuchot, Joël Falcou, Amal Khabou  
International Conference on High Performance Computing Simulation, 2018
- *ctbench: compile time benchmarking for Clang*  
Jules Pénuchot  
CPPP 2021
- *A totally constexpr standard library*  
Paul Keir, Joel Falcou, Jules Pénuchot, Andrew Gozillon  
Meeting C++, 2022
- *ctbench - compile-time benchmarking and analysis*  
Jules Pénuchot, Joël Falcou  
Journal of Open Source Software, vol. 8, 2023