

# Performance des ordinateurs quantiques analogiques pour l'optimisation.

Daniel Vert

Coordinateur du Hub Advanced Engineering & Computing  
Systematic Paris Region

[daniel.vert@systematic-paris-region.org](mailto:daniel.vert@systematic-paris-region.org)

Daniel VERT



# Why quantum computing? A new digital wave? A hype ...



## Les promesses de l'informatique quantique pour la R&D d'EDF

Entre « Informatique » et « Informatique quantique », un seul mot de différence... et pourtant tout un monde les sépare : à l'échelle des composants de la matière, les lois de la physique sont particulières. Cette « étrangeté » ouvre de gigantesques possibilités pour améliorer les moyens de calcul, une opportunité sur laquelle la R&D d'EDF veille et travaille.

Dans son activité, notamment au sein de la R&D, EDF a recours à de nombreux modèles informatiques très complexes, donc gourmands en temps de calcul. C'est le cas, par exemple, de l'optimisation de la gestion de la recharge de véhicules électriques, des études probabilistes de sûreté nucléaire, de la simulation de matériaux pour étudier leur vieillissement ou encore de l'amélioration des techniques de machine learning.

Depuis 2010, les capacités de calcul démultipliées que promet l'informatique quantique font donc l'objet d'une veille active et ont donné lieu à



On ouvre le capot de l'ordinateur quantique d'IBM, qui commence enfin à corriger ses erreurs.

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Par France Info - Vidéo

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Business /

## L'ordinateur quantique : la technologie disruptive de la prochaine décennie

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

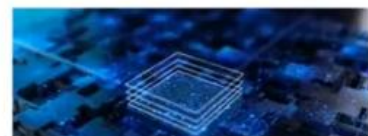
Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

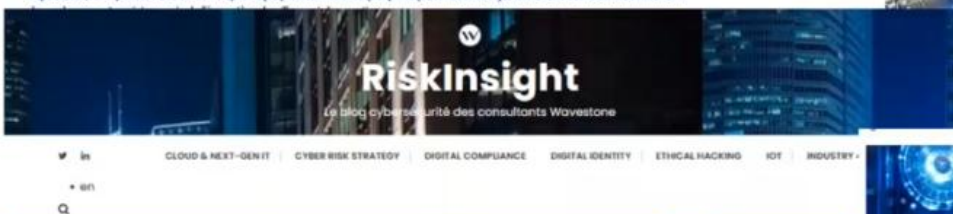
Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00



Pourtant, en plus de vous proposer du contenu adapté à

média



### RiskInsight

Le blog cybersécurité des consultants Wavestone

CLOUD & NEXT-GEN IT | CYBER RISK STRATEGY | DIGITAL COMPLIANCE | DIGITAL IDENTITY | ETHICAL HACKING | IoT | INDUSTRY

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en

en



## Informatique quantique : une question de sécurité

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00

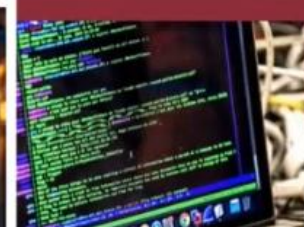
Publié le 06/06/2017 à 10h00

Publié le 06/06/2017 à 10h00



## La Russie a son premier ordinateur quantique : quel impact sur la guerre ?

Publié le 06/06/2017 à 10h00



Auteur  
Thérèse Lenoir

Publié le 06/06/2017 à 10h00

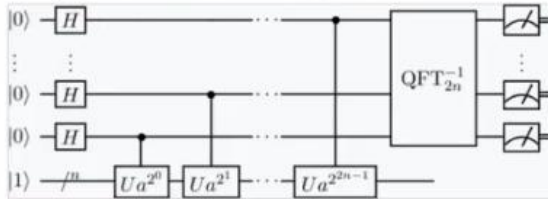
<https://www.institutmontaigne.org/>

# Quantum machines: 2 families

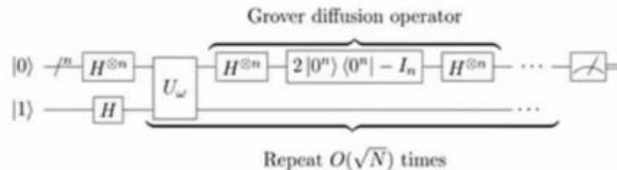
## Universal quantum gates

- Google/IBM etc  $\leq 127$  qubits
- Algo :

- Shor (Shor, 1994) factorize an integer  $N$  in time  $((\log N)^3)$



- Grover (Grover, 1996) quadratic acceleration to find a value



- QAOA (Farhi et al., 2014) Quantum Approximate Optimization Algorithm

## Quantum annealing

- D-Wave/qilimanjaro  $\geq 5000$  qubits
- Algo :
  - focus on a particular Hamiltonian  $\rightarrow$  Ising model

$$\mathcal{H}_P = \sum_i h_i \sigma_i^z + \sum_{(ij)} J_{i,j} \sigma_i^z \sigma_j^z$$

**What is quantum annealing?**

**How does it work?**

**How is it programmed?**

**What is its performance?**

# Machine quantique analogique

- It is a machine specialized in solving a difficult NP-optimization problem.
- Using an algorithm similar to a simulated → (meta)heuristic annealing to quickly solve complex problem classes (optimization problems, machine learning problems, or operations research problems) inspired by statistical physics.



<https://www.oezratty.net/wordpress/2018/comprendre-informatique-quantique-algorithmes-et-applications/>

- D-Wave is thus a kind of optimization oracle for the typical machine problem (spin glasses) using a quantum phenomenon.

## Question :

- Behavior / Performance on a problem known to be difficult to anneal (acceleration factor between QA and SA)



15 millions de dollars pour l'ordinateur quantique D-Wave 2000Q

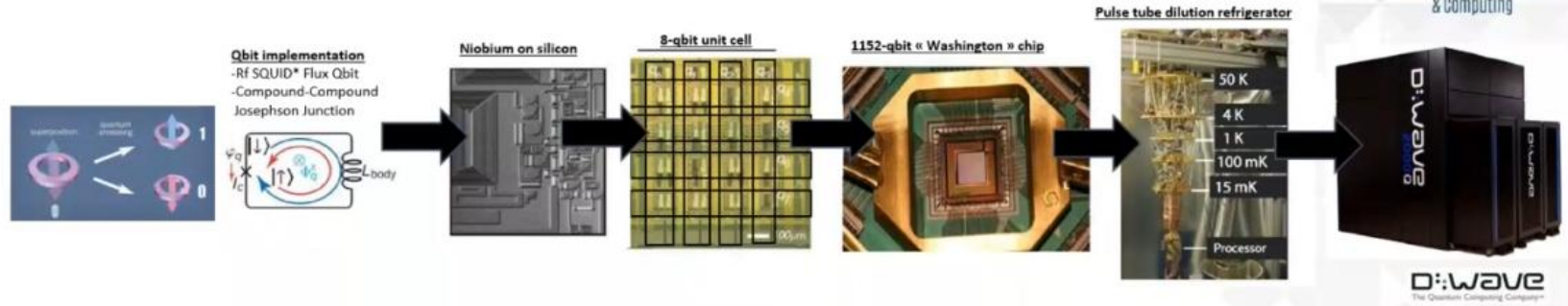




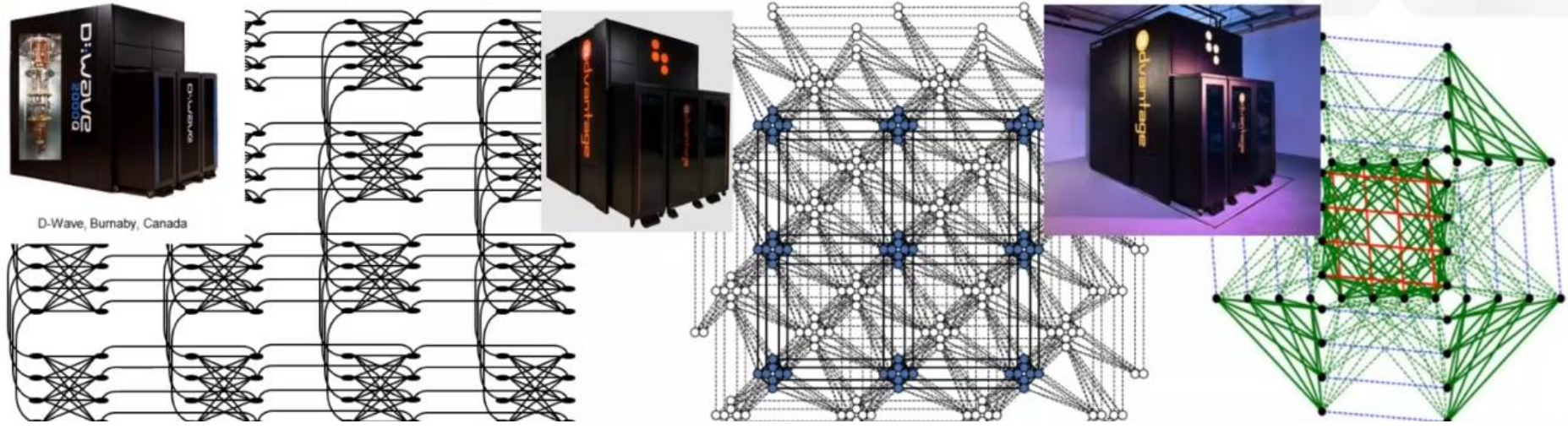
Advanced Engineering & Computing

# D-Wave QPU architecture: topologies

## QPU :



## D-Wave 2000Q/Advantage/Advantage2.0 → more 2000/5600/7000 qubits



# From the machine to the ising model

- D-Wave systems are based on a quantum annealing process whose aim is to minimize Ising's Hamiltonian :

$$\mathcal{H}_P = \sum_i h_i \sigma_i^z + \sum_{(i,j)} J_{i,j} \sigma_i^z \sigma_j^z$$

$h$  External field

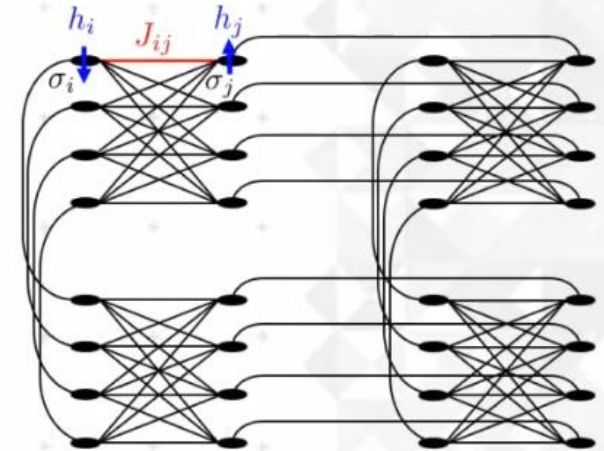
$J$  spin coupling interaction matrix

$\sigma$  spin vector (or qubit) of values  $\{-1, 1\}$   $\rightarrow$  variable for which the energy of the system is minimized

- Input :** The values of the  $h$ -weights (qubits) and  $J$ -weights (connections) for each qubit and mapped on the Chimera graph.

- Execute a quantitative/adiabatic annealing  $\rightarrow$  The result should be the lowest energy state (lowest energy) of the HP problem.

- Output :** The spin of each qubit is measured at the end of the process  $\rightarrow$  This set of spins defines the lowest energy state found.



Chimera graph 2 x 2  $\rightarrow$  32 qubits ( $h$ ) / 80 coupling ( $J$ )

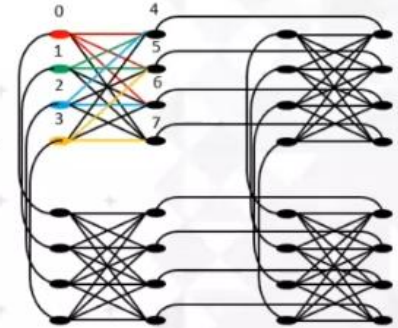
# QUBO integration on D-Wave and limitation

## Integrating the QUBO matrix into the internal graph of physical qubits

Directly integrable approach (fictitious example) :

$$\begin{pmatrix}
 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 0 & 17 & 0 & 0 & 0 & -5 & 2 & -21 & 0 \\
 1 & 0 & 17 & 0 & 0 & -16 & -1 & 0 & 9 \\
 2 & 0 & 0 & 17 & 0 & -1 & 0 & 4 & 0 \\
 3 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 16 & 0 & 8 \\
 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 0 & 0 \\
 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 0 \\
 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 \\
 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17
 \end{pmatrix}$$

**No problem for D-Wave!**



🚫 1 variable → N qubits

Not enough connections between qubits (hi) → maximum 6!

- Variable 1,2,5,7 duplicated 3 times
- Variable 0,3,4,6 duplicated 2 times
- Total number of connections: 15
- Total number of qubits used: 20

$$\begin{pmatrix}
 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 0 & 17 & 0 & 4 & 0 & -5 & 2 & -21 & 0 \\
 1 & 0 & 17 & 0 & -2 & -16 & -1 & 0 & 9 \\
 2 & 0 & 0 & 17 & 0 & -1 & 0 & 4 & 0 \\
 3 & 0 & 0 & 0 & 17 & 9 & 16 & -1 & 8 \\
 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & -6 & 0 & 0 \\
 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 0 \\
 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & -12 \\
 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17
 \end{pmatrix}$$

**Several physical qubits are ONE variable of the problem!**




**If the graph induced by the matrix's non-zero couplings is not isomorphic to Chimera's graph → it is necessary to duplicate the variable(s) on several physical qubits!**

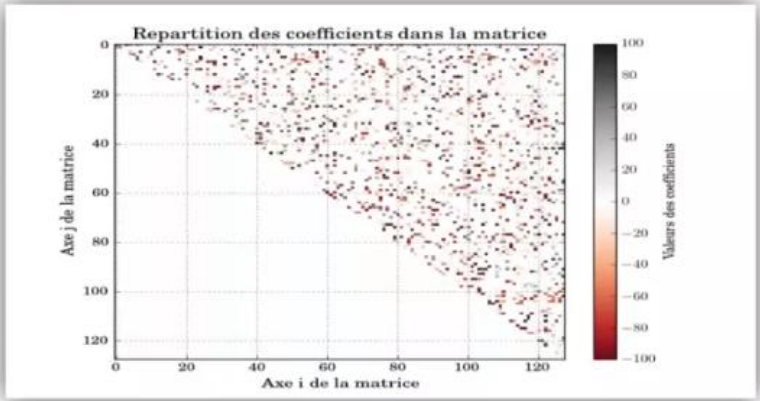


## ■ Limitation (next)

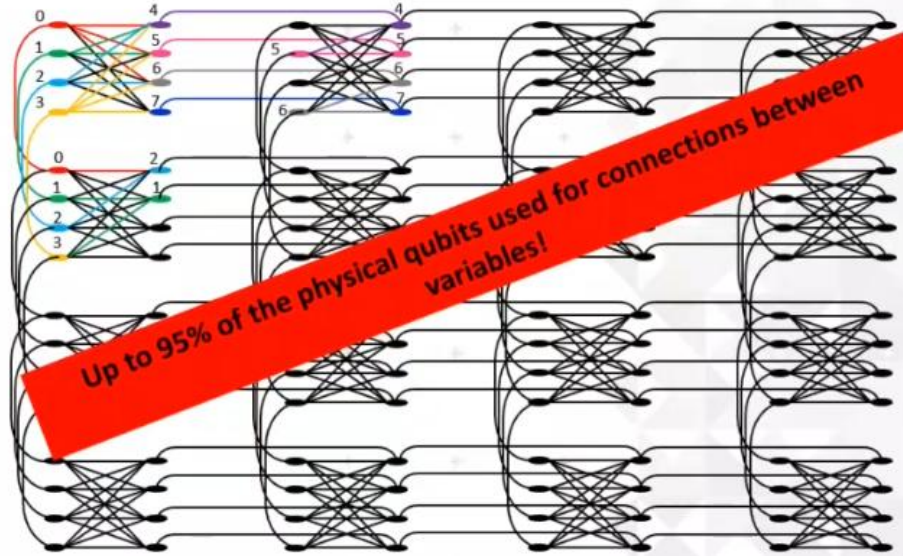
### ■ Integrating the QUBO matrix into the internal graph of physical qubits

 1 variable  $\rightarrow$  1 qubit

Total number of connections: 384 edges!



128  $h_i$  (qubits) + 8128  $J_{ij}$  (terms)



Chimera Graph 4x4  $\rightarrow$  128 qubits

The topology represents only 4% (worst case) of the total number of couplers needed to integrate the matrix.



## ■ Problem definition

### ■ Matching problem on a general graph :

Goal: select a set of edges that gives a **matching** in order to maximize the number of vertices covered

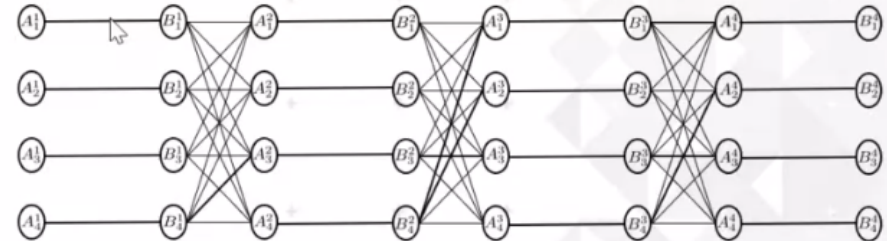
Polynomial Problem

### ■ Maximum matching problem :

[sasaki-1988] → Special cases to require an **exponential** number of iterations to reach an optimal solution

→ (trivial to solve algorithmically)

→ And even to the eye



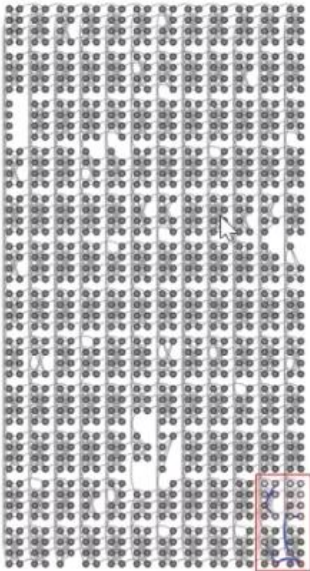
Vertices A not connected to each other and idem for vertices B

Number of vertices:  $O(n^3)$   
 Number of edges:  $O(n+1)^3$   
 Number of edges in an optimal solution:  $O(n^2)$   
 → It's hard for simulated annealing

**Objective: Compare QA to SA**

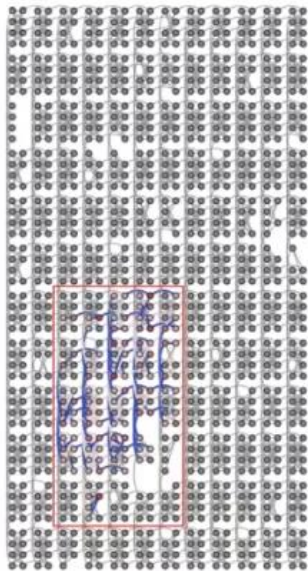
# Instance on D-Wave

- G<sub>1</sub> -



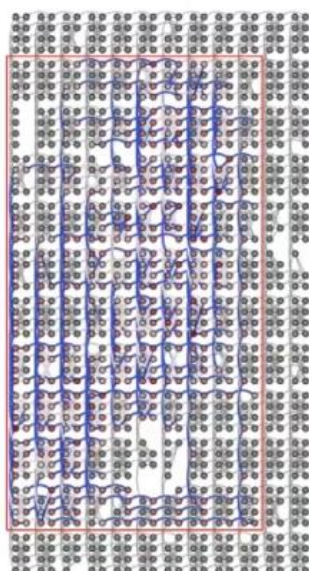
8 variables  
16 qubits physiques → ~2%  
Moy. dup. : 2.0  
12 coefficients non 0

- G<sub>2</sub> -



27 variables  
100 qubits physiques → ~10%  
Moy. dup. : 3.7  
72 coefficients non 0

- G<sub>3</sub> -

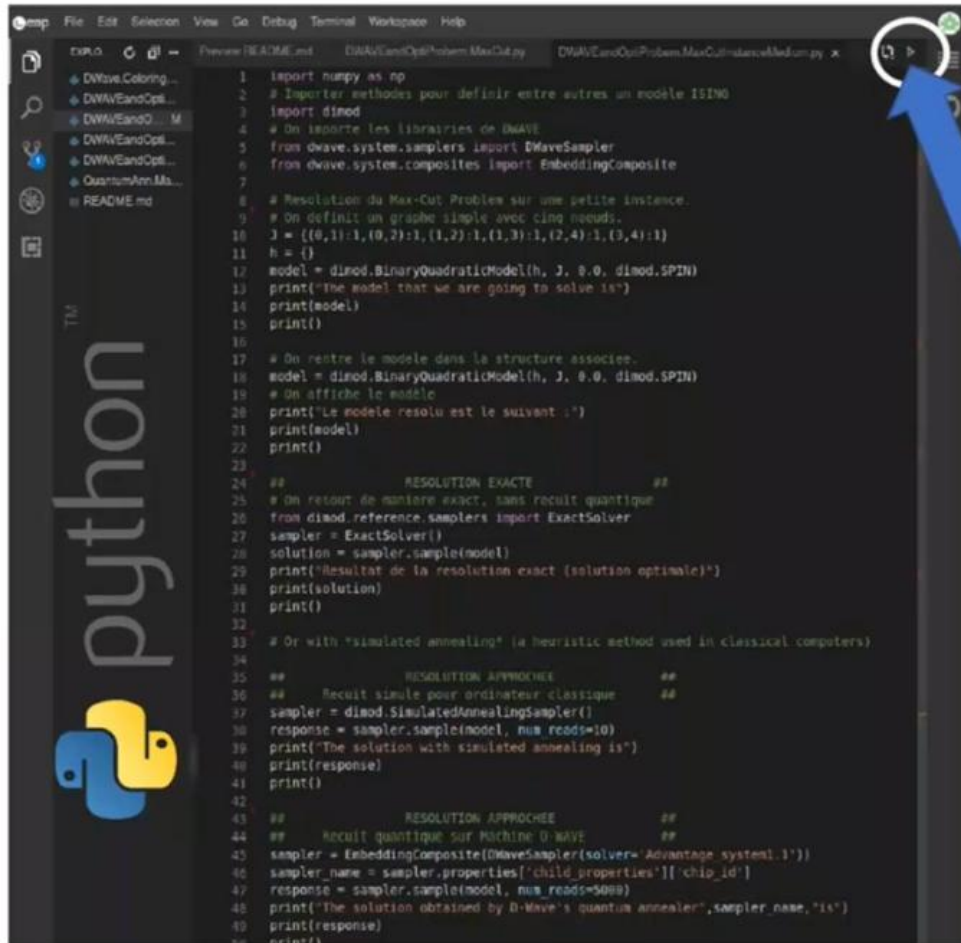


64 variables  
431 qubits physiques → ~40%  
Moy. dup. : 6.7  
240 coefficients non 0

- G<sub>4</sub> -



125 variables  
951 qubits physiques → ~87%  
Moy. dup. : 7.6  
600 coefficients non 0



```

1 import numpy as np
2 # Importer methodes pour definir entre autres un modele ISING
3 import dimod
4 # On importe les librairies de DWAVE
5 from dwave.system.samplers import DWaveSampler
6 from dwave.system.composites import EmbeddingComposite
7
8 # Resolution du Max-Cut Problem sur une petite instance.
9 # On definit un graphe simple avec cinq nodes.
10 J = {(0,1):-1,(0,2):1,(1,2):1,(1,3):1,(2,4):1,(3,4):1}
11 h = {}
12 model = dimod.BinaryQuadraticModel(h, J, 0.0, dimod.SPIN)
13 print("The model that we are going to solve is")
14 print(model)
15 print()
16
17 # On rentre le modele dans la structure associee.
18 model = dimod.BinaryQuadraticModel(h, J, 0.0, dimod.SPIN)
19 # On affiche le modele
20 print("Le modele resolu est le suivant :")
21 print(model)
22 print()
23
24 ##          RESOLUTION EXACTE          ##
25 # On resout de maniere exact, sans recuit quantique
26 from dimod.reference.samplers import ExactSolver
27 sampler = ExactSolver()
28 solution = sampler.sample(model)
29 print("Resultat de la resolution exact (solution optimale)")
30 print(solution)
31 print()
32
33 # Or with "simulated annealing" (a heuristic method used in classical computers)
34
35 ##          RESOLUTION APPROCHEE          ##
36 ## Recuit simple pour ordinateur classique ##
37 sampler = dimod.SimulatedAnnealingSampler()
38 response = sampler.sample(model, num_reads=10)
39 print("The solution with simulated annealing is")
40 print(response)
41 print()
42
43 ##          RESOLUTION APPROCHEE          ##
44 ## Recuit quantique sur machine D-WAVE    ##
45 sampler = EmbeddingComposite(DWaveSampler(solver='Advantage_system1.1'))
46 sampler_name = sampler.properties['child_properties']['chip_id']
47 response = sampler.sample(model, num_reads=5000)
48 print("The solution obtained by D-Wave's quantum annealer",sampler_name,"is")
49 print(response)
50 print()

```

■ Solve a problem on D-Wave machine ?

Direct resolution  
online terminal displaying the result

easy no ?

The solution obtained by D-Wave's quantum annealer Advantage\_system1.1 is

	0	1	2	3	4	energy	num_oc.	chain_.
0	-1	+1	+1	-1	+1	-4.0	1398	0.0
1	+1	-1	-1	+1	-1	-4.0	1029	0.0
2	-1	+1	+1	-1	-1	-4.0	1487	0.0
3	+1	-1	-1	+1	+1	-4.0	1084	0.0
4	-1	+1	+1	+1	-1	-2.0	1	0.0
5	+1	-1	-1	-1	+1	-2.0	1	0.0

['SPIN', 6 rows, 5000 samples, 5 variables]





## RESULTS ON $G_1 / G_2 / G_3 / G_4$

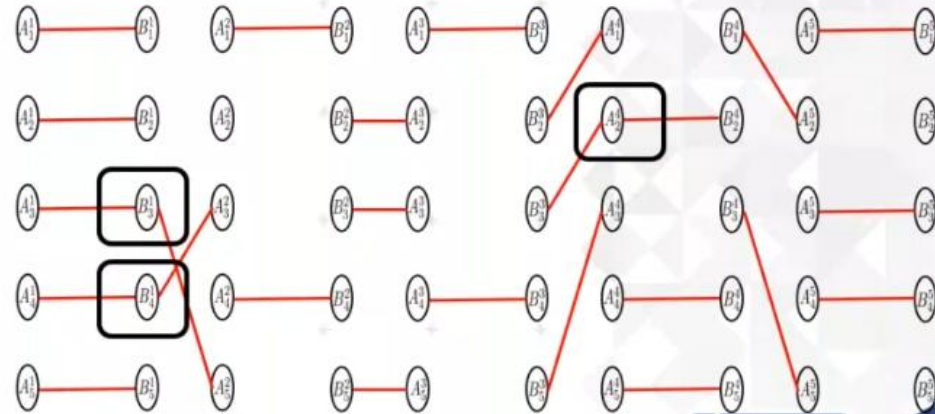
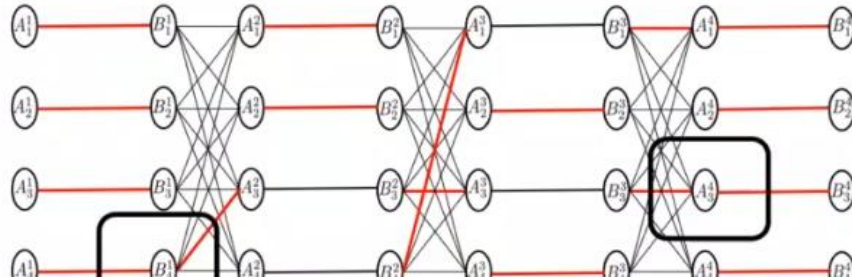
### Results :

- G1 : Optimal solution more 9600 times.
- G2 : Optimal solution 662 times  $\rightarrow$  6% success rate
- G3 : Difference with the lowest cost solution found is about 15% (-1810 for -2064)
- G4 : Difference with the lowest cost solution found is about 10% (-5527 for -6275)
- the smallest instances are trivially solved but not the biggest ones

	opt.	sans vote				
		best	worst	mean	median	stdev
$G_1$	-68	-68	-9	-66.8	-68	4.6
$G_2$	-495	-495	-29	-398.2	-388	48.1
$G_3$	-2064	-1810	-505	-1454.8	-1548	157.7
$G_4$	-6275	-5527	-2507	-4609.9	-4675	346.5

### Observation of results :

- Best solution found for  $G_3 / G_4$  not a matching
- D-Wave does not get the optimal solution



# ■ Résultats on Advantage

## ■ Advantage4.1 (Peg.) ■ 5627 qubits

	#var.	#qubits	#Opt.	Opt.	Best	Worst	Mean	Median	Stdev
G1	8	8	1000	-68	-68	-68	-68	-68	0
G2	27	49	80	-495	-495	-225	-389.2	-387	34.5
G3	64	174	0	-2064	-1937 (x3)	-916	-1565.5	-1553	137.8
G4	125	471	0	-6275	-5278	-2782	-4268.9	-4278	370.4
G5	216	1033	0	-15588	-12134	-6527	-9629.3	-9549	912.3
G6	343	2372	0	-33663	-23383	-8301	-16299.9	-16528	2286.4
G7	512	4186	0	-65600	-40019	-11361	-27278.3	-27734	4645.5

G3 → ~6%.  
 G4 → ~16%  
 G5 → ~22%  
 G6 → ~31%  
 G7 → ~39%

Results on Advantage .... Identical to D2000Q ?  
**From 6 connections to 15!**

**Question1** : need post-processing? If yes → Constraint(s): fast (keeps the quantum advantage) and gives a **valid** solution!

**Question 2** : Is it possible to improve results?

# Is it possible to improve results?

The examples below use the following setup:

```
>>> from dwave.system import DWaveSampler, LeapHybridSampler, LeapHybridCQMSampler
...
>>> qpu_advantage = DWaveSampler(solver={'topology_type': 'pegasus'})
>>> qpu_2000q = DWaveSampler(solver={'topology_type': 'chimera'})
>>> hybrid_bqm_sampler = LeapHybridSampler()
>>> hybrid_cqm_sampler = LeapHybridCQMSampler()
```

- anneal\_offset\_ranges
- anneal\_offset\_step
- anneal\_offset\_step\_ph0
- annealing\_time\_range
- beta\_range
- category
- chip\_id
- couplers
- default\_annealing\_time
- default\_beta
- default\_programming\_thermalization
- default\_readout\_thermalization
- extended\_j\_range
- h\_gain\_schedule\_range
- h\_range
- j\_range
- max\_anneal\_schedule\_points
- max\_h\_gain\_schedule\_points
- maximum\_number\_of\_blases
- maximum\_number\_of\_constraints
- maximum\_number\_of\_quadratic\_variables
- maximum\_number\_of\_variables
- maximum\_time\_limit\_hrs
- minimum\_time\_limit
- minimum\_time\_limit\_s
- num\_blases\_multiplier
- num\_constraints\_multiplier
- num\_qubits
- num\_reads\_range
- num\_variables\_multiplier
- parameters
- per\_qubit\_coupling\_range
- problem\_run\_duration\_range
- programming\_thermalization\_range

```
#####
##### partie 2 : dwave_leap #####
#####
```

```
import dwave_sapi2
from dwave_sapi2.remote import RemoteConnection
from dwave_sapi2.core import solve_ising, solve_qubo

url = 'https://cloud.dwavesys.com/sapi/'
token = '0EV-32b473f753f4641ca3e87d4318f325295665204d'
```

```
# create a remote connection
conn = RemoteConnection(url, token)

# get the solver
solver = conn.get_solver('DW_2000Q_6')
#solver = conn.get_solver('Advantage_system4.1')
```

```
params = { "num_reads": 1000, "max_answers": 1000, "answer_node": "histogram", "auto_scale": True, "annealing_time": 20 }, "num_spin_reversal_trans"
```

```
# solve QUBO problem with parameters
answer = solve_qubo(solver, QUBO, **params)
print("\n")
print("Energie:", answer["energies"])
print("Nb occurrences:", answer["num_occurrences"])
```

```
l = 0
count = 0
while (answer["energies"][l]*(norma) <= -60) :
    count = count + answer["num_occurrences"][l]
    l = l + 1
```

```
print([energie*(norma) for energie in answer["energies"]])
```

```
print("Taux de réussite : " + str(float(count)/sum(answer["num_occurrences"])))
```

```
print("Energie moyenne : " + str(sum([answer["energies"][i] * answer["num_occurrences"][i] for i in range (len(answer["energies"]))]) / sum(answer["num_occurrences"])*(norma)))
```



## ■ First observation

### ■ Solutions without topologie

		opt.	best	worst	mean	median	stdev
G <sub>1</sub>	n	-68	-68	-68	-68	-68	0
	n <sup>1.5</sup>	-68	-68	-68	-68	-68	0
	n <sup>2</sup>	-68	-68	-68	-68	-68	0
G <sub>2</sub>	n	-495	-495	-495	-495	-495	0
	n <sup>1.5</sup>	-495	-495	-495	-495	-495	0
	n <sup>2</sup>	-495	-495	-495	-495	-495	0
G <sub>3</sub>	n	-2064	-2064	-1810	-2004.7	-2064	79.9
	n <sup>1.5</sup>	-2064	-2064	-2064	-2064	-2064	0
	n <sup>2</sup>	-2064	-2064	-2064	-2064	-2064	0
G <sub>4</sub>	n	-6275	-6275	-5528	-5785.3	-5777	178.9
	n <sup>1.5</sup>	-6275	-6275	-6026	-6241.8	-6275	86.1
	n <sup>2</sup>	-6275	-6275	-6275	-6275	-6275	0

Paramètres Annealing :

- Standard cooling time of the form  $T_{k+1}=0,95T_k$
- Stop annealing at  $T < 10^{-3}$ .
- Number of iterations of the Metropolis algorithm  
 → For each k to T = cst and n: number of variables in QUBO.

For **n iterations** per temperature plate: Lower quality results → standard solutions.

For **n<sup>2</sup> iterations** per plateau: Results of much better quality, but with a much longer computing time.

■ **Better** performance simulated annealing

■ **Worst** solutions over 30 cycles: Almost always better than D-Wave over 10,000 cycles.

■ Asymptotic regime of the exponential number of iterations of Sasaki & Hajek's theorem not reached with annealing (sol. Opt. reached for G4)

■ Instances small enough to remain easy to anneal in the conventional way

**Unduplicated resolved instances for comparison with D-Wave**

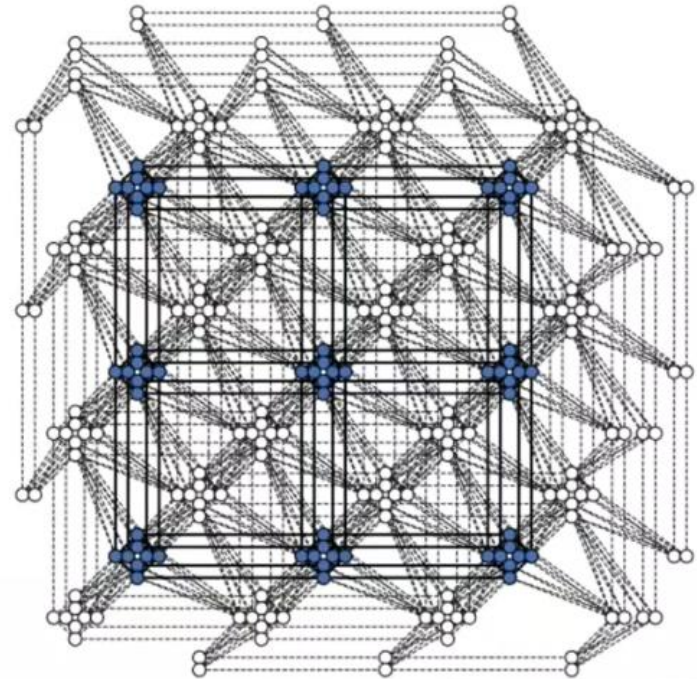
## Second observation : topological bias

### Solutions with topology (Chim. & Peg.)

		opt.	best	worst	mean	median
$G_4$ (Chim.)	$n$	-6275	-2213	3662	1453.9	1401.0
	$n^{1.5}$	-6275	-4526	-2654	-3585.6	-3699.8
	$n^2$	-6275	-5028	-4027	-4473.1	-4527.0
D-Wave		-6275	-5025	-3551	-4447.7	-4525
$G_4$ (Peg.)	$n$	-6275	-3930	-785	-2609.3	-2708.5
	$n^{1.5}$	-6275	-5028	-3580	-4305.5	-4281.0
	$n^2$	-6275	-5278	-4530	-5035.9	-5028.0

### Topology of interconnections between 15 qubits

	#var.	#qubits (Chim.)	#qubits (Peg.)
$G_1$	8	16	8
$G_2$	27	100	46
$G_3$	64	431	164
$G_4$	125	958	513



Results on D-Wave **competitive** with those of SA.

Duplicate instances are **much more difficult** to resolve than non-duplicate instances on SA.

The denser topology of Pegasus leads to **smaller duplicated** QUBOs and gives better (but not optimal) results.

## ■ Conclusion and perspectives ?

### ■ Difficult problem for simulated and quantum annealing

First benchmark on a D-Wave

With topology → Similar results between D-Wave and SA.

The constraints imposed by the graph show that SA and QA cannot solve the problem!

### ■ Low quality results

■ The need to duplicate qubits strongly limits the size of accessible problems.

■ Necessity of post-treatments

**Duplication errors** ☹️

not representing a valid solution

### ■ Sparse topology

■ Need more connections between qubits → mapping denser and larger problems!



[ACM-CF] « ***On the limitations of the Chimera graph topology in using analog quantum computers*** », in « *ACM International Conference on Computing Frontiers* » 2019, Alghero, Sardinia, Italy.

[ICCS] « **Revisiting old combinatorial beasts in the quantum age : quantum annealing versus maximal matching** », in « INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCE » (ICCS 2020 - Quantum Computing Workshop).

[ISVLSI] « **Operational Quantum Annealers are Cursed by Their Qubits Interconnection Topologies** », in « 1st International Workshop on Quantum Computing : Circuits Systems Automation and Applications » (QC-CSAA) (ISVLSI2020 - Quantum Workshop).

[SN] « **Benchmarking quantum annealing against "hard" instances of the bipartite matching problem** », in Special issue for Springer journals (SN Computer Science).