Systèmes à objets répartis

M1 Informatique, S8

Janvier 2026

Vincent Lannurien [1]
vincent.lannurien@univ-brest.fr

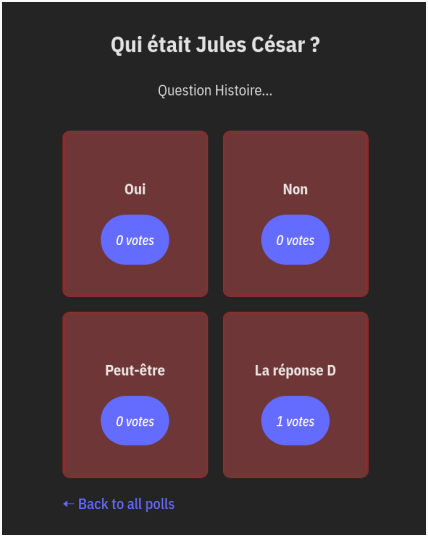
[1] Lab-STICC, CNRS UMR 6285, Université de Bretagne Occidentale, Brest

Introduction

http://info-demo-sor.univ-brest.fr:3000

Plan du cours

1. Organisation de l'UE
2. Introduction
3. Cas d'étude applicatif
4. Architecture : modèle client/serveur
5. JavaScript, TypeScript et *runtime*
   - Typage statique et dynamique
   - Généricité
   - Gestion des erreurs
   - Asynchronisme et parallélisme
   - Environnement d'exécution
6. Serveur web
   - Protocole HTTP
   - Mise en œuvre
   - Gestion de l'état
   - Architecture
   - Fiabilité et tests
7. Client web
8. Authentification
9. Interactions
10. Déploiement de l'application
11. Débuggage et profilage
    - Outillage
    - Profilage des performances



Organisation de l’UE

Organisation de l'UE – Contenu

- Objectifs :
  - Développer une application suivant l'**architecture trois tiers**, s'appuyant sur des communications via **HTTP** et **WebSockets** ;
  - Comprendre les mécanismes de l'**authentification** (avec ou sans état) d'un client auprès d'un serveur ;
  - S'initier au **déploiement** d'une application répartie à l'aide d'un *reverse proxy*.
- Prérequis :
  - Côté client : HTML/CSS
- Méthode :
  - Un peu de cours…
  - Beaucoup de pratique !

Organisation de l'UE – Logistique

- Volume horaire :
  - CM : 3 séances de 2h (total : 6h)
  - TP : 8 séances de 2h (total : 16h)
- Contrôle des connaissances :
  - TP noté (2h sur cette partie du cours)
  - Examen final (2h en tout)

Introduction

Contenu du cours

- État et gestion de l'état
  - Contrats
    - Interfaces
    - *Data Transfer Objects*
  - Persistance
    - Base de données
    - Transactions
- Protocoles
  - HTTP
    - *Status codes*
    - *CORS* (*Cross-Origin Resource Sharing*)
  - Authentification
    - *Tokens*
- Performances et profilage
  - Instrumentation (serveur)
  - Inspecteur (client)
  - Injection de trafic
- Déploiement
  - SSL, certificats
  - *Reverse proxy*

Technologies utilisées

- Côté serveur :
  - Runtime (Deno)
  - Langage (TypeScript)
  - Framework (Oak)
  - Base de données (SQLite)
- Côté client :
  - Bundler (Vite)
  - Langage (TypeScript)
  - Framework (React)
- Communications :
  - Requêtes HTTP
  - WebSockets

Cas d’étude applicatif

Présentation de l'application

Description

L'application est une **plateforme de sondages en ligne**.
Elle permet à des utilisateurs de **créer des sondages** et d'ajouter des **options de réponse**.
Les participants peuvent **voter** pour une ou plusieurs options selon des règles définies par le créateur du sondage.
L'application gère également l'**authentification** des utilisateurs et assure la **persistance** des données.

Présentation de l'application

Acteurs

Les acteurs de l'application sont les suivants :

- Utilisateur authentifié : peut créer des sondages, voter, et consulter les résultats ;
- Utilisateur invité : peut voter (si autorisé) et consulter les résultats (si autorisé) ;
- Administrateur : peut gérer les sondages et les utilisateurs.

Présentation de l'application

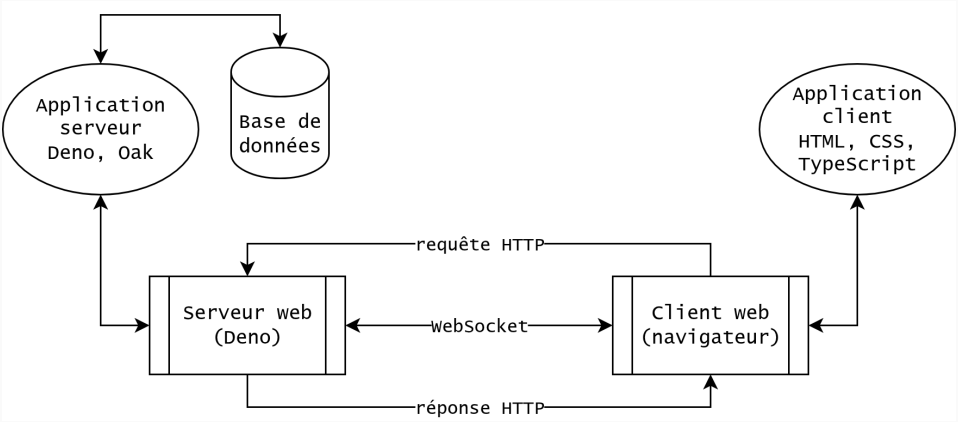
Fonctionnalités

Les principales fonctionnalités de l'application peuvent être résumées ainsi :

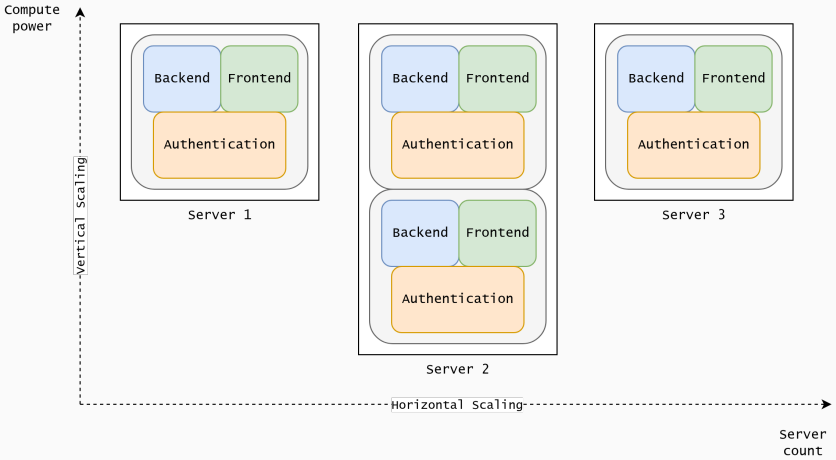
- Création de sondages avec : titre, description, date de création, date d'expiration, statut (actif/inactif) ;
- Ajout d'options à un sondage : texte descriptif ;
- Vote pour une option de sondage ;
- Consultation des résultats (nombre de votes par option) ;
- Gestion des utilisateurs (inscription, authentification).

Architecture : modèle client/serveur

Vue d'ensemble

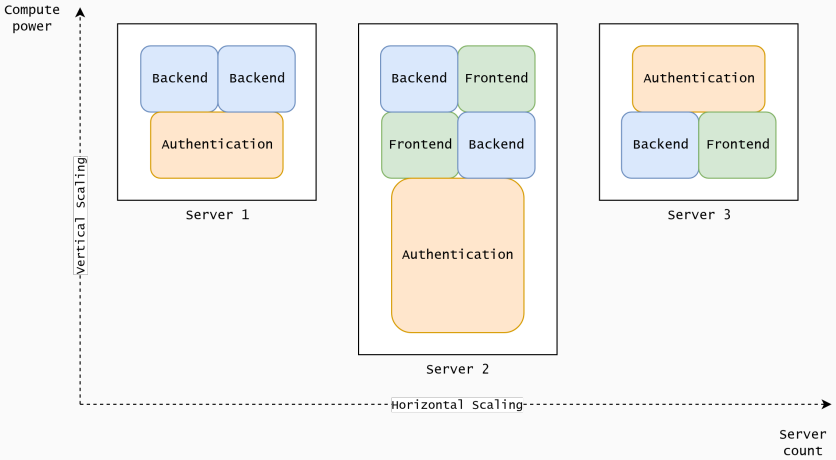


Monolithes ou microservices



1. [5] James Lewis et Martin Fowler. *Microservices.*

Monolithes ou microservices



1. [5] James Lewis et Martin Fowler. *Microservices.*

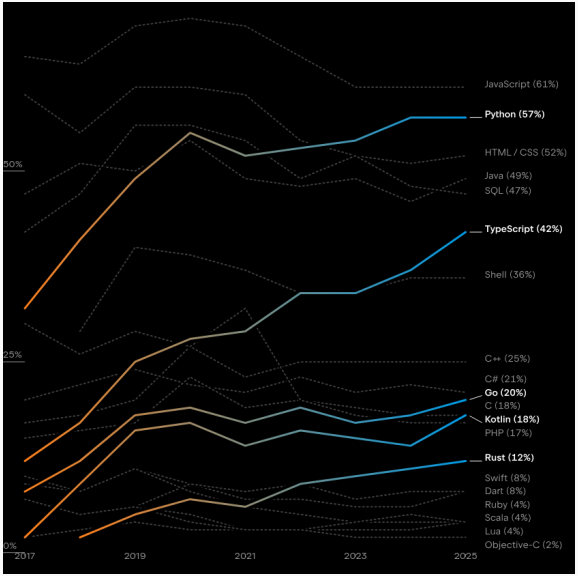
JavaScript, TypeScript et *runtime*

JavaScript

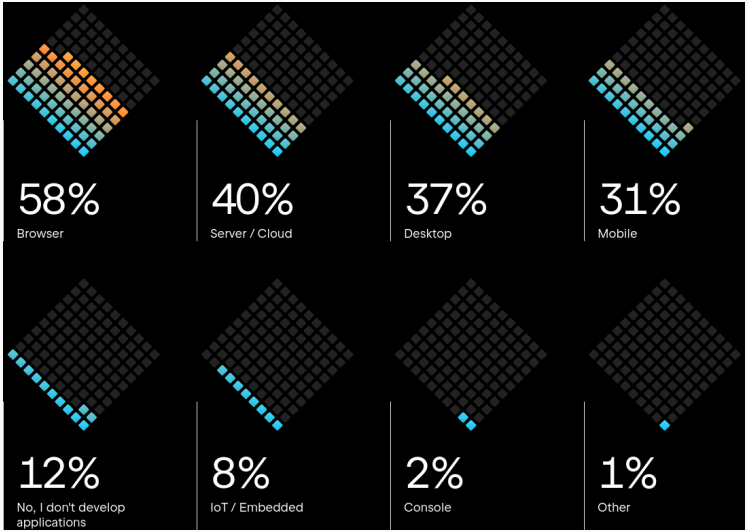
```
1 <html>
2 <head><title>Alert Page</title></head>
3 <Body>
4     <script language="javascript">
5         alert("Welcome to javaskool.com");
6     </script>
7 </body>
8 <html>
```

JavaScript

- 1995 : Brendan Eich développe en 10 jours un langage simple, interprété par le navigateur, pour dynamiser les pages web
- 1997 : première standardisation par ECMA (*European Computer Manufacturers Association*) sous le nom ECMAScript
- 2005 : AJAX popularise les applications web dynamiques
- 2008 : Google publie la machine virtuelle V8 pour l'exécution du code JavaScript dans Chrome
- 2009 : Node.js étend l'utilisation de JavaScript au côté serveur
- 2010 – 2014 : émergence des frameworks et d'un outillage moderne pour JavaScript (jQuery, AngularJS, etc.)
- 2015 : ECMAScript Edition 6 (ES6/ES2015) transforme le langage (modules, classes, *arrow functions*, *Promises*)



- *”Among the most dramatic rises in real-world usage over the last five years is TypeScript.”*



2. https://devecosystem-2025.jetbrains.com/tools-and-trends

TypeScript

- Conçu en 2012 par Anders Hejlsberg
- Open source, maintenu par Microsoft
- Ni interprété, ni compilé : langage **transpilé** vers JavaScript, *superset* de JS
- Exécutable dans n'importe quel *runtime* JS (navigateur, Node.js, etc.)
- Multi-paradigme : **fonctionnel**, générique, impératif, orienté objet

TypeScript

- **Typage statique** : détecter les erreurs et incohérences à la compilation (donc avant l'exécution)
- **Interopérabilité** : typage *progressif* (tout fichier JavaScript valide est un fichier TypeScript valide)

Adoption par l'industrie :

- Slack[3] : migration du frontend React vers TS pour sécuriser les appels d'API et réduire les erreurs au runtime
- Airbnb[4] : typage progressif du code JS pour réduire les coûts de maintenance
- Microsoft[5] : migration vers TS pour faciliter l'évolution de VS Code ($>$ 1M SLoC)
- Shopify[6] : migration frontend et backend pour fiabiliser les fonctions critiques

3. https://slack.engineering/typescript-at-slack/
4. https://www.youtube.com/watch?v=P-J9Eg7hJwE
5. https://www.git-tower.com/blog/developing-for-the-desktop-vscode
6. https://shopify.engineering/migrating-large-typescript-codebases-project-references

TypeScript

- Ressources :
  - *The TypeScript Handbook*[7]
  - *The Concise TypeScript Book*[8]
  - TypeScript TV[9] (liste des codes d'erreur)
  - TS Playground[10] (environnement d'exécution en ligne)

7. [6] Microsoft. *The TypeScript Handbook*. 2026
8. [7] Simone Poggiali. *The Concise TypeScript Book*. 2026
9. `https://typescript.tv/`
10. `https://www.typescriptlang.org/play/`

JavaScript, TypeScript et *runtime*

Typage statique et dynamique

TypeScript : typage du code JavaScript

Types de base disponibles dans TypeScript[11] :

- `boolean`
- `number`
- `string`
- Tableaux (dynamiques) – exemple : `string[]` ou `Array<string>`
- Tuples (taille fixe) – exemple : `let x: [string, number]`
- `enum`
- `unknown` (type à préciser en le vérifiant à l'exécution)
- `any` (à éviter : toute valeur autorisée)
- `void` (absence de valeur)
- `null` (valeur vide) et `undefined` (valeur non définie)

11. https://www.typescriptlang.org/docs/handbook/2/everyday-types.html

Exercice 1 : les pièges du typage dynamique

Fonctions et paramètres

- Écrire une fonction `addition(a, b)` qui additionne deux nombres.
- Tester la fonction avec les entrées suivantes :

```
addition(2, 3);       // attendu : 5
addition("2", 3);     // attendu : ?
addition(true, 3);    // attendu : ?
```

Questions

1. Que se passe-t-il pour les deux derniers cas ?
2. Quels problèmes cela pose-t-il poser dans une application réelle ?
3. Proposer une version TypeScript pour éviter ces erreurs *à la compilation*.

Exercice 1 : les pièges du typage dynamique

```ts
function addition2(a: number, b: number): number {
  return a + b;
}

console.log(addition2(2, 3));
// L'argument de type 'string' n'est pas attribuable au paramètre
// de type 'number'.ts(2345)
console.log(addition2("2", 3));
// L'argument de type 'boolean' n'est pas attribuable au paramètre
// de type 'number'.ts(2345)
console.log(addition2(true, 3));
```

JavaScript : POJO (*Plain Old Java Object*)

```
const o = {
    "foo": "bar",
    "value": 42,
    other: true,
}

console.log(o.foo);
console.log(o["value"]);
console.log(o.other);
```

POJO et listes : *Spread operator*

```
const o1 = { "abc": 123 };
// Ajout d'une nouvelle valeur dans `o1`
o1["def"] = 456;
// Nouvel objet avec copie des valeurs de `o1`
const o2 = { ...o1, "ghi": 789 };


const l1 = [123];
// Ajout d'une nouvelle valeur à la fin de `l1`
l1.append(456);
// Nouvelle liste avec copies des valeurs de `l1`
const l2 = [...l1, 789];
```

TypeScript : typer les objets avec `Record`

```ts
const o: Record<string, string | number | boolean> = {
    "foo": "bar",
    "value": 42,
    other: true,
}

console.log(o.foo);
console.log(o["value"]);
console.log(o.other);
console.log(o.blabla); // undefined
```

Typage, interfaces et classes

```ts
// Définition
interface Bidule {
    truc: string;
    machin: number;
    toto?: boolean;
}

// Instanciation
const b: Bidule = {
    truc: "bidule",
    machin: 42,
};
```

```ts
// Définition
class Bidule {
    constructor(
        public truc: string,
        public machin: number,
        public toto?: boolean,
    ) {}
}

// Instanciation
const b: Bidule = new Bidule(
    "bidule", 42
);
```

Exercice 2 : interfaces et contrats

Typage des objets

- Écrire une fonction `afficherUtilisateur(u)` qui prend un objet représentant un utilisateur et affiche son nom et son âge.
- Tester la fonction avec les entrées suivantes :

```
afficherUtilisateur({ nom: "Alice", age: 25 });
afficherUtilisateur({ nom: "Bob" });
```

Questions

1. Que se passe-t-il pour le second cas ?
2. Comment TypeScript peut-il garantir la présence des propriétés attendues ?
3. Proposer une solution avec TypeScript.

Exercice 2 : interfaces et contrats

```ts
interface Utilisateur {
    nom: string;
    age: number;
}

function afficherUtilisateur(u: Utilisateur): void {
    console.log(`${u.nom} a ${u.age} ans`);
}

afficherUtilisateur({ nom: "Alice", age: 25 });
// L'argument de type '{ nom: string; }' n'est pas attribuable
// au paramètre de type 'Utilisateur'.
//  La propriété 'age' est absente du type '{ nom: string; }'
//  mais obligatoire dans le type 'Utilisateur'.ts(2345)
afficherUtilisateur({ nom: "Bob" });
```

Typage, interfaces et classes

- Types **effacés** à la compilation
  - Pas d'impact sur les performances (compromis : temps de compilation vs temps d'exécution)
  - Une erreur de typage n'empêche pas la compilation vers JavaScript
- Corollaire : il n'est pas possible de vérifier les types TypeScript **lors de l'exécution** du programme…
- … sauf pour les types primitifs de JavaScript !

Typage, interfaces et classes

```ts
// type union : soit number, soit string
const fn = (x: number | string) => {
    // typeof type guard
    if (typeof x === 'number') {
        return x + 1;
    }

    return -1;
};
// type union : soit string, soit null
const toUpperCase = (name: string | null) => {
    // truthiness narrowing
    if (name) {
        return name.toUpperCase();
    } else {
        return null;
    }
};
```

Exercice 3 : types au *runtime*

```ts
interface Animal {
  name: string;
}
interface Dog extends Animal {
  bark: () => void;
}
interface Cat extends Animal {
  meow: () => void;
}
const makeNoise = (animal: Animal) => {
  if (animal instanceof Dog) {
    // 'Dog' fait référence à un type mais s'utilise en tant que valeur ici.ts(2693)
    animal.bark();
  } else {
    animal.meow();
  }
};
```

Questions

1. Que signifie l'erreur levée par le compilateur ?
2. Comment peut-on vérifier la nature de l'objet `animal` au *runtime* ?

Exercice 3 : types au *runtime*

```ts
interface Dog {
  kind: "dog"; // Tagged union
  bark: () => void;
}

interface Cat {
  kind: "cat"; // Tagged union
  meow: () => void;
}

type Animal = Dog | Cat; // Union type

const makeNoise = (animal: Animal) => {
  if (animal.kind === "dog") animal.bark();
  else animal.meow();
};
```

Exercice 3 : types au *runtime*

```ts
class Dog {
  constructor(public name: string, public bark: () => void) {}
}

class Cat {
  constructor(public name: string, public meow: () => void) {}
}

type Animal = Dog | Cat; // Union type

const makeNoise = (animal: Animal) => {
  if (animal instanceof Dog) animal.bark();
  else animal.meow();
};
```

Exercice 3 : types au *runtime*

```ts
interface Dog {
  kind: "dog"; // Tagged union
  bark: () => void;
}
interface Cat {
  kind: "cat"; // Tagged union
  meow: () => void;
}
type Animal = Dog | Cat;
const makeNoise = (animal: Animal) => {
  if (animal.kind === "dog") animal.bark();
  else animal.meow();
};
const dog: Dog = {
  kind: "dog",
  bark: () => console.log("bark")
};
makeNoise(dog);
```

Type Guards : *compile time* et *run time*

- *Type narrowing* : *compile time*
- *Type assertion* : *run time*

```
interface Something { id: string };

export function isSomething(obj: unknown): obj is Something {
  return !!obj
    && typeof obj === "object"
    && "id" in obj && typeof obj.id === "string";
}

const bla = { id: "blabla" };
```

JavaScript, TypeScript et *runtime*

Généricité

Généricité

- `SomeContainer<T extends SomeData>`
  - `T` est un type paramètre contraint à hériter ou implémenter `SomeData`
  - Permet de réutiliser le même conteneur pour différents types de données
- Objectifs :
  - Définir des structures et fonctions abstraites sur un type variable
  - Maintenir les contraintes de type

```ts
interface SomeData {
  id: string;
}

interface SpecializedData extends SomeData {
  name: string;
  value: number;
}

interface SomeContainer<T extends SomeData> {
  data: T;
}
```

```ts
const c: SomeContainer<
  SpecializedData
> = {
  data: {
    id: "foo",
    name: "Foo Bar",
    value: 42,
  },
};
```

JavaScript, TypeScript et *runtime*

Gestion des erreurs

Gestion des erreurs : exceptions

```
const randInt = Math.floor(Math.random() * 3) + 1; // [1, 3]
const error =
  randInt === 1 ? new TypeError() :
  randInt === 2 ? new RangeError() :
  new EvalError();

try {
  throw error;
} catch {
  // handle error
}
```

Gestion des erreurs : exceptions

```
const randInt = Math.floor(Math.random() * 3) + 1; // [1, 3]
const error =
    randInt === 1 ? new TypeError() :
    randInt === 2 ? new RangeError() :
    new EvalError();

try {
  throw error;
} catch (e) {
  if (e instanceof TypeError) {
    // handle TypeError
  } else if (e instanceof RangeError) {
    // handle RangeError
  } else if (e instanceof EvalError) {
    // handle EvalError
  }
}
```

Gestion des erreurs : exceptions

```
try {
  const file = await Deno.open("example.txt", { read: true });

  for await (const chunk of Deno.iter(file)) {
      console.log(new TextDecoder().decode(chunk));
  }
} catch (e) {
  console.error("Error reading file:", e);
} finally {
  // always close the file handle
  if (file) {
    file.close();
  }
}
```

JavaScript, TypeScript et *runtime*

Asynchronisme et parallélisme

Programmation asynchrone

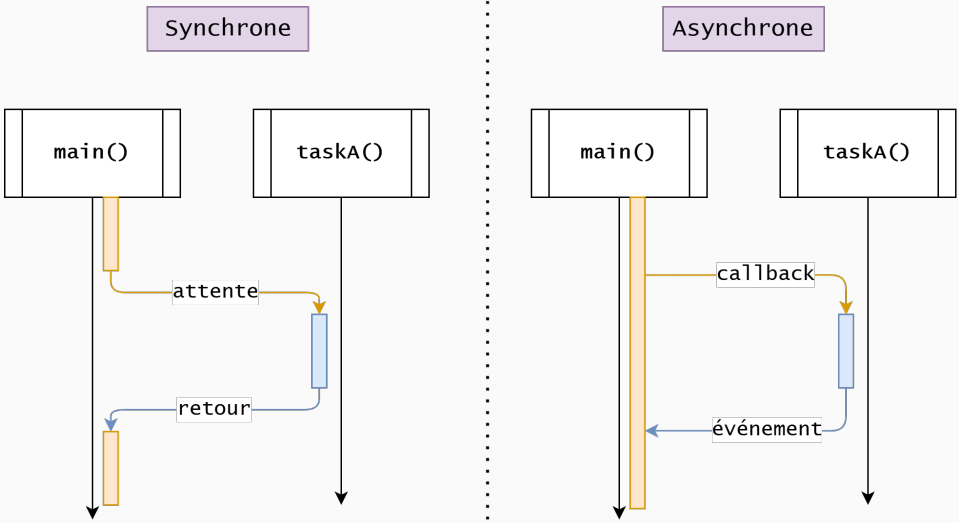
Comment manipuler des données…

- que l'on n'a pas encore ?
- que l'on n'aura peut-être jamais ?
- qui l'on obtient dans un temps variable ?

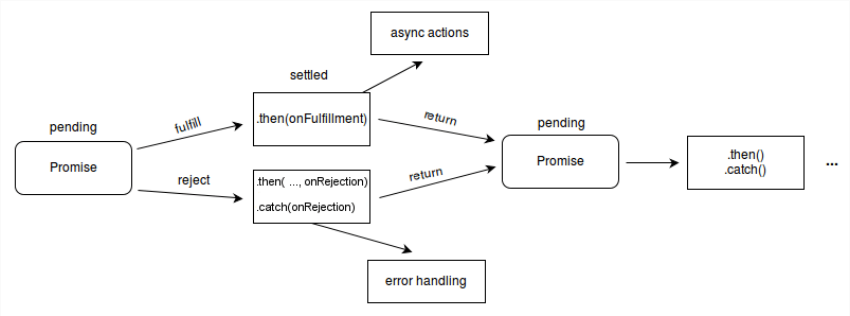
Par exemple…

- le résultat d'une requête à une API ?
- le contenu d'un fichier volumineux sur le disque ?
- le résultat d'une requête à une base de données ?

Programmation asynchrone



- API : **Promises**
  - Traiter des opérations **asynchrones**
  - Une Promise *encapsule un résultat futur*
  - Elle est associée à des *callbacks* qui seront exécutés à l'obtention de ce résultat
  - Elle peut être *résolue* (réussite) ou *rejetée* (échec)



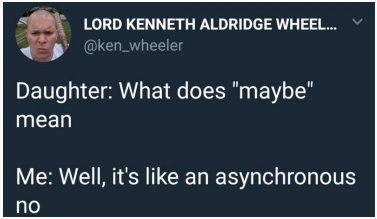
12. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Reference/Global_Objects/Promise

Programmation asynchrone

```
function repeatMaybe(repeat: string): Promise<string> {
  return new Promise((resolve, reject) => {
    const maybe: number = randomIntegerBetween(0, 1);

    if (!maybe) {
        reject("Nope");
        return;
    }

    setTimeout(() => {
        resolve(repeat);
    }, 1000);
  });
}

const blabla = repeatMaybe("bla").then((result: string) => {
    console.log(result);
}).catch((error: string) => {
    console.log(error)
});
```

Programmation asynchrone

- API : `async`/`await`
  - Sucre syntaxique pour ”aplatir” du code asynchrone
  - `async` définit une fonction asynchrone
  - `await` met l’exécution du programme en pause dans l’attente d’un résultat




```
asyncFunction().then((res) => {
    console.log(res);
}).catch((err) => {
    console.log(err);
});
```

```
try {
    const res = await asyncFunction();
    console.log(res); // "bla"
} catch (err) {
    console.log(err); // "Nope"
}
```

Programmation asynchrone

```
function repeatMaybe(repeat: string): Promise<string> {
  return new Promise((resolve, reject) => {
    const maybe: number = randomIntegerBetween(0, 1);

    if (!maybe) {
        reject("Nope");
        return;
    }

    setTimeout(() => {
        resolve(repeat);
    }, 1000);
  });
}

try {
    const blabla = await repeatMaybe("bla");
    console.log(blabla); // "bla"
} catch (error) {
    console.log(error); // "Nope"
}
```

Programmation parallèle

- `Promise.all`
  - exécute toutes les Promises en **parallèle**
  - résout quand toutes les Promises ont **réussi**
  - rejette immédiatement si **une seule échoue**
  - retourne un tableau des résultats dans l'ordre initial des Promises
- `Promise.allSettled`
-
  - exécute toutes les Promises en **parallèle**
  - résout quand toutes les Promises sont terminées, **succès ou échec**
  - ne rejette **jamais**
  - retourne un tableau d'objets de type :
    - `status: 'fulfilled' | 'rejected', value | reason`

Exercice 4 : programmation asynchrone

Manipuler l'API Promise

- Écrire une fonction `readTextFileIfExists(path)` qui lit un fichier s'il existe et retourne son contenu si le fichier n'est pas vide :

```
readTextFileIfExists("data.txt")
  .then(text => console.log("File contents:", text))
  .catch(err => console.error("I/O error:", err.message));
```

Questions

1. Quelle est la signature de cette fonction en TypeScript ?
2. Comment utiliser cette fonction avec `await` ?
3. Comment utiliser cette fonction sur une liste de fichiers ?
4. Comment paralléliser la lecture des fichiers de la liste ?

Exercice 4 : programmation asynchrone

```
function readTextFileIfExists(path) {
  return new Promise((resolve, reject) => {
    if (!path) {
      reject(new Error("No file path provided"));
      return;
    }

    readFile(path, "utf8")
      .then(data => {
        if (data.length === 0) {
          reject(new Error("File is empty")); // explicit failure
        } else {
          resolve(data); // successful read
        }
      })
      .catch(err => reject(err)); // I/O error
  });
}
```

Exercice 4 : programmation asynchrone

```
try {
  const text = await readTextFileIfExists("data.txt");
  console.log("File contents:", text);
} catch (err) {
  console.error("I/O error:", err.message);
}
```

Exercice 4 : programmation asynchrone

```
const files = ["file1.txt", "file2.txt", "file3.txt"];

for (const file of files) {
  try {
    const text = await readTextFileIfExists(file);
    console.log("File contents:", text);
  } catch (err) {
    console.error("I/O error:", err.message);
    continue;
  }
}
```

🤔

Temps d'exécution total = ?

Exercice 4 : programmation asynchrone

```
const files = ["does_not_exist.txt", "file2.txt", "file3.txt"];

const contents = await Promise.all(
  files.map(readTextFileIfExists)
);
try {
    contents.forEach((text, i) => {
      console.log("File contents:", text);
    });
} catch (err) {
    console.error("I/O error:", err.message);
}
```

Temps d'exécution total = ?

Exercice 4 : programmation asynchrone

```
const files = ["does_not_exist.txt", "file2.txt", "file3.txt"];

const contents = await Promise.allSettled(
  files.map(readTextFileIfExists)
);
contents.forEach((result, i) => {
  if (result.status === "fulfilled") {
      console.log("File contents:", result.value);
  } else if (result.status === "rejected") {
      console.error("I/O error:", result.reason);
  }
});
```

🤔

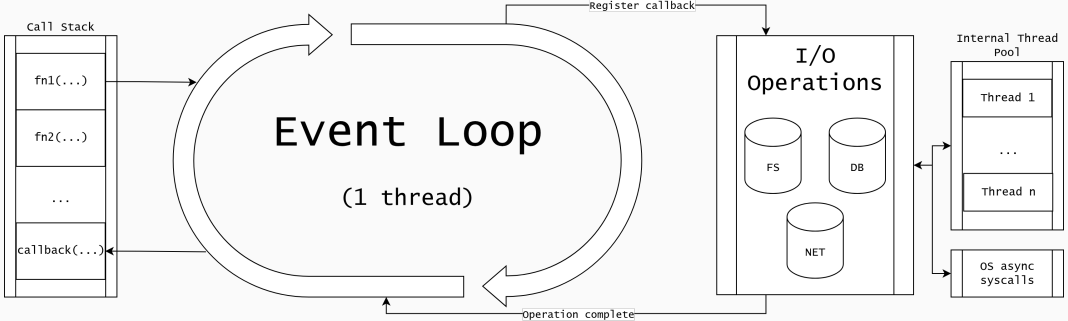
Temps d'exécution total = ?

JavaScript, TypeScript et *runtime*

Environnement d'exécution

Exécution : machine virtuelle

- JavaScript : langage interprété dans une VM
- Langage permet d'exprimer des instructions **asynchrones**
- Runtime **synchrone** : boucle d'événements (pas de coroutines, pas de threads [13])



13. Sauf *workers*, voir `https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/Thread`

Runtime : Deno

- Runtime pour exécuter du code JavaScript en-dehors du navigateur
- Basé sur le moteur V8 (comme Node.js)
- Créé en 2018 par Ryan Dahl, développeur de Node.js[14]
- Points forts :
  - *Sandbox* : permissions explicites (lecture/écriture, accès au réseau, etc.)
  - Exécute du code TypeScript sans outillage supplémentaire
  - Inclut un formateur, un *linter*, une plateforme de test, un profileur

[14] https://www.youtube.com/watch?v=M3BM9TB-8yA

Sécurité, permissions

- *Supply-chain attack* : introduction de vulnérabilités dans un logiciel *via* compromission d'une ou plusieurs de ses dépendances
- Exemple : *Shai Hulud*, novembre 2025[15], 700 paquets compromis sur NPM
  - récupération de différents secrets présents sur la machine compromise […] ;
  - exfiltration des secrets ;
  - réplication par l'infection de paquets NPM ;
  - suppression de données utilisateurs ;
  - mise en place de persistance.

15. https://www.cert.ssi.gouv.fr/actualite/CERTFR-2025-ACT-051/

Gestion des dépendances

Outils et registres :

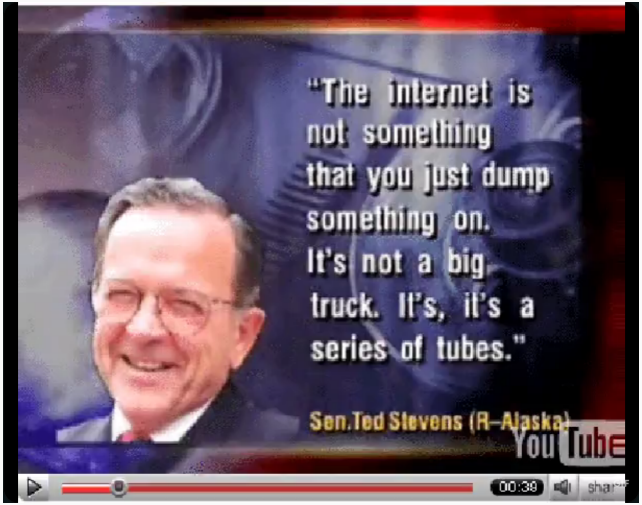
- `npmjs.org` : registre historique des paquets JavaScript
  - Gestionnaires de paquets : **npm / yarn**
- `jsr.org` : "nouveau" registre, orienté TypeScript
  - Gestionnaire de paquets : **jsr**, intégré dans Deno

Modules et imports :

- **CommonJS (CJS)** : compatibilité historique
  - Import : `const fs = require('fs');`
  - Export : `module.exports = { readFile };`
  - Chargement synchrone
- **ECMAScript Modules (ESM)** : standard moderne
  - Import : `import { readFile } from 'fs/promises';`
  - Export : `export const myFunc = () => {...};`
  - Chargement statique ou dynamique (asynchrone)

Serveur web

It's a series of tubes...



Résumé de la méthode en TP

1. La base de données retourne des **enregistrements** : ce sont des données arbitraires
   - Élément unique : `Record<string, SQLOutputValue> | undefined`
     - Peut être `undefined` si introuvable !
   - Liste : `Record<string, SQLOutputValue>[]`
     - Peut être vide !
2. On doit *vérifier le typage des données* pour que l'objet se conforme à son *interface base de données* (`PollRow`, …)
3. On peut alors *convertir l'enregistrement* en objet de notre *API* (`Poll`, …)
4. L'objet peut être retourné au client de manière *sûre*
   - *Compile time* : typage statique des données dans l'application client
   - *Run time* : pas d'erreur à l'exécution pour l'utilisateur

❶ Récupération des enregistrements en BDD

```
const pollId = ctx.params.pollId;
      const pollRow: Record<string, SQLOutputValue> | undefined
const pollRow = db.prepare(
  `SELECT id, title, description, user_id, created_at, expires_at, is_active
   FROM polls WHERE id = ?;`,
).get(pollId);

const pollOptionRows = db.prepare(
  `SELECT id, poll_id, text, vote_count FROM poll_options WHERE poll_id = ?;`,
).all(pollId);
```

❶ Récupération des enregistrements en BDD

```
const pollId = ctx.params.pollId;
      const pollRow: Record<string, SQLOutputValue> | undefined
const pollRow = db.prepare(
  `SELECT id, title, description, user_id, created_at, expires_at, is_active
   FROM polls WHERE id = ?;`,
).get(pollId);

const pollOptionRows = db.prepare(
  `SELECT id, poll_id, text, vote_count FROM poll_options WHERE poll_id = ?;`,
).all(pollId);
```

❷ Vérification des données (*type guard*)

```
if (!pollRow || !isPollRow(pollRow)) {
  const responseBody: APIResponse<Poll> = {
    success: false,
    error: { code: APIErrorCode.NOT_FOUND, message: "Poll not found" },
  };

  ctx.response.status = 404;
  ctx.response.body = responseBody;
  return;
}
      const pollOptionRows: Record<string, SQLOutputValue>[]
if (!pollOptionRows.every(isPollOptionRow)) {
  const responseBody: APIResponse<Poll> = {
    success: false,
    error: { code: APIErrorCode.NOT_FOUND, message: "Poll not found" },
  };

  ctx.response.status = 404;
  ctx.response.body = responseBody;
  return;
}
```

❶ Récupération des enregistrements en BDD

```
const pollId = ctx.params.pollId;
      const pollRow: Record<string, SQLOutputValue> | undefined
const pollRow = db.prepare(
  `SELECT id, title, description, user_id, created_at, expires_at, is_active
   FROM polls WHERE id = ?;`,
).get(pollId);

const pollOptionRows = db.prepare(
  `SELECT id, poll_id, text, vote_count FROM poll_options WHERE poll_id = ?;`,
).all(pollId);
```

❷ Vérification des données (*type guard*)

Données arbitraires

```
if (!pollRow || !isPollRow(pollRow)) {
  const responseBody: APIResponse<Poll> = {
    success: false,
    error: { code: APIErrorCode.NOT_FOUND, message: "Poll not found" },
  };

  ctx.response.status = 404;
  ctx.response.body = responseBody;
  return;
}
      const pollOptionRows: Record<string, SQLOutputValue>[]
if (!pollOptionRows.every(isPollOptionRow)) {
  const responseBody: APIResponse<Poll> = {
    success: false,
    error: { code: APIErrorCode.NOT_FOUND, message: "Poll not found" },
  };

  ctx.response.status = 404;
  ctx.response.body = responseBody;
  return;
}
```

❶ Récupération des enregistrements en BDD

```
const pollId = ctx.params.pollId;
      const pollRow: Record<string, SQLOutputValue> | undefined
const pollRow = db.prepare(
  `SELECT id, title, description, user_id, created_at, expires_at, is_active
   FROM polls WHERE id = ?;`,
).get(pollId);

const pollOptionRows = db.prepare(
  `SELECT id, poll_id, text, vote_count FROM poll_options WHERE poll_id = ?;`,
).all(pollId);
```

❷ Vérification des données (*type guard*)

Données arbitraires

```
if (!pollRow || !isPollRow(pollRow)) {
  const responseBody: APIResponse<Poll> = {
    success: false,
    error: { code: APIErrorCode.NOT_FOUND, message: "Poll not found" },
  };

  ctx.response.status = 404;
  ctx.response.body = responseBody;
  return;
}
      const pollOptionRows: Record<string, SQLOutputValue>[]
if (!pollOptionRows.every(isPollOptionRow)) {
  const responseBody: APIResponse<Poll> = {
    success: false,
    error: { code: APIErrorCode.NOT_FOUND, message: "Poll not found" },
  };

  ctx.response.status = 404;
  ctx.response.body = responseBody;
  return;
}
```

❸ Conversion des données et envoi au client

```
                                  const pollRow: PollRow
const poll = pollRowToApi(pollRow, pollOptionRows);

const responseBody: APIResponse<Poll> = {
  success: true,
  data: poll,
};

ctx.response.body = responseBody;
```

❶ Récupération des enregistrements en BDD

```
const pollId = ctx.params.pollId;
      const pollRow: Record<string, SQLOutputValue> | undefined
const pollRow = db.prepare(
  `SELECT id, title, description, user_id, created_at, expires_at, is_active
   FROM polls WHERE id = ?;`,
).get(pollId);

const pollOptionRows = db.prepare(
  `SELECT id, poll_id, text, vote_count FROM poll_options WHERE poll_id = ?;`,
).all(pollId);
```

```
if (!pollRow || !isPollRow(pollRow)) {
  const responseBody: APIResponse<Poll> = {
    success: false,
    error: { code: APIErrorCode.NOT_FOUND, message: "Poll not found" },
  };

  ctx.response.status = 404;
  ctx.response.body = responseBody;
  return;
}
      const pollOptionRows: Record<string, SQLOutputValue>[]
if (!pollOptionRows.every(isPollOptionRow)) {
  const responseBody: APIResponse<Poll> = {
    success: false,
    error: { code: APIErrorCode.NOT_FOUND, message: "Poll not found" },
  };

  ctx.response.status = 404;
  ctx.response.body = responseBody;
  return;
}
```

❷ Vérification des données (*type guard*)

Données arbitraires

❸ Conversion des données et envoi au client

```
                                  const pollRow: PollRow
const poll = pollRowToApi(pollRow, pollOptionRows);

const responseBody: APIResponse<Poll> = {
  success: true,
  data: poll,
};

ctx.response.body = responseBody;
```

Données conformes

Résumé de la méthode en TP

```ts
export interface PollRow {
  id: string;
  title: string;
  description: string | null;
  user_id: string | null;
  created_at: string;
  expires_at: string | null;
  is_active: number;
  [key: string]: SQLOutputValue;
}
```

```ts
export interface Poll {
  id: string;
  title: string;
  description?: string;
  options: PollOption[];
  userId?: string;
  createdAt: string;
  expiresAt?: string;
  isActive: boolean;
}
```

Résumé de la méthode en TP

```
export function isPollRow(
  obj: Record<string, SQLOutputValue>
): obj is PollRow {
  return !!obj &&
    typeof obj === "object" &&
    "id" in obj && typeof obj.id === "string" &&
    "title" in obj && typeof obj.title === "string" &&
    "description" in obj &&
    (typeof obj.description === "string" || obj.description === null) &&
    "user_id" in obj &&
    (typeof obj.user_id === "string" || obj.user_id === null) &&
    "created_at" in obj && typeof obj.created_at === "string" &&
    "expires_at" in obj &&
    (typeof obj.expires_at === "string" || obj.expires_at === null) &&
    "is_active" in obj && typeof obj.is_active === "number";
}
```

Résumé de la méthode en TP

```
export function pollRowToApi(
  row: PollRow,
  optionRows: PollOptionRow[],
): Poll {
  return {
    id: row.id,
    title: row.title,
    description: row.description ?? undefined,
    createdAt: row.created_at,
    expiresAt: row.expires_at ?? undefined,
    isActive: row.is_active === 1,
    options: optionRows.map(pollOptionRowToApi),
  };
}
```

Résumé de la méthode en TP

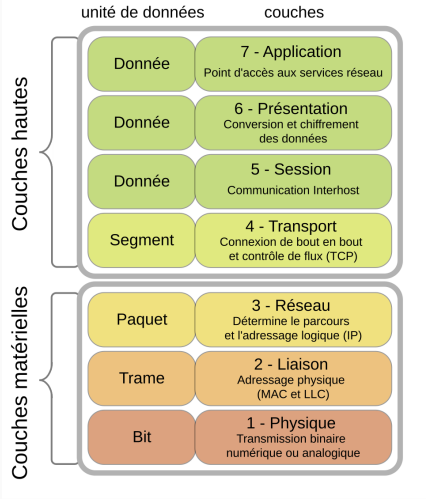
```
export function pollApiToRow(
  poll: Poll
): [PollRow, PollOptionRow[]] {
  return [
    {
      id: poll.id,
      title: poll.title,
      description: poll.description ?? null,
      user_id: poll.userId ?? null,
      created_at: poll.createdAt,
      expires_at: poll.expiresAt ?? null,
      is_active: Number(poll.isActive),
    },
    poll.options.map((pollOption) => pollOptionApiToRow(
      poll.id, pollOption
    )),
  ];
}
```

Serveur web

Protocole HTTP

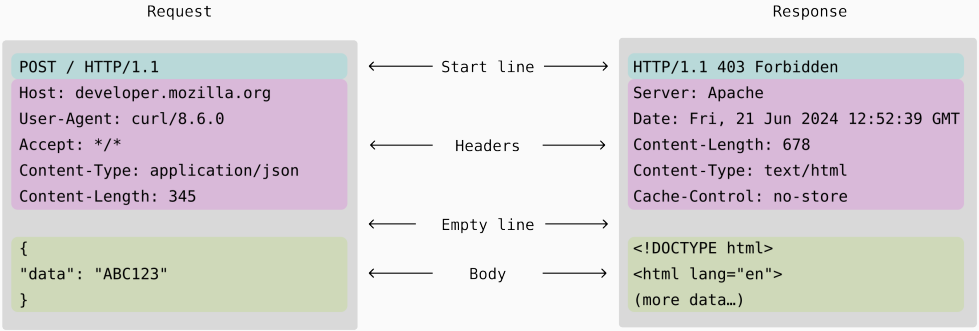
HTTP

- *Hypertext Transfer Protocol* : à l'origine, sert à partager des pages web reliées entre elles par des liens
- Inventé au CERN[16] par un chercheur britannique, Tim Berners-Lee, entre 1989 et 1991
- 1997 : standardisation de HTTP/1.1 :
  - Apparition de l'en-tête `Host`, permettant d'héberger plusieurs domaines sur la même adresse IP, donc la colocation de serveurs web



[16] Initialement *Conseil européen pour la recherche nucléaire*, plus grand centre de recherche au monde en physique des particules

HTTP : requêtes et réponses



HTTP : méthodes

Méthodes principales pour les requêtes HTTP[17], aussi appelées *verbes* :

- `GET` : demande d'une ressource
- `POST` : envoi de données du *corps* de la requête vers une ressource
- `PUT` : remplacement d'une ressource par le *corps* de la requête
- `DELETE` : suppression d'une ressource

17. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Reference/Methods

HTTP : codes de réponse

- `100` à `199` : réponses informatives
  - `101 Switching Protocols`
- `200` à `299` : réponses de succès
  - `200 OK`
- `300` à `399` : réponses de redirection
  - `301 Moved Permanently`
- `400` à `499` : erreurs du client
  - `401 Unauthorized`
- `500` à `599` : erreurs du serveur
  - `500 Internal Server Error`

HTTP : architecture REST

- *REpresentational State Transfer* [1] : défini par Roy Fielding en 2000, conçu pendant son doctorat (1996 - 1999)
- Modèle d'architecture logicielle pour applications réseau
- Manipuler des ressources distantes via des représentations textuelles
- Opérations uniformes, prédéfinies, et **sans état**

Méthodes HTTP

URI	GET	POST	PUT	PATCH	DELETE
Ressource collection, telle que `http://api.exemple.com/collection/`	*Récupère* les URI des ressources membres de la ressource collection dans le corps de la réponse.	*Crée* une ressource membre dans la ressource collection en utilisant les instructions du corps de la requête. L'URI de la ressource membre créée est *attribué automatiquement* et retourné dans le champ d'en-tête *Location* de la réponse.	*Remplace* toutes les représentations des ressources membres de la ressource collection par la représentation dans le corps de la requête, ou *crée* la ressource collection si elle n'existe pas.	*Met à jour* toutes les représentations des ressources membres de la ressource collection en utilisant les instructions du corps de la requête, ou *crée éventuellement* la ressource collection si elle n'existe pas.	*Supprime* toutes les représentations des ressources membres de la ressource collection.
Ressource membre, telle que `http://api.exemple.com/collection/item3`	*Récupère* une représentation de la ressource membre dans le corps de la réponse.	*Crée* une ressource membre dans la ressource membre en utilisant les instructions du corps de la requête. L'URI de la ressource membre créée est *attribué automatiquement* et retourné dans le champ d'en-tête *Location* de la réponse.	*Remplace* toutes les représentations de la ressource membre, ou *crée* la ressource membre si elle n'existe pas, par la représentation dans le corps de la requête.	*Met à jour* toutes les représentations de la ressource membre, ou *crée éventuellement* la ressource membre si elle n'existe pas, en utilisant les instructions du corps de la requête.	*Supprime* toutes les représentations de la ressource membre.

Exercice 5 : un serveur HTTP minimal avec TypeScript

Lire et écrire sur un socket TCP

Ci-dessous, la boucle principale pour ouvrir et écouter sur un socket TCP avec Deno. Dès la connexion d'un **client**, on passe le socket à la fonction `handleConn`.

```
// TCP socket
const listener = Deno.listen({ port: 8080 });
// Strings <-> Bytes
const decoder = new TextDecoder();
const encoder = new TextEncoder();
// Listen loop
for await (const conn of listener) {
  handleConn(conn);
}
```

Exercice 5 : un serveur HTTP minimal avec TypeScript

Lire et écrire sur un socket TCP

Ci-dessous, la fonction `handleConn` par laquelle chaque **requête** en provenance d'un **client** est traitée. Le serveur reçoit un **tableau d'octets**; on le convertit en une chaîne de caractères dans `rawRequest`.

```
async function handleConn(conn: Deno.Conn) {
  const buf = new Uint8Array(1024);
  const bytes = await conn.read(buf);
  if (bytes === null) {
    conn.close();
    return;
  }

  const rawRequest = decoder.decode(buf.subarray(0, bytes));
}
```

Exercice 5 : un serveur HTTP minimal avec TypeScript

```
curl -X POST http://localhost:8080 \
     -H "Content-Type: text/plain" \
     -d "hello world"
```

```
POST / HTTP/1.1
Host: localhost:8080
User-Agent: curl/8.14.1
Accept: */*
Content-Type: text/plain
Content-Length: 11

hello world
```

Questions

1. Quels sont les champs à inclure dans la réponse que l'on va retourner au client ?
2. Compléter la fonction `handleConn` pour signifier une réponse OK comportant du texte au format JSON.
3. Comment va-t-on gérer l'horodatage ?

Serveur web

Mise en œuvre

Framework pour serveur HTTP : Oak

- Inspiré par Express.js, initialement développé pour Deno
- Framework *middleware* : un logiciel qui s'intercale entre la requête d'un client et la réponse d'un serveur
- **Contexte** = **Requête** + **Réponse**
- Mécanisme principal : le **routage**
  - Pour un point d'entrée donné, appliquer telle fonction, retourner telle valeur
  - Requête : `GET http://blabla.com/item/123`
  - Méthode : `GET`
  - Route : `/item/:itemId`
  - Fonction : `getItem(id)`
  - Réponse : `{ id: 123, value: "..." }`

Framework pour serveur HTTP : Oak

```ts
// Configuration
const BASE_URL = "http://localhost:8000";
// Initialisation
const app = new Application();
const router = new Router();
// Middlewares
app.use(router.routes()); // Encore faut-il définir des routes ! ...
app.use(router.allowedMethods());
// Événements
app.addEventListener(
  "listen", () => console.log(`Server listening on ${BASE_URL}`),
);
app.addEventListener(
  "error", (e) => console.log(`Uncaught error: ${e.message}`),
);
// Boucle principale
if (import.meta.main) {
  await app.listen({ hostname: "localhost", port: 8000 });
}
// Export
export { app };
```

Routage avec Oak : paramètres de la requête

- L'utilisateur envoie une requête `GET`
- Adresse : `http://localhost:8000/polls/abcd`

```
router.get("/:pollId", (ctx) => {
  const pollId = ctx.params.pollId; // abcd
});
```

Routage avec Oak : paramètres de la requête

- L'utilisateur envoie une requête POST
- Corps de la requête : un objet JSON

```
{ "foo": "bar" }
```

- Adresse : `http://localhost:8000/polls`

```
router.post("/polls", async (ctx) => {
  const createPollRequest = await ctx.request.body.json();
  // { "foo": "bar" }
});
```

Routage avec Oak : réponse à la requête

```typescript
export interface APISuccess<T> {
  success: true;
  data: T;
  error?: never;
}

export interface APIFailure {
  success: false;
  data?: never;
  error: APIError;
}
```

Routage avec Oak : réponse à la requête

```
export enum APIErrorCode {
  NOT_FOUND = "NOT_FOUND",
  SERVER_ERROR = "SERVER_ERROR",
  TIMEOUT = "TIMEOUT",
  UNAUTHORIZED = "UNAUTHORIZED",
  VALIDATION_ERROR = "VALIDATION_ERROR",
}

export interface APIError {
  code: APIErrorCode;
  message: string;
}
```

Routage avec Oak : réponse à la requête

- Et finalement, le type de **toute** réponse de l'API...

```
export type APIResponse<T> = APISuccess<T> | APIFailure;
```

Routage avec Oak : réponse à la requête

- Si l'entité demandée est trouvée :

```
const responseBody: APIResponse<Poll> = {
  success: true,
  data: poll,
};

// Oak donne passe implicitement le code HTTP OK
ctx.response.body = responseBody;
```

Routage avec Oak : réponse à la requête

- Si l'entité demandée est introuvable :

```
const responseBody: APIResponse<Poll> = {
  success: false,
  error: {
    code: APIErrorCode.NOT_FOUND,
    message: "Poll not found",
  },
};

ctx.response.status = 404;
ctx.response.body = responseBody;
```

Routage avec Oak : réponse à la requête

- Le serveur rencontre une erreur :

```
const responseBody: APIResponse<Poll> = {
  success: false,
  error: {
    code: APIErrorCode.SERVER_ERROR,
    message: "Failed to fetch poll",
  },
};

ctx.response.status = 500;
ctx.response.body = responseBody;
```

Middleware

- Code applicatif qui se positionne **entre la requête et la réponse**
- **Intercepte** les données pour leur appliquer des modifications ou effectuer des effets de bord
- En pratique :
  - Une **fonction** qui prend en paramètre le **contexte** (`ctx`) et la **prochaine fonction** (`next`)
  - Invoquée dans une **chaîne** de traitement, ordonnée, pour chaque requête
  - Capable d'observer, modifier, court-circuiter ou ignorer le cycle de vie requête-réponse
  - Appelée par le framework (Oak) lors de la réception d'une requête

Middleware

```
interface HelloWorldState {
  hello?: string;
  world?: string;
}
async function hello(ctx: Context<HelloWorldState>, next: Next) {
  ctx.state.hello = "Hello";
  await next();
}
async function world(ctx: Context<HelloWorldState>, next: Next) {
  ctx.state.world = "world";
  await next();
}
const router = new Router<HelloWorldState>();
router.get("/hello", hello, world, (ctx) => {
  ctx.response.body = `${ctx.state.hello}, ${ctx.state.world}!`;
});
const app = new Application<HelloWorldState>();
```

Exercice 6 : gestion des erreurs du serveur

Un unique point de sortie pour les réponses d'erreur

On veut éviter de dupliquer du code pour retourner des erreurs au client dans les fonctions de nos routes. On va donc utiliser un **middleware** qui sera chargé de remplir la réponse en cas d'erreur.

```
export async function errorMiddleware(ctx: Context, next: Next) { }
```

Questions

1. Sur quel mécanisme s'appuyer pour intercepter les erreurs levées dans les routes de l'application ?
2. Comment différencier une erreur *prévue* d'une erreur *inattendue* ?

Serveur web

Gestion de l’état

Base de données

- SQLite
- Interactions avec SQLite : bibliothèque
- Conversion des **enregistrements** vers des **objets**

Base de données : rappels sur SQL

```sql
CREATE TABLE things (
    id TEXT PRIMARY KEY,
    name TEXT NOT NULL,
    maybe TEXT,
    active INTEGER NOT NULL
);

CREATE TABLE thing_options (
    id TEXT PRIMARY KEY,
    thing_id TEXT NOT NULL,
    value TEXT NOT NULL,
    FOREIGN KEY (thing_id) REFERENCES things(id) ON DELETE CASCADE
);
```

Base de données : transactions

- **Interdépendance** (sémantique et/ou fonctionnelle) entre deux requêtes **distinctes**
- Les deux doivent réussir ou échouer **ensemble** pour éviter une **incohérence dans l'état** de l'application

```
// Enregistrer le vote
const voteId = crypto.randomUUID();
const now = new Date().toISOString();
db.prepare(
  "INSERT INTO votes " +
  "(id, poll_id, option_id, user_id, created_at) " +
  "VALUES (?, ?, ?, ?, ?);",
).run(voteId, pollId, optionId, userId || null, now);

// Incrémenter le compteur
db.prepare(
  "UPDATE poll_options SET vote_count = vote_count + 1 WHERE id = ?;",
).run(optionId);
```

Base de données : transactions

- Mécanisme : **transactions**
- Unités de travail qui garantissent l'**atomicité** des opérations

```
try {
  db.prepare("BEGIN").run();     // Début de transaction

  db.prepare("...").run();       // Requête 1
  db.prepare("...").run();       // Requête 2

  db.prepare("COMMIT").run();    // Transaction validée
} catch {
  db.prepare("ROLLBACK").run(); // Transaction annulée
}
```

Exercice 7 : gestion des erreurs du serveur

Besoin d'atomicité

1. Quelles opérations doivent être **atomiques** dans notre application de sondage ?
2. Pourquoi ? C'est-à-dire : quels problèmes peuvent survenir si les sous-opérations, disjointes, échouent ?

Serveur web

Architecture

Organisation du dépôt

Exercice : ...

TODO : proposer une organisation
TODO : montrer les directives export / import associées

Serveur web

Fiabilité et tests

Tests

```
import { assertEquals, assert } from "@std/assert";

const BASE_URL = `http://localhost:8000`;

Deno.test({
  name: "polls management API",
  async fn() {
    const listRes = await fetch(`${BASE_URL}/polls`);
    assertEquals(listRes.status, 200);

    const listBody = await listRes.json();
    assert(listBody.success);
    assert(listBody.data.length >= 1);
    },
});
```

Exercice …

TODO : écrire des tests pour une ou deux routes

Client web

HTTP, encore

- API `fetch`

Un client web minimal avec TypeScript

```
const foo = "bar";
```

Framework : React

- Hooks
  - `useParams`
  - `useState`
  - `useRef`
  - `useEffect`
- Functional Components
- React Router

Bundling

- Bundler
- Vite

React : architecture

- Service Layer Pattern

Bundler

Authentification

Concepts généraux

Stateful : Sessions

Stateless : JWT

Interactions

Data Transfer Objects

WebSockets

Déploiement de l’application

Nom d'hôte, port, adresse

- `https` : protocole
- `foo.bar` : nom d'hôte (*hostname*)
- `com` : *TLD* (*Top-Level Domain*)
- `443` : port (HTTP : 80, HTTPS : 443)
- `baz.html` : nom de fichier

Nom d’hôte, port, adresse

```
https://foo.bar.com[:443]/baz.html
```

Reverse proxy

```
http {
    server {
        listen 80;
        server_name coucou.localhost;

        location / {
            proxy_pass http://127.0.0.1:8000;
            proxy_set_header Host $host;
            proxy_set_header X-Real-IP $remote_addr;
            proxy_set_header X-Forwarded-For $proxy_add_x_forwarded_for;
            proxy_set_header X-Forwarded-Proto $scheme;
        }
    }
}
```

Certificats SSL

- Protocole (TLSv1.2, TLSv1.3)
- Algorithme de chiffrement : AES 128/256, etc.

CORS

TODO :

Débuggage et profilage

What could go wrong…

- Niveau client
- Niveau serveur
- Niveau base de données
- Interactions API / BDD
- Infrastructure
- Sécurité
- Déploiement
- Gestion de l'état

Débuggage et profilage

Outillage

Logging

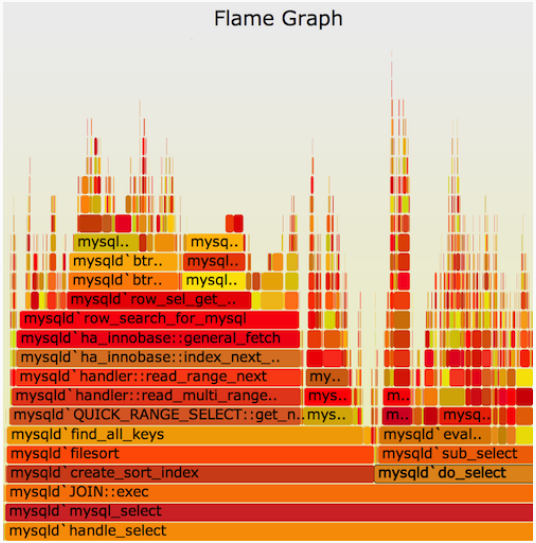
TODO :

Débuggage et profilage

Profilage des performances

Côté serveur

- `deno run --v8-flags="--prof" main.ts`
  - Crée un fichier .log dans le répertoire courant
  - *"V8 has built-in sample-based profiling. Profiling is turned off by default, but can be enabled via the `--prof` command-line option. The sampler records stacks of both JavaScript and C/C++ code."*
- Lecture du fichier avec cpupro [18]
  - Visualisation : *flame graph* [19]



[18] https://discoveryjs.github.io/cpupro/

[19] [2] Brendan Gregg. « The Flame Graph ». *Communications of the ACM* (2016)

Côté client

Bibliographie

Références i

[1] Roy Thomas Fielding. *Architectural styles and the design of network-based software architectures*. University of California, Irvine, 2000.

[2] Brendan Gregg. « The Flame Graph ». *Communications of the ACM* 59.6 (mai 2016), p. 48-57. issn : 0001-0782, 1557-7317. doi : 10.1145/2909476.

[3] Alexis King. *Parse, Don't Validate*. Nov. 2019. url : https://lexi-lambda.github.io/blog/2019/11/05/parse-don-t-validate/ (visité le 27/01/2026).

[4] Martin Kleppmann. *Designing Data-Intensive Applications : The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems*. 1st. Sebastopol, CA : O'Reilly Media, 2017, p. xix + 590. isbn : 978-1449373320.

[5] James Lewis et Martin Fowler. *Microservices*. url : https://martinfowler.com/articles/microservices.html (visité le 19/01/2026).

[6] Microsoft. *The TypeScript Handbook*. 2026. url : https://www.typescriptlang.org/docs/handbook/intro.html (visité le 19/01/2026).

[7] Simone Poggiali. *The Concise TypeScript Book*. 2026. url : https://gibbok.github.io/typescript-book/book/the-concise-typescript-book/ (visité le 19/01/2026).

[8] Yehonathan Sharvit. *Data-Oriented Programming : Reduce Software Complexity*. Shelter Island, NY : Manning Publications, 2022, p. 325. isbn : 978-1617298578.